



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΣΜΟ ΠΛΩΜΑΡΙΟΥ, ΛΕΣΒΟΥ ΜΕ
ΤΗΝ ΣΥΝΔΡΟΜΗ ΣΜΗΕΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.**

Διπλωματική Εργασία του

ΛΥΜΠΕΡΗ ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ



Θεσσαλονίκη, 2020



© Copyright; Lymperis Efstathios 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αποτελούν πεποιθήσεις του συγγραφέα και σε καμία περίπτωση δεν εκφράζουν επίσημη θέση του Πανεπιστημίου, του Τμήματος, της Σχολής ή του Εργαστηρίου.



**ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΣΗΣ ΣΤΟΝ
ΟΙΚΙΣΜΟ ΠΛΩΜΑΡΙΟΥ, ΛΕΣΒΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΝΔΡΟΜΗ ΣΜΗΕΑ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.**

Πτυχιακή Εργασία

του

ΛΥΜΠΕΡΗ ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαρίνος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Χρηστάρας Βασίλειος, Καθηγητής

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα
Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη 2020



Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Στράτο και Ντίνα
χωρίς τον μόχθο και την υποστήριξη των οποίων
δεν θα έφθανα ποτέ να γράφω τις σελίδες αυτές

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 24 Νοεμβρίου 2018, μια σημαντική βραχοκατάπτωση έλαβε χώρα στον οικισμό του Πλωμαρίου στην ΝΔ Λέσβο. Τριάντα επτά (37) άνθρωποι εκκένωσαν τα σπίτια τους. Το συμβάν αποτελεί το πιο πρόσφατο εντός μιας σειράς φυσικών καταστροφών που έχουν πλήξει το νησί τα τελευταία χρόνια, μεταξύ των οποίων κυριότερος υπήρξε ο σεισμός της 12^{ης} Ιουλίου 2016, μεγέθους 6.1 . Στην παρούσα εργασία επιστρατεύτηκαν σύγχρονα τεχνικά μέσα, σε συνδυασμό με κλασσικές τεχνικογεωλογικές προσεγγίσεις, για την διερεύνηση του μηχανισμού της αστοχίας και των καταλυτικών παραγόντων που συντέλεσαν σε αυτή καθώς και την περαιτέρω τεχνικογεωλογική μελέτη της στενής περιοχής: παράλληλα με τα κλασσικά εργαλεία υπαίθριας έρευνας (σκαριφήματα, δείγματα, πυξίδα, προφιλόμετρο, σφύρα Schmidt κλπ) χρησιμοποιήθηκε ένα ελικοφόρο M.E.A. για την εναέρια αποτύπωση της θέσης και την κατασκευή ενός τριδιάστατου μοντέλου (νέφους σημείων) υψηλής χωρικής ακρίβειας μέσω φωτογραμμετρίας. Το αρνητικό εκμαγείο του τεμάχους που κατέπεσε ανακατασκευάστηκε από το νέφος σημείων σε AutoCAD και χρησιμοποιήθηκε για την διενέργεια ανάστροφης ανάλυσης και την διευκρίνηση των συνθηκών αστοχίας και των αιτίων της. Ο μηχανισμός αστοχίας περιγράφηκε ως συνδυασμός επίπεδης ολίσθησης και ανατροπής και η πίεση του νερού ως ο παράγοντας εναύσματος μετακίνησης. Παράλληλα κατασκευάστηκε ένα τεχνικογεωλογικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τον μηχανισμό απόρριψης μάζας στην θέση και χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση πιθανών μελλοντικών αστοχιών. Επιπλέον μετρήσεις εκμαιεύθηκαν με την μεθοδολογία του Riquelme από το νέφος σημείων και χρησιμοποιήθηκαν για την κινηματική ανάλυση του πρανούς, ενώ συντέθηκε και εφαρμόστηκε ένας αλγόριθμος υπολογισμού δυναμικού αστοχίας με βάση το τεχνικογεωλογικό μοντέλο και ειδικά για την συγκεκριμένη θέση. Τα αποτελέσματα των παραπάνω συνδυάστηκαν για τον προσδιορισμό επισφαλών τεμαχών. Προέκυψε ένα μεγάλο τέμαχος που θεωρήθηκε επιδεκτικό σε αστοχία, για το οποίο πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευστάθειας σε ειδικό λογισμικό, με τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας σε διαφορετικές συνθήκες.

Λυμπέρης Ευστάθιος, B.Sc., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαρίνος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Χρηστάρας Βασίλειος, Καθηγητής



ABSTRACT

On November the 24th, 2018 a major rockfall occurred in the village of Plomari, in SW Lesvos Island, Greece. Thirty-seven (37) residents were forced to evacuate. The event is the latest one in a series of natural disasters that have plagued the island in the last years, among which the earthquake of July 12, 2016 stands out. In this study, the latest advancements in surveying and computing technology were used in parallel with conventional engineering geological approaches, in order to investigate the mechanism and catalyst factors behind the event, as well as to further assess the site from the perspective of engineering geology: established geological field tools (technical sketches, samples, compass, profilometer, Schmidt hammer) were used in combination with a quadcopter U.A.V.. The vehicle performed an aerial survey from which a high-accuracy 3D model (point cloud) was obtained. The negative space produced by the failing block was directly exploited on the point cloud to reconstruct the block in AutoCAD & Rhino and use it to perform a back-analysis. The latter showcased a complex failure mechanism of slide & topple and suggested that water pressure acted as the triggering factor. An engineering geological model describing the general failure mechanism of the slope was constructed and used to assess the present and future stability of the site. Additional measurements were obtained from the point cloud using Riquelme's methodology and used for kinematic analysis of the slope, while a custom-made algorithm, based on the engineering geological model was developed and used in combination with the results of the kinematic analysis to identify hazardous blocks. A large unstable block was pinpointed, and its stability was assessed via calculations of the Safety Factor for an array of stress scenarios.

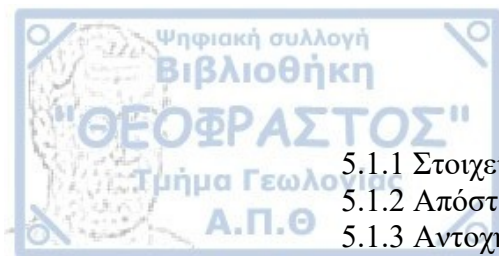
Lymperis Efstathios, B.Sc., Aristotle University of Thessaloniki, 2020

Supervisor: Vassilios Marinos, Associate Professor

Co-supervisor: Vassilios Christaras, Professor



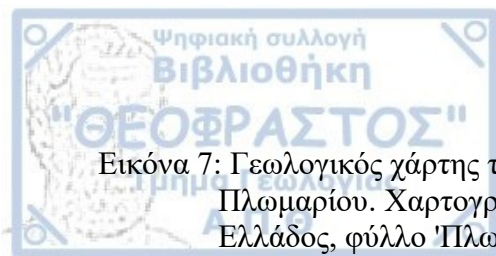
Προλογικό Σημείωμα	17
Ευχαριστίες	17
Σκοπός της Εργασίας	17
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1.1 Σκοπός της Εργασίας	19
1.2 Μεθοδολογία	19
1.3 Διάρθρωση Εργασιών & Εργαλεία Έρευνας	20
1.4 Η βραχοκατάπτωση της 24 ^{ης} Νοεμβρίου 2018	21
1.5 Προφίλ περιοχής μελέτης	24
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	26
2.1 Γεωτεκτονική Θέση της Λέσβου στον Ελληνικό Χώρο	26
2.2 Γεωλογία της Περιοχής Μελέτης	30
2.2.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Πλωμαρίου	30
2.2.2 Γεωλογία της θέσης έρευνας	32
2.3 Γεωμορφολογία της ευρύτερης περιοχής	34
2.4 Ενεργός Τεκτονική	36
2.4.1 Ο Σεισμός της 12 ^{ης} Ιουνίου 2017	39
2.5 Κλιματολογικά και Καιρικά Στοιχεία	40
3. ΈΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	44
3.1 Κατολισθήσεις	44
3.2 Συντελεστής Ασφαλείας	45
3.3 Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων (3D Point Cloud)	46
3.4 Φωτογραμμετρία – Structure From Motion (SfM)	47
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ	50
4.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	50
4.1.1 Έρευνα Πεδίου	50
4.1.2 Πρόγραμμα Εικονοληψίας από πτήση UAV	51
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	52
4.2.1 Παραγωγή Τρισδιάστατου Νέφους Σημείων	52
4.2.2 Επεξεργασία του Τρισδιάστατου Νέφους Σημείων	53
4.2.3 Εξαγωγή Τεχνικογεωλογικών Πληροφοριών	55
4.2.4 Ανάστροφη Ανάλυση Δυνάμεων	59
4.2.5 Στατιστική Προσέγγιση – Μέθοδος Εκτίμησης Σημείου	66
4.2.6 Διερεύνηση δυνητικών μελλοντικών αστοχιών	67
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	71
5.1 Τεχνικογεωλογικές Παράμετροι	71



5.1.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Ασυνεχειών	71
5.1.2 Απόσταση Κύριων Οικογενειών Ασυνεχειών	74
5.1.3 Αντοχή Τοιχωμάτων Ασυνεχειών -Τραχύτητα.....	76
5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο.....	78
5.3 Συνθήκες Αστοχίας – Ανάστροφη Ανάλυση Δυνάμεων	80
5.3.1 Εμβαδό Επιφάνειας.....	80
5.3.2 Όγκος Τεμάχους.....	81
5.3.3 Ανάλυση Δυνάμεων και Ανάστροφη Ανάλυση.....	82
5.3.4 Στατιστική Προσέγγιση των Αποτελεσμάτων	84
5.4 Διερεύνηση δυνητικών μελλοντικών αστοχιών.....	86
5.4.1 Δυνητικές Ολισθήσεις -Κινηματική Ανάλυση	86
5.4.2 Δυνητικά Ασταθή Τεμάχη	88
5.4.3 Ευστάθεια Μικρότερων Τεμαχίων	88
5.4.4 Προσδιορισμός Μεγάλων Επισφαλών Τεμαχών – Κινηματική Ανάλυση.....	90
5.4.5 Εντοπισμός Μεγάλων Επισφαλών Τεμαχών	90
5.4.6 Ευστάθεια Κύριου Τεμάχους.....	93
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
Βιβλιογραφία.....	98

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης από τα Βόρεια, κατά την διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.	22
Εικόνα 2: Άποψη από την βάση του πρανούς. Διακρίνονται πεσμένα τεμάχη και σπίτι που υπέστη σοβαρές ζημιές.	23
Εικόνα 3: Πεσμένα τεμάχη στον δρόμο μπροστά από τα σπίτια. Φαίνεται ενδεικτικά ο όγκος τους σε σχέση με το παγκάκι.	23
Εικόνα 4: Ορθοφωτογραφία του πρανούς στη βάση του λόφου Π. Ηλία. Η κατολίσθηση σημειώνεται με κόκκινο.....	24
Εικόνα 5: Αεροφωτογραφία του Πλωμαρίου. Σημειώνεται η θέση της κατολίσθησης και η θέση του Πλωμαρίου επί της Λέσβου. Πηγή: Κτηματολόγιο Α.Ε.	25
Εικόνα 6: : Η θέση της Λέσβου στο Ελληνικό ορογενετικό σύστημα, από (Μουντράκης, 2010)	27



Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης της Νήσου Λέσβου. Σημειώνεται η θέση του οικισμού Πλωμαρίου. Χαρτογράφηση από Hecht, 1979. Ε.Ι.Γ.Μ.Ε., Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος, φύλλο 'Πλωμάριον-Μυτιλήνη'. Η αναπαραγωγή του παρόντος υλικού έγινε για καθαρά ακαδημαϊκούς, μη-κερδοσκοπικούς σκοπούς. Ιδιοκτησία & Copyright Ι.Γ.Μ.Ε., με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.....28

Εικόνα 8: Υπόμνημα του παραπάνω χάρτη (βλέπε Εικόνα 8)29

Εικόνα 9: Σχηματική γεωλογική της περιοχής κοντά στο Πλωμάρι, από Θωμαΐδου, 2009 ...30

Εικόνα 12: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Τροποποιημένος από Hecht, 1972, ομαδοποίηση και χρωματισμός των σχηματισμών κατά Θωμαΐδου 2009.....31

Εικόνα 10: Άποψη του βράχου δίπλα στην θέση της κατολίσθησης. Διακρίνονται τα πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών. Η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως 'πολύ τεμαχώδης' (κατά G.S.I.) και δομείται από σύνθετα πρισματικά μπλοκ.32

Εικόνα 11: Προσεγγιστική γεωλογική τομή διερχόμενη από το κατολισθαίνον πρανές33

Εικόνα 13: Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής του Πλωμαρίου. Υψομετρικό μοντέλο από ASTER GDEM v234

Εικόνα 15: Χάρτης υψομέτρων της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Υψομετρικά δεδομένα από ASTER GDEM v235

Εικόνα 14: Χάρτης μορφολογικών κλίσεων της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Υψομετρικά δεδομένα από ASTER GDEM v235

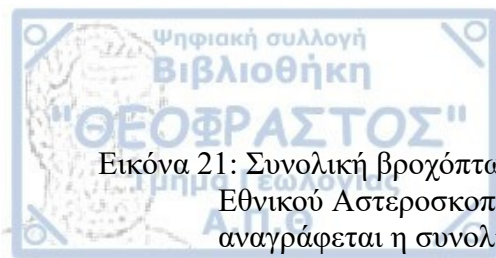
Εικόνα 16: Γεωδυναμικός και σεισμοτεκτονικός χάρτης του Κόλπου του Αδραμυτίου και της νήσου Λέσβου. Πηγή (Hasan Sözbilir Ö. S., 2016)37

Εικόνα 17: Μορφολογικός χάρτης όπου σημειώνονται οι κύριες σεισμικές πηγές της περιοχής Αδραμυτίου-Λέσβου με το μέγιστο εκτιμώμενο δυναμικό τους. Τροποποιημένο από Greek Database of Seismogenic Sources38

Εικόνα 18: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου, σκιαγραφείται με κόκκινο η Λέσβος . Από Ο.Α.Σ.Π. 200338

Εικόνα 19: Θέσεις επικέντρων της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού του 2016. Με αστέρι σημειώνεται το επίκεντρο του κυρίου σεισμού, με κόκκινο τα επιφανειακά ίχνη των ρηγμάτων που ενεργοποιήθηκαν. Πηγή: Ε.Κ.Π.Α., Lesvos earthquake Mw 6.3, 12/6/2017,39

Εικόνα 20: Χάρτης μακροσεισμικής έντασης (κατά Mercalli) του σεισμού του 2016. Πηγή: (Παπαδημητρίου, 2018)40



Εικόνα 21: Συνολική βροχόπτωση που μετρήθηκε στον μετεωρολογικό σταθμό Θερμής του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την δεκαετία 2009-2018. Με μπλε αναγράφεται η συνολική βροχόπτωση ολόκληρου του έτους ενώ με κόκκινο η συνολική βροχόπτωση του μηνός Νοεμβρίου κάθε έτους.....42

Εικόνα 22: Βροχόπτωση ανά ημέρα (1η-30η) κατά τον μήνα Νοέμβριο για την δεκαετία 2009-2018, όπως μετρήθηκε από το σταθμό Θερμής, Λέσβου (δεδομένα από Ε.Α.Α.). Σημειώνονται οι υψηλότερες ημερήσιες τιμές καθώς και η ημέρα της αστοχίας (με κόκκινο κύκλο). Ξεχωρίζουν οι διαδοχικές υψηλότερες τιμές της 18^{ης} και 19^{ης} Νοεμβρίου 2018 με αθροιστικό ύψος βροχής 189,6 mm.....43

Εικόνα 23: Μηχανισμοί κατολισθήσεων σε βραχώδη πρανή κατά Varnes.....45

Εικόνα 24: Διαδικασία αποτύπωσης ενός πρανού με τεχνικές φωτογραμμετρίας, από (Bemis, et al., 2014) , μετ. (Κωνσταντινίδης, 2019).....48

Εικόνα 25: Μέτρηση στοιχείων προσανατολισμού επιφανειών.....50

Εικόνα 26: Κύριες θέσεις εικονοληψίας πάνω από το πρανές51

Εικόνα 27: Το αρχικό νέφος σημείων (κομμένο στην θέση του πρανούς).....54

Εικόνα 28: Το τελικό νέφος που χρησιμοποιήθηκε για την τεκτονική ανάλυση, αποτελούμενο μόνο από τις καθαρές βραχώδεις επιφάνειες55

Εικόνα 29: Γεωμετρία αρνητικού όγκου του κατολισθαίνοντος τεμάχους (με πράσινες γραμμές), πλάγια όψη62

Εικόνα 30: Γεωμετρία αρνητικού όγκου του κατολισθαίνοντος τεμάχους (με κίτρινες γραμμές), κάτοψη, οπίσθια όψη.....63

Εικόνα 31: Προσομοίωμα τεμάχους, κάτοψη.....64

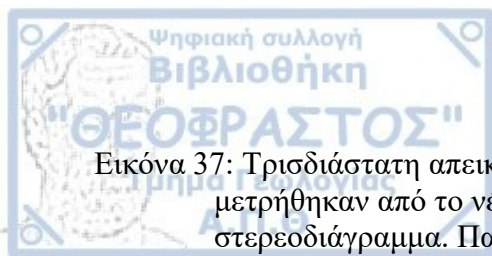
Εικόνα 32: Συσσώρευση στοιχειωδών κατόψεων, ανακατασκευή όγκου.....65

Εικόνα 33: Προσομοίωμα τεμάχους, πλάγια όψη (αριστερά), οπίσθια όψη (δεξιά)65

Εικόνα 34: Χαρακτηρισμένες επιφάνειες πάνω στο νέφος. Η κλίμακα αντιστοιχεί στην αρίθμηση των οικογενειών ασυνεχειών (1-7).....71

Εικόνα 35: Μετρήσεις από νέφος σημείων όπως προβάλλονται σε στερεοδιάγραμμα από το λογισμικό D.S.E.(Riquelme, 2009), χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες οπτικοποίησης της Matlab (MathWorks Inc.)72

Εικόνα 36: Μετρήσεις Υπαίθρου όπως συγκεντρώνονται σε στερεοδιάγραμμα στο λογισμικό Dips (Rocscience Inc.)72



Εικόνα 37: Τρισδιάστατη απεικόνιση της συγκέντρωσης των πόλων των επιφανειών που μετρήθηκαν από το νέφος σημείων. Ο κύκλος της βάσης είναι ένα απλό στερεοδιάγραμμα. Παρήχθη με το λογισμικό D.S.E. (Riquelme, 2009) χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες οπτικοποίησης της Matlab (Mathworks Inc.)73

Εικόνα 38: Αποστάσεις κύριων συστημάτων ασυνεχειών, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό D.S.E. (Riquelme, 2009) με την χρήση γραφημάτων της Matlab (Mathworks Inc.).....75

Εικόνα 39: Νομόγραμμα εκτίμησης Μονοαξονικής Θλιπτικής Αντοχής από αριθμό αναπηδήσεων σφύρας L-Schmidt. Με κόκκινο σημειώνονται οι μετρήσεις υπαίθρου.76

Εικόνα 40: Κινηματική ανάλυση των επιφανειών J1 και J3 σε στερεοδιάγραμμα. Η J1 δύναται να αστοχήσει με ανατροπή (αριστερά) και με επίπεδη ολίσθηση (δεξιά) ..78

Εικόνα 41: Σχηματικό τεχνικογεωλογικό μοντέλο του πρανούς (observational model), όπως κατασκευάστηκε με βάση το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM).....79

Εικόνα 42: Αεροφωτογραφία, όπου φαίνεται η εκτεθειμένη επιφάνεια από την οποία αποκολλήθηκε το τέμαχος. Με κόκκινο σημειώνεται η παθητική (ξηρή) και με μπλε η ενεργή (υγρή) περιοχή80

Εικόνα 43: Αεροφωτογραφία του πρανούς πριν την αστοχία από τα Β, Ιούνιος 2017. Από (SKOURTSOS, 2019).....81

Εικόνα 44: Άποψη του πρανού από τα Β, μετά την αστοχία, Δεκέμβριος 201882

Εικόνα 45: Κοντινή άποψη της επιφάνειας που αποκαλύφθηκε, όπου φαίνεται ο έντονος κερματισμός και μεγάλα κενά. Διακρίνεται ανάπτυξη κρυστάλλων χαλαζία μέσα σε μεγάλες κοιλότητες και μεγάλος ελεύθερος χώρος => υψηλό πορώδες83

Εικόνα 46: Ισοδύναμο Επικρεμάμενο Βάρος ανά σημείο (σε KN).....91

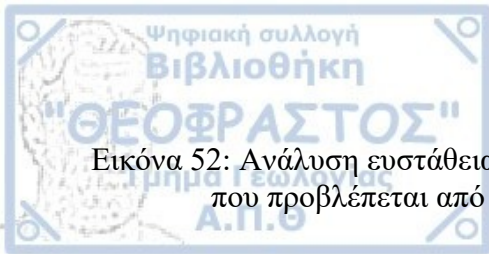
Εικόνα 47: Το κύριο επισφαλές τέμαχος που εντοπίστηκε σημειώνεται με κόκκινο πάνω στο νέφος92

Εικόνα 48: Ισοδύναμη Δυναμική Ενέργεια ανά σημείο (σε KJ)92

Εικόνα 49: Ανάλυση ευστάθειας σε ξηρές συνθήκες93

Εικόνα 50: Ανάλυση ευστάθειας σε υγρές συνθήκες με 90% πλήρωση της ασυνέχειας.....94

Εικόνα 51: Ανάλυση ευστάθειας σε υγρές συνθήκες με 70% πλήρωση της ασυνέχειας.....94



Εικόνα 52: Ανάλυση ευστάθειας σε συνθήκες σεισμού, με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που προβλέπεται από τον σχεδιασμό του Ο.Α.Σ.Π.95



ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέπων καθηγητή μου Β. Μαρίνο για την εμπιστοσύνη και την υπομονή του, όσο και για την εξαιρετική του στάση ως άνθρωπος και ως καθηγητής. Οι ευκαιρίες που μου προσέφερε αποτέλεσαν σημείο καμπής για την ζωή μου και ιδιαίτερα την ακαδημαϊκή μου υπόσταση.

Θα ήθελα επίσης να απευθύνω τις πιο βαθιές μου ευχαριστίες στον Ε. Καραντανέλλη, για την ανεκτίμητη συμβολή του στην εργασία αυτή και όχι μόνο, την απρόσκοπτη συνεργασία μας και την στήριξη του εντός και εκτός πανεπιστημιακού περιβάλλοντος

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον Ι. Φαρμάκη για την πρόσχαρη και πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και τις συμβουλές του πάνω σε θέματα επεξεργασίας σημειακών νεφών.

Σκοπός της Εργασίας

Ο στόχος της παρούσας εργασίας σε τεχνικό επίπεδο ήταν η μελέτη της βραχοκατάπτωσης που έλαβε χώρα στο Πλωμάρι Λέσβου την 24^η Νοεμβρίου, 2018. Αυτή περιλαμβάνει αρχικά την διερεύνηση των τεχνικογεωολογικών συνθηκών της αστοχίας και τον προσδιορισμό του παράγοντα ενεργοποίησης μέσω μιας αναστροφής ανάλυσης και έπειτα την αξιολόγηση της παρούσας και μελλοντικής ευστάθειας του πρανούς. Ο σκοπός της ήταν τα παραπάνω να επιτευχθούν με την συμβολή ανερχόμενων, στο πεδίο της τεχνικής γεωλογίας, τεχνολογικών εφαρμογών που βασίζονται στην αποτύπωση της θέσης έρευνας με Σ.ΜΗ.Ε.Α. (UAV) και την κατασκευή ενός ακριβούς 3D προσομοιώματος της σε Υ/Η, αποσκοπώντας στην εξοικείωση με το οικοσύστημα των τεχνολογιών αυτών, το οποίο αποτελεί πλέον έναν ξεχωριστό κλάδο έρευνας στις εφαρμοσμένες γεωεπιστήμες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια βραχοκατάπτωση είναι μια σύνθετη φυσική διαδικασία η οποία εγείρει διακινδύνευση για το σύνολο των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων εντός της ζώνης επιρροής της. Η μελέτη μιας πρόσφατης βραχοκατάπτωσης, ή γενικά ενός σύγχρονου συμβάντος έχει μεγάλη σημασία τόσο για τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και για την κοινωνία. Σε πρώτο βαθμό, τέτοιες μελέτες συγκροτούν αυτό που χαρακτηρίζεται ως "προηγούμενο" ή "εμπειρία". Τα αποτελέσματα τους δηλαδή, σωρευτικά, δομούν το πληροφοριακό και γνωστικό αρχείο της επιστημονικής και τεχνικής κοινότητας, θέτοντας τις βάσεις για την αναφορά και μελέτη νέων γεγονότων και κυρίως για την πρόληψη και αποφυγή τους. Η τελευταία, επιτυγχάνεται με την διαρκή ενημέρωση του καταλόγου των παραγόντων που ορίζουν μια κατάσταση ως δυνητικά επισφαλή και, συνακόλουθα, την στρέψη της προσοχής των ερευνητών, μελετητών και εμπειρογνομόνων προς αυτούς σε μελλοντικά σενάρια. Η πρόοδος αυτή από μεριάς επιστημονικής κοινότητας έχει άμεσο αντίκτυπο στην κοινωνία, αφού συντελεί στην βελτίωση των σχημάτων Πρόληψης-Ετοιμότητας-Αντιμετώπισης με την ανάδειξη της σημασίας της συστηματικής παρακολούθησης και αξιολόγησης (monitoring & hazard assessment), την οργάνωση, χρηματοδότηση και στελέχωση αντίστοιχων προγραμμάτων και τον εκσυγχρονισμό των σχετικών νόμων, διατάξεων και κανονισμών. Ακόμη, η άμεση ανταπόκριση της επιστημονικής κοινότητας σε τέτοιες περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, με την έκδοση τεχνικών εκθέσεων και δελτίων προς το κοινό, είναι ζωτικής σημασίας, πρώτον, για την διασφάλιση του αισθήματος της ασφάλειας των τοπικών κοινωνιών και την διατήρηση της ψυχραιμίας, και δεύτερον, για την εισήγηση σχεδίων δράσης σε περιπτώσεις παραμένουστος κινδύνου. Συνοπτικά, η περίπτωση των φυσικών καταστροφών αποτελεί ένα ειδικό αντικείμενο, το οποίο απαιτεί την άμεση, εμπεριστατωμένη και συνειδητοποιημένη απόκριση του επιστήμονα, υπό το βάρος της ευθύνης του απέναντι στο κοινωνικό σύνολο.

Η παρούσα εργασία ανατέθηκε αμέσως μετά το συμβάν, με ακόλουθη, εσπευσμένη, επιτόπια έρευνα και συλλογή δεδομένων. Μέρη της και πρώιμα αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν σε μικρό χρονικό διάστημα.

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτο βαθμό η μελέτη της βραχοκατάπτωσης που έλαβε χώρα εντός του οικισμού Πλωμαρίου της νήσου Λέσβου την 18^η Νοεμβρίου 2018, ο καθορισμός του μηχανισμού αστοχίας και η διερεύνηση των παραγόντων που συντέλεσαν σε αυτή. Το μέρος αυτό αποτελεί πρακτικά μια διαδικασία ανάστροφης ανάλυσης η οποία ξεκινάει με την ανακατασκευή του κατολισθαίνοντος όγκου και την διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του πρανούς και αποσκοπεί στην διευκρίνηση των συνθηκών υπό τις οποίες αστόχησε. Παράγωγο αυτής είναι μια ποσοτική εκτίμηση των γεωμηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας και των ασυνεχειών πριν και κατά την αστοχία καθώς και η ταυτοποίηση του αιτίου ενεργοποίησης της μετακίνησης. Από τα παραπάνω κατασκευάζεται και το τεχνικογεωλογικό μοντέλο της θέσης.

Σε δεύτερο βαθμό μελετάται το ευρύτερο πρανές με σκοπό την αξιολόγηση της ευστάθειας του με βάση το τεχνικογεωλογικό μοντέλο. Στο μέρος αυτό τελείται μια ανάλυση ευστάθειας ώστε να προσδιοριστεί η δυνητική και πραγματική ευστάθεια του πρανούς. Σκοπός του είναι ο προσδιορισμός δυνητικών μελλοντικών ολισθήσεων, ο εντοπισμός επισφαλών τεμαχίων και η αξιολόγηση της ευστάθειας τους μέσω του Συντελεστή Ασφαλείας, χωρίς να γίνει ωστόσο μια κανονική ανάλυση διακινδύνευσης, καθώς αυτό κρίθηκε πέραν των απαιτήσεων μιας προπτυχιακής εργασίας.

Σε όλα τα παραπάνω κεντρικό ρόλο κατέχουν σύγχρονα τεχνικά μέσα (ΣΜΗΕΑ/UAV, λογισμικά και προγραμματιστικά εργαλεία) με σκοπό την παραγωγή και αξιοποίηση όσο δυνατό πυκνότερης και ακριβέστερης πληροφορίας, όσο και την λεπτομερή, ταχεία και αυτοματοποιημένη ανάλυση της. Στο πλαίσιο αυτό, επιτελείται και ένας δευτερεύον σκοπός της εργασίας, ο οποίος είναι η ανάλυση και ανάδειξη των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, κυρίως δε των πιο σύγχρονων εξ αυτών

1.2 Μεθοδολογία

Ακολουθώντας την προαναφερθείσα προσέγγιση προς τους στόχους και σκοπούς της εργασίας, αναπτύχθηκε μια υβριδική μεθοδολογία η οποία συνδυάζει συμβατικές τεχνικογεωλογικές μεθόδους με σύγχρονα εργαλεία και λογισμικά.

Τα πρωτογενή δεδομένα συγκεντρώθηκαν στο ύπαιθρο από επιτόπου μετρήσεις και εναέρια αποτύπωση του πρανούς με Σ.ΜΗ.Ε.Α.

Από τις μετρήσεις τραχύτητας και αντοχής υπολογίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αντοχής των ασυνεχειών και από τις μετρήσεις προσανατολισμού κατασκευάστηκε τεκτονικό διάγραμμα. Από την εναέρια αποτύπωση του πρανούς κατασκευάστηκε φωτογραμμετρικά ένα γεωαναφερμένο τρισδιάστατο νέφος σημείων το οποίο αποτέλεσε και το "εικονικό εργαστήριο" πάνω στο οποίο στηρίχθηκαν οι περαιτέρω εργασίες. Από το νέφος σημείων συντέθηκε ένα εκμαγείο του κατολισθαίνοντος τεμάχους το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάστροφη ανάλυση της αστοχίας.

Για την αξιολόγηση της ευστάθειας του παραμένοντος πρανούς τελέστηκε αρχικά κινηματική ανάλυση με μετρήσεις προσανατολισμού που εκμαιεύθηκαν από το νέφος σημείων και συγκρίθηκαν με το τεκτονικό διάγραμμα. Συμπληρωματικά αναπτύχθηκε ειδικά για την συγκεκριμένη περίπτωση ένας αλγόριθμος αξιολόγησης του δυναμικού αστοχίας κάθε σημείου του μετώπου και προσδιορίστηκε ένα μεγάλο τέμαχος που θεωρήθηκε επιδεκτικό σε ολίσθηση. Σε τελικό στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευστάθειας του τεμάχους αυτού υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

1.3 Διάρθρωση Εργασιών & Εργαλεία Έρευνας

Οι εργασίες που συνεισέφεραν στην περάτωση της παρούσας διπλωματικής εντάσσονται στο κλασικό πλαίσιο της τεχνικογεωλογικής μελέτης: *Εργασίες Γραφείου (Προπαρασκευαστικές, Βιβλιογραφικές) – Εργασίες Υπαίθρου – Επεξεργασία Δεδομένων & Εξαγωγή Αποτελεσμάτων.*

Από την βιβλιογραφική μελέτη συγκεντρώθηκαν ήδη υπάρχοντα στοιχεία για την περιοχή και την θέση έρευνας τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2.

Κατά την υπαίθρια έρευνα έγινε μια αρχική γεωλογική αναγνώριση της θέσης και πάρθηκαν μετρήσεις προσανατολισμού ασυνεχειών, αντοχής και τραχύτητας με γεωλογική πυξίδα, σφύρα Schmidt τύπου L και προφιλόμετρο αντίστοιχα. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε αποτύπωση του πρανούς με περί τις 750 αεροφωτογραφίες από Σ.ΜΗ.Ε.Α. τύπου DJI Phantom 4 Pro.

Η επεξεργασία των αποκτηθέντων δεδομένων περιλαμβάνει πολλά στάδια για καθένα από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά λογισμικά. Το πρώτο εξ αυτών είναι η κατασκευή του τρισδιάστατου νέφους σημείων, η οποία έγινε από τις αεροφωτογραφίες με το λογισμικό Pix4D Mapper (Pix4D S.A.) . Για τον καθαρισμό και την επεξεργασία του νέφους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα CloudCompare ενώ για την ανακατασκευή του τεμάχους που κατολίσθησε το νέφος εξήχθη από το C.C. απευθείας στο AutoCAD (Autodesk Inc.), για την δημιουργία κατόψεων και πλαγίων όψεων. Από τις τελευταίες έγινε η ανακατασκευή του όγκου σε 3D μέσα στο περιβάλλον του Rhino (Robert McNeel & Associates). Η εξαγωγή μετρήσεων προσανατολισμού επιφανειών και

απόστασης οικογενειών ασυνεχειών από το νέφος σημείων έγινε με το πακέτο Discontinuity Set Extractor (Riquelme et al., 2014). Οι μετρήσεις προσανατολισμού που έγιναν με πυξίδα αναλύθηκαν στατιστικά στο λογισμικό Dips (RocScience Inc), στο οποίο πραγματοποιήθηκε επίσης η κινηματική ανάλυση. Για τον ημι-αυτόματο προσδιορισμό επισφαλών τεμαχών αναπτύχθηκε ένας ειδικός για την θέση αλγόριθμος ο οποίος συντάχθηκε και εκτελέστηκε σε Python. Η ανάλυση ευστάθειας του τεμάχους που τελικά εντοπίστηκε ως επισφαλές έγινε με το RocPlane (RocScience Inc.). Το σχηματικό τεχνικογεωλογικό μοντέλο καθώς και άλλα γραφιστικά στοιχεία συντέθηκαν στο CorelDraw X8 (Corel Corporation).

1.4 Η βραχοκατάπτωση της 24^{ης} Νοεμβρίου 2018

Τα ξημερώματα της Κυριακής, 24 Νοεμβρίου, 2018, κατά την 1π.μ. (ώρα Ελλάδος, GMT+2:00) σημειώθηκε μια σημαντική κατολίσθηση εντός του οικισμού Πλωμαρίου της νήσου Λέσβου. Το συμβάν έλαβε χώρα στην βάση του λόφου Προφήτης Ηλίας, εντός της οικιστικής ζώνης, και προκάλεσε υλικές ζημιές σε έξι γειτονικά κτήρια, καθώς και τον θάνατο ενός σκύλου. Μετά από εντολή της δημόσιας αρχής, τριάντα επτά κάτοικοι της περιοχής μετακινήθηκαν σε προσωρινά καταλύματα, αφού εκκενώθηκαν τα σπίτια τους. Το γεγονός προκάλεσε την ανησυχία της τοπικής κοινότητας, η οποία είχε προσφάτως πληγεί από τον σεισμό της 12^{ης} Ιουνίου 2017 (Mw 6.3). Νέες βραχοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή του Πλωμαρίου σημειώθηκαν την 16^η Δεκεμβρίου, στον οδικό άξονα Μελίντας-Πλωμαρίου και Ακρασίου-Δρώτας και 12^η Απριλίου 2019 στον επαρχιακό δρόμο Σελαδίου-Παλαιοχωρίου.



Εικόνα 1: Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης από τα Βόρεια, κατά την διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.



Εικόνα 2: Άποψη από την βάση του πρανούς. Διακρίνονται πεσμένα τεμάχη και σπίτι που υπέστη σοβαρές ζημιές.



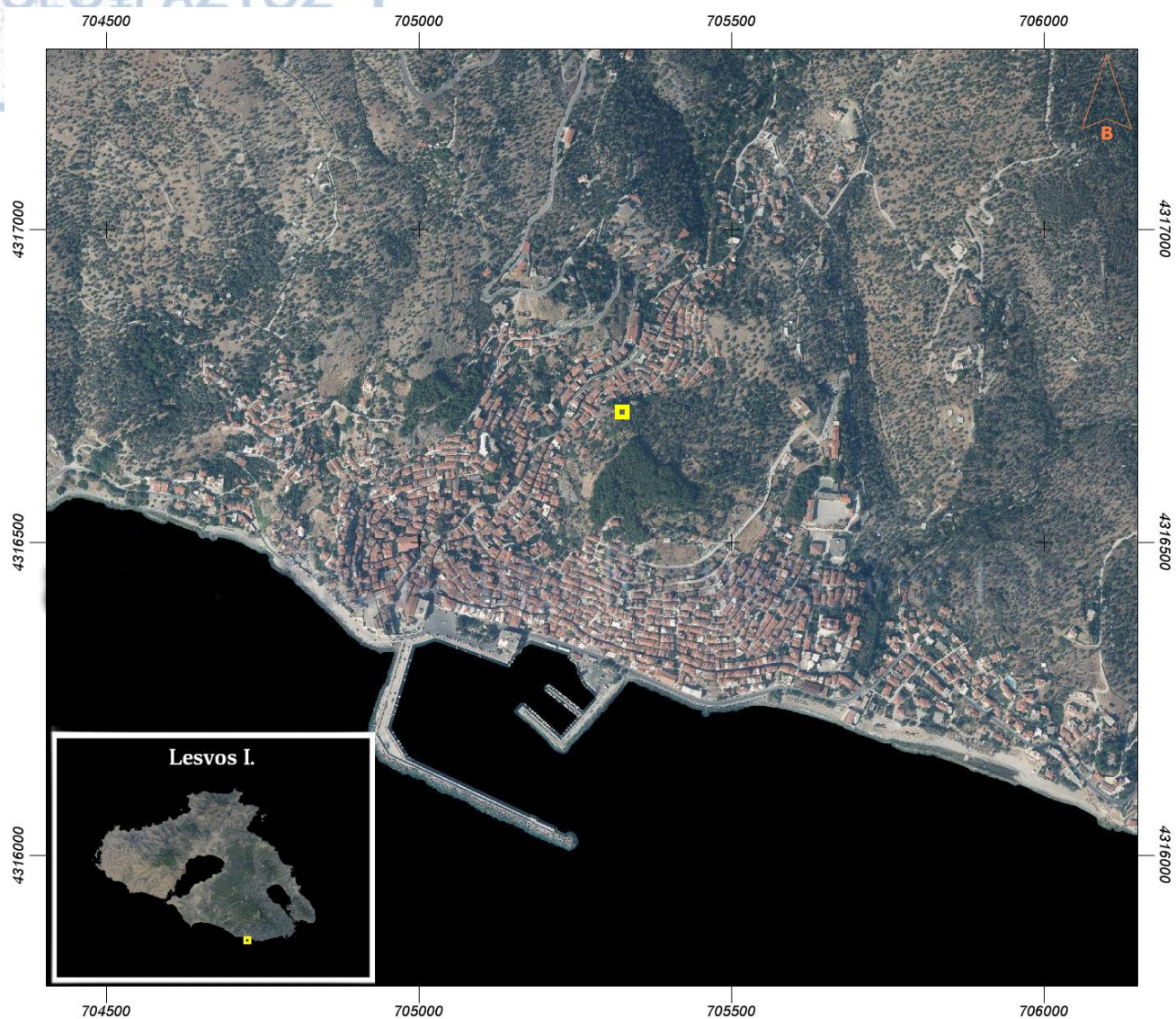
Εικόνα 3: Πεσμένα τεμάχη στον δρόμο μπροστά από τα σπίτια. Φαίνεται ενδεικτικά ο όγκος τους σε σχέση με το παγκάκι.

1.5 Προφίλ περιοχής μελέτης

Το κατολισθαίνον πρανές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4, βρίσκεται στις παρυφές του λόφου Προφήτης Ηλίας στην ανατολική πλευρά του οικισμού Πλωμαρίου της Λέσβου. Το Πλωμάρι βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νησιού, το οποίο οριοθετείται στα ΒΔ και Α από τους κόλπους της Καλλονής και της Γέρας αντίστοιχα, και σε απόσταση 39 χλμ. (οδικώς) από την πρωτεύουσα Μυτιλήνη. Διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Λέσβου της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου, με φορέα τοπικής αυτοδιοίκησης τον Δήμο Πλωμαρίου. Πρόκειται για έναν παραδοσιακό οικισμό με αυξημένη κίνηση την θερινή τουριστική περίοδο, ο οποίος οριοθετείται από βραχώδη πρανή που διαμορφώνονται με ήπιες ως απότομες κλίσεις σε μεταμορφωμένα (πρασινοσχιστολιθικά) πετρώματα. Αντίστοιχα πρανή, έχοντα επίσης δώσει προσφάτως αστοχίες, κυριαρχούν και στον μοναδικό οδικό άξονα που συνδέει το Πλωμάρι και τους πέριξ οικισμούς (Άγιος Ισίδωρος, Μελίντα) με την πόλη της Μυτιλήνης. Το εν λόγω πρανές βρίσκεται στο αριστερό (ανατολικό) αντέρεισμα της κοιλάδας του ρέματος Σεδούντας, ενός εκ των πολλών που αποστραγγίζουν τις ΝΔ παρυφές του ορεινού όγκου του Ολύμπου. Στην κοιλάδα αυτή είναι κτισμένο και το μεγαλύτερο μέρος του οικισμού.



Εικόνα 4: Ορθοφωτογραφία του πρανούς στη βάση του λόφου Π. Ηλία. Η κατολίσθηση σημειώνεται με κόκκινο



Εικόνα 5: Αεροφωτογραφία του Πλωμαρίου. Σημειώνεται η θέση της κατολίσθησης και η θέση του Πλωμαρίου επί της Λέσβου. Πηγή: Κτηματολόγιο Α.Ε.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γεωτεκτονική Θέση της Λέσβου στον Ελληνικό Χώρο

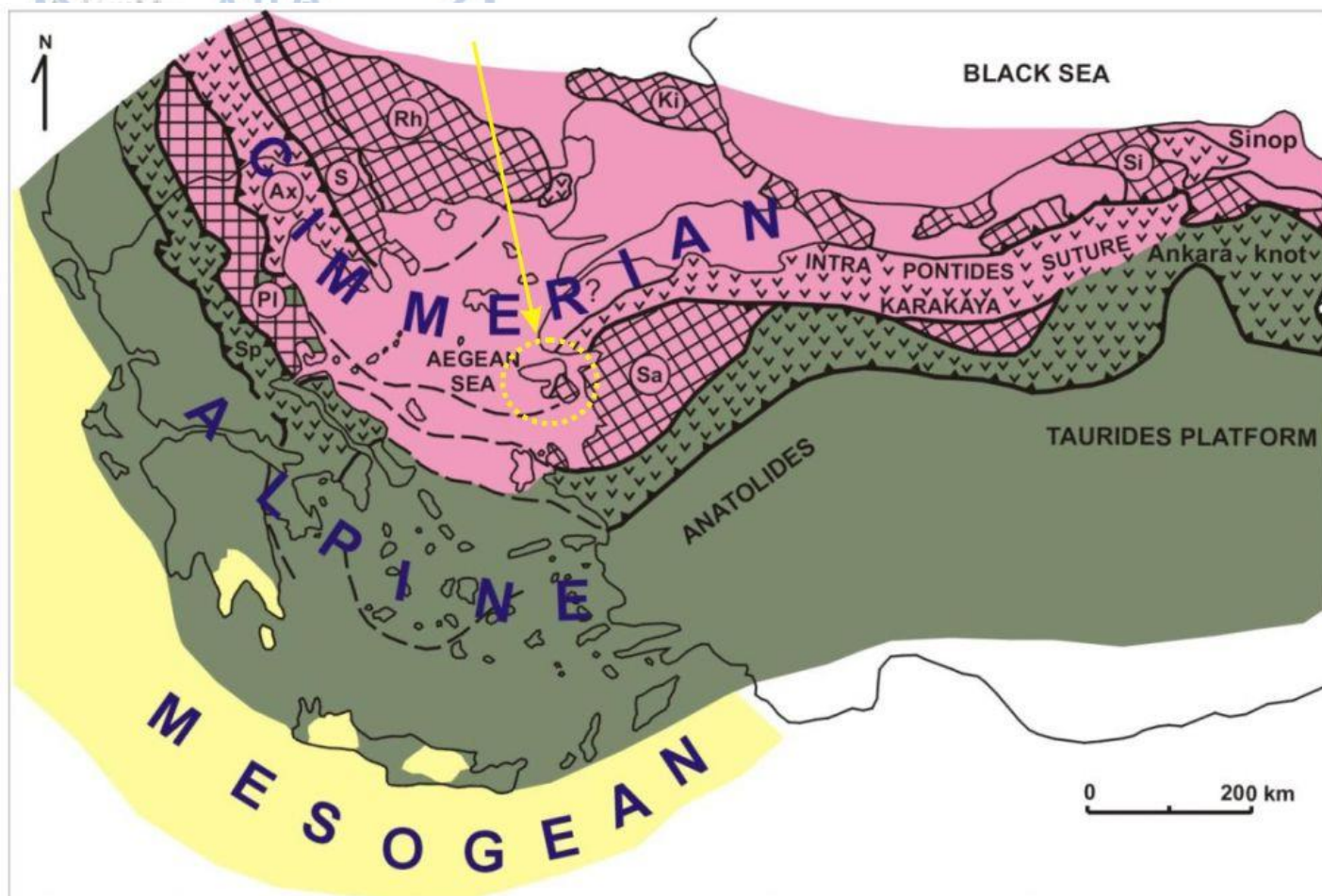
Γεωτεκτονικά το νησί της Λέσβου τοποθετείται πλέον στο Δυτικό περιθώριο της Πελαγονικής ζώνης (P), στην επαφή με τις οφειολιθικές μάζες της Υποπελαγονικής (Sp) (Θωμαΐδου, 2009). Η άποψη αυτή, η οποία έχει προταθεί από αρκετά παλαιότερες έρευνες (Κατσικάτσος et al., 1982, Mountrakis et al., 1983) ενισχύεται περαιτέρω από την τοποθέτηση της νήσου Χίου στην Υποπελαγονική (Τσελεπίδης, 2007) και των νήσων Οινούσες στην Πελαγονική (Mountrakis et al., 1983). Κατά την ερμηνεία αυτή, η Λέσβος αποτελεί την προς Ανατολάς προέκταση της Πελαγονικής ζώνης προς την ζώνη Sakarya της Μ. Ασίας, κατά και την κάμψη του τόξου των Ελληνίδων γεωτεκτονικών ζωνών προς τα Α και ΒΑ (Θωμαΐδου, 2009).

Συνοπτικά, η Πελαγονική ζώνη αποτελείται από ένα ανωπαλαιοζωικό κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο (1), μια μετακλαστική ηφαιστειοζηματογενή σειρά Περμίου-Τριαδικού (2) η οποία μεταβαίνει σταδιακά σε μια ανθρακική σειρά Τριαδικού-Ιουραϊκού (3), και τους επωημένους επί της τελευταίας οφειολίθους (4).

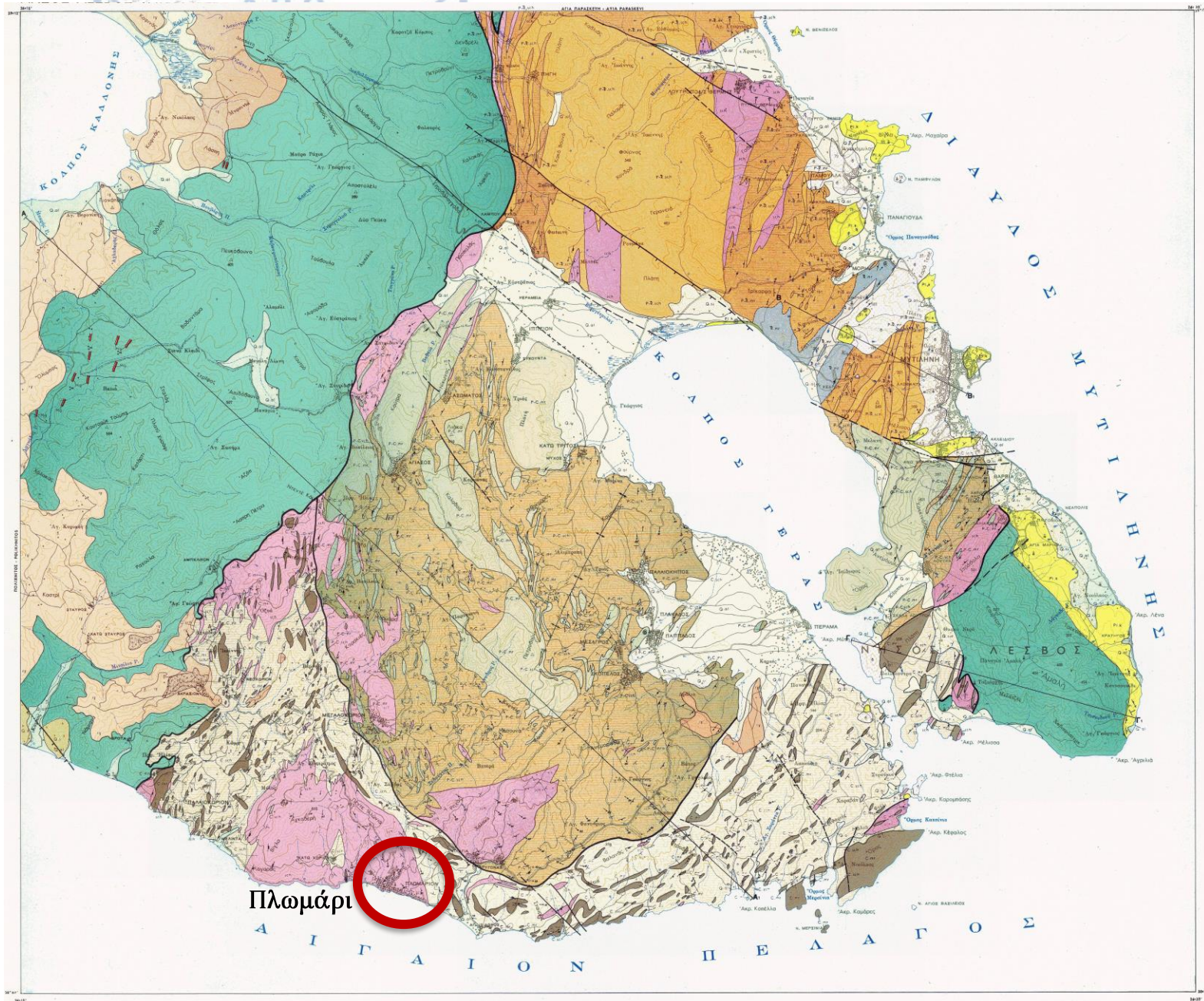
Στην Λέσβο εμφανίζονται:

- Ένα σχετικά αυτόχθονο μεταμορφωμένο υπόβαθρο, Ανωπαλαιοζωικής-Τριαδικής ηλικίας, που μεταβαίνει σταδιακά από μετακλαστικά υλικά (Παλαιοζωικό-Κ. Τριαδικό) σε ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους (Τριαδικό). Ανά θέσεις τα μετακλαστικά αυτά υλικά εμφανίζουν δομή μεταφλύσχη. Όλα τα πετρώματα του υποβάθρου έχουν υποστεί μια πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση, μάλλον κατά το Ιουραϊκό, και εμφανίζονται σε μεγάλες εκτάσεις εμπλεκόμενα σε τεκτονικά μίγματα. Τα μίγματα αυτά στην παρούσα εργασία αναφέρονται ως το Κατώτερο Τεκτονικό Κάλυμμα (Lower Nappe)
- Οι οφειολιθικές μάζες, οι οποίες συνιστούν το Ανώτερο Τεκτονικό Κάλυμμα. Οι οφειόλιθοι της Λέσβου προσομοιάζουν περισσότερο με αυτούς της Υποπελαγονικής (Θωμαΐδου 2009) και εμφανίζουν μεταμορφική σόλα στη βάση τους.
- Νεογενή όξινα ηφαιστειακά υλικά (ρυόλιθοι, δακίτες, ρυοδακίτες, ιγκνιμβρίτες, τόφφοι) τα οποία καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις του νησιού.

Χαρακτηριστική είναι η απουσία του αμφιβολιτικού-γνευσιακού υποβάθρου της Πελαγονικής, και των γνευσιωμένων γρανιτών που διεισδύουν σε αυτό. Θεωρείται ότι το υπόβαθρο αυτό ενδεχομένως να βρίσκεται υποκείμενο του υπάρχοντος μεταμορφωμένου υποβάθρου του νησιού, μη έχοντας ακόμη εκταφεί.



Εικόνα 6: : Η θέση της Λέσβου στο Ελληνικό ορογενετικό σύστημα, από (Μουντράκης, 2010)



Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης της Νήσου Λέσβου. Σημειώνεται η θέση του οικισμού Πλωμαρίου. Χαρτογράφηση από Hecht, 1979. Ε.Ι.Γ.Μ.Ε., Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος, φύλλο 'Πλωμαρίον-Μυτιλήνη'. Η αναπαραγωγή του παρόντος υλικού έγινε για καθαρά ακαδημαϊκούς, μη-κερδοσκοπικούς σκοπούς. Ιδιοκτησία & Copyright Ι.Γ.Μ.Ε., με επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ ΟΛΟΚΑΙΝΟΝ

Τεταρτογενές διαιρείται: Τεταρτί και Επάρτι όργιλοι, άμμοι, κροκάλοι, παρόδια κροκαλοπαγή, ηπειρωτικά άποθέσεις.

Πλευρικά κορήματα κροκαλοπαγή: με κροκάλες σερπεντίνου, άσβεστολίθου, βασάλτου ή φυλλίτων.

ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟΝ

Παλαιά πλευρικά κορήματα: συγκεκολλημένα κροκαλοπαγή, κροκάλες κυρίως σερπεντίνου, ίγνιμπρίται και ρυολιτικοί τόφοι.

Πάχος: μέχρι 60 μ.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟΝ

Άσβεστολίθοι: κυρίως μαργαίτοι γλακιών ύδάτων, λευκοί, έν μέρει με συσπαιμώματα και έν μέρει άσπιδιτικοί. Είς τά κατώτερα μέρη άπαντώνται ψαμίται και κροκαλοπαγή. Έπίσης ύψάλιμοι άποθέσεις μετά μαργών, άργιλιών, ψαμιτών, περιεχόντων άρκετά στρώματα άστράκων.

Συνολικός πάχος: άνω τών 60 μ.

Άπολιθώματα.

Γαστροπόδια:

Vivipara megarensis, *Planorbis*, *Bithinia rubens*, *Theodoxus* (*Calvertia*) *slavonicus*, *Valvata* sp., *Hydrobia* cf. *grandis*, *Prososthenia radmanesti*, *Bulimus* (*Tylopoma*) *melanthispis*, *Gyraulus* cf. *rumanus*.

Έλαιοματόβραγχια:

Psidium amnicum, *Dreissena polymorpha*, *Didacna subaristata*, *Cardium bollense*, *Cardium praetense*, *Unio* cf. *davilei*.

Όστρακόδοι:

Tyrhenocythere sicula, *Candona angulata*, *Hicocypris* sp., *Cyprideis torosa*, *Loxocantha* sp., *Darsinula stevensoni*, *Cypria ophthalmica*.

ΤΡΙΑΔΙΚΟΝ

Μάρμαρο και φυλλίται: λεπτοστρωματώδη έως συμπαγή άδρομερή μάρμαρα (R.mr) βαθύς κυανός έως τεροό χρώματος. Είς τά μάρμαρα ταύτα άρκετά παρυαλλίσματα, σχεδόν μεταμορφωμένοι φυλλίται (R.ph).

Άπολιθώματα: Μεγαλόδοντα, διαμέτρου από 6-12 δκ., και Κρινοίδια.

ΠΕΡΜΙΟΝ - ΤΡΙΑΔΙΚΟΝ

Μάρμαρο και σχιστόλιθοι: σειρά μαργών (P.R.sch) και σχιστολίθων (P.R.mr) κυρίως πρεσινωχοστρώδους φύσεως κυανή και τεροό συμπαγή μάρμαρα, δολομίται, φυλλίται. (Μετα-άργιλλικοί σχιστολίθοι, μετα-ψαμίται - μετα-κροκαλοπαγή) και πράσινοι σχιστολίθοι.

Ήλικία: κυρίως Πέρμιον.

ΠΕΡΜΟ - ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟΝ

Μάρμαρο και σχιστόλιθοι: σειρά μαργών (P.C.mr) και σχιστολίθων (P.C.sch), κυρίως είς άσπιδι πρεσινωχοστρώδους φύσεως κυανή και τεροό χρώματος. Άσπιδιτικοί μαργών παρεστερωμένοι μετά τών σχιστολίθων: φυλλώδη μάρμαρα με ένναλλαγές άνοικοτοχρών και σκοτεινοχρών στρωμάτων είς τό κατώτερον μέρος. Περιορισμένα μάρμαρα φυλλίται (κυρίως μετα-άργιλλικοί σχιστολίθοι, έν μέρει μετα-ψαμίται, μετα-άρεόζοι και μετα-κροκαλοπαγή) πράσινοι σχιστολίθοι, κυρίως συμπαγείς και είς μικρά στρώματα, πάχους μερικτών μέτρων.

Πάχος: πλέον τών 400 μέτων.

Άπολιθώματα.

Τριματοφόρα:

Cyclogira, (*Cornuspira*) *sp.*, *Orthovertella* sp., *Meandrosira* sp., *Staffella* sp., *Schwagerina* sp.

Βραχαιοπόδια:

Productus sp., *Productus* aff. *opuntia* (WAGNER), *Orthis* cf. *armeniaca*, *Derbya* sp., *Bellerophon* sp.

Ήλικία: κυρίως Πέρμιον

ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟΝ

Σχιστολίθοι και μάρμαρα: σειρά σχιστολίθων (C.sch) και μαργών (C.mr), έν μέρει ημιμεταμορφωμένοι, έν μέρει ποσινωχοστρώδους φύσεως. Ή σειρά αποτελείται από φυλλίται (μεγάλες σειρές μετα-κλαστικών: μετα-ψαμιτών μετα-άρεόζοι, μετα-κροκαλοπαγών και μικροτέρας έκτάσεως μετα-άργιλλικών σχιστολίθων), φυλλώδη ή ταινιωδή μάρμαρα και άσπιδι μαργών πάχους από μερικά ένς 80 μέτρων (λευκά έως κυανή χρώματα έπικρατούν). Άσβεστολιθικά κροκαλοπαγή: λωρίδες και μεγάλοι μάζες πρεσινών σχιστολίθων μικροτέρας έκτάσεως πυρριτικοί σχιστολίθοι.

Άπολιθώματα.

Κοράλλια:

Aulophyllum fungites, *Hillia* sp., *Carcinophyllum* sp., *Paleosmilia* sp.

Κωνόδοτοι:

Gondolella sp.

Ήλικία: κυρίως Κατώτερον Λιθανθρακοφόρον (Visé).

ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Βασάλται και ένδιάμεσοι λάβοι: σχηματισμών κώνους και κορυφές, σκοτεινοχρόνου, συμπαγείς, άνευ σκαρίας λάβας. Οι βασάλται κείνται, τοπικά, έπί τών πλειοκαινικών άποθέσεων γλακιών ύδάτων.

Ήλικία: Πλειόκαινον.

Ήγνιμπρίται: ρυολιτικοί έως ρυολιτικοί χαρακτήρος, σχηματίζοντες συμπαγή λωρίδες, συνοχής φύλλα με έπιπεδο έπιφανείαν έπικρατημένη διαβεβρωμένων έπιφανείων περιόδοιτο. Τά ήγνιμπρίτικα ταύτα φύλλα (ή) περιέχουν στρώματα συγκεκολλημένων τόφων, πυρίδους τόφους και φακούς μαύρου όφιδινού. Τοπικά τα ήγνιμπρίτικα φύλλα καλύπτονται ύπό στρώματος τεροός (ρυολιθικά τεροά, λάβαιοι, βόμβαι και τεμάχια θηρακικής γής και όφιδινός), ένσωματωμένα είς έκρηξιγενή κοινοτήτων και τόφων (ή).

Ήλικία: Νεογένης.

Περιδοίτης πυροξένο-περιδοίτης, όφιδινίτης: βαθμός σερπεντινίσωσης μεταβλητός, (από έλαφρύς άλλοίωσης μέχρι πλήρους σερπεντινίσωσης). Μικρά άποφύσεις τών πετρωμάτων τούτων διατείνονται τοπικά έντός τού περμό-λιθανθρακοφόρου μαρμαρο-σχιτολιθικού σχηματισμού.

Πράσινοι σχιστόλιθοι: έν μέρει συμπαγείς μετα-κεροσιλβικοί, βασάλτικοι, κυρίως μετα-βασάλτικοι, τόφοι και μετα-τοφίται. Έννάλλασσονται μετά τών νεότερων καλαιοζωικών μαρμαρο-σχιτολιθικών σειράν με συνεχή όλλαγήν μετα-τοφών, μετα-τοφωτών-φυλλίτων και έν μέρει προσκεραυωμένων λάβων.

Ήλικία: νεότερον Παλαιοζωϊκόν.

Γεωλογικών όριον όρατόν

Ρήγμα όρατόν. Παλαιά δεικνύουσαι πιθανή πρόεκτιση τούτου.

Ρήγμα όρατόν. Μικρά γραμμά προς τό κατωθέν τέμαχος.

Ρήγμα πιθανόν.

Ρήγμα κεκαλυμμένον.

Τεκτονική έπαφή.

Άξον άντικλίνου.

Μεταλλεον προσφάτως έπανεξετασθέν.

Έμφάνισις μεταλλεύματος.

Έγκυκαλιφθέν μεταλλεον.

Θέσις άπολιθωμάτων.

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

LEGEND

QUATERNARY

HOLOCENE

Quaternary undivided: grey and red clays, sands, gravels, coastal conglomerates, continental deposits.

Talus and conglomerates: with gravels of serpentine, limestone, basalt or phyllites.

PLEISTOCENE

Old talus: cemented conglomerates, gravels mainly of serpentine, ignimbrite and rhyolite tuffs.

Thickness: up to 60 meters.

PLIOCENE

Limestones: chiefly marly, freshwater, of white color, partly concretionary and partly oolitic. In the lower parts sandstones and conglomerates are present. Also oligohaline deposits with marls, clays, sandstones, containing several shell beds.

Total thickness: more than 60 meters.

Fossils.

TRIASSIC

Marbles and phyllites: fine to massive coarse-grain marbles (R.mr) of dark blue or greyish color. Intercalated archaean metamorphic to epimetamorphic phyllites (R.ph) occur in these marbles.

Fossils: Megalodon, with diameters from 6 up to 12 cm., and Crinoida.

PERMIAN - TRIASSIC

Marbles and schists: series of marbles (P.R.sch) and schists (P.R.mr) chiefly in green schist facies; blue and grey massive marbles, dolomites, phyllites. (Meta-argillaceous shales, meta-sandstones, meta-conglomerates) and green schists.

Age: mainly Permian.

PERMO - CARBONIFEROUS

Marbles and schists: series of marbles (P.C.mr) and schists (P.C.sch) chiefly in green schist facies, consisting of massive marbles of white to bluish or grey color and dolomites; Thin lenses of marble interstratified with the schists; laminated marbles with alternating light and dark colored beds; bituminous marbles in the lower part; phyllites (mostly meta-argillaceous shales, partly meta-sandstones, meta-argillaceous shales, meta-conglomerates); green schists mainly massive and in small beds of a few meters thick.

Thickness more than 400 m.

Fossils.

Eoraminifera:

Cyclogira, (*Cornuspira*) *sp.*, *Orthovertella* sp., *Meandrosira* sp., *Staffella* sp., *Schwagerina* sp.

Brachiopods:

Productus sp., *Productus* aff. *opuntia* (WAGNER), *Orthis* cf. *armeniaca*, *Derbya* sp., *Bellerophon* sp.

Age: mainly Permian.

CARBONIFEROUS

Schists and marbles: series of schists (C.sch) and marbles (C.mr), partly archaean metamorphic, partly in green schist facies. The series consist of phyllites (large series of meta-clastics: meta-sandstones, meta-argillaceous shales, meta-conglomerates and minor meta-argillaceous shales); laminated or banded marbles and lenses of marble, from several to about 80 meters thick (white to bluish colors predominate); Limestone conglomerates; bands and great masses of green schists; minor siliceous shale.

Fossils.

Corals:

Aulophyllum fungites, *Hillia* sp., *Carcinophyllum* sp., *Paleosmilia* sp.

Conodonts:

Gondolella sp.

Age: mainly Lower Carboniferous (Visé).

IGNEOUS ROCKS

Basalts and intermediate lavas: forming cones and summits, dark, massive, non-scoracious lavas. The basalts lavas, locally, upon the Pliocene freshwater deposits.

Age: Pliocene.

Ignimbrites: rhyolitic to rhyodacitic in character, forming massive compact sheets with flat surface overlying eroded surfaces of peridotite. These ignimbritic sheets (iy) contain beds of welded tufts and lenses of black obsidian. Locally the ignimbritic sheets are covered by a layer of tephra (rhyolite cinders, lapilli, pumice bombs and blocks and obsidian) embedded in volcanic dust and ash (ty).

Age: Neogene.

Peridotite pyroxen - peridotite, olivinite: degree of serpentinisation variable (from slight alteration to complete serpentinisation). Small apophyses of these rocks are locally injected into the permo-carboniferous marble-schist formation.

Green schists: partly massive meta-hornblend, basalts, mostly meta-basaltic tufts and meta-tuffites. They are intercalated with the late paleozoic marble-schist series with the continuous change, meta-tuff, meta-tuffite phyllite and partly pillow lavas.

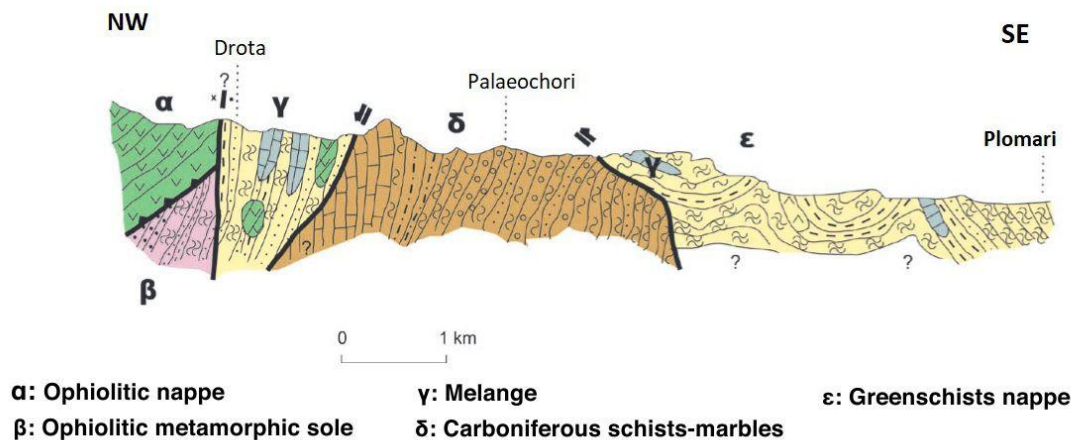
Age: Late Paleozoic.

Εικόνα 8: Υπόμνημα του παραπάνω χάρτη (βλέπε Εικόνα 8)

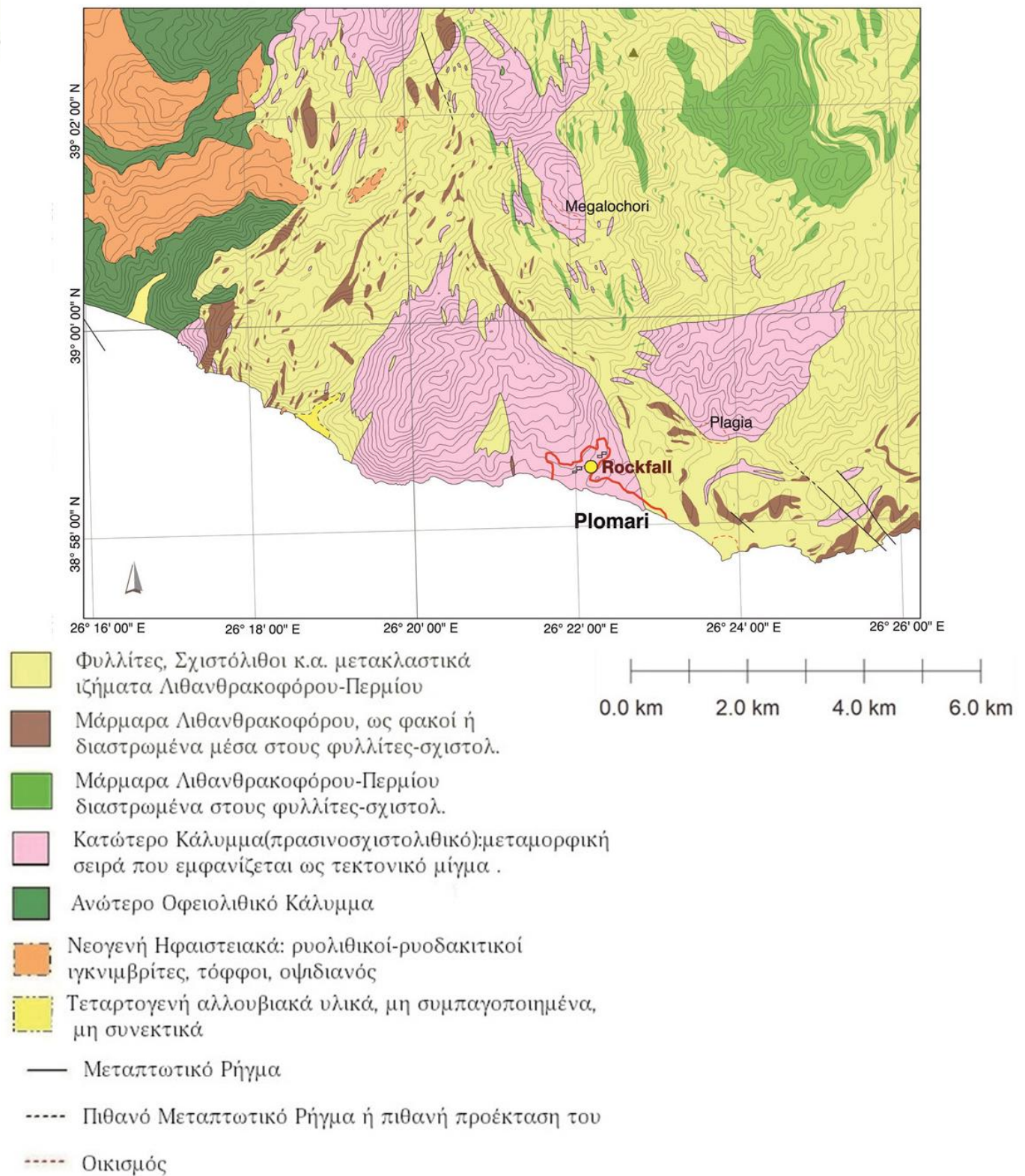
2.2 Γεωλογία της Περιοχής Μελέτης

2.2.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Πλωμαρίου

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής του Πλωμαρίου δομείται από το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα των πρασινοσχιστολίθων. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει χλωριτικούς-επιδοτιτικούς-ασβεστιτικούς σχιστόλιθους, μεταπηλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες, κερατολίθους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, φυλλίτες, διαβάσεις, μετατόφφους και όγκους μαρμάρων του Ανωπαλαιωζωικού-Τριαδικού υποβάθρου και σερπεντινιτών, συμπτυχωμένους με τα όλα τα παραπάνω. Τα πετρώματα αυτά αποτελούν ένα τεκτονικό μίγμα που αρχικά υπερκάλυψε το υπόβαθρο, στην συνέχεια αποκόπηκε με την δράση ανάστροφων ρηγμάτων και εμφανίζεται ως τεκτονικό ράκος. Τα διαφορετικά μέρη της ενότητας (προσινοσχιστόλιθοι, μέτα-διαβάσεις, φυλλίτες, μάρμαρα του υποβάθρου) εμφανίζονται κατά τυχαίο τρόπο χωρίς να παρουσιάζουν μια σαφή τεκτονοστρωματογραφική δομή. Έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση κατά τις δύο κύριες αλπικές φάσεις πτυχώσεων και εμφανίζονται συνήθως τεμαχισμένα με πάνω από 4 οικογένειες ασυνεχειών. Πολλές από τις επιφάνειες φέρουν ενδείξεις ολίσθησης.



Εικόνα 9: Σχηματική γεωλογική της περιοχής κοντά στο Πλωμάρι, από Θωμαΐδου, 2009



Εικόνα 10: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Τροποποιημένος από Hecht, 1972, ομαδοποίηση και χρωματισμός των σχηματισμών κατά Θωμαΐδου 2009

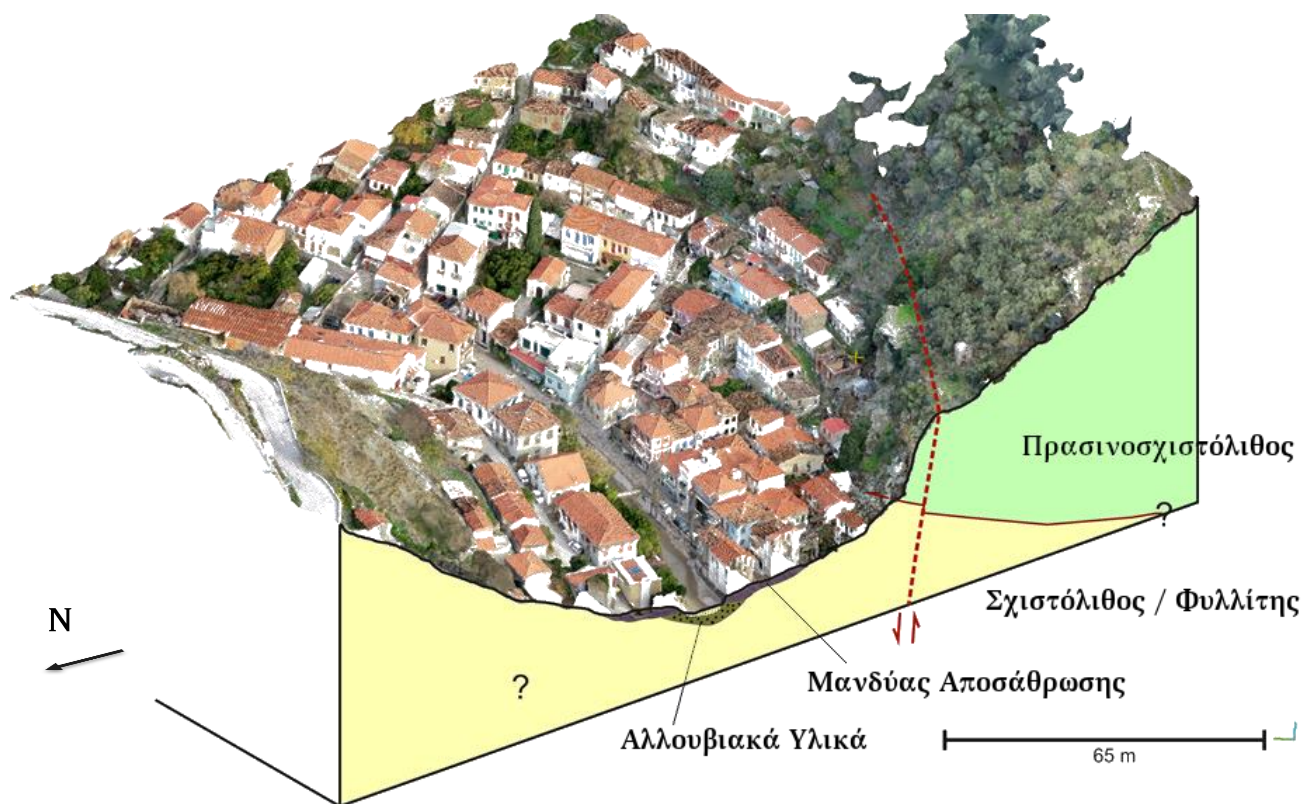
2.2.2 Γεωλογία της θέσης έρευνας

Τα παρακάτω αποτελούν μια πολύ συνοπτική αναφορά των γεωλογικών παρατηρήσεων που έγιναν στο ύπαιθρο. Περαιτέρω αναλυτική, λεπτομερής χαρτογράφηση δεν πραγματοποιήθηκε καθώς αποκλίνει από το επίπεδο και το προσδοκώμενο της παρούσας εργασίας.

Το υπό μελέτη πρανές αποτελείται από συμπαγείς χλωριτικούς επιδοτιτικούς πρασινοσχιστόλιθους, πιθανώς μέτα-διαβάσες, σε επάφη με τεφροπράσινους φυλλίτες-πρασινοσχιστόλιθους στην βάση του. Η επαφή είναι τεκτονική και παρουσιάζει μέτρια βύθιση προς τα Ν (η οποία δεν μετρήθηκε λόγω της απουσίας εγκάρσιας τομής), παρόμοια με την βύθιση της κύριας φύλλωσης των σχηματισμών. Στην επιφάνεια που αποκαλύφθηκε από την αστοχία εμφανίζεται γράμμωση ολίσθησης που υποδεικνύει υπο-κατακόρυφη κίνηση του υπερκείμενου τεμάχους και συνεπώς θεωρείται ότι το πρανές τεμαχίζεται κατά μήκος του από ένα μικρό μεταπτωτικό ρήγμα, μάλλον μη ενεργό. Η βραχόμαζα παρουσιάζει πολλές οικογένειες ασυνεχειών, φαίνεται ωστόσο να κυριαρχούν δύο κάθετα μεταξύ τους συστήματα, υποκατακόρυφα με κλίση προς Β και Δ αντίστοιχα. Είναι έντονα κερματισμένα, αποχωρίζεται κυρίως σε μετρίου μεγέθους σύνθετα πρισματικά μπλοκ (περί τα $0,2 \text{ m}^3$) και χαρακτηρίζεται ως 'Πολύ Τεμαχώδης' κατά G.S.I..



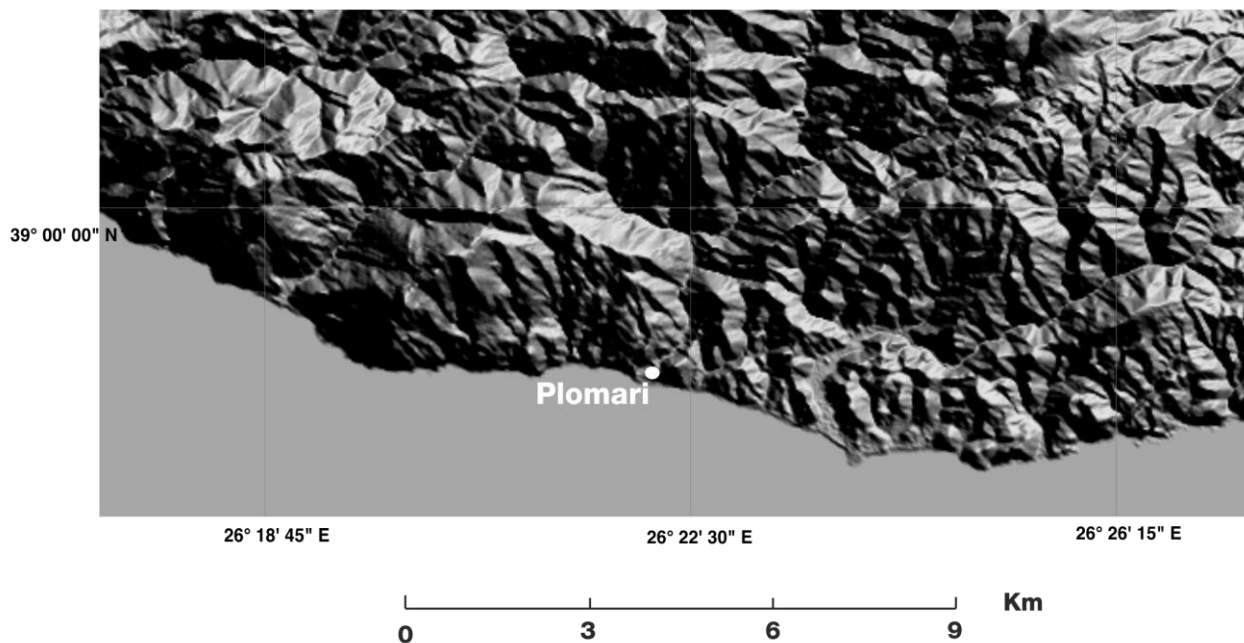
Εικόνα 11: Άποψη του βράχου δίπλα στην θέση της κατολίσθησης. Διακρίνονται τα πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών. Η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως 'πολύ τεμαχώδης' (κατά G.S.I.) και δομείται από σύνθετα πρισματικά μπλοκ.



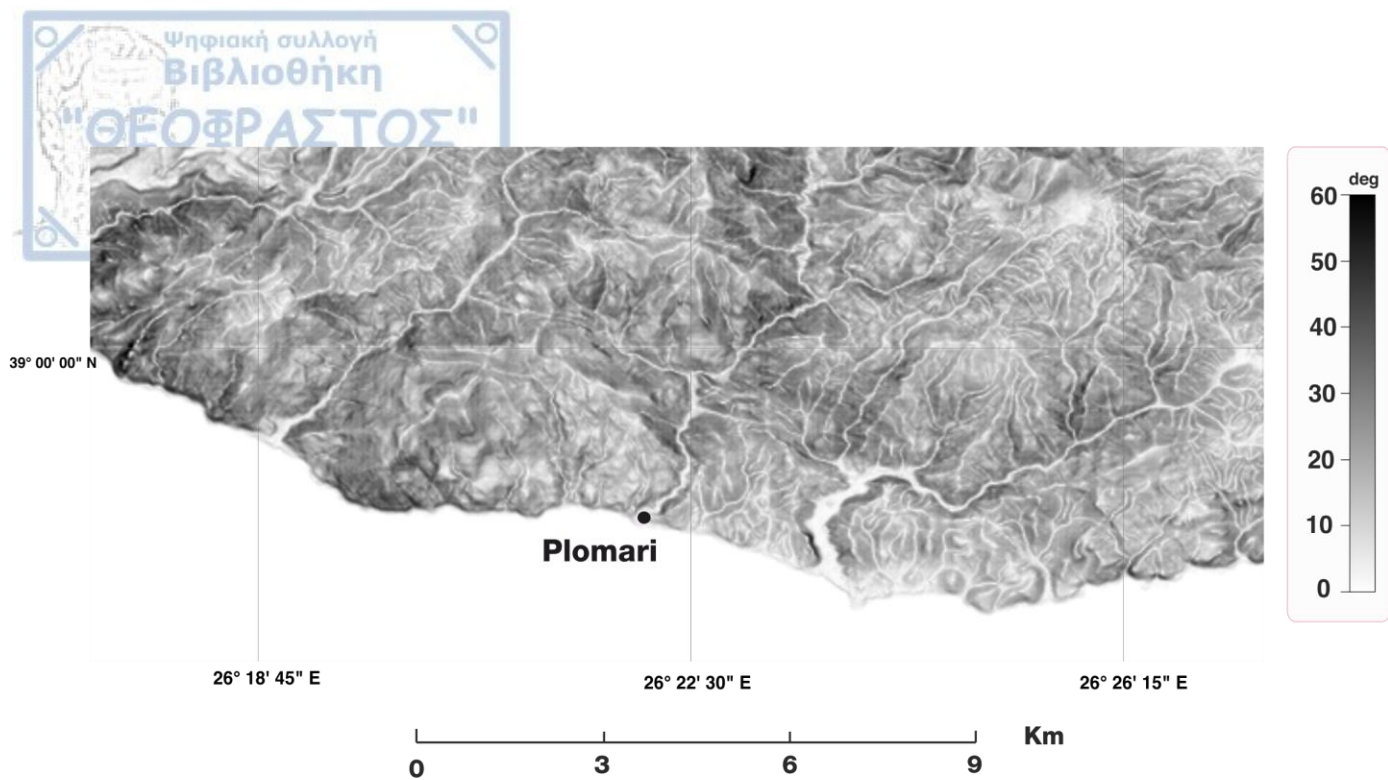
Εικόνα 12: Προσεγγιστική γεωλογική τομή διερχόμενη από το κατολισθαίνον πρανές

2.3 Γεωμορφολογία της ευρύτερης περιοχής

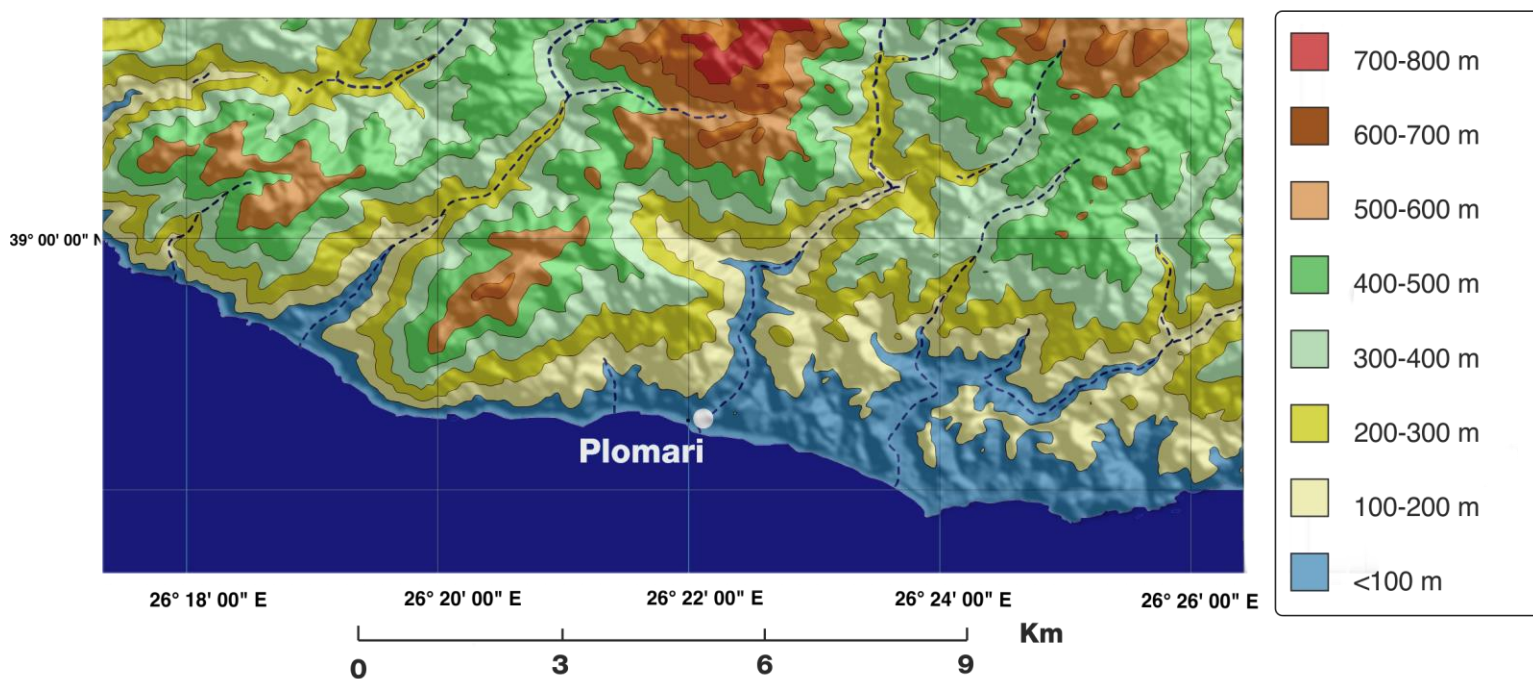
Η Λέσβος αποτελεί ένα κατά βάση ορεινό νησί, με δεσπόζοντες τους όγκους των βουνών Λεπέτυμνος (968 m) και Όλυμπος (967 m) στο βόρειο και νότιο τμήμα του νησιού αντίστοιχα, παρουσιάζει ωστόσο και δύο σημαντικές υφέσεις, τους κόλπους της Γέρας και της Καλλονής (ο οποίος χωρίζει τα δύο όρη στα δυτικά, τεμαχίζοντας ουσιαστικά το νησί με μια διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ). Γενικά το ανάγλυφο της Λέσβου ποικίλει, καθώς παρουσιάζει απότομες αλλαγές και είναι αρκετά έντονο (Θωμαΐδου, 2009). Η περιοχή της Νότιας Λέσβου εμφανίζει ένα γενικά απότομο ανάγλυφο χαμηλού ορεινού τύπου, εξομαλυσμένο ωστόσο από την διάβρωση (Θωμαΐδου, 2009), με πλήθος ρεμάτων, γενικώς καλά ανεπτυγμένο μανδύα αποσάθρωσης και εκτεταμένη φυτοκάλυψη. Στην ευρύτερη περιοχή του Πλωμαρίου, το ανάγλυφο είναι μεν ημιορεινό, με χαμηλά ωστόσο υψόμετρα (0-400 m), πυκνό υδρογραφικό δίκτυο και κλιτείς με μέση κλίση 20-40°.



Εικόνα 13: Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής του Πλωμαρίου. Υψομετρικό μοντέλο από ASTER GDEM v2



Εικόνα 15: Χάρτης μορφολογικών κλίσεων της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Υψομετρικά δεδομένα από ASTER GDEM v2



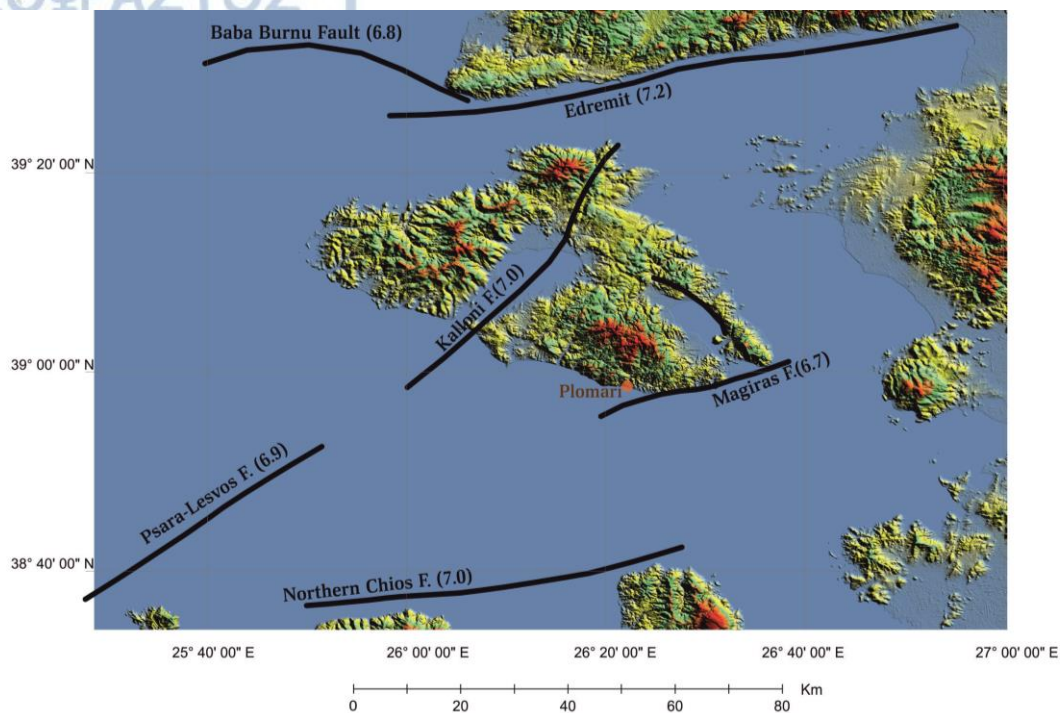
Εικόνα 14: Χάρτης υψομέτρων της ευρύτερης περιοχής Πλωμαρίου. Υψομετρικά δεδομένα από ASTER GDEM v2

2.4 Ενεργός Τεκτονική

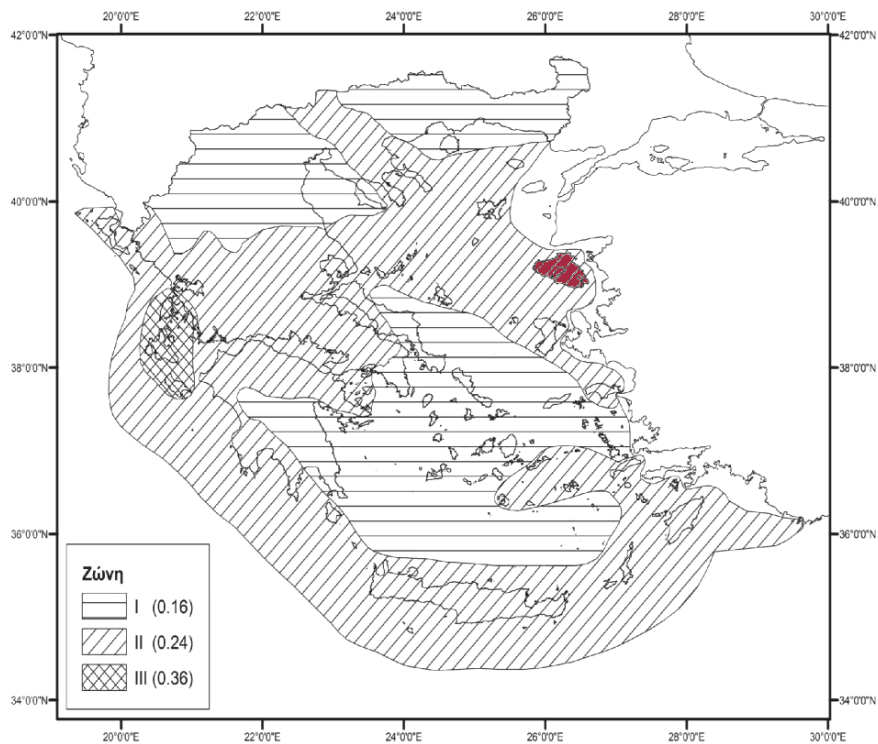
Η Λέσβος τοποθετείται σε ένα ιδιαίτερα ενεργό γεωδυναμικό καθεστώς, στο ΒΑ περιθώριο της μικροπλάκας του Αιγαίου και στην άμεση ζώνη του νότιου κλάδου του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας. Το ρήγμα αυτό αποτελεί ένα όριο ανάμεσα στις λιθοσφαιρικές πλάκες της Ευρασίας, Ανατολίας και Αιγαίου, και ελέγχει την προς ΝΔ αριστερόστροφη κίνηση της Ανατολίας προς τον χώρο του Αιγαίου. Η κυρίαρχη τεκτονική δομή του χώρου της Λέσβου είναι μια μεγάλη ζώνη δεξιόστροφης οριζόντιας και κανονικής μετατόπισης (EFZ) βόρεια των ακτών του νησιού, η οποία ελέγχει την μορφολογία του κόλπου και των ακτών του Αδραμυτίου (Edremit). Το σημαντικότερο τμήμα της ζώνης αυτής είναι το ρήγμα του Αδραμυτίου με παράταξη ΔΝΔ-ΑΒΑ. Προεκτάσεις της ίδιας δεξιόστροφης ζώνης είναι και τα ρήγματα Καλλονής και Ψαρρών-Λέσβου με παράταξη ΝΔ-ΒΑ. Τόσο ο κόλπος του Αδραμυτίου, όσο και ο κόλπος της Λέσβου αποτελούν ρηξιγενείς λεκάνες με πλήθος ενεργών, κανονικών ρηγμάτων διευθύνσεων ΝΔ-ΒΑ και ΒΔ-ΝΑ συνοδών και συγγενών της μεγάλης strike-slip δομής της Βόρειας Ανατολίας. Η τεκτονική αυτή δομή μελετάται και καταγράφεται από πλήθος ερευνητών (Chatzipetros et al., 2013, Pavlides et al., 2018, κ.α.). Η έντονη γεωδυναμική δραστηριότητα στην περιοχή έχει προκαλέσει μεγάλο αριθμό καταγεγραμμένων και ιστορικών σεισμών με μεγέθη μέχρι Mw 7. (Calvi, 1941, Öcal, 1968, Ambraseys & Jackson, 1998, Παπαζάχου & Παπαζάχος, 2003, Makropoulos et al., 2012, Παπαδημητρίου, 2018) Στην εικόνα 2.6 παρουσιάζονται οι κυριότερες ενεργές τεκτονικές δομές της ευρύτερης περιοχής της Λέσβου με το μέγιστο πιθανό μέγεθος σεισμού (Mw) που δύναται να δώσουν, σύμφωνα με την Ελληνική Βάση Δεδομένων Σεισμογόνων Πηγών (Greek Database of seismogenic Sources)



Εικόνα 16: Γεωδυναμικός και σεισμοτεκτονικός χάρτης του Κόλπου του Αδραμυτίου και της νήσου Λέσβου. Πηγή (Hasan Sözbilir Ö. S., 2016)



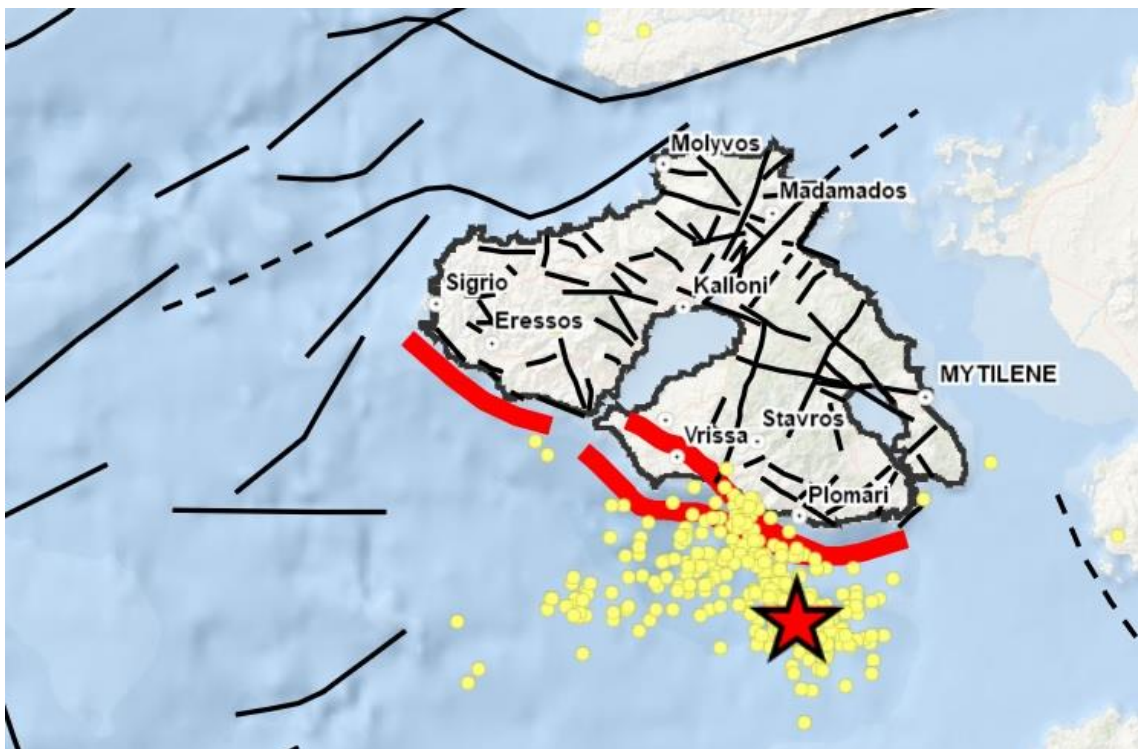
Εικόνα 17: Μορφολογικός χάρτης όπου σημειώνονται οι κύριες σεισμικές πηγές της περιοχής Αδραμυτίου-Λέσβου με το μέγιστο εκτιμώμενο δυναμικό τους. Τροποποιημένο από Greek Database of Seismogenic Sources



Εικόνα 18: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού χώρου, σκιαγραφείται με κόκκινο η Λέσβος . Από Ο.Α.Σ.Π. 2003

2.4.1 Ο Σεισμός της 12^{ης} Ιουνίου 2017

Την 12^η Ιουνίου 2017 έλαβε χώρα ένας καταστροφικός σεισμός μεγέθους Mw 6.3. Το επίκεντρο επιλύθηκε 15 χλμ. ΝΔ της Λέσβου. Στον απολογισμό του συμβάντος περιλαμβάνεται μια απώλεια, 15 τραυματίες, υλικές ζημιές σε 12 οικισμούς του νησιού, μεταξύ αυτών και στο Πλωμάρι, καθώς και στα Τουρκικά παράλια. Συνολικά 1115 κτίρια κρίθηκαν μη ασφαλή. Σημειώθηκαν επίσης βραχοκαταπτώσεις σε όλο το μήκος των νοτίων παραλίων του νησιού. Ο συγκεκριμένος σεισμός θεωρείται σημαντικός για την παρούσα εργασία, αφού βρίσκεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά κοντά στην θέση της αστοχίας του πρανούς στο Πλωμάρι.



Εικόνα 19: Θέσεις epicέντρων της σεισμικής ακολουθίας του σεισμού του 2016. Με αστέρι σημειώνεται το επίκεντρο του κύριου σεισμού, με κόκκινα τα επιφανειακά ίχνη των ρηγμάτων που ενεργοποιήθηκαν. Πηγή: Ε.Κ.Π.Α., Lesvos earthquake Mw 6.3, 12/6/2017, (<https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=d35c1c88f8d84709b94748efc3f1741d>)

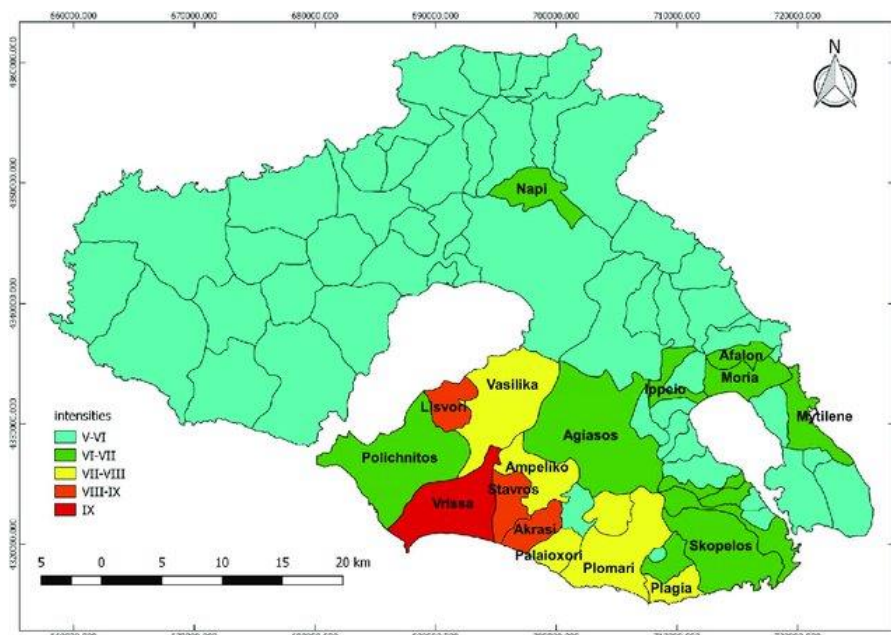
Η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση κατά τον κύριο σεισμό θεωρείται, σε πρώτο βαθμό, ότι συνέβαλε στην διατάραξη του καθεστώτος της ισορροπίας ή οριακής ισορροπίας του υπό μελέτη πρανούς, προκαλώντας ενδεχομένως μερική μείωση της διατμητικής αντοχής των κύριων ασυνεχειών της βραχώμαζας. Το μέτρο της επιτάχυνσης αυτής μπορεί, χονδρικά, να εκτιμηθεί από το αντιληπτό μέγεθος του σεισμού στην Μακροσεισμική Κλίμακα EMS-98. Σύμφωνα με σχετική δημοσίευση (Παπαδημητρίου, 2018) το αντιληπτό μέγεθος

του σεισμού στην περιοχή του Πλωμαρίου ήταν VII στην κλίμακα EMS-98. Οι Musson et al. (2010) επιχειρούν έναν συσχετισμό των κυριότερων κλιμάκων μακροσεισμικής έντασης, κατά τον οποίο το μέγεθος VII στην EMS-98 αντιστοιχεί επίσης σε μέγεθος VII στην MMI (Τροποποιημένη Κλίμακα Mercalli). Οι (Wald, Quitoriano, Heaton, & Kanamori, 1999) συσχετίζουν την Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration (% g)) με το μέγεθος (I_{mm}) στην Τροποποιημένη Κλίμακα Mercalli με την σχέση:

$$I_{mm} = 3,66 \log(PGA) , \quad V \leq I_{mm} \leq VIII \quad (1)$$

Για την περίπτωση του σεισμού της Λέσβου, στο Πλωμάρι με MMI= VII η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση υπολογίζεται ίση με 0,28g. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παραπάνω τύπος έχει προταθεί για την Καλιφόρνια, και ότι τα μακροσεισμικά αποτελέσματα που μετράει η κλίμακα Mercalli είναι εν μέρει συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής, αλλά και το γεγονός ότι οι δύο κλίμακες EMS98 και MMI δεν είναι απόλυτες αριθμητικές κλίμακες, και η τελική τιμή της έντασης ενός σεισμού σε μια περιοχή έγκειται μερικώς σε ανθρώπινη κρίση, κρίνεται σκόπιμο η παραπάνω τιμή να απομειωθεί κατά 20-30%. Η τελική επομένως, καθαρά ενδεικτική, τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης είναι 0,2g ή ισοδύναμα 1,96 m/s².

2.5



Εικόνα 20: Χάρτης μακροσεισμικής έντασης (κατά Mercalli) του σεισμού του 2016.
Πηγή: (Παπαδημητρίου, 2018)

Κλιματολογικά και Καιρικά Στοιχεία

Η νήσος της Λέσβου παρουσιάζει κλιματικό τύπο Ξηρού Θέρους Υποτροπικό. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 17.4 °C, η μέση σχετική υγρασία 65% και η

μέση βροχόπτωση 670mm, κυμαινόμενη από 350mm ως 900mm (στοιχεία αναφερόμενα πρωταρχικά στην πόλη της Μυτιλήνης). Αναλυτικά παρουσιάζονται τα κλιματικά της στοιχεία κατά τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (W.M.O.)

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Ατμοσφαιρική πίεση (hPa)	1017	1015.6	1014.9	1012.5	1012.7	1011.4
Μέση θερμοκρασία (°C)	10.5	10.7	12.1	15.2	19.3	23.5
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	12.9	13.2	14.8	18.4	22.8	27.1
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	8.5	8.5	9.6	12.4	15.9	19.8
Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)	21.6	26.2	25.6	28.4	35.4	40
Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	-4.4	-3	-1.2	4	8.4	11
Μέση σχετική υγρασία (%)	71	70	68	64	63	57
Μέση βροχόπτωση (mm)	130	97	75	47	21	6
Μέσος αριθμός ημερών με βροχή μεγαλύτερη από 1 mm	9	8	7	5	3	1
Μέση ένταση ανέμου (m/s)	2.8	3	2.6	2.3	1.9	2

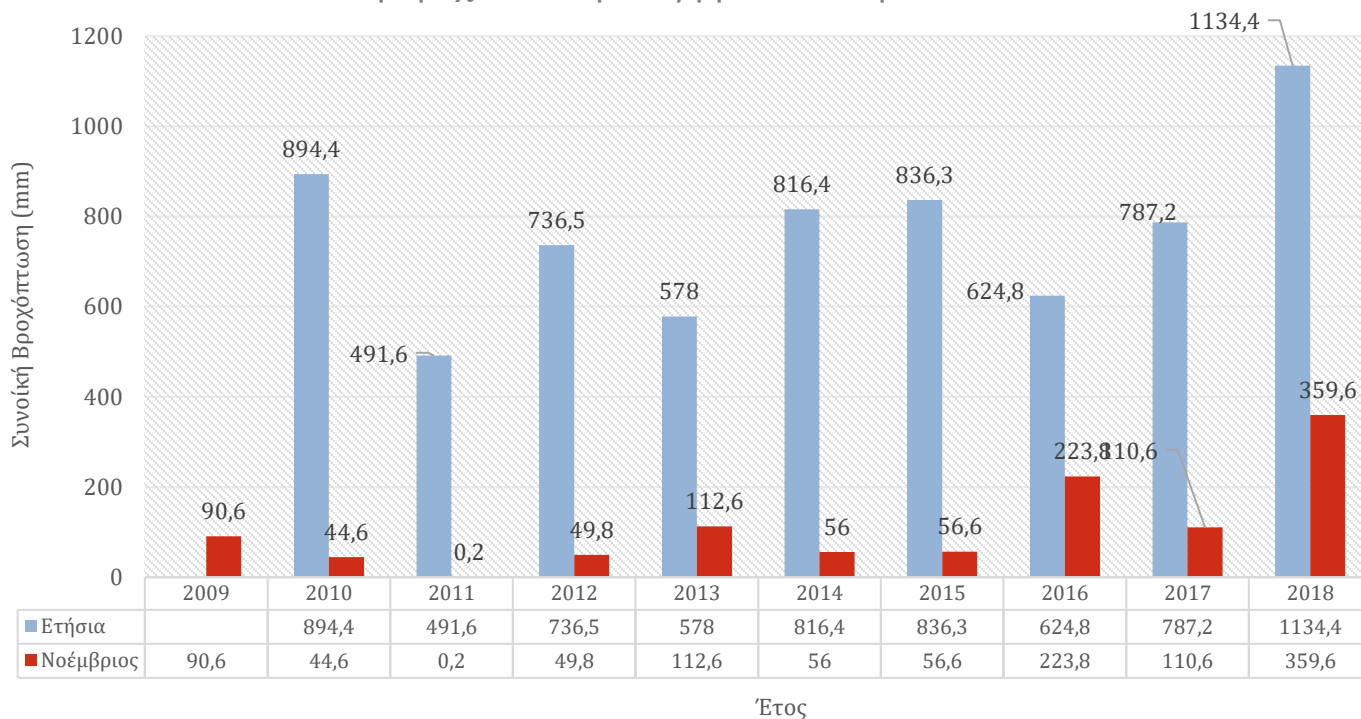
	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΕΤΟΣ
Ατμοσφαιρική πίεση (hPa)	1010.2	1010.6	1014	1016.8	1017.5	1016.7	1014.2
Μέση θερμοκρασία (°C)	25	24.6	22.3	18.5	15.3	12.3	17.4
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	28.1	27.6	25.2	21.3	18	14.6	20.3
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	21.8	21.6	19.6	16.1	13.1	10.3	14.8
Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)	41	38.4	36.3	32	27.8	23.4	
Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	15.8	16.3	10.9	5.2	1.4	-1.4	
Μέση σχετική υγρασία (%)	56	57	60	66	71	72	65
Μέση βροχόπτωση (mm)	2	4	11	38	94	145	670
Μέσος αριθμός ημερών με βροχή μεγαλύτερη από 1 mm	0	0	1	3	7	10	54
Μέση ένταση ανέμου (m/s)	2.6	2.5	2.3	2.3	2.4	2.9	2.5

Πίνακας 1: Κλιματικά στοιχεία της νήσου Λέσβου (πηγή: W.M.O., Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας)

Για την εξαγωγή τιμών αναφερόμενων στην περιοχή του Πλωμαρίου επιχειρήθηκε αρχικά ο συσχετισμός δεδομένων των τριών πλησιέστερων επίγειων μετεωρολογικών σταθμών (Πλιγόνι-Μυτιλήνη, Θερμή-Λέσβος και Καρδάμυλα-Χίος). Οι σταθμοί ωστόσο του Πλιγονίου και των Καρδαμύλων δεν παρείχαν επαρκή δεδομένα, λόγω της πολύ πρόσφατης θέσης τους σε λειτουργία. Τα στοιχεία επομένως του σταθμού της Θερμής Λέσβου θεωρήθηκαν τα πιο αντιπροσωπευτικά και παρατίθενται παρακάτω. Τα δεδομένα παρήχθησαν από το σταθμό της Θερμής, ο οποίος ανήκει στο δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, και προσπελάστηκαν από την ηλεκτρονική πύλη meteo.gr την οποία διατηρεί το Ε.Α.Α. Από τα παρακάτω φαίνεται καθαρά πως ο Νοέμβριος του 2018 ήταν με διαφορά ο πιο υγρός της δεκαετίας 2009-2018 με 359,6 mm συνολικής

βροχόπτωσης, ενώ ακολουθεί ο Νοέμβριος του 2016 με 223,8 mm. Ταυτόχρονα, το 2018 ήταν και συνολικά το πιο υγρό έτος της δεκαετίας.

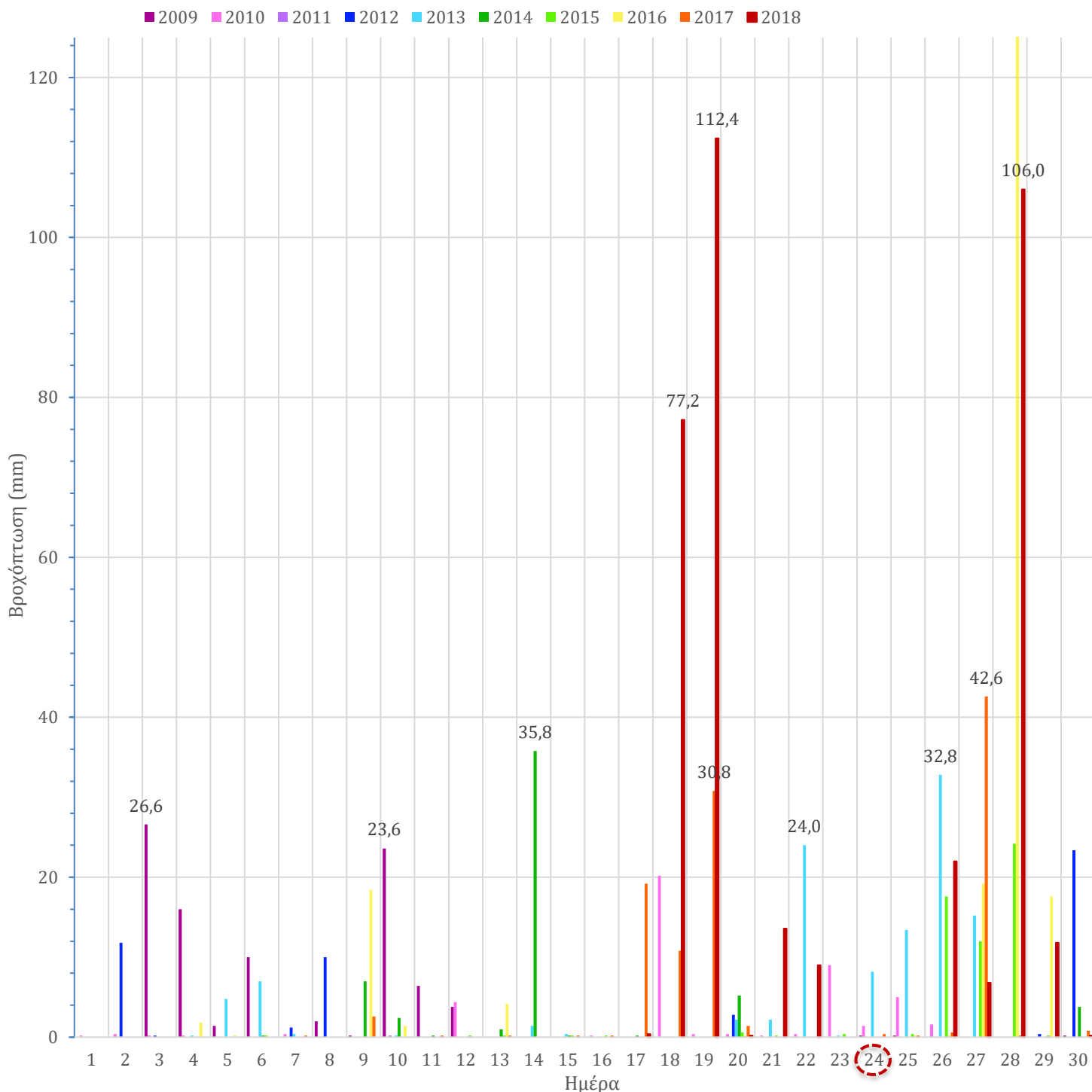
Συνολική Βροχόπτωση Νοεμβρίου & Ετήσια, 2009-2018



Εικόνα 21: Συνολική βροχόπτωση που μετρήθηκε στον μετεωρολογικό σταθμό Θερμής του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την δεκαετία 2009-2018. Με μπλε αναγράφεται η συνολική βροχόπτωση ολόκληρου του έτους ενώ με κόκκινο η συνολική βροχόπτωση του μηνός Νοεμβρίου κάθε έτους.

Όσον αφορά τις ημέρες που προηγήθηκαν της κατολίσθησης, διακρίνεται το εξαιρετικά υγρό διήμερο 18-19 Νοεμβρίου, με καταγραφές 77,2 mm και 112,4 mm βροχής αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω της απόστασης του σταθμού της Θερμής από το Πλωμάρι, τα δεδομένα αυτά δεν ανταποκρίνονται με απόλυτη αναλογία στις συνθήκες βροχής που επικράτησαν στην περιοχή της κατολίσθησης. Ενδέχεται ακόμη και οι ημέρες βροχής να ήταν ελαφρώς διαφορετικές (διαφορά μερικών ωρών, μέχρι και μιας ημέρας). Ωστόσο, όπως εξηγήθηκε παραπάνω το σφάλμα αυτό κρίνεται αποδεκτό, και επομένως τα παρατιθέμενα δεδομένα θεωρούνται επαρκώς ενδεικτικά για την περιοχή μελέτης.

Ημερήσια βροχόπτωση κατά τον μήνα Νοέμβριο , 2009-2018



Εικόνα 22: Βροχόπτωση ανά ημέρα (1η-30η) κατά τον μήνα Νοέμβριο για την δεκαετία 2009-2018, όπως μετρήθηκε από το σταθμό Θερμής, Λέσβου (δεδομένα από Ε.Α.Α.). Σημειώνονται οι υψηλότερες ημερήσιες τιμές καθώς και η ημέρα της αστοχίας (με κόκκινο κύκλο). Ξεχωρίζουν οι διαδοχικές υψηλότερες τιμές της 18^{ης} και 19^{ης} Νοεμβρίου 2018 με αθροιστικό ύψος βροχής 189,6 mm.

3. ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

3.1 Κατολισθήσεις

Στην ελληνική βιβλιογραφία, ο όρος 'κατολίσθηση' αναφέρεται σε όλων των ειδών τις κινήσεις εδαφικών ή βραχωδών πρανών, ενώ ο ακριβής ορισμός του έχει επιχειρηθεί από πολλούς ερευνητές.

Η σύγχρονη ταξινόμηση και η μελέτη τους βασίζεται στην εργασία του Varnes (Varnes, 1978):

Ο ίδιος, διακρίνει ότι ο όρος αυτός (landslide στην διεθνή βιβλιογραφία) είναι ανακριβής, αφού από τις κινήσεις αυτές, πολλές δεν περιλαμβάνουν ολίσθηση και θεωρεί ότι οι γενικότεροι όροι 'κινήσεις πρανούς' και 'απόρριψη μάζας' (slope movement, mass wasting) είναι ορθότεροι. Παρότι η παρατήρηση αυτή δεν επικράτησε πλήρως στην διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία, αξίζει να σημειώνεται για λόγους σαφήνειας και ακριβολογίας.

Το κοινό χαρακτηριστικό των κινήσεων αυτών είναι η μετάθεση κάποιας ελεύθερης μάζας (μεμονωμένων τεμαχών ή σωματίων που συμπεριφέρονται σαν ρευστό) σε σχέση με το πρανές (τροποποιημένο) και εν τέλει ο πλέον αποδεκτός ορισμός για τον όρο κατολίσθηση ως απόδοση του slope movement είναι ο εξής:

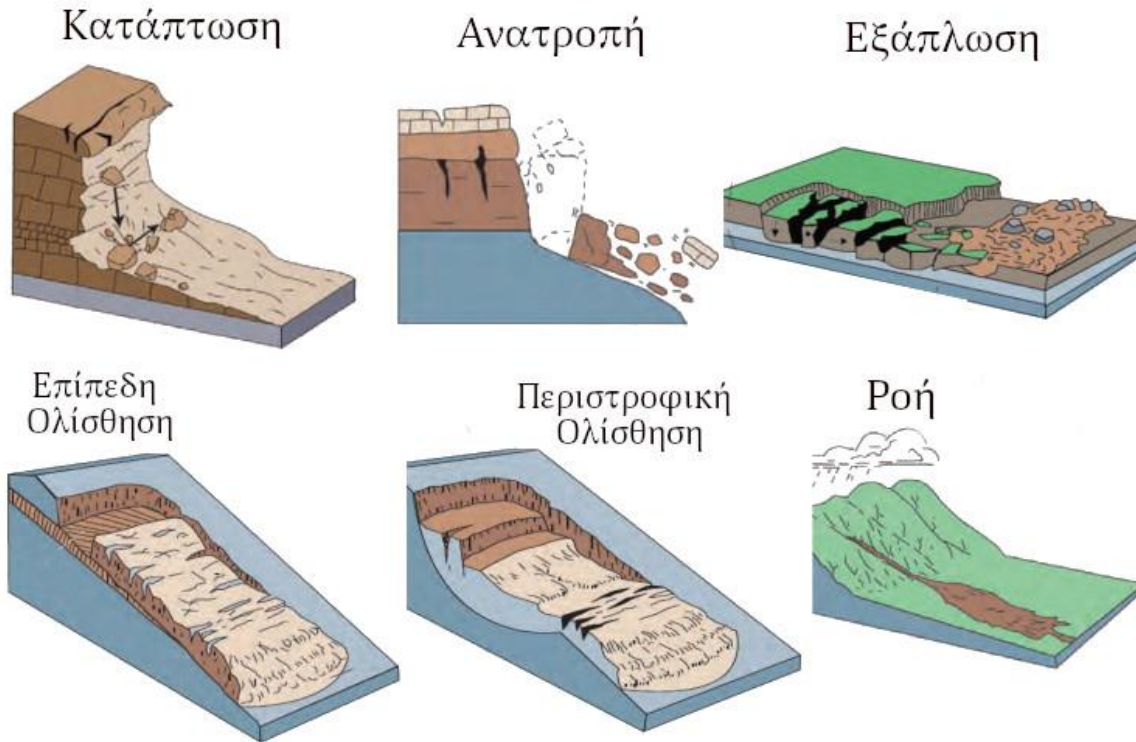
"η μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό" (μετ. (Σαμπατακάκης & Κούκης, 2007))

Η ταξινόμηση τους βασίζεται αρχικά στον τύπο του υλικού της κινούμενης μάζας και έπειτα στο είδος της κίνησης που αυτή επιτελεί. Η παρούσα εργασία εξετάζει αποκλειστικά βραχώδη υλικά και συνεπώς θα αναφερθούν μόνο συνοπτικά τύποι κινήσεων βραχωδών πρανών. Αυτοί κατά την ταξινόμηση του Varnes είναι:

- Καταπτώσεις
- Ανατροπές
- Ολισθήσεις
 - Περιστροφικές
 - Μεταθετικές
- Εξαπλώσεις
- Ροές
- Σύνθετες κινήσεις

Στην τεχνικογεωλογική μελέτη οι κινήσεις αυτές εξετάζονται ως πιθανές δομικές αστοχίες, δηλαδή ως πιθανές αστοχίες του πρανούς που προκύπτουν

λόγω της δομής του (των συστημάτων ασυνεχειών και του σχετικού προσανατολισμού τους).



Εικόνα 23: Μηχανισμοί κατολισθήσεων σε βραχώδη πρανή κατά Varnes

3.2 Συντελεστής Ασφαλείας

Η έννοια του Συντελεστή Ασφαλείας προτάθηκε από τους Hoek και Bray (Hoek & Bray, 1981) για την αριθμητική αξιολόγηση της ευστάθειας ενός τεμάχους βράχου, η οποία εξεταζόταν (μέχρι τότε) με εξισώσεις στατικής και δυναμικής ισορροπίας (Giani, 1992). Ο συντελεστής ασφαλείας εκφράζεται ως η συνισταμένη δύναμη που αντιστέκεται στην ολίσθηση του τεμάχους προς την συνισταμένη δύναμη που τείνει να προκαλέσει την ολίσθηση του. Ισοδύναμα μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση τάσεων, οπότε ισούται με την μέγιστη διατμητική αντοχή σε κίνηση της εν δυνάμει επιφάνειας ολίσθησης προς την διατμητική τάση που τείνει να προκαλέσει την κίνηση αυτή.

$$F = \frac{\Sigma F_{Resisting}}{\Sigma F_{Driving}} = \frac{\tau_{mobilizable}}{\tau_{mobilized}}$$

Ο ορισμός του Συντελεστή Ασφαλείας επιτρέπει μια απλή, μαθηματικά, προσέγγιση της κατάστασης οριακής ισορροπίας σε ένα πρανές, και άρα τον προσδιορισμό των **οριακών τιμών** των παραμέτρων που καθορίζουν την ευστάθεια του πρανούς αυτού, λ.χ. την μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκεί το νερό σε συνθήκες οριακής ισορροπίας ή την μέγιστη σεισμική επιτάχυνση. Η κατάσταση οριακής ισορροπίας, προφανώς, περιγράφεται από έναν οριακό Συντελεστή Ασφαλείας, $F = 1$.

3.3 Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων (3D Point Cloud)

Τα τρισδιάστατα νέφη σημείων αποτελούν ένα πλέον σύγχρονο εργαλείο για την αποτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων και δομών και την απεικόνιση και επεξεργασία τους σε Η/Υ. Ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων αποτελεί απλώς ένα σύνολο σημείων στον χώρο. Πρακτικά είναι ένα αρχείο το οποίο περιέχει πληροφορίες XYZ για κάθε μη κενό σημείο σε έναν χώρο. Κάθε σημείο μπορεί να φέρει επιπλέον πληροφορία όπως χρώμα (RGB), ένταση ανάκλασης (αν το νέφος προέκυψε από επίγειο σαρωτή LiDAR), κατηγοριοποίηση (classification) και λοιπά. Κατά την επεξεργασία νεφών σημείων, συνηθίζεται η χρήση αριθμητικών πεδίων, δηλαδή η απόδοση τιμών για διάφορες μεταβλητές ενδιαφέροντος, σε κάθε σημείο. Έτσι κάθε σημείο φέρει τιμές για διάφορα μεγέθη που αφορούν την εκάστοτε μελέτη και γράφεται με τη μορφή:

Σημείο n	X_n	Y_n	Z_n	K_n	Λ_n	M_n
------------	-------	-------	-------	-------	-------------	-------

όπου X_n , Y_n , Z_n οι συντεταγμένες του, και K_n , Λ_n , M_n τρία μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην μελέτη που γίνεται επί του νέφους. Συχνά, υπολογίζεται για κάθε σημείο το κάθετο προς την γειτονιά του διάνυσμα, και παράγεται ένα νέο νέφος όπου κάθε σημείο φέρει πληροφορίες για τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος αυτού, ως:

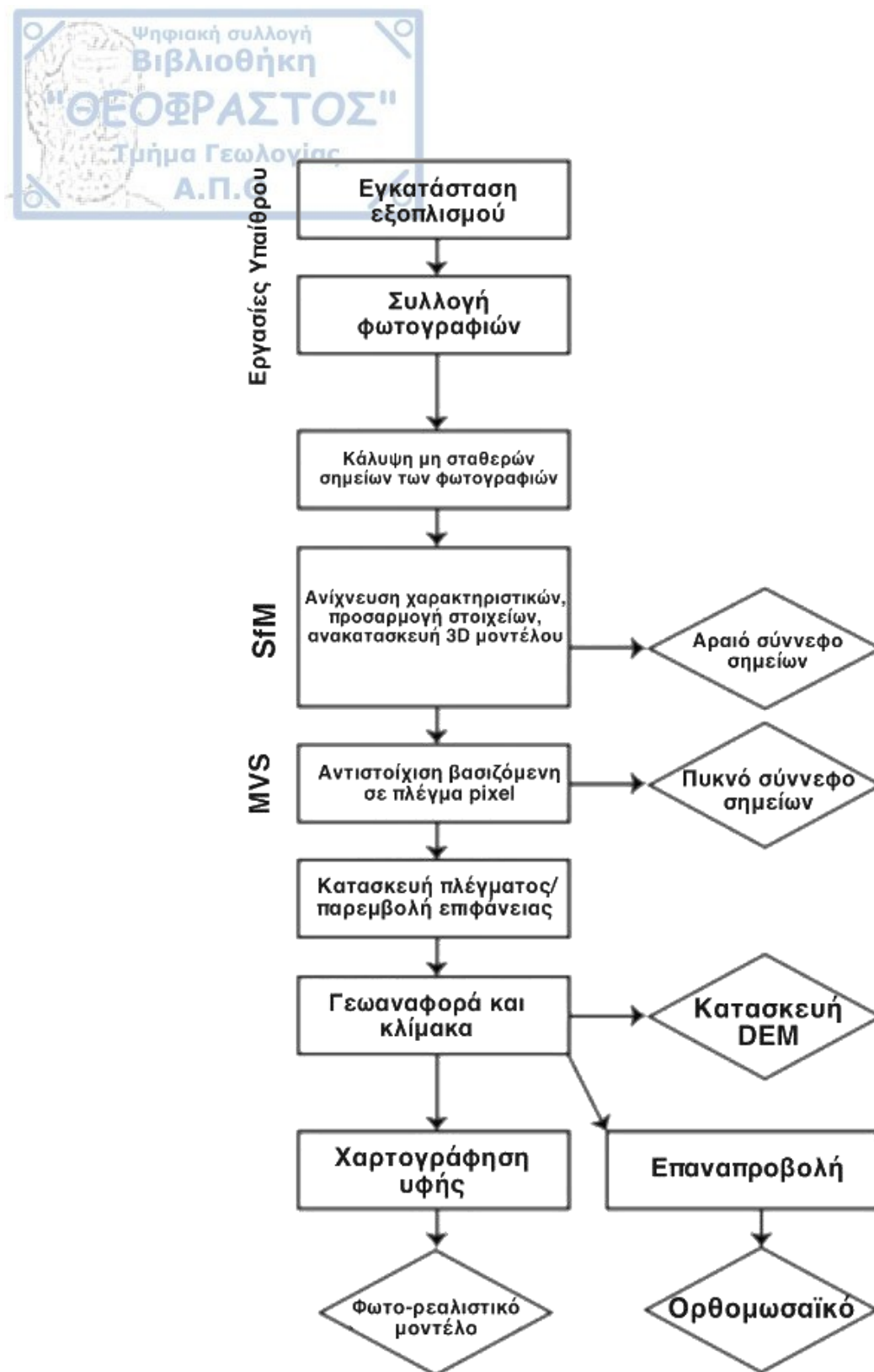
Σημείο n	X_n	Y_n	Z_n	N_x	N_y	N_z
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

όπου N_x , N_y , N_z οι συντεταγμένες του κάθετου διανύσματος.

3.4 Φωτογραμμετρία – Structure From Motion (SfM)

Κατά την Αμερικανική Εταιρεία Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης, η φωτογραμμετρία είναι η τέχνη, επιστήμη και τεχνολογία της απόληψης αξιόπιστων πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον μέσω της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων, μοτίβων εικόνων που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και άλλων φαινομένων. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση αλγορίθμων Structure From Motion και Multi View Stereo. Η τεχνική Structure From Motion (SfM) είναι μια εδραιωμένη τεχνική για την απόληψη τρισδιάστατων γεωμετρικών προσομοιωμάτων (σημειακών νεφών) από φωτογραφικές απεικονίσεις, ενώ η Multi View Stereo συντελεί στην πύκνωση των νεφών αυτών.

Συνοπτικά, το αντικείμενο-στόχος φωτογραφίζεται από έναν οπτικό αισθητήρα ο οποίος κινείται σε σχέση με τον στόχο, λαμβάνοντας διαδοχικές, αλληλεπικαλυπτόμενες εικόνες. Η λογική της σύνθεσης του τρισδιάστατου μοντέλου βασίζεται στον εντοπισμό κοινών σημείων σε ζεύγη φωτογραφιών και την διαπίστωση της μεταβολής των σχετικών αποστάσεων των σημείων αυτών από ένα σταθερό σημείο. Η σύγκριση αλληπάλληλων ζευγών που περιέχουν το ίδιο ταυτοποιημένο σημείο παράγει μια τροχιά κίνησης του σημείου αυτού από φωτογραφία σε φωτογραφία. Από την τροχιά αυτή εξάγεται η τελική θέση του σημείου στον τρισδιάστατο χώρο.



Εικόνα 24: Διαδικασία αποτύπωσης ενός πρανούς με τεχνικές φωτογραμμετρίας, από (Bemis, et al., 2014) , μετ. (Κωνσταντινίδης, 2019)



4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1.1 Έρευνα Πεδίου

Για την αξιολόγηση των συνθηκών, της γεωμετρίας και του μηχανισμού της εκδηλωθείσας βραχώπτωσης πραγματοποιήθηκε επιτόπια έρευνα 8 ημέρες μετά το συμβάν. Αυτή περιέλαβε τις τυπικές εργασίες μιας υπαίθριας τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης, με την διαφορά πως στην εν λόγω περίπτωση ο σκοπός τους ήταν η ανάστροφη ανάλυση και η τεχνικογεωλογική μοντελοποίηση μιας παρελθούσας αστοχίας. Ο χρόνος διεξαγωγής της, σε άμεση, κατά το δυνατό, απόκριση στο γεγονός, λογίζεται κρίσιμος, ταυτόχρονα ωστόσο, άφησε μικρό περιθώριο οργάνωσης της έρευνας και βιβλιογραφικής προεργασίας. Κατά την διάρκεια της υπαίθριας εργασίας πραγματοποιήθηκε μικροτεκτονική μελέτη για τον καθορισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών, την συλλογή στατιστικά επαρκούς δείγματος των στοιχείων προσανατολισμού τους και τον εντοπισμό επιπρόσθετων τεκτονικών στοιχείων (ρήγματα, γραμμώσεις). Μελετήθηκε η κατάσταση των ασυνεχειών, το άνοιγμα τους, η εμμονή, η ύπαρξη και φύση υλικού πλήρωσης, η παρουσία νερού και η τραχύτητα των επιφανειών τους. Πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις αναπηδήσεων με σφύρα Schmidt τύπου L για την αξιολόγηση της αντοχής των τοιχωμάτων των ανοικτών ασυνεχειών.



Εικόνα 25: Μέτρηση στοιχείων προσανατολισμού επιφανειών

4.1.2 Πρόγραμμα Εικονοληψίας από πτήση UAV

4.1.2.1 Διασφάλιση πληρότητας πρωτογενών δεδομένων

Η επιστράτευση ενός προγράμματος εικονοληψίας από UAV για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων μεγάλης ακρίβειας είναι μια σχετικά απλή και γρήγορη διαδικασία, απαιτεί ωστόσο άριστη γνώση των περιορισμών και των παραμέτρων που καθορίζουν την αξιοπιστία των παραχθέντων δεδομένων. Η γνώση αυτή θα πρέπει να συνδυάζεται και με την εξέταση των κατά περίπτωση επιτόπιων συνθηκών της περιοχής έρευνας, με σκοπό τα αποληφθέντα δεδομένα να είναι πλήρη, αξιόπιστα και ικανά να παρέχουν, μετά την επεξεργασία τους, τις πληροφορίες στις οποίες το εκάστοτε ερευνητικό έργο αποσκοπεί. Δύο είναι τα θέματα που προκύπτουν κατά το στάδιο της συλλογής δεδομένων με UAV:

- Η εμπλοκή ψηλής βλάστησης ανάμεσα στον στόχο και τον οπτικό δέκτη
- Η έμφραξη: το φαινόμενο της έμφραξης είναι ένα κοινό θέμα που χρήζει προσοχής τόσο σε έρευνα με επίγειους σαρωτές laser (TLS/LiDAR) όσο και σε έρευνες με UAV. Το πρόβλημα έγκειται στην αποτύπωση επιφανειών παράλληλων ή υποπαράλληλων στο οπτικό επίπεδο του δέκτη (Lato et al., 2009) . Οι επιφάνειες αυτές εμφανίζονται στα τελικά νέφη σημείων σαν σκιερές ζώνες.

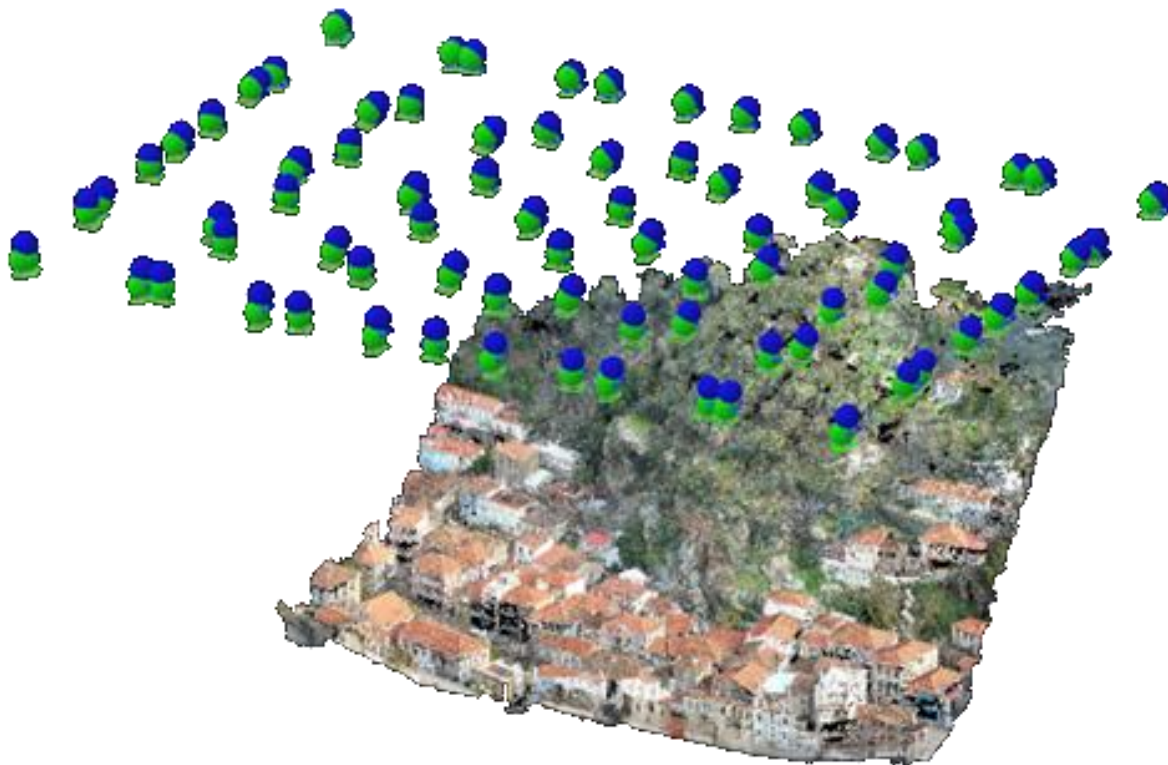
Τα δύο αυτά θέματα δεν αποτελούν προβλήματα, παρά σημεία που χρήζουν προσοχής και εύκολα αποφεύγονται με σωστό σχεδιασμό των εργασιών αποτύπωσης

4.1.2.2 Συλλογή Δεδομένων στο υπό μελέτη πρανές

Το μέτωπο του πρανούς αποτυπώθηκε από αέρος με την διεξαγωγή δύο πτήσεων διάρκειας 20 λεπτών, με όχημα DJI Phantom 4 Pro, εξοπλισμένο με συστήματα φωτογραφικής κάμερας με τριαξονική καρδανική ανάρτηση και Real Time Kinematic (RTK) GPS για την ακριβή γεωαναφορά των φωτογραφιών σε πραγματικό χρόνο. Το πρόγραμμα των πτήσεων πραγματοποιήθηκε βάσει προκαθορισμένου σχεδίου για την απόληψη επαρκούς δειγματος φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης εντός του δυνατού χρόνου πτήσης και την διασφάλιση της επιθυμητής Απόστασης Δειγματοληψίας Εδάφους (Ground Sampling Distance). Η απόσταση αυτή εκφράζει την πραγματική (μετρημένη επί του εδάφους) απόσταση των κέντρων δύο γειτονικών εικονοστοιχείων (pixel) της τελικής φωτογραφίας. Κατά την πρώτη πτήση το όχημα διατήρησε σταθερό ύψος πτήσης στα 60m πραγματοποιώντας διαδοχικές λήψεις με μεταξύ τους αλληλεπικάλυψη 70-80%. Κατά την δεύτερη πτήση το όχημα κινήθηκε σε τροχιά επί επιπέδου

Εικόνα 26: Κύριες θέσεις εικονοληψίας πάνω από το πρανές

κάθετου ως προς το επίπεδο της πρώτης πτήσης, ξεκινώντας από το έδαφος και σταδιακά φτάνοντας το ύψος των 60m. Η παραπάνω διάρθρωση του σχεδίου πτήσης διασφάλισε την παραγωγή κατάλληλου δείγματος φωτογραφιών για την μετέπειτα επεξεργασία.



4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.2.1 Παραγωγή Τρισδιάστατου Νέφους Σημείων

Για την παραγωγή ενός τρισδιάστατου νέφους σημείων εφαρμόστηκαν τεχνικές Structure from Motion (SfM) και Multi View Stereo (MVS) φωτογραμμετρίας. Κατά την ερευνητική πτήση που πραγματοποιήθηκε, παρήχθησαν περί τις 340 έγχρωμες φωτογραφίες ανάλυσης 4096×2160 pixel. Από αυτές, 200 φωτογραφίες επιλέχθηκαν ως input στο φωτογραμμετρικό λογισμικό Pix4D Mapper. Για τον λογισμό ενός εικονοστοιχείου (pixel) ως συμπεριληφθέντος στο τελικό νέφος σημείων, ορίστηκε ένας ελάχιστος αριθμός ταυτίσεων αυτού σε τρεις (3) φωτογραφίες, με αποδεκτό Παράγοντα Ομοιότητας 2. Το παραχθέν νέφος σημείων αποτελείται από 48.600.000 σημεία με στοιχεία θέσης (XYZ) και χρώματος (RGB) και αξιολογείται ως επαρκώς



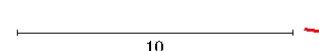
πυκνό. Επιπλέον παρήχθη τρισδιάστατο τριγωνικό mesh μοντέλο και Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM) με ανάλυση 0.66 cm/pixel.

4.2.2 Επεξεργασία του Τρισδιάστατου Νέφους Σημείων

Η βασική επεξεργασία του παραχθέντος νέφους σημείων έγινε στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα (GPL) Cloud Compare. Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας απομονώθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος, και συγκεκριμένα το καθαρό βραχώδες μέτωπο του πρανούς. Από το τμήμα αυτό απομακρύνθηκαν, στο μέτρο του δυνατού, τα σημεία που δεν αντιπροσωπεύουν τμήματα του βράχου. Η συγκεκριμένη περιοχή αποδείχθηκε απαιτητική, αφού το πρανές είναι σχετικά μικρό, χωρίς πολλές μεγάλες εκτεθειμένες βραχώδεις επιφάνειες και με έντονη βλάστηση ακόμη και στα πιο απότομα σημεία του. Η βραχώμαζα επίσης εμφανίζεται κατατεμαχισμένη, δημιουργώντας πλήθος μικρών επιφανειών διαφόρων διευθύνσεων, και φέρει σημαντική την επίδραση της διάβρωσης στα λιγότερο "φρέσκα" σημεία της εμφάνισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά κατέστησαν δύσκολη την εφαρμογή της καθιερωμένης μεθοδολογίας, η οποία εκμεταλλεύεται μεγάλες, σχετικά επίπεδες και καθαρές επιφάνειες για να εκτελέσει διανυσματικούς υπολογισμούς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έγινε λεπτομερής καθαρισμός και τμηματική αφαίρεση περιοχών από το νέφος σημείων, με φροντίδα να μη χαθούν, συστηματικά, επιφάνειες ορισμένων προσανατολισμών.



Εικόνα 27: Το αρχικό νέφος σημείων (κομμένο στην θέση του πρανούς)



Εικόνα 28: Το τελικό νέφος που χρησιμοποιήθηκε για την τεκτονική ανάλυση, αποτελούμενο μόνο από τις καθαρές βραχώδεις επιφάνειες

4.2.3 Εξαγωγή Τεχνικογεωλογικών Πληροφοριών

Οι βασικές τεχνικογεωλογικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας και την αξιολόγηση της περαιτέρω ευστάθειας του πρανούς μπορούν να εξαχθούν κατά την συμβατική μέθοδο με την αυτοψία και την χειροκίνητη συλλογή στοιχείων των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων της βραχώμαζας. Ο σκοπός ωστόσο της παρούσας εργασίας είναι να αξιοποιήσει στο έπακρο τα ακριβή ψηφιακά δεδομένα που παρήχθησαν με την χρήση του UAV και τις δυνατότητες επεξεργασίας τους, σε συνδυασμό με τα συμβατικά δεδομένα υπαίθρου, από ειδικά λογισμικά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Θεωρήθηκε επομένως βέλτιστος ο συνδυασμός των πληροφοριών που προέκυψαν από τις δύο διαδικασίες, πάντα υπό την επίβλεψη της ανθρώπινης κρίσης (engineering judgement). Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία με την οποία εκμαιεύθηκαν οι επιθυμητές πληροφορίες από τα

παραχθέντα ψηφιακά δεδομένα, τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και τα σημεία εκείνα που έχρησαν προσοχής.

4.2.3.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Επιφανειών

Για την εξαγωγή των στοιχείων προσανατολισμού των επιφανειών ασυνεχειών της βραχώμαζας (Γωνία Κλίσης/Κατεύθυνση Κλίσης) ακολουθήθηκε η μεθοδολογία των Riquelme et al. (Riquelme A. J., 2014) . Συνοπτικά, στα πλαίσια μιας ημι-αυτοματοποιημένης διαδικασίας, για κάθε σημείο του νέφους προσδιορίζονται τα k-πλησιέστερα γειτονικά σημεία και γίνεται έλεγχος της συνεπιπεδότητας του αυτού σημείου και των γειτονικών του. Τα σημεία που δεν εντάσσονται σε κάποιο σύνολο συνεπίπεδων σημείων απορρίπτονται και ακολούθως προσδιορίζονται οι εξισώσεις των βέλτιστων επιπέδων που ορίζονται από τα σύνολα τα οποία έχουν προσδιορισθεί. Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν στην επιφάνεια της ασυνέχειας, τοπικά, κοντά στο εκάστοτε σημείο, όπως αυτή ορίζεται σε τριδιάστατο χώρο με το σύστημα αναφοράς στο οποίο μετράται και το νέφος.

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

Το αρχικό νέφος αποτελείται από σημεία με πληροφορία θέσης και χρώματος (XYZRGB). Σε κάθε σημείο που κατατάσσεται σε ένα επίπεδο προστίθεται μια επιπλέον πληροφορία ABCD, όπου A,B,C,D οι συντελεστές της εξίσωσης του επιπέδου. Κατά τον φορμαλισμό αυτό, το διάνυσμα N, με:

$$\vec{N} = A\vec{i} + B\vec{j} + C\vec{k}$$

είναι το κάθετο προς το επίπεδο διάνυσμα. Ο συντελεστής D αντιπροσωπεύει την απόσταση του επιπέδου από την αρχή των αξόνων (εδώ, του σημείου αναφοράς του γεωδαιτικού συστήματος WGS84). Οι προσανατολισμοί των επιπέδων που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία αντιπροσωπεύουν μετρήσεις ασυνεχειών που, σε ιδανικές συνθήκες, θα μπορούσαν να έχουν αποκτηθεί με γεωλογική πυξίδα (Φαρμάκης, 2018). Τελικώς, υπολογίζονται σε στερεοδιάγραμμα οι πόλοι των διαφόρων επιπέδων, και προσδιορίζονται με ανάλυση της πυκνότητας τους (καθώς θα γινόταν σε ένα συμβατικό, αναλογικό στερεοδιάγραμμα Schmidt) οι οικογένειες των ασυνεχειών και τα στοιχεία προσανατολισμού της κάθε μίας. Πρακτικά, στο στάδιο αυτό, κάθε σημείο αντιπροσωπεύει μια μέτρηση επιφάνειας. Ως εκ τούτου, η πυκνότητα των πόλων μιας οικογένειας στο στερεοδιάγραμμα είναι γραμμική συνάρτηση του αριθμού των σημείων του νέφους που αντιστοιχούν στην επιφάνεια αυτή. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι επιφάνειες που δεν εκφράζονται καλά στο μέτωπο του πρανούς, λόγω έμφραξης, προσανατολισμού του μετώπου ή

άλλων αιτιών, εμφανίζονται με μη αντιπροσωπευτική πυκνότητα πόλων στο στερεοδιάγραμμα. Το ζήτημα αυτό αναλύεται περαιτέρω παρακάτω.

Κάθε σημείο που ανήκει σε κάποια οικογένεια ασυνεχειών χαρακτηρίζεται με έναν δείκτη J_s για την αντίστοιχη οικογένεια. Με το πέρας της διαδικασίας επομένως, έχει παραχθεί ένα νέφος σημείων με πληροφορίες XYZRGB- J_s . Στην παρούσα εργασία, για την διασφάλιση μεγαλύτερου στατιστικού δείγματος επιφανειών, έγινε ανάλυση τόσο του κατολισθαίνοντος πρανούς όσο και του γειτονικού του προς ανατολικά μετώπου.

Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας αυτής, τα στοιχεία των οικογενειών που έχουν προσδιοριστεί προβάλλονται σε στερεοδιάγραμμα και συγκρίνονται με τις μετρήσεις πεδίου για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα τους.

4.2.3.2 Απόσταση Κύριων Οικογενειών Ασυνεχειών

Η απόσταση των μεταξύ των ασυνεχειών αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική τεχνικογεωλογική παράμετρο, αφού ελέγχει το μέγεθος των τεμαχών στα οποία αποχωρίζεται η βραχώμαζα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002). Εντούτοις, στην βιβλιογραφία και πρακτική, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση τόσο του ορισμού της απόστασης των ασυνεχειών όσο και της μεθόδου μέτρησης. Κατά την ISRM, η απόσταση των ασυνεχειών μιας οικογένειας είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ασυνέχειες της οικογένειας αυτής, κατά μήκος μιας επιλεγμένης γραμμής σάρωσης (I.S.R.M., 1977). Κατά τον Palmstrom (Palmstrom, 2001) η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών μιας οικογένειας είναι η κάθετη (ή ελάχιστη) απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της οικογένειας αυτής.

Στην παρούσα εργασία, σε συνέχεια της προηγούμενης παραγράφου περί στοιχείων προσανατολισμού, εφαρμόσθηκε η μέθοδος των Riquelme et al. (Riquelme et al., 2015) για την εκτίμηση της απόστασης των ασυνεχειών των επιμέρους οικογενειών. Η απόσταση η οποία υπολογίζεται από αυτήν, είναι η Μέση Κάθετη Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της κάθε οικογένειας. Για κάθε οικογένεια προκύπτουν δύο τελικές τιμές, οι οποίες αναφέρονται σε απόσταση μεταξύ συνεχών (με εμμονή) και μη-συνεχών (χωρίς εμμονή) ασυνεχειών.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας, είναι ο προσδιορισμός των επιμέρους επιφανειών των ασυνεχειών, ο οποίος γίνεται με την διεξαγωγή ανάλυσης κατά συστάδες (Cluster Analysis). Τα σημεία κάθε οικογένειας έτσι ομαδοποιούνται σε συστάδες οι οποίες αντιστοιχούν σε επιφάνειες. Στο σημείο αυτό γίνεται η παραδοχή πως όλες οι επιφάνειες μια οικογένειας είναι εντελώς παράλληλες και όλες οι συστάδες της ίδιας οικογένειας παίρνουν κοινούς συντελεστές A, B, C και κάθε μια έναν ξεχωριστό συντελεστή θέσης D. Κάθε σημείο μιας συστάδας παίρνει έναν δείκτη για την συστάδα στην

οποία ανήκει, J_c (και περιέχει πλέον πληροφορία XYZRGB- J_s - J_c). Με την παραπάνω παραδοχή, κάθε οικογένεια ασυνεχειών αποτελείται πλέον από παράλληλες επιφάνειες με κοινό προσανατολισμό και διαφορετική απόσταση από την αρχή των αξόνων (D). Οι συντελεστές D κάθε οικογένειας ταξινομούνται με αύξουσα σειρά και δημιουργείται η λίστα D_{sorted} . Δημιουργείται ένα σύνολο R το οποίο περιέχει όλα τα σημεία εκτός από αυτά που ανήκουν στην πρώτη συστάδα, και για κάθε σημείο της τελευταίας βρίσκεται το κοντινότερο του σημείο που ανήκει στο σύνολο R . Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί στην κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών της οικογένειας. Στο επόμενο βήμα, τα σημεία της συστάδας που αναλύθηκε εξαιρούνται από το σύνολο R και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογιστούν οι αποστάσεις για όλες τις συστάδες. Υπολογίζεται μέσω KDF (Kernel Density Function) η κανονική κατανομή των αποτελεσμάτων των αποστάσεων για την κάθε οικογένεια και η μέση τιμή (mean) λογίζεται ως η ζητούμενη Μέση Κάθετη Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται με και χωρίς την παραδοχή της εμμονής κάθε επιφάνειας στον χώρο, και δίνονται τελικώς δύο τιμές απόστασης για κάθε ένα από τα δύο σενάρια (Με Εμμονή/Χωρίς Εμμονή) .

4.2.3.3 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ασυνεχειών -Αντοχή

Η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών απαιτεί την εκτίμηση της αντοχής τους, σύμφωνα με κάποιο εδραιωμένο πρότυπο έκφρασης αυτής. Η αντοχή των ασυνεχειών, όπως και αυτή ενός οποιουδήποτε υλικού, εκφράζεται ως συνάρτηση των τάσεων που εφαρμόζονται σε αυτές, σύμφωνα με έναν μαθηματικό φορμαλισμό που περιγράφεται ως Κριτήριο Αστοχίας. Στις πρακτικές της τεχνικής γεωλογίας και γεωτεχνικής μηχανικής, για τις ασυνέχειες της βραχώμαζας έχει καθιερωθεί το κριτήριο αστοχίας Barton-Bandis (Barton & Bandis, 1990):

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2)$$

Για την έκφραση του κριτηρίου χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (JRC , JCS) όπως προέκυψαν από την υπαίθρια έρευνα, σε συνδυασμό με βιβλιογραφικά δεδομένα. Οι επιτόπου τάσεις στο στάδιο αυτό εκτιμήθηκαν από την απλή εξίσωση:

$$\sigma_n = \gamma * h \quad (3)$$

Όπου γ είναι το ειδικό βάρος του υλικού και h το ύψος των υπερκειμένων στο επίπεδο που υπολογίζεται η σ_h . Στην παρούσα μελέτη ως h θεωρήθηκε η υψομετρική διαφορά της κλιτύος από την βάση του πρανούς, 30m πάνω από την στέψη του.

4.2.4 Ανάστροφη Ανάλυση Δυνάμεων

Η πλήρης περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας απαιτεί την εκτίμηση της εντατικής κατάστασης της βραχώμαζας στην οριακή κατάσταση πριν από την εκδήλωση αυτής. Η γνώση της γεωμετρίας και των μηχανικών χαρακτηριστικών της δομής επιτρέπει την κατασκευή ενός επαρκούς τεχνικογεωλογικού προσομοιώματος του πρανούς σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Από αυτό, με μικρές μεταβολές μέρους ή όλων των δρώντων δυνάμεων μπορεί να εκτιμηθεί ποιος είναι ο πιθανός παράγοντας εναύσματος μετακίνησης. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα τέτοιο στοχαστικό προσομοίωμα το οποίο αναλύθηκε υπό την συνθήκη οριακού συντελεστή ασφαλείας ($F \leq 1$)

Για τη μηχανική μελέτη της διάταξης αυτής είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των παρακάτω βασικών παραμέτρων:

1. Όγκος του τεμάχους και ισοδύναμα η μάζα του, που καθορίζει το μέτρο της δύναμης του βάρους
2. Εμβαδό επιφάνειας επαφής της ασυνέχειας, που καθορίζει το μέτρο της πίεσης του νερού και της διατμητικής τάσης επί της επιφάνειας.

Οι δύο αυτές παράμετροι έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση καθότι: Η οριζόντια συνιστώσα του βάρους αποτελεί την σημαντικότερη δύναμη ώθησης, ενώ η διατμητική τάση ελέγχει την πιθανή αστοχία λόγω θραύσης των ασπεριτών της ασυνέχειας. Η μεταβολή της πίεσης του νερού αποτελεί το πιθανότερο αίτιο εναύσματος μετακίνησης και σκοπός της παραπάνω διαδικασίας είναι η αξιολόγηση της επίδρασης αυτής στην δημιουργία συνθήκης αστοχίας (ή ισοδύναμα η ταυτοποίηση της ως παράγοντα εναύσματος μετακίνησης) όσο και η διερεύνηση της πιθανής ύπαρξης συνοχής στην επιφάνεια της ασυνέχειας.

4.2.4.1 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας έγινε με την ακόλουθη λογική:
Η ορθή τάση που ασκείται στην επιφάνεια της ασυνέχειας είναι ίση με την συνισταμένη ορθή δύναμη προς την επιφάνεια επί της οποίας αυτή δρα, δηλαδή:

$$\sigma_n = \frac{(W \sigma_{\nu\alpha}) - U}{A} \quad (4)$$

όπου W το βάρος του τεμάχους, α η γωνία κλίσης της ασυνέχειας, U η ορθή δύναμη που ασκεί το νερό εντός της ασυνέχειας και A η επιφάνεια της

Επομένως, η ολική διατμητική τάση που αναπτύσσεται και αντιστέκεται στην ολίσθηση, με βάση την θεώρηση του μοντέλου των Barton και Bandis, θα είναι:

$$\tau = c + \frac{W \sigma_{\nu\alpha}}{A} * \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\frac{W \sigma_{\nu\alpha}}{A}} \right) \right] \quad (5)$$

Και άρα, η συνισταμένη διατμητική δύναμη που αντιστέκεται στην ολίσθηση θα είναι:

$$F_{Resisting} = \tau * A = cA + (W \sigma_{\nu\alpha} - U) * \tan \left\{ \varphi_b + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS A}{(W \sigma_{\nu\alpha}) - U} \right] \right\} \quad (6)$$

Η μόνη δύναμη που τείνει να προκαλέσει την ολίσθηση είναι η οριζόντια συνιστώσα του βάρους, και άρα ο Συντελεστής Ασφαλείας εκφράζεται ως:

$$F = \frac{\Sigma F_{Resisting}}{\Sigma F_{Driving}} = \frac{cA + (W \sigma_{\nu\alpha} - U) * \tan \left\{ \varphi_b + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS A}{(W \sigma_{\nu\alpha}) - U} \right] \right\}}{W \eta\mu\alpha} \quad (7)$$

4.2.4.2 Εμβαδό Επιφάνειας Επαφής και Μέγεθος Τεμάχους

Η επιφάνεια επί της οποίας δρα η στατική τριβή καθορίζει το μέτρο της τελευταίας. Η επιφάνεια αυτή οριοθετήθηκε από παρατηρήσεις πάνω στο πρανές και μετρήθηκε με ακρίβεια σε τρισδιάστατο χώρο, απευθείας από το νέφος σημείων.

Το μέγεθος και η γεωμετρία του απορριφθέντος τεμάχους εκτιμήθηκαν από παλαιότερες φωτογραφίες της θέσης, και η ανακατασκευή του βασίστηκε στην διαστασιολόγηση της 'φρέσκιας' επιφάνειας ολίσθησης (failure plane) μέσα από το νέφος σημείων. Το μέτρο μεγέθους που απαιτείται για την παρούσα διερεύνηση είναι ο όγκος, αφού από αυτόν θα προκύψει η μάζα και εν τέλει το μέτρο της βαρυτικής δύναμης που δρούσε επί του τεμάχους πριν την αστοχία. Πρακτικά, πρέπει να δημιουργηθεί μια μήτρα, η οποία αντιπροσωπεύει τον αρνητικό χώρο που δημιουργήθηκε από την απόρριψη του τεμάχους, ή ισοδύναμα τον χώρο που καταλάμβανε το τέμαχος πριν αστοχήσει.

Σε μια γενική περίπτωση (Dong, 2019), όπου η γεωμετρία του πρανούς πριν την αστοχία είναι εντελώς άγνωστη, η κατασκευή αυτής της μήτρας αποτελεί την πιο απλή γεωμετρική ανακατασκευή του τεμάχους. Σύμφωνα με την Θεωρία Τεμάχους (Goodman, 1995) η ανακατασκευή αυτή βασίζεται στην απλή προεκβολή της γεωμετρίας με βάση τις εκτεθειμένες επιφάνειες ασυνεχειών στις οποίες το τέμαχος στηριζόταν προ-αστοχίας, υπό την καθοδήγηση βέβαια της τεχνικής κρίσης (engineering judgement).

Στην συγκεκριμένη μελέτη ωστόσο, οι έρευνες πεδίου που πραγματοποιήθηκαν μετά τον σεισμό του 2016 συνέβαλαν σε ένα στοιχειώδες ποσό πληροφορίας σχετικά με την γεωμετρία του τεμάχους, μέσα από φωτογραφίες του πρανούς το καλοκαίρι του 2016. Αυτό επέτρεψε την βελτίωση της εκτιμώμενης μήτρας, αφού έγινε δυνατό να καθοριστούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αρνητικού χώρου, δηλαδή χαρακτηριστικά γεωμετρίας του τεμάχους που δεν αποτυπώνονται στην επαφή του με το πρανές, αλλά οριοθετούν την ελεύθερη επιφάνεια του.

Το κατολισθαίνον τέμαχος αποτελεί ένα στερεό που προσεγγίζει παραλληλεπίπεδο, του οποίου μία έδρα είναι με βεβαιότητα γνωστή, αφού ταυτίζεται με την επιφάνεια που αποκαλύφθηκε μετά την αστοχία. Η έδρα αυτή δίνει κατά προσέγγιση το ύψος και πλάτος του τεμάχους. Η τρίτη του διάσταση εκτιμάται με την ερμηνεία των φωτογραφιών σε συνδυασμό με μερικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς γύρω από την ζώνη της αστοχίας. Επιπλέον, σύμφωνα με περιγραφές των κατοίκων, υπήρχε μια σαφής υποσκαφή του πρανούς στην βάση του, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την διαπίστωση αρνητικής κλίσης του μετώπου του στις φωτογραφίες. Η ανακατασκευή του όγκου αυτού έγινε πάνω στο τρισδιάστατο νέφος σημείων σε περιβάλλον AutoCAD και ανήχθη σε όψη, τομή και κάτοψη.



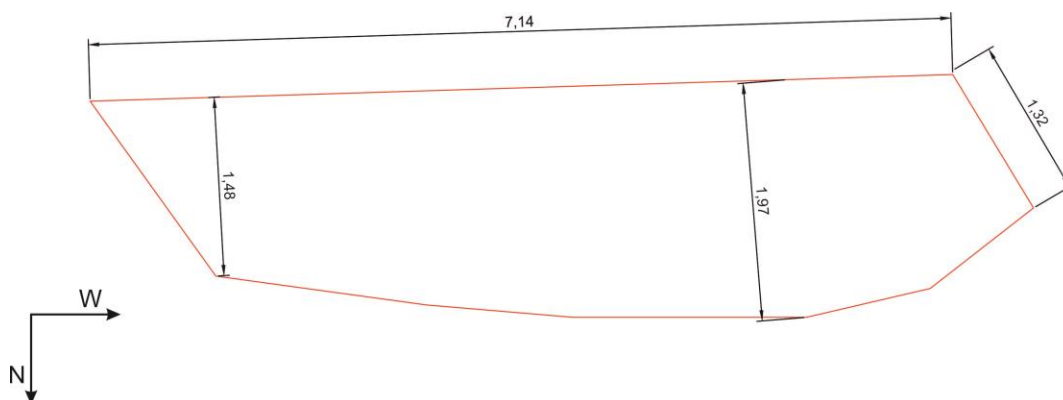
Εικόνα 29: Γεωμετρία αρνητικού όγκου του κατολισθαίνοντος τεμάχους (με πράσινες γραμμές), πλάγια όψη



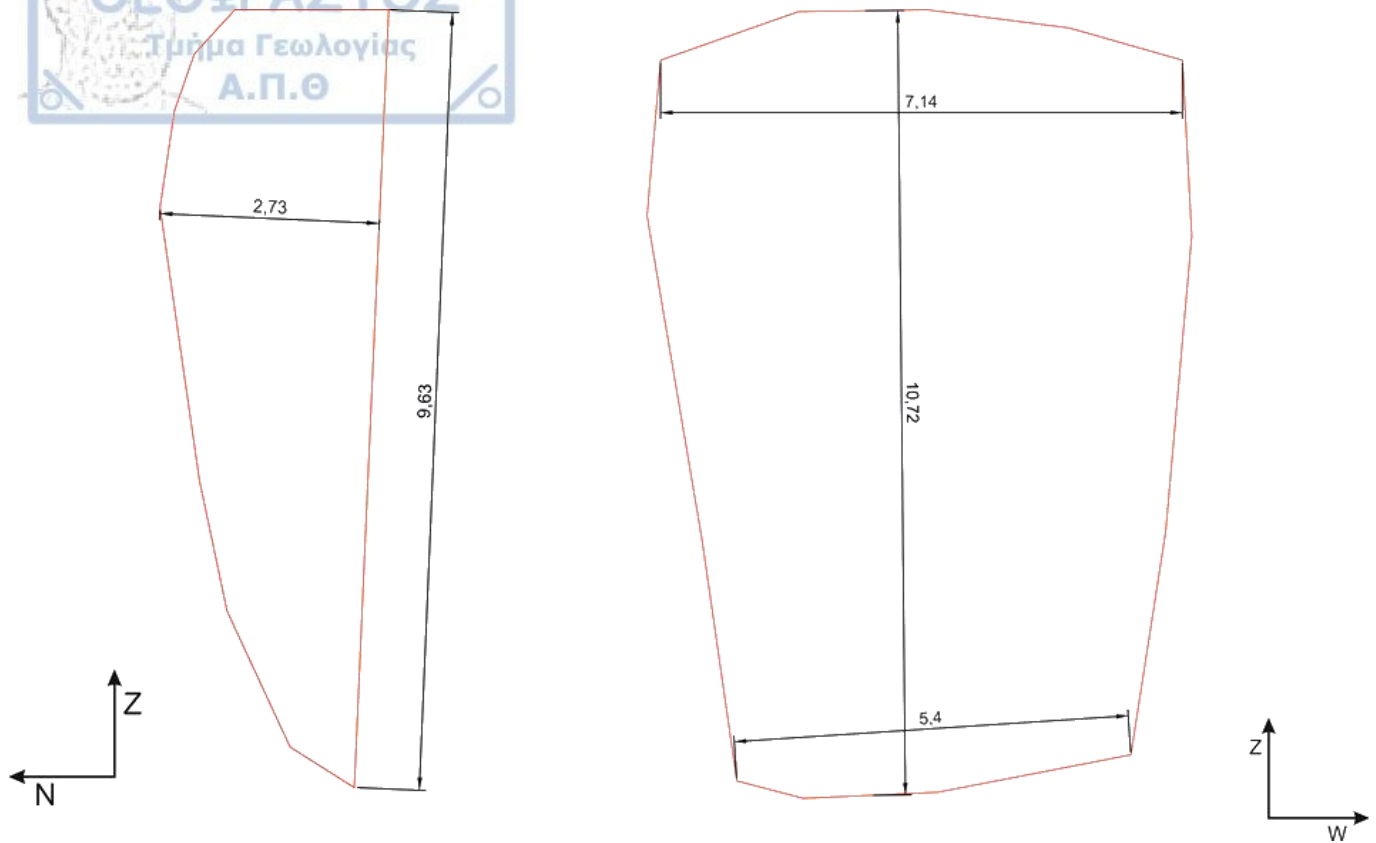
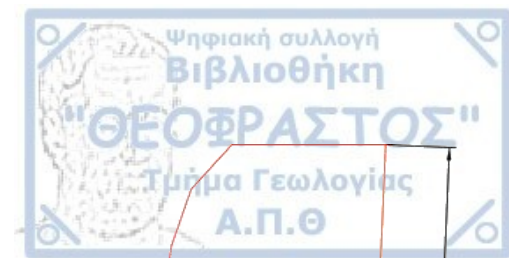
Εικόνα 30: Γεωμετρία αρνητικού όγκου του κατολισθαίνοντος τεμάχους (με κίτρινες γραμμές), κάτοψη, οπίσθια όψη

Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του τεμάχους κατέστησε τον υπολογισμό του όγκου από ένα ακριβές προσομοίωμα του ιδιαίτερα περίπλοκη. Για την επίλυση του προβλήματος έγινε αποδοχή κάποιων παραδοχών και ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

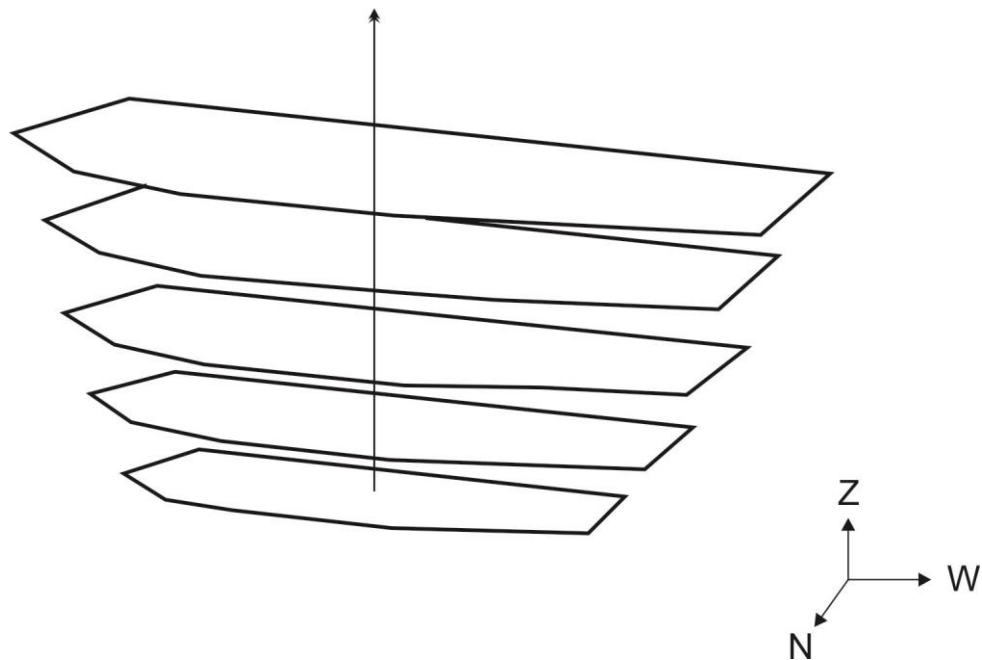
Υποτέθηκε ότι η γεωμετρία της κάτοψης διατηρείται σταθερή για όλο το τέμαχος, αλλά με μειούμενη, προς τη βάση του, επιφάνεια. Ουσιαστικά, το τέμαχος θεωρήθηκε ως ένα κατά ύψος άθροισμα άπειρων ανάλογων πολυγώνων, καθένα από τα οποία είναι διαδοχικά μικρότερο του υπερκειμένου του και μεγαλύτερο του υποκειμένου του. Με την παραδοχή αυτή, κατασκευάστηκε το αντίστοιχο μοντέλο σε περιβάλλον Rhino και ογκομετρήθηκε.



Εικόνα 31: Προσομοίωμα τεμάχους, κάτοψη



Εικόνα 33: Προσομοίωμα τεμάχους, πλάγια όψη (αριστερά), οπίσθια όψη (δεξιά)



Εικόνα 32: Συσσώρευση στοιχειωδών κατόψεων, ανακατασκευή όγκου

4.2.5 Στατιστική Προσέγγιση – Μέθοδος Εκτίμησης Σημείου

Παρά την όποια διεξοδικότητα με την οποία γίνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων που περιγράφουν την κατάσταση του πρηνούς κατά την αστοχία, οι τιμές πολλών από αυτές παραμένουν εκτιμήσεις, και άρα εμπεριέχουν κάποιο σφάλμα. Η απόδοση λοιπόν ενός αξιόλογου επιστημονικά αποτελέσματος απαιτεί την εισαγωγή ενός περιθωρίου τιμών, που αντιπροσωπεύει την αβεβαιότητα του υπολογισμού που τελείται. Αυτή γίνεται με την χρήση μιας στοχαστικής στατιστικής μεθοδολογίας. Η Γενικευμένη Μέθοδος Εκτίμησης Σημείου ((Rosenblueth, 1975), (Harr, 1987)) αποτελεί μια γρήγορη και απλή μέθοδο, η οποία έχει εφαρμοσθεί και καταγραφεί με επιτυχία στην γεωτεχνική μηχανική (Hoek, 1989, Miller et al., 2004). Τυπικά, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας και της Πιθανότητας Αστοχίας από αυτόν.

Με την ΓΜΕΣ μπορεί να υπολογιστεί η εκτιμώμενη μέση τιμή (μ) και τυπική απόκλιση (s) για μια *τυχαία μεταβλητή* (G) η οποία εκφράζεται ως συνάρτηση δύο ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών ($X_1, X_2, \dots, X_n$). Στο παρούσα εργασία ακολουθείται η πιο απλή προσέγγιση των δύο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών. Για την εφαρμογή της απαιτείται:

- Η αναλυτική συνάρτηση μεταξύ της ζητούμενης εξαρτημένης μεταβλητής και των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών $G = f(X_1, X_2)$
- Οι τιμές των παραμέτρων της συνάρτησης που θεωρούνται σταθερές (με ακρίβεια γνωστές, ή με πολύ μικρή τυπική απόκλιση)
- Η εκτιμώμενη μέση τιμή και τυπική απόκλιση για κάθε μια από τις δύο ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές ($\mu_{X1}, \mu_{X2}, s_{X1}, s_{X2}$)

Η εκτιμώμενη μέση τιμή της ζητούμενης μεταβλητής υπολογίζεται ως:

$$\mu_G = E(G) = P_{++}G_{++} + P_{--}G_{--} + P_{+-}G_{+-} + P_{-+}G_{-+}$$

όπου:

$$\begin{aligned} G_{++} &= f[(\mu_{X_1} + s_{X_1}), (\mu_{X_2} + s_{X_2})] \\ G_{+-} &= f[(\mu_{X_1} + s_{X_1}), (\mu_{X_2} - s_{X_2})] \\ G_{-+} &= f[(\mu_{X_1} - s_{X_1}), (\mu_{X_2} + s_{X_2})] \\ G_{--} &= f[(\mu_{X_1} - s_{X_1}), (\mu_{X_2} - s_{X_2})] \end{aligned}$$

και

$$P_{++} = P_{--} = 1/4(1 + \rho_{12}) \quad , \quad P_{+-} = P_{-+} = 1/4(1 - \rho_{12}) \quad \text{όπου } \rho_{12} \text{ ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών } X_1, X_2$$

Η εκτιμώμενη τυπική απόκλιση υπολογίζεται ως:

$$s_f = \sqrt{\text{var}(f)} = \sqrt{E(G^2) - [E(G)]^2}$$

Πρακτικά, η μέθοδος αυτή εισάγει τα διαστήματα $\mu_x \pm s_x$ για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή στον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής, και συνεπώς αποδίδει ένα εκτιμώμενο εύρος πιθανότερων τιμών για την τελευταία, παρά μια de facto ντετερμινιστική εκτίμηση.

4.2.6 Διερεύνηση δυνητικών μελλοντικών αστοχιών

Η εκδήλωση βραχοκαταπτώσεων στην στενή περιοχή ενός οικισμού είναι μια διεργασία η οποία ενέχει κίνδυνο για την ανθρώπινη δραστηριότητα και ζωή. Εξ ορισμού, η εκδήλωση αυτή αποτελεί μια εκτόνωση δυναμικής ενέργειας και συντελεί στην, προσωρινή ή μερική, σταθεροποίηση του ενεργού πρानούς, ωστόσο το κατά πόσο αυτή έχει επιτευχθεί είναι ένα ερώτημα με σημαντικό βάρος, το οποίο χρήζει άμεσης διευκρίνησης. Ως εκ τούτου, την ολοκλήρωση της μελέτης της εκδηλωθείσας κατολίσθησης ακολουθεί η διερεύνηση της δυναμικής κατάστασης του ευρύτερου πρानούς, προς την αξιολόγηση της παρούσας και μελλοντικής ευστάθειας του.

Η διαδικασία αυτή, αποτελεί ένα κλασσικό πόνημα της τεχνικής γεωλογίας και πραγματοποιείται με μια σαφώς ορισμένη μεθοδολογία.

Η βραχώμαζα στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται τεμαχώδης ως πολύ τεμαχώδης και συνεπώς ο πιθανός μηχανισμός αστοχίας της ελέγχεται από τις επιφάνειες των ασυνεχειών που την κατατέμνουν. Σε ενδεχόμενη αστοχία δηλαδή, η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ανισότροπα και συνεπώς για την αξιολόγηση των δυνητικών ολισθήσεων που μπορεί να σημειωθούν στο πρανές εκπονείται τεκτονικό διάγραμμα και κινηματική ανάλυση. Αυτή περατώθηκε με βάση τα στοιχεία προσανατολισμού του μετώπου, μετρημένων απευθείας από το νέφος σημείων, τα στοιχεία προσανατολισμού των ασυνεχειών (που μετρήθηκαν κατά την παράγραφο 4.2.3.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Επιφανειών) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (που προσδιορίστηκαν κατά την παράγραφο 4.2.3.3 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ασυνεχειών -Αντοχή).

Στο στάδιο αυτό της μελέτης μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω βήματα:

1. Διερεύνηση δυνητικών ολισθήσεων με κινηματική ανάλυση
2. Προσδιορισμός τεμαχών που δύναται να ολισθήσουν
3. Διερεύνηση της ευστάθειας τους

4.2.6.1 Κινηματική Ανάλυση

Για τον προσδιορισμό των πιθανών ολισθήσεων που μπορεί να προκύψουν καθαρά λόγω του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε συνδυασμό με την γεωμετρία του μετώπου του πρανούς διενεργήθηκε κινηματική ανάλυση, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία προσανατολισμού που προσδιορίστηκαν. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί κάποια τεκμηριωμένα και ομόφωνα αποδεκτά γεωμετρικά κριτήρια για τον προσδιορισμό των επιφανειών, ή των συνδυασμών επιφανειών, επί των οποίων μπορεί να προκύψουν ολισθήσεις, εφόσον ο Συντελεστής Ασφαλείας είναι μικρός. Οι μηχανισμοί αστοχίας που εξετάζονται είναι η επίπεδη ολίσθηση, η σφηνοειδής ολίσθηση και η ανατροπή. Τα κριτήρια αστοχίας είναι τα παρακάτω:

Επίπεδη	• Η επιφάνεια της ασυνέχειας να ανατέλλει (daylighting) στο μέτωπο • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$) • $\varphi_{\text{πρανούς}} > \varphi_{\text{ασυνέχειας}} > \varphi$
Σφηνοειδής	• Να δημιουργείται δίδρο τέμαχος από συνδυασμό δύο επιφανειών • Η τομή του δίδρου να ανατέλλει στο μέτωπο • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$) • $\varphi_{\text{πρανούς}} > \varphi_{\text{τομής}} > \varphi$
Ανατροπή	• $\varphi_{\text{ασυνέχειας}} > 70^\circ \leftarrow$ Υποκατακόρυφη ασυνέχεια • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$)

Όπου $\varphi_{\text{πρανούς}}$ η γωνία κλίσης του πρανούς, $\varphi_{\text{ασυνέχειας}}$ η γωνία κλίσης της ασυνέχειας, $\varphi_{\text{τομής}}$ η γωνία κλίσης της τομής των δύο επιφανειών και φ η γωνία τριβής της ασυνέχειας

Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό Dips της εταιρείας Rocscience Inc..

4.2.6.2 Προσδιορισμός Κύριων Επισφαλών Τεμαχών (Ενεργειακή Μέθοδος)

Όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο και Πίνακας 6: Γραφική παράσταση της κινηματικής ανάλυσης

5.4.2 Δυνητικά Ασταθή Τεμ, ο μηχανισμός αστοχίας στο πρανές, τουλάχιστον για μεγάλα ογκοτεμάχη, είναι επαρκώς συγκεκριμένος και σαφής, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή μιας προσαρμοσμένης μεθοδολογίας για την ποσοτικοποίηση της επισφάλειας διαφορετικών σημείων του πρανούς ως εξής:

Τα μεγάλα τεμάχη που αστοχούν αποχωρίζονται από το πρανές επί μιας συγκεκριμένης επιφάνειας. Εφόσον η επιφάνεια αυτή είναι γνωστή, μπορεί να μετρηθεί η απόσταση κάθε σημείου του πρανούς από αυτήν, έτσι ώστε να παραχθεί ένα νέφος σημείων με πληροφορία X , Y , Z , $Dist$ (όπου $Dist$ η εν λόγω απόσταση). Γνωρίζοντας την εξίσωση της επιφάνειας

$$ax + by + cz + d = 0$$

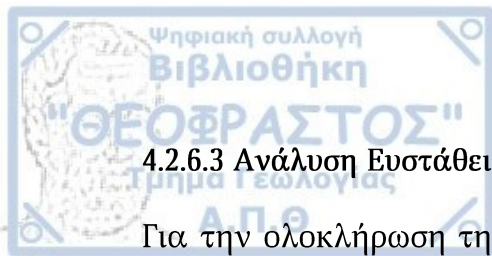
η απόσταση ενός σημείου $\Sigma (x_1, y_1, z_1)$ μπορεί να προσδιοριστεί από απλές εξισώσεις ευκλείδειας γεωμετρίας ως:

$$Dist = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

Πολλαπλασιάζοντας αυτή την απόσταση για κάθε σημείο με το ειδικό βάρος (γ) του πετρώματος μπορεί να υπολογισθεί το βάρος του στοιχειώδους παραλληλεπίπεδου που ορίζεται από την επιφάνεια ασυνέχειας (που βρίσκεται μέσα στην βραχώμαζα) και την ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς στο σημείο αυτό (πρακτικά, μια αριθμητική ολοκλήρωση με ανάμεσα στις οριακές καμπύλες που ορίζουν η ασυνέχεια, ως κάτω όριο ολοκλήρωσης, και η επιφάνεια του πρανούς, ως άνω όριο). Με δεδομένο επίσης ότι το νέφος σημείων έχει μια Απόσταση Δειγματοληψίας Εδάφους (Ground Sampling Distance, GSD) ίση με 3cm, μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε σημείο αποτελεί, προσεγγιστικά, ένα τετράγωνο τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς με πλευρά 3cm. Ως εκ τούτου, μπορεί να υπολογισθεί ένα πραγματικό βάρος για το στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο, το οποίο ορίζεται από την ασυνέχεια και το τετράγωνο αυτό και έχει διαστάσεις $3 * 3 * Dist$. Συνεπώς για κάθε σημείο του πρανούς μπορεί να υπολογισθεί η βαρυτική δύναμη του στοιχειώδους τεμάχους που δυνητικά μπορεί να αποχωριστεί από αυτό (σε KN) από τον απλό τύπο:

$$F_w = Dist * \gamma * 0.3^2 = 0.0261 * Dist$$

Παρότι η ποσότητα αυτή δεν ανταποκρίνεται στο βάρος κάποιου πραγματικού, ολόκληρου τεμάχους που πρόκειται να αστοχήσει, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σαν ένα μέτρο της σχετικής επισφάλειας, τοπικά, λόγω των ειδικών συνθηκών αστοχίας που ρυθμίζουν το συγκεκριμένο πρανές. Υπό τις συνθήκες αυτές, όπου τα τεμάχη που αστοχούν αποχωρίζονται κατά κανόνα από μια συγκεκριμένη επιφάνεια, η ποσότητα αυτή δίνει τοπικά το βάρος που συντελεί (ή μια του συνιστώσα) σε μια επικείμενη αστοχία, ή ισοδύναμα την δυναμική ενέργεια (U) που δύναται να εκτονωθεί. Ο παραπάνω αλγόριθμος μεταφράστηκε σε Python και εφαρμόστηκε στο κατηγοριοποιημένο (classified) νέφος σημείων.



4.2.6.3 Ανάλυση Ευστάθειας

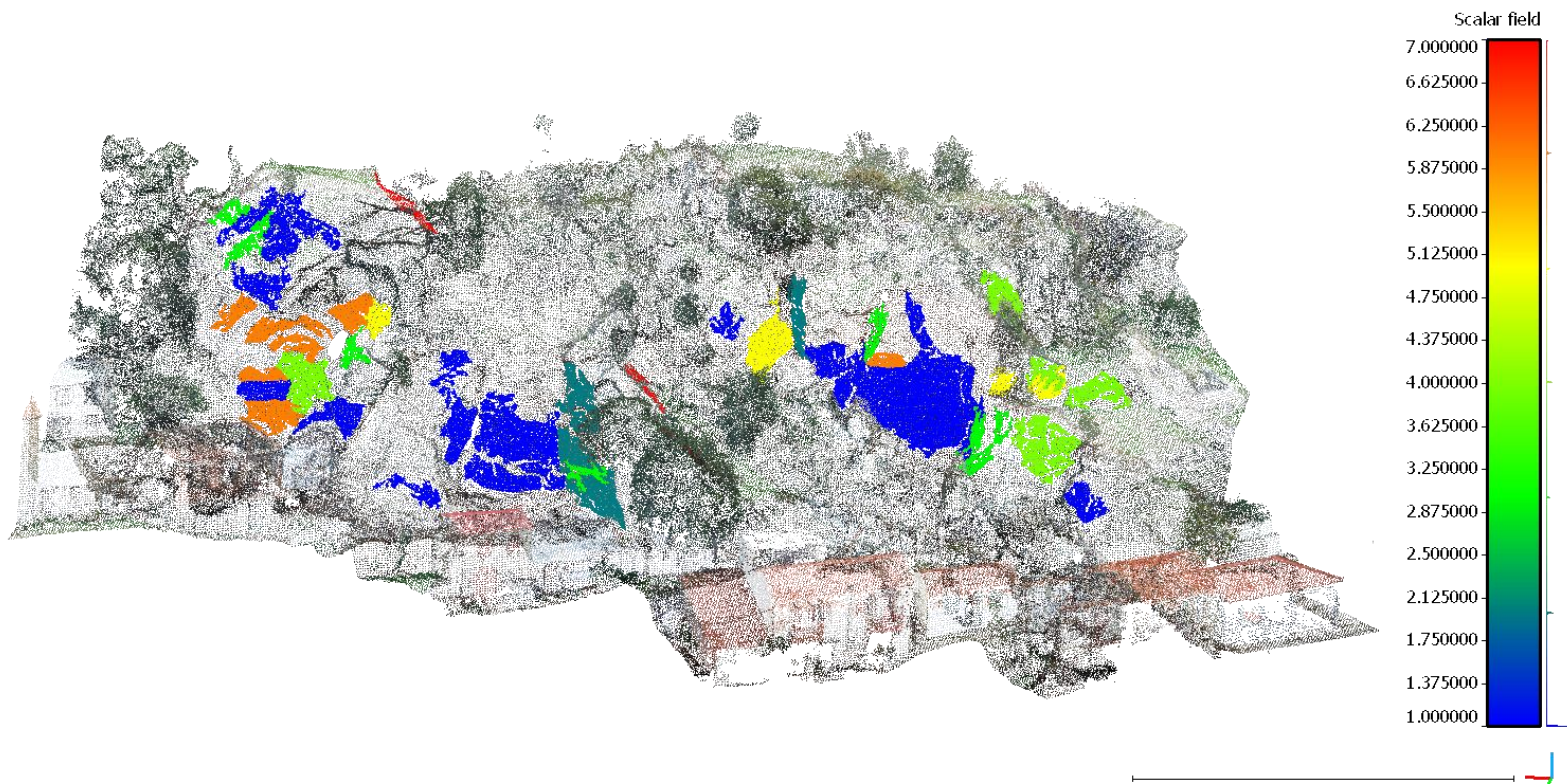
Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, το θέμα που προσδιορίστηκε ως επιδεκτικό σε αστοχία μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό RocPlane (Rocscience Inc.) και εφαρμόστηκε η κλασική τεχνικογεωλογική μεθοδολογία ανάλυσης δυνάμεων. Προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις ώθησης και συγκράτησης (driving & resisting forces) για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης (ξηρή και υγρή επιφάνεια ασυνέχειας, διαφορετικό ποσοστό πλήρωσης της ασυνέχειας με νερό, συνθήκες σεισμού) και από αυτές υπολογίστηκε ο Συντελεστής Ασφαλείας για κάθε περίπτωση, κατά τον ορισμό της παραγράφου 3.2 Συντελεστής Ασφαλείας . Οι τιμές του Σ.Α. χρησιμοποιήθηκαν ως ο ποσοτικός δείκτης της ευστάθειας ή μη του τεμάχους υπό τις εκάστοτε συνθήκες.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Τεχνικογεωλογικές Παράμετροι

5.1.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Ασυνεχειών

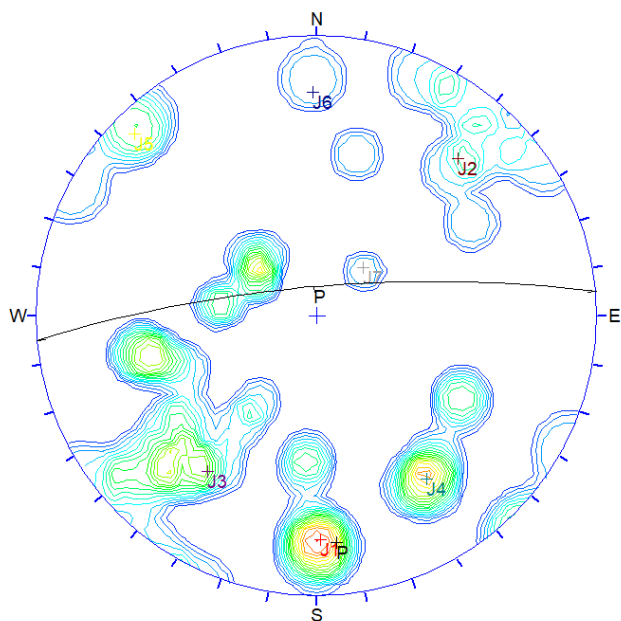
Οι μετρήσεις των στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών που προέκυψαν από την ανάλυση του τρισδιάστατου νέφους σημείων (4.2.3.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Επιφανειών) αξιολογήθηκαν σε σχέση με τις μετρήσεις υπαίθρου για την κατασκευή τεκτονικού διαγράμματος. Από την υπαίθρια έρευνα προέκυψαν 9 οικογένειες, από τις οποίες 5 θεωρήθηκαν ως κύριες. Αυτές παρουσιάζουν την μεγαλύτερη εμμονή, αποκαλυμμένη επιφάνεια και συχνότητα εμφάνισης και ρυθμίζουν την γεωμετρία του πρανούς και την απόρριψη μάζας από αυτό.



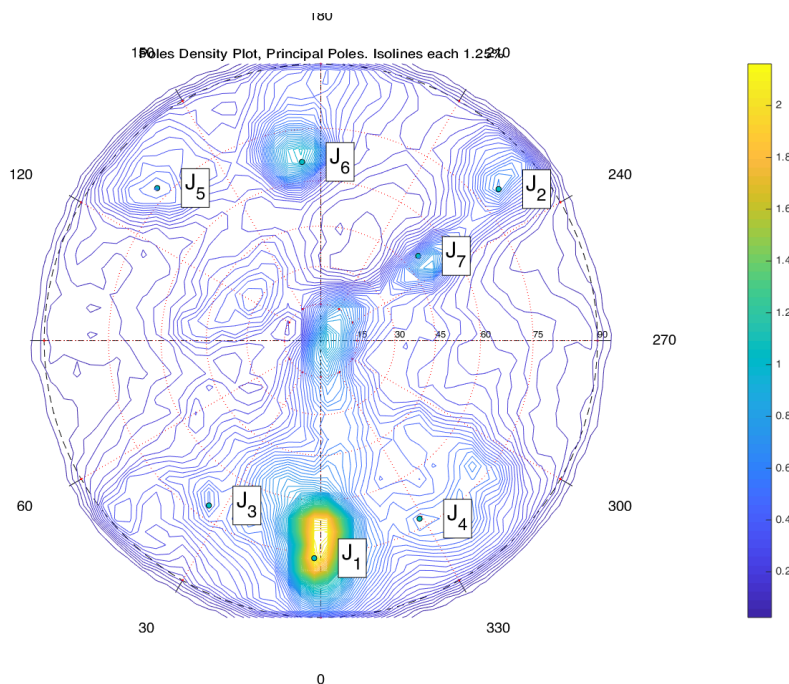
Εικόνα 34: Χαρακτηρισμένες επιφάνειες πάνω στο νέφος. Η κλίμακα αντιστοιχεί στην αρίθμηση των οικογενειών ασυνεχειών (1-7)

Από την ανάλυση του νέφους σημείων προέκυψαν 8 οικογένειες ασυνεχειών. Στο στερεοδιάγραμμα (εικόνα 29) φαίνεται επίσης μια μεγάλη συγκέντρωση

πόλων στο κέντρο, η οποία αντιπροσωπεύει οριζόντιες επιφάνειες. Αυτές έχουν δημιουργηθεί από τον συνδυασμό διάβρωσης και ανθρώπινης δραστηριότητας και δεν αποτελούν έκφραση κάποιας οικογένειας ασυνεχειών και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στην περαιτέρω ανάλυση.



Εικόνα 36: Μετρήσεις Υπαίθρου όπως συγκεντρώνονται σε στερεοδιάγραμμα στο λογισμικό Dips (Rocscience Inc.)



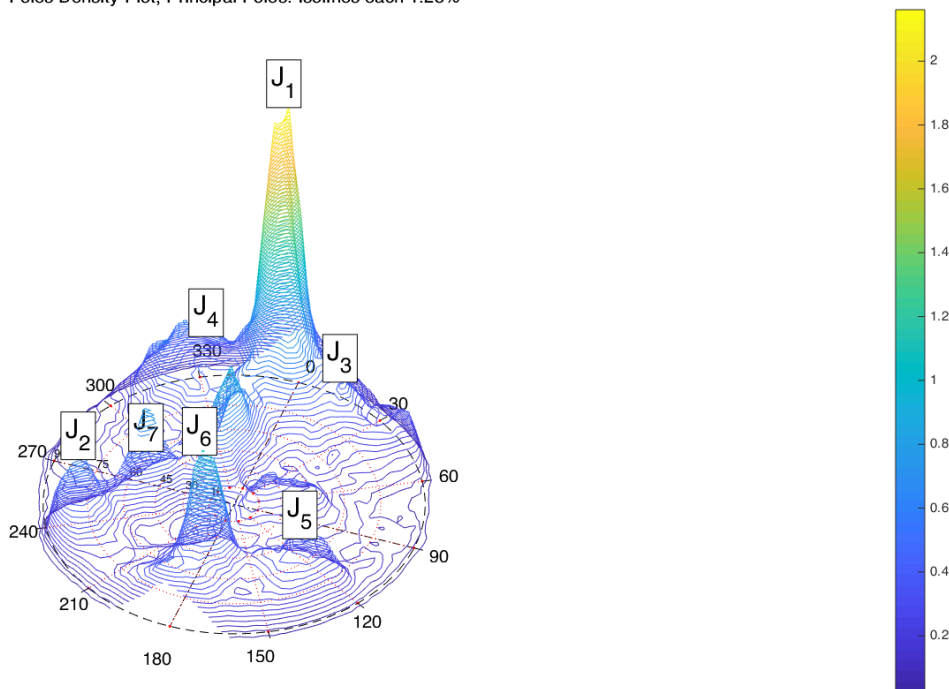
Εικόνα 35: Μετρήσεις από νέφος σημείων όπως προβάλλονται σε στερεοδιάγραμμα από το λογισμικό D.S.E.(Riquelme, 2009), χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες οπτικοποίησης της Matlab (MathWorks Inc.)

Από την σύγκριση των δύο στερεοδιαγραμμάτων προκύπτει μια γενική συμφωνία των μετρήσεων, με αντιληπτές ωστόσο αποκλίσεις σε κάποια σημεία. Οι αποκλίσεις αυτές είναι αποτέλεσμα τόσο της φύσης του πρανούς όσο και κάποιων περιορισμών της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα:

1. Παρατηρείται μια πολύ υψηλή συγκέντρωση πόλων της οικογένειας J_1 . Αυτή, είναι ακόμη πιο εξέχουσα στο διάγραμμα των μετρήσεων από το νέφος σημείων. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα βασικό κλειδί για την κατανόηση της λειτουργίας του πρανούς και τον μηχανισμό με τον οποίο αστοχεί, όπως θα αναλυθεί και στην 5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο. Οι επιφάνειες της οικογένειας αυτής καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο εμβαδό του μετώπου του πρανούς. Ειδικά στο σημείο της αστοχίας, μια μεγάλη υποκατακόρυφη J_1 -επιφάνεια αποτελεί με διαφορά την μεγαλύτερη και πιο καλά εκφρασμένη σε όλο το

μέτωπο. Επίσης, η υποπαραλληλία της οικογένειας αυτής με την διεύθυνση του πρηνούς οδηγεί στην βέλτιστη αποτύπωση τους από το UAV, σε αντίθεση με άλλες οικογένειες των οποίων οι επιφάνειες αποκαλύπτονται μόνο μερικώς. Στην εικόνα 30 φαίνεται παραστατικά η πυκνότητα των πόλων όπως μετρήθηκε από νέφος σημείων.

Poles Density Plot, Principal Poles. Isolines each 1.25%



Εικόνα 37: Τρισδιάστατη απεικόνιση της συγκέντρωσης των πόλων των επιφανειών που μετρήθηκαν από το νέφος σημείων. Ο κύκλος της βάσης είναι ένα απλό στερεοδιάγραμμα. Παρήχθη με το λογισμικό D.S.E. (Riquelme, 2009) χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες οπτικοποίησης της Matlab (Mathworks Inc.)

2. Παρατηρείται μια απουσία πόλων στο 3^ο τεταρτημόριο του διαγράμματος που προέκυψε από το νέφος σημείων, πλην αυτών της J3. Η απουσία αυτή ερμηνεύεται με παρατηρήσεις υπαίθρου, κατά τις οποίες οι επιφάνειες των οποίων οι πόλοι φαίνεται να λείπουν είναι μικρές, και αντιστοιχούν σε ασυνέχειες με μικρή εμμονή. Πρακτικά, είναι μικροασυνέχειες που δεν έχουν σημαντική έκφραση στην γεωμετρία του πρηνούς, αφού ορίζουν πολύ μικρά τεμάχια.

Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις προκύπτουν λόγω της φύσης του αλγόριθμου με τον οποίο μετράται η πυκνότητα των πόλων των επιφανειών, ο οποίος λογίζει κάθε σημείο που ανήκει σε μια επιφάνεια $N_x N_y N_z D$ ως μια μεμονωμένη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, μεγαλύτερες επιφάνειες του πρηνούς

αντιπροσωπεύονται από δυσανάλογα μεγαλύτερο αριθμό σημείων σε σχέση με μικρότερες και εμφανίζονται στο στερεοδιάγραμμα με πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα πόλων. Διορθώνοντας για την παραπάνω μεροληψία (bias) του αλγορίθμου, παρατηρείται πράγματι μια πολύ καλή συμφωνία των συμβατικών και των ψηφιακών μετρήσεων.

Παρακάτω φαίνονται οι οικογένειες επιφανειών που αναγνωρίστηκαν με τα στοιχεία προσανατολισμού τους.

	Οικογένεια	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
Μετρήσεις Υπαίθρου	Κλίση	77	74	68	70	85	77	27
	Κατεύθυνση Κλίσης	359	222	035	326	135	179	224
Point Cloud	Κλίση	76	80	71	72	78	66	46
	Κατεύθυνση Κλίσης	001	229	034	330	133	174	229
Πρανές (P): 78/355								

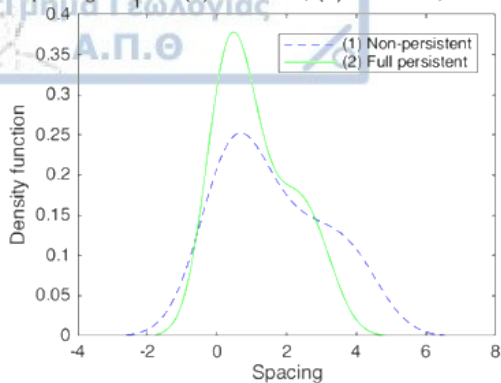
Πίνακας 2: Στοιχεία προσανατολισμού των κύριων οικογενειών ασυνεχειών, όπως μετρήθηκαν στο ύπαιθρο και από το νέφος σημείων. Σημειώνονται με έντονους χαρακτήρες οι βασικές οικογένειες (έχουσες την μεγαλύτερη εμμονή και καθορίζουσες την λειτουργία του πρανούς)

5.1.2 Απόσταση Κύριων Οικογενειών Ασυνεχειών

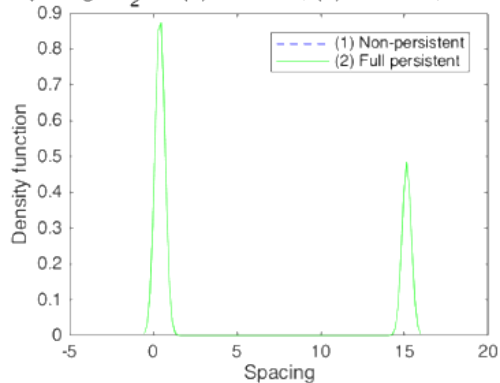
	Οικογένεια	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
Απόσταση (m)	Με Εμμονή	1.11	5.32	7.01	3.96	8.56	0.97	0.53
	Χωρίς Εμμονή	1.59					0.87	0.57
Αριθμός Συστάδων		11	4	6	5	4	7	4

Πίνακας 3: Μέση απόσταση (spacing) των ασυνεχειών κάθε οικογένειας όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό D.S.E. (Riquelme, 2009). Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη μεθοδολογία, υπολογίζεται η Μέση Απόσταση με και χωρίς την παραδοχή εμμονής της εκάστοτε ασυνέχειας.

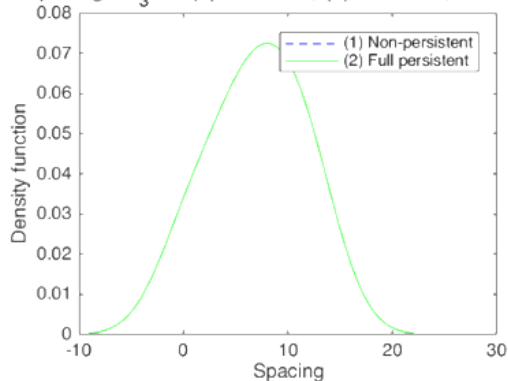
Spacings. J_1 . S: (1) = 1.5956; (2) = 1.1107; 11 cluster



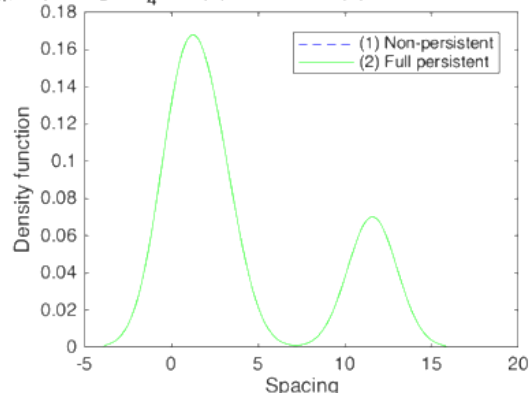
Spacings. J_2 . S: (1) = 5.3172; (2) = 5.3172; 4 clusters



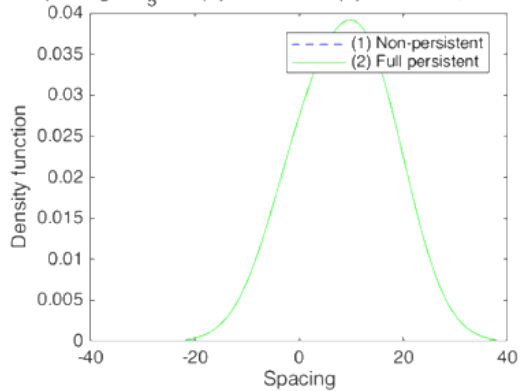
Spacings. J_3 . S: (1) = 7.0135; (2) = 7.0135; 6 cluster



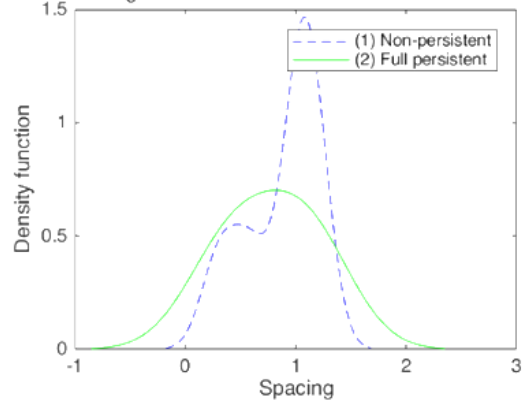
Spacings. J_4 . S: (1) = 3.9577; (2) = 3.9577; 5 clusters



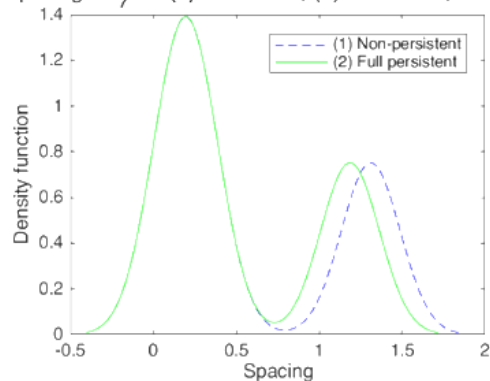
Spacings. J_5 . S: (1) = 8.5633; (2) = 8.5633; 4 cluster



Spacings. J_6 . S: (1) = 0.87462; (2) = 0.77452; 7 cluster



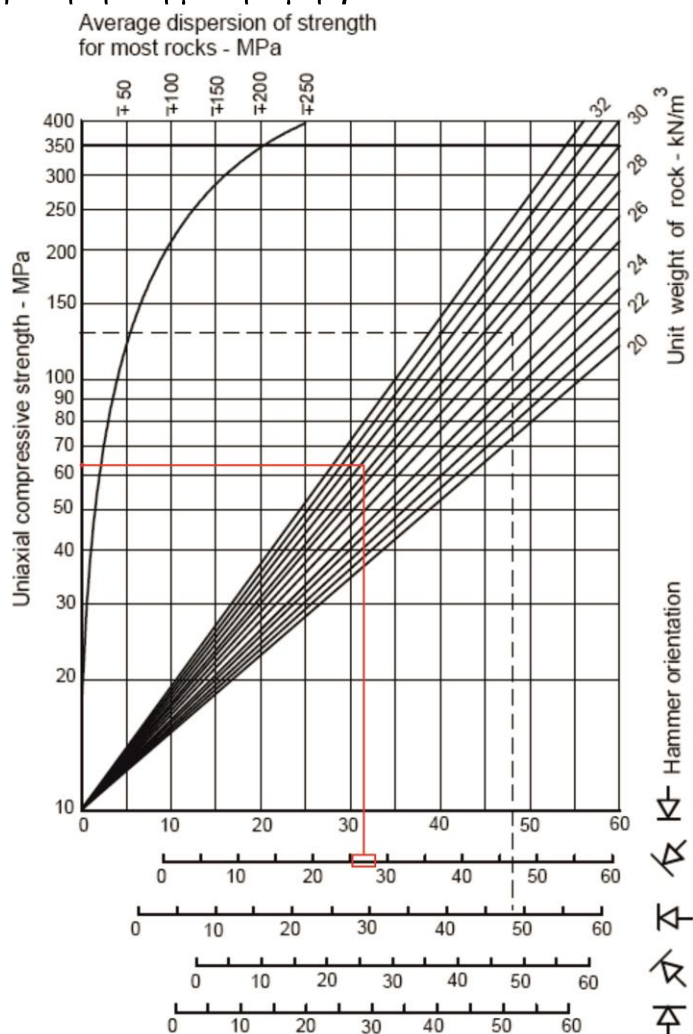
Spacings. J_7 . S: (1) = 0.56694; (2) = 0.52527; 4 cluster



Εικόνα 38: Αποστάσεις κύριων συστημάτων ασυνεχειών, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό D.S.E. (Riquelme, 2009) με την χρήση γραφημάτων της Matlab (Mathworks Inc.)

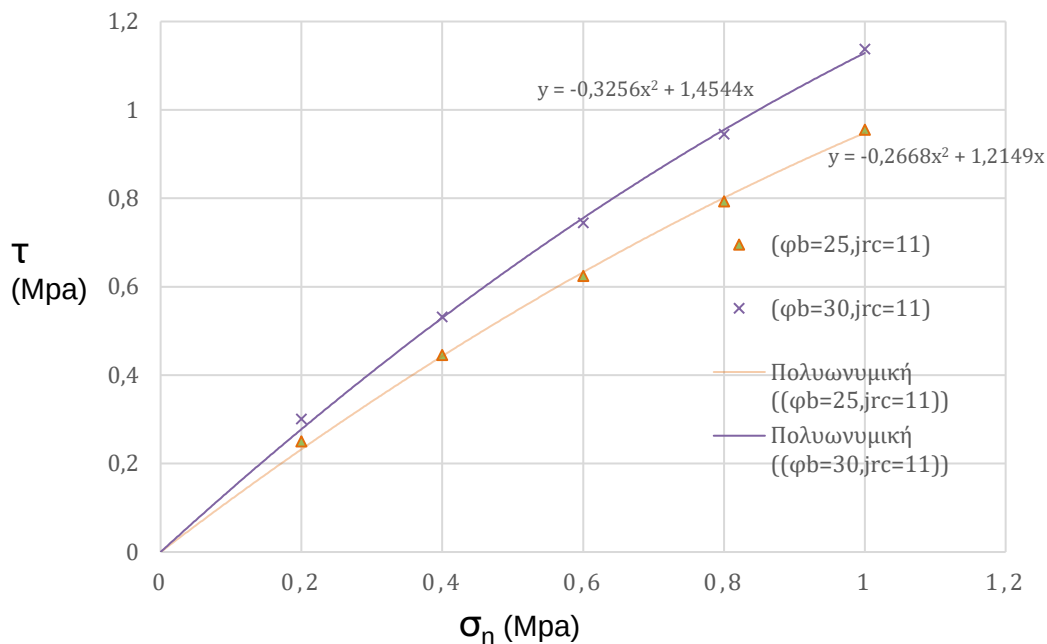
5.1.3 Αντοχή Τοιχωμάτων Ασυνεχειών -Τραχύτητα

Σκοπός της ποσοτικοποίησης της αντοχής τοιχωμάτων των ασυνεχειών και της τραχύτητας τους είναι εν τέλει η έκφραση της αντοχής των επιφανειών αυτών μέσω του κριτηρίου αστοχίας Barton-Bandis. Από τις εργασίες υπαίθρου εξήχθη για την τραχύτητα των τοιχωμάτων των ασυνεχειών μια μέση τιμή $JRC = 11$. Οι δοκιμές με σφύρα Schmidt έδωσαν μια μέση τιμή 27 αναπηδήσεων, η οποία αντιστοιχεί για πρασινοσχιστόλιθο (με ειδικό βάρος $\gamma = 29 \text{ KN/m}^3$ (βάση δεδομένων PETLAB)) σε $JCS = 63 \text{ MPa}$. Η βασική γωνία τριβής των ασυνεχειών (φ_b) εκτιμήθηκε βιβλιογραφικά (Coulson, 1972) και ελήφθησαν υπόψιν δύο ακραίες τιμές, 25° και 30° . Για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής, επιλύθηκε για τις δύο αυτές τιμές το κριτήριο αστοχίας, με τιμές κάθετης τάσης $0 < \sigma_n < 1 \text{ (Mpa)}$. Προέκυψε έτσι ένα $\varphi_{\max}=46^\circ$ και ένα $\varphi_{\min}=41^\circ$ και κρατήθηκε η μέση τιμή $\varphi=43.6^\circ$.



Εικόνα 39: Νομόγραμμα εκτίμησης Μονοαξονικής Θλιπτικής Αντοχής από αριθμό αναπηδήσεων σφύρας L-Schmidt. Με κόκκινο σημειώνονται οι μετρήσεις υπαίθρου.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΘΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ



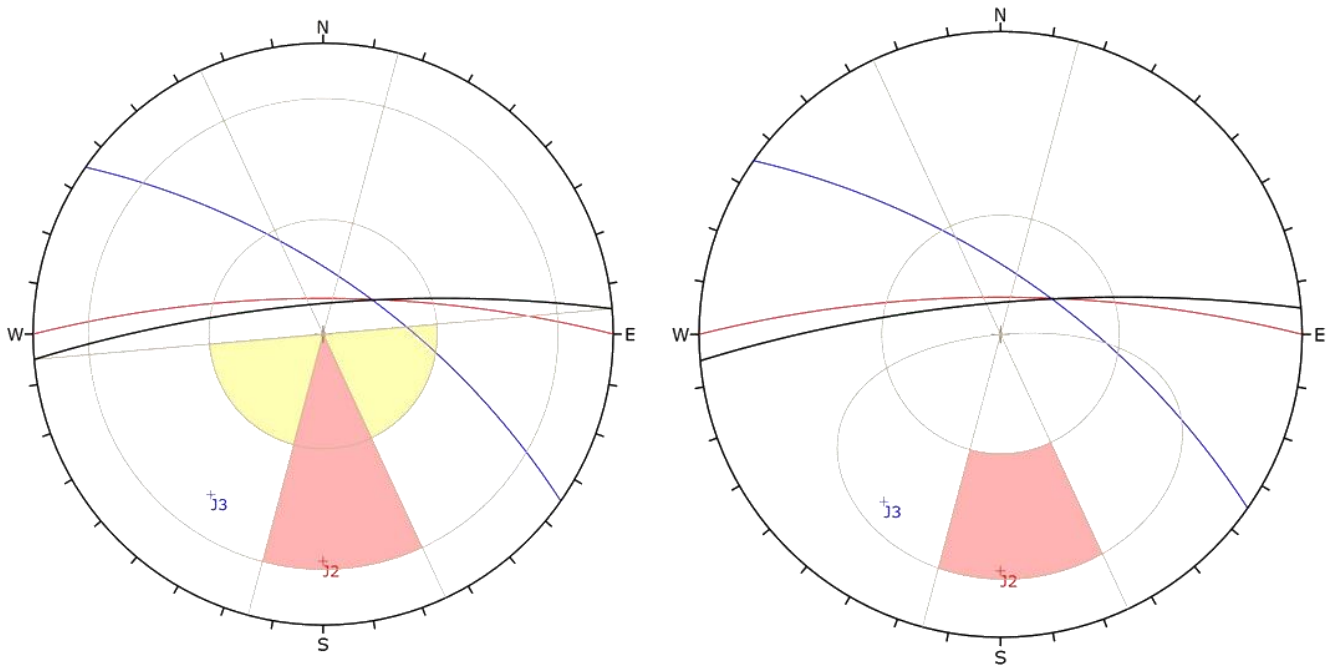
Η μέγιστη επιτόπου τάση που μπορεί να ασκείται σε μια τυχαία επιφάνεια ασυνέχειας στο πρανές υπολογίστηκε από το ειδικό βάρος του πετρώματος και το μέγιστο ύψος, σε σχέση με την βάση του πρανούς, κοντά στην στέψη του. Το τελευταίο μετρήθηκε από το νέφος σημείων, ίσο με 45m.

$$(2) \Rightarrow \sigma_n = \gamma * h = 0.029 * 45 = 1.305 \text{ MPa}$$

Το κριτήριο αστοχίας Barton-Bandis εκφράζεται εν τέλει ως:

$$(3) \Rightarrow \tau = \sigma_n * \tan \left[27.5 + 11 \log_{10} \left(\frac{63}{\sigma_n} \right) \right]$$

5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο



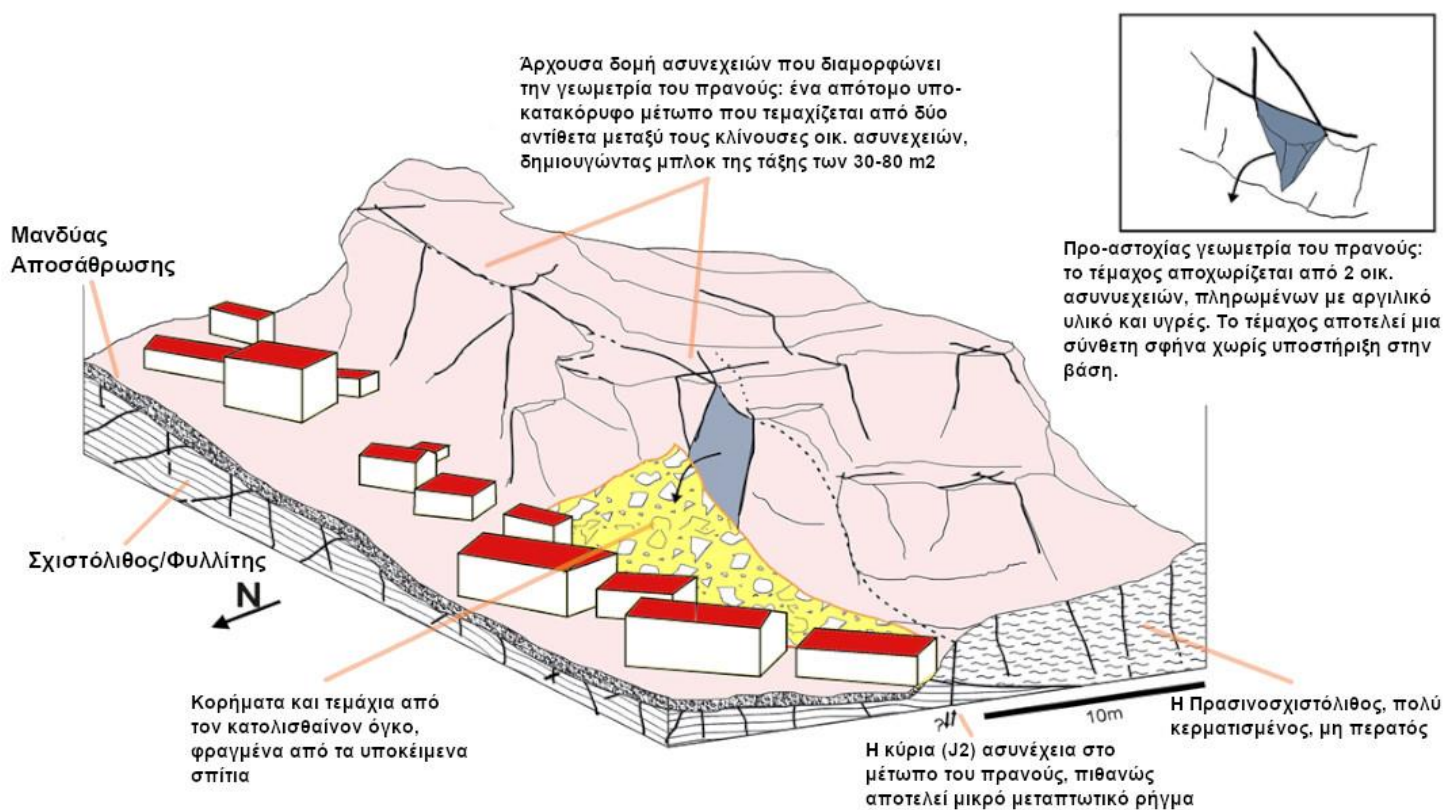
Εικόνα 40: Κινηματική ανάλυση των επιφανειών J1 και J3 σε στερεοδιάγραμμα. Η J1 δύναται να αστοχήσει με ανατροπή (αριστερά) και με επίπεδη ολίσθηση (δεξιά)

Τα αποτελέσματα της έρευνας συνηγορούν σε ένα σύνθετο μηχανισμό αστοχίας: πρόκειται για μια επίπεδη ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας J1, με μια περιστροφική συνιστώσα, δηλαδή για μια ολίσθηση με ταυτόχρονη ανατροπή. Το βραχοτέμαχος που ολισθαίνει αποκολλάται πλευρικός από δύο υπο-κατακόρυφες J3 επιφάνειες και βρίσκεται μερικώς επικρεμάμενο λόγω της υπάρχουσας υποσκαφής (συνεπώς θα μπορούσε η κίνηση να χαρακτηριστεί και σαν πτώση). Η τελευταία πιθανώς οφείλεται στην φυσική λειτουργία του πρανούς, με την σταδιακή αποκόλληση τεμαχών από επιφάνειες της οικογένειας J6, ενδεχομένως, ωστόσο, να εντάθηκε λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας (λήψη δομικών λίθων), όπως υπέδειξαν κάτοικοι της περιοχής. Η κύρια ασυνέχεια J1 φαίνεται ανοιχτή, με μέγιστο άνοιγμα που εκτιμάται ως και 10 cm στην στέψη πριν την αστοχία, και αργιλικό υλικό πλήρωσης εντός της. Στην επιφάνεια της επίσης βρέθηκε γράμμωση ολίσθησης που υποδεικνύει την πιθανή λειτουργία της ως επιφάνεια ρήγματος.

Η δράση των ωθόντων δυνάμεων προκάλεσε την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής της επιφάνειας J1, με αποτέλεσμα την αστοχία της. Ο όγκος που

αποκολλήθηκε ολίσθησε προς τα κατάντη με ταυτόχρονη περιστροφή του άνω μέρους του και διασπάστηκε σε μικρότερα τεμάχια κατά την πρόσκρουση του στην βάση του πρανούς. Ο μηχανισμός αστοχίας επομένως μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια ολίσθηση με ανατροπή. Τα υποκείμενα κτήρια λειτούργησαν ως το κύριο εμπόδιο για την περαιτέρω μετακίνηση των επιμέρους αυτών τεμαχίων περιορίζοντας την μάζα της κατολίσθησης και παράλληλα απορροφώντας την κινητική τους ενέργεια, με αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικών φθορών.

Η πιθανή λειτουργία της επιφάνειας J1 ως επιφάνεια ρήγματος συνηγορεί στην απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων τόσο του βράχου όσο και των ασυνεχειών, ενώ η ισχυρή μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του σεισμού της 12^{ης} Ιουνίου 2017 πιθανώς συνέβαλλε σε μια περαιτέρω, μικρή, μείωση της γωνίας τριβής των ασυνεχειών, διαταράσσοντας την δυναμική ισορροπία στα σημεία των ασεριτών, στην μικροκλίμακα. Ο παράγοντας εναύσματος μετακίνησης την 24^η Νοεμβρίου, το αίτιο δηλαδή της αστοχίας φαίνεται με βεβαιότητα να ήταν η έντονη βροχόπτωση, γεγονός που υποστηρίζεται τόσο από τα καιρικά δεδομένα (2.5 Κλιματολογικά και Καιρικά Στοιχεία) όσο και από την ανάστροφη ανάλυση που τελέσθηκε (5.3.3 Ανάλυση Δυνάμεων και Ανάστροφη Ανάλυση).



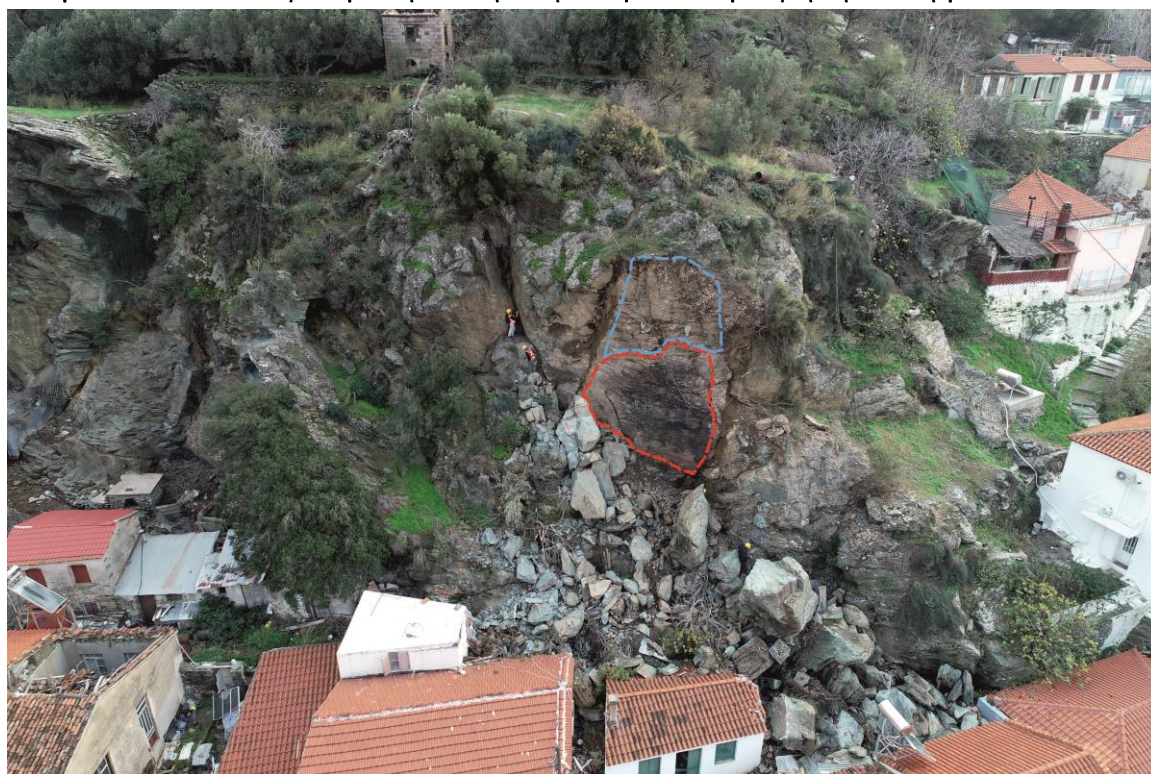
Εικόνα 41: Σχηματικό τεχνικογεωλογικό μοντέλο του πρανού (observational model), όπως κατασκευάστηκε με βάση το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM)

5.3 Συνθήκες Αστοχίας – Ανάστροφη Ανάλυση Δυνάμεων

Κατά το μοντέλο αστοχίας που προτάθηκε παραπάνω (5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο) ο απορριφθής όγκος αποτελείτο από ένα μεγάλο βραχοτέμαχος το οποίο βρισκόταν επικρεμάμενο και αποσπάστηκε από την κύρια J1 επιφάνεια ολισθαίνοντας προς τα κατόντη. Η επιφάνεια αυτή εμφανίζεται ετερογενής και πληρωμένη με αργιλικό υλικό στο άνω μέρος της. Μπορεί συνεπώς να γίνει η θεώρηση πως το κάτω, επίπεδο τμήμα της ήταν αυτό στο οποίο ενεργούσε η στατική τριβή, ενώ το άνω μέρος της ήταν ανοιχτό, πληρωμένο με μικρά κατατεμαχισμένα θραύσματα βράχου και αργιλικό υλικό, παρουσιάζοντας πρακτικά μηδενική συνοχή και τριβή. Στο επάνω αυτό τμήμα η μοναδική δρώσα δύναμη θεωρείται η υδατική πίεση, και συνεπώς ενήργησε κυρίως παθητικά, χωρίς να συμβάλει στις δυνάμεις συγκράτησης του τεμάχους.

5.3.1 Εμβαδό Επιφάνειας

Το εμβαδό της επιφάνειας που αποκαλύφθηκε, και ταυτοποιήθηκε ως η επιφάνεια δράσης της τριβής, μετρήθηκε από το νέφος σημείων και προέκυψε ίσο με 37 m². Η υπερκείμενη παθητική επιφάνεια μετρήθηκε ίση με 11 m².



Εικόνα 42: Αεροφωτογραφία, όπου φαίνεται η εκτεθειμένη επιφάνεια από την οποία αποκολλήθηκε το τέμαχος. Με κόκκινο σημειώνεται η παθητική (ξηρή) και με μπλε η ενεργή (υγρή) περιοχή

5.3.2 Όγκος Τεμάχους

Ο υπολογισμός του όγκου του αποριφθέντος τεμάχους κατέστη ιδιαίτερα απαιτητικός, και αυτό γιατί αποτελεί μια παράμετρο με μεγάλη σημασία, της οποίας ο προσδιορισμός ενέχει αντίστοιχα μεγάλη αβεβαιότητα, αφού υπησέρχεται το σφάλμα της ανθρώπινης εκτίμησης. Χρησιμοποιήθηκαν εναέριες φωτογραφίες του πρανούς, από τις οποίες έγιναν συσχετισμοί μηκών και συγκρίσεις με μετρήσεις μηκών πάνω στο νέφος σημείων. Το αποτέλεσμα είναι μια εκτίμηση της γεωμετρίας του τεμάχους σε όψη, κάτοψη και τομή, από τα οποία κατασκευάστηκε, με ορισμένες παραδοχές ένα μοντέλο του τεμάχους. Από την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκε ένας προσεγγιστικός όγκος 80 m^3 . Λαμβάνοντας υπόψιν το ειδικό βάρος ($\gamma=29 \text{ KN/m}^3$) του πετρώματος, το συνολικό βάρος του (W) υπολογίστηκε στα 2320 KN.



Εικόνα 43: Αεροφωτογραφία του πρανούς πριν την αστοχία από τα Β, Ιούνιος 2017. Από (SKOURTSOS, 2019)



Εικόνα 44: Άποψη του πρανούς από τα Β, μετά την αστοχία, Δεκέμβριος 2018

5.3.3 Ανάλυση Δυνάμεων και Ανάστροφη Ανάλυση

Οι τεχνικογεωλογικές και γεωμηχανικές πληροφορίες που αποκτήθηκαν στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων αποτελούν τις βασικές παραμέτρους εισόδου για την τέλεση της ανάστροφης ανάλυσης. Ένα σύστημα που εξετάζεται με την μέθοδο της ανάστροφης ανάλυσης θα έχει, ιδανικά, έναν βαθμό ελευθερίας, τουτέστιν, μια παράμετρο της οποίας η αρχική τιμή είναι άγνωστη και επ' αυτής γίνονται υποθέσεις μέχρι να ικανοποιείται η συνθήκη $F \leq 1$. Μια πρόκληση της παρούσας μελέτης, η οποία εισάγει αναπόφευκτα και έναν σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας για το αποτέλεσμα, είναι η περάτωση της ανάστροφης ανάλυσης με δύο βαθμούς ελευθερίας: οι δύο άγνωστοι παράμετροι για τις οποίες έγιναν υποθέσεις είναι η πίεση του νερού εντός της ασυνέχειας (U) και η αρχική συνοχή επί της επιφάνειας της ασυνέχειας (c). Οι δύο παράμετροι δεν μπορούν στην πραγματικότητα να μεταβληθούν ελεύθερα και ανεξάρτητα, αφού αύξηση της μίας συνεπάγεται αναγκαστικά αύξηση και της άλλης (αν λ.χ. η συνοχή θεωρηθεί μεγαλύτερη, η πίεση του νερού θα πρέπει επίσης να θεωρηθεί

μεγαλύτερη ώστε να μειωθεί ο συντελεστής ασφαλείας και να επιτευχθεί κατάσταση οριακής ανισορροπίας)

Για την πίεση του νερού οι υποθέσεις που έγιναν βασίστηκαν στις υπαίθριες παρατηρήσεις της υγρής επιφάνειας που αποκαλύφθηκε, καθώς και στο ύψος βροχής που υπολογίστηκε για τ . Η συνοχή προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου για καθορισμένη πίεση νερού και για $F = 1$. Η θεωρούμενη ως υγρή επιφάνεια εμβαδομετρήθηκε από το νέφος σημείων και προέκυψε ίση με 16 m^2 . Με βάση τις παρατηρήσεις υπαίθρου θεωρήθηκε ότι το ενεργό πορώδες του συστήματος ασυνέχειας-υλικού πλήρωσης είναι 50 % και το μέσο άνοιγμα της ασυνέχειας είναι της τάξης των 10 cm: από τα παραπάνω στοιχεία υπολογίζεται ένας όγκος νερού 0.8 m^3 , ο οποίος αντιστοιχεί σε δύναμη $U = 7.8 \text{ KN}$.



Εικόνα 45: Κοντινή άποψη της επιφάνειας που αποκαλύφθηκε, όπου φαίνεται ο έντονος κερματισμός και μεγάλα κενά. Διακρίνεται ανάπτυξη κρυστάλλων χαλαζία μέσα σε μεγάλες κοιλότητες και μεγάλος ελεύθερος χώρος => υψηλό πορώδες

Τα στοιχεία του πρανούς όπως παραμετροποιήθηκαν παραπάνω παρατίθενται συνοπτικά:

α (κλίση ασυνέχ., °)	Φ_B (βασική γωνία τριβής, °)	JRC (τραχύτητα)	JCS (αντοχή τοιχωμάτων)	W (βάρος τεμάχους, KN)	A (επιφάνεια ασυνέχειας, m ²)
77	27.5	11	63	2320	37

Επιλύοντας την εξ. 7 με τα στοιχεία αυτά και για Συντελεστή Ασφαλείας $F = 1$ προκύπτει:

$$(7) \Rightarrow c = \frac{2269 - (482 - U) \tan \left[27.5 + 11 \log \left(\frac{2331}{482 - U} \right) \right]}{37}$$

Η σχέση αυτή συνδέει για τη συγκεκριμένη περίπτωση τα μεγέθη c και U . Θέτοντας την τιμή $U = 7,8 \text{ KN}$ και επιλύοντας την σχέση αυτή υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή συνοχή της επιφάνειας της ασυνέχειας πριν την αστοχία:

$$c = 52.3 \text{ KN/m}^2 \quad \text{ή ισοδύναμα } c = 0.052 \text{ MPa}$$

Η τιμή αυτή, αποτελεί μια ρεαλιστική εκτίμηση, η οποία τεκμηριώνεται από το σύνολο των μεθόδων που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων που συμπεριλαμβάνει το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο. Συνακόλουθα, στην εκτίμηση αυτή υπεισέρχεται και το αθροιστικό σφάλμα όλων των προσεγγίσεων και παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν, το οποίο ωστόσο δεν μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά.

5.3.4 Στατιστική Προσέγγιση των Αποτελεσμάτων

Η προηγούμενη τιμή της εκτιμώμενης προ αστοχίας συνοχής (c) είναι μεν ρεαλιστική, αλλά φέρει αναπόφευκτα το σφάλμα των πολλαπλών παραδοχών που έγιναν για τον υπολογισμό της. Για την απόδοση μιας πιο υπεύθυνης εκτίμησης, έγινε υπολογισμός της εκτιμώμενης μέσης τιμής της συνοχής με την Γ.Μ.Ε.Σ. . Στην παρούσα μελέτη, οι παράμετροι που είναι με λιγότερη βεβαιότητα γνωστές είναι το βάρος του κατολισθαίνοντος τεμάχους (W) και η ορθή δύναμη του νερού στην ασυνέχεια (U), καθώς καθορίστηκαν με

εκτιμήσεις και όχι με απευθείας μετρήσεις. Η συνοχή ως συνάρτηση αυτών, θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους (α , ϕ_b , JRC , JCS) γνωστές με αρκετή βεβαιότητα εκφράζεται ως:

$$c = \frac{1}{37} \left\{ 0.98W - (0.23W - U) \tan \left[27.5 + 11 \log \left(\frac{2331}{0.23W - U} \right) \right] \right\}$$

Οι τιμές των W , U που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μπορούν να θεωρηθούν ως οι μέσες τιμές τους (μ_w , μ_U). Για το βάρος του τεμάχους, θεωρήθηκε μια τυπική απόκλιση ± 145 KN που αντιστοιχεί σε αβεβαιότητα του όγκου του τεμάχους ± 5 m³. Για την δύναμη του νερού θεωρήθηκε τυπική απόκλιση ± 1.96 KN που αντιστοιχεί σε αβεβαιότητα του όγκου του νερού ± 0.2 m³. Ο συντελεστής συσχέτισης (ρ_{wU}) είναι μηδέν, αφού τα δύο μεγέθη είναι πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους. Από τα παραπάνω υπολογίστηκε η εκτιμώμενη μέση τιμή και τυπική απόκλιση της συνοχής:

$$\mu_c = 57.3 \quad s_c = 3.7$$

Η συνοχή επομένως της ασυνέχειας πριν την αστοχία εκτιμάται ως:

$$c = 57.3 \pm 3.7 \text{ KN/m}^2 \quad \text{ή} \quad c = 0.0573 \pm 0.0037 \text{ MPa}$$

Οι παράμετροι που εισήχθησαν για το υπολογισμό αναφέρονται παρακάτω.

	V τεμ. (m ³)	W τεμ. (KN)	V νερού (m ³)	U (KN)
M	80	2320	0.8	7.8456
+s	85	2465	1	9.807
-s	75	2175	0.6	5.8842

	E(c)	(c ²)
c ₊₊	61.05332	3727.508
c ₋₋	53.59552	2872.48
c ₊₋	60.98736	3719.459
c ₋₊	53.66311	2879.729

Εκτιμώμενη Μέση Τιμή (μ_c):	57.32483
E(c ²):	3299.794
Μεταβλητότητα (s_c^2):	13.65793
Τυπική Απόκλιση (s_c):	3.695664

Πίνακας 4: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της c με την Γενική Μέθοδο Εκτίμησης Σημείου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω μεγέθη δεν ακολουθούν αναγκαστικά κανονική κατανομή και οι τυπικές αποκλίσεις τους δεν είναι πραγματικές τυπικές αποκλίσεις. Αντίθετα, η έννοια της απόκλισης από την μέση τιμή χρησιμοποιείται σαν ένα μαθηματικό τέχνασμα για την διατύπωση ενός αποτελέσματος εντός ρεαλιστικών ορίων εκτίμησης, αντί ως μεμονωμένης τιμής.

5.4 Διερεύνηση δυνητικών μελλοντικών αστοχιών

5.4.1 Δυνητικές Ολισθήσεις -Κινηματική Ανάλυση

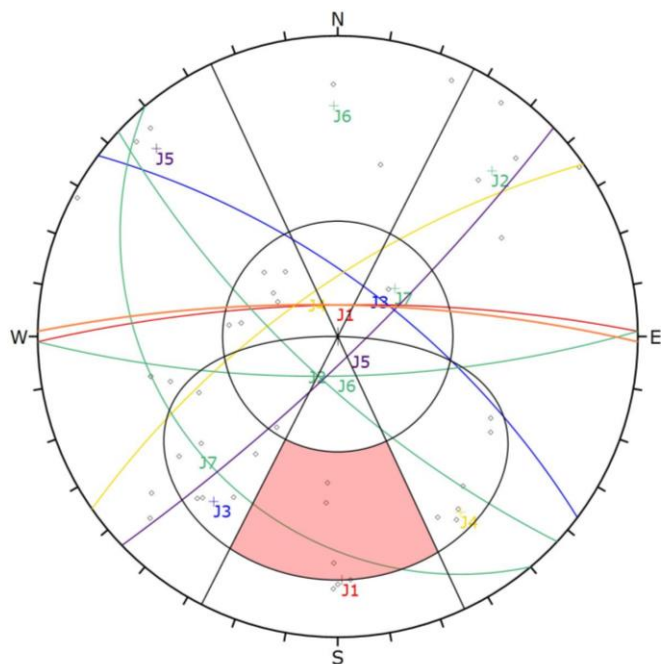
Τα στοιχεία προσανατολισμού των ασυνεχειών που προέκυψαν από το τεκτονικό διάγραμμα (4.2.3.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Επιφανειών) σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες που μετρήθηκαν (5.1.3 Αντοχή Τοιχωμάτων Ασυνεχειών -Τραχύτητα) και υπολογίστηκαν (5.3.4 Στατιστική Προσέγγιση) χρησιμοποιήθηκαν για την κινηματική ανάλυση των σχηματιζόμενων τεμαχών του βράχου.

Από την κινηματική ανάλυση προέκυψαν τρεις πιθανοί μηχανισμοί ολίσθησης, οι οποίοι συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

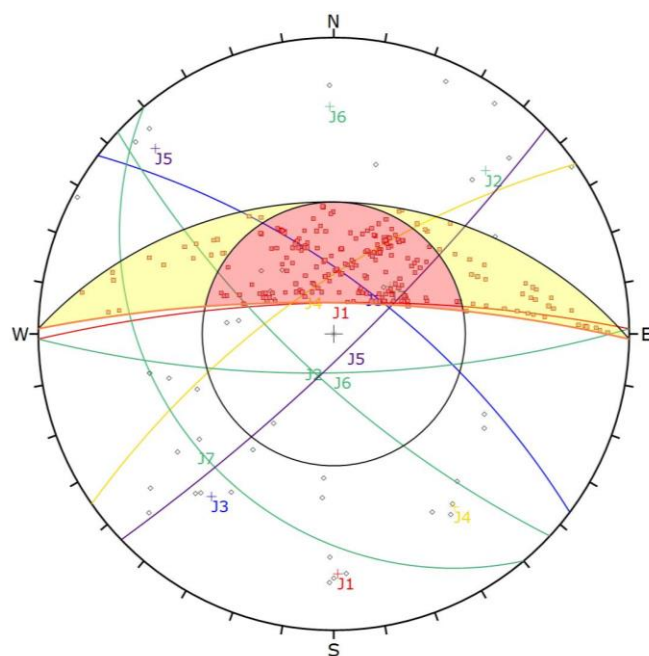
	Οικογένειες Ασυνεχειών			
Σφηνοειδής Ολίσθηση	J ₃ /J ₄	J ₃ /J ₅	J ₁ /J ₅	J ₃ /J ₁
Ανατροπή	J ₁		J ₆	
Επίπεδη Ολίσθηση	J ₁			

Πίνακας 5: Τύποι δυνητικών ολισθήσεων που προέκυψαν από την κινηματική ανάλυση και οι ασυνέχειες οι οποίες συμμετέχουν στον καθένα. Με κάθετο (/) σημειώνονται οι συνδυασμοί ασυνεχειών που δίνουν σφηνοειδείς ολισθήσεις.

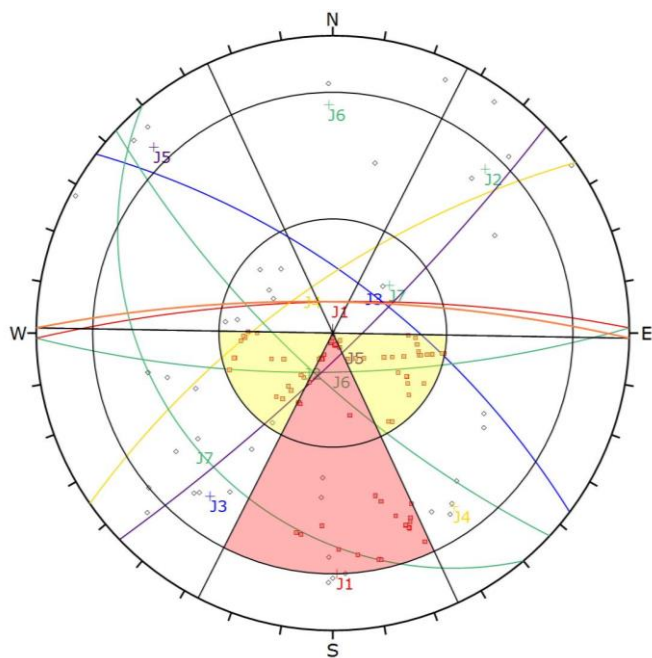
Επίπεδη Ολίσθηση (J_1 -Αστοχεί)



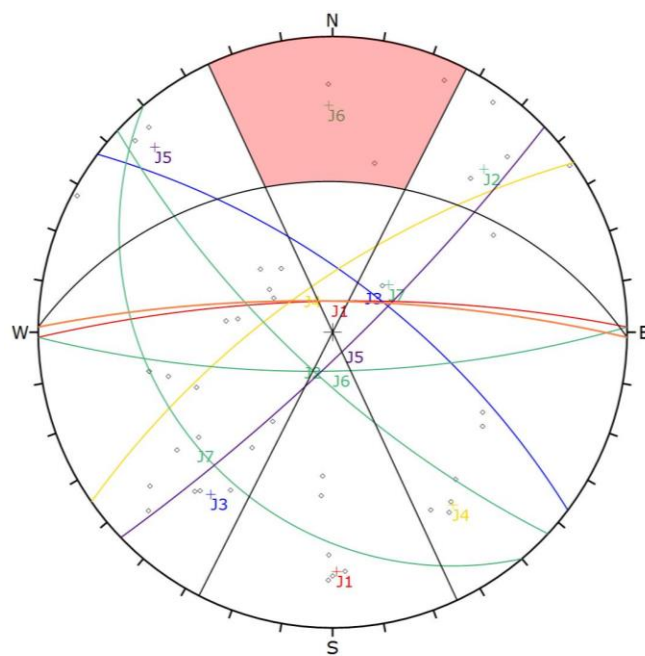
Σφηνοειδής Ολίσθηση (Σφήνα J_3/J_5 -Αστοχεί)



Ανατροπή Ομόρροπη με πρανές (J_1 -Αστοχεί)



Ανατροπή Αντίρροπη με πρανές (J_6 - Αστοχεί)



5.4.2 Δυνητικά Ασταθή Τεμάχια

Ο όγκος των τεμαχίων που δύναται να ολισθήσουν αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας σε υπόγεια και υπέργεια πρηνή και εκσκαφές (Palmström, BLOCK SIZE AND BLOCK SIZE DISTRIBUTION, 2000). Καθορίζει τόσο την σοβαρότητα μιας πιθανής κατάρπτωσης όσο και τον σχεδιασμό των μέτρων διαχείρισης της πιθανότητας αυτής.

Ως εκ τούτου, στην παρούσα μελέτη οι πιθανές αστοχίες διακρίθηκαν με βάση τον όγκο σε δύο περιπτώσεις:

- α. Εξαιρετικά Μεγάλοι Όγκοι, όπως αυτός που ενεργοποιήθηκε κατά το γεγονός της 24^{ης} Νοεμβρίου
- β. Μικροί Όγκοι που ακολουθούν άλλη συστηματική αστοχία, εκτός του τεχνικογεωλογικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο.

Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε πολύ μεγάλα μπλοκ (>30m³) τα οποία αποχωρίζονται από την κυρίαρχη J1 ασυνέχεια, ακολουθούν τον μηχανισμό που περιεγράφηκε στο Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο και μπορούν να προκαλέσουν ως και σοβαρή βλάβη στις γύρω δομές. Για την μελέτη των αστοχιών σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που αναφέρονται και αναλύονται παραπάνω, ενώ ο εντοπισμός και προσδιορισμός τους περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.5 Εντοπισμός Μεγάλων Επισφαλών Τεμαχίων .

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει όλα τα μικρότερα μπλοκ που σχηματίζονται από τις 7 συστηματικές οικογένειες ασυνεχειών και δεν έχουν εξετασθεί μέχρι στιγμής. Το τελευταίο, διότι στην διερεύνηση της εκδηλωθείσας κατωλίσθησης δεν κατέχουν κάποιον σημαντικό ρόλο. Εντούτοις, θεωρείται λογικό πως τέτοια μικρά μπλοκ αναμένεται να προκαλούν ένα σημαντικό ποσοστό των καταπτώσεων στο πρηνές και άρα είναι απαραίτητη η αναφορική εξέταση τους.

5.4.3 Ευστάθεια Μικρότερων Τεμαχίων

5.4.3.1 Μηχανισμός

Παρότι ο διαχωρισμός των δύο κατηγοριών ισχύει, θεωρείται ότι και τα τεμάχια της δεύτερης κατηγορίας τείνουν να αστοχούν με μηχανισμό παρόμοιο με αυτόν που περιεγράφηκε στο τεχνικογεωλογικό μοντέλο.

Συγκεκριμένα, αναμένεται την αστοχία τους να ελέγχει η απώλεια στήριξης από τη βάση τους, και άρα ο μηχανισμός αστοχίας να είναι επίσης ένας συνδυασμός επίπεδης ολίσθησης με ανατροπή.

Την παραπάνω διαπίστωση στηρίζουν τρεις παράγοντες:

α. Οι σφηνοειδείς ολισθήσεις που προκύπτουν από την κινηματική ανάλυση αναφέρονται σε μπλοκ που ορίζονται από επιφάνειες J_3 , για τις οποίες όμως έχει καθοριστεί μια μέση απόσταση $J_s = 7 \text{ m}$. Συνεπώς οι επιφάνειες αυτές όντως έχουν καθοριστικό ρόλο, ο οποίος όμως είναι η πλευρική αποκόλληση των μεγάλων τεμαχών τα οποία συζητήθηκαν παραπάνω και όχι η δημιουργία μικρών πρισματικών τεμαχίων της δεύτερης κατηγορίας.

β. Από την κινηματική ανάλυση προκύπτουν καθαρά επίπεδες ολισθήσεις και ανατροπές επί των J_1 και J_6 .

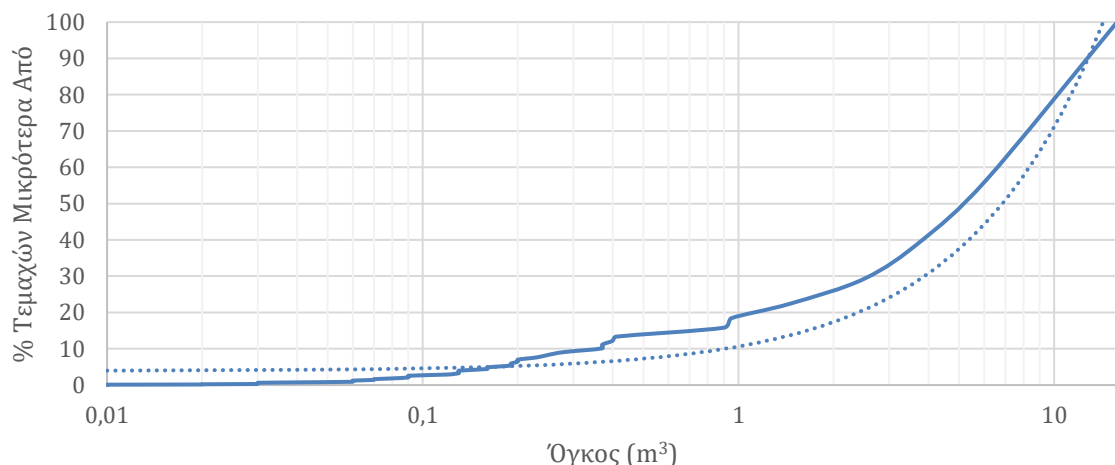
γ. Η μορφολογία του πρανούς συμφωνεί με το παραπάνω μοντέλο, αφού αυτό αναπτύσσεται κυρίως κατακόρυφα ή με αρνητικές κλίσεις, γεγονός που υποδηλώνει την αποκόλληση τεμαχίων από την υποκατακόρυφη J_1 είτε μικρότερων τεμαχίων που βρίσκονται επικρεμάμενα λόγω της απώλειας μάζας από τη βάση τους.

Συμπερασματικά, θεωρείται πως και τα μικρά τεμάχια θα αστοχούν με επίπεδες ολισθήσεις ή ανατροπές ή ακόμη και ελεύθερες πτώσεις.

5.4.3.2 Όγκος

Για την εκτίμηση του όγκου των μικρότερων τεμαχίων που πιθανόν να αστοχήσουν μετρήθηκαν ενδεικτικά 50 μικρά-μεσαία δείγματα που βρέθηκαν στην ζώνη συγκέντρωσης μπροστά από το πρανές.

Αθροιστική Συχνότητα Τιμών Όγκου



Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι το 50% των τεμαχίων ήταν μικρότερα από 5 m^3 , ενώ η μέση τιμή όγκου ήταν $0,8 \text{ m}^3$ με μια τυπική απόκλιση $\pm 2,5 \text{ m}^3$.

5.4.4 Προσδιορισμός Μεγάλων Επισφαλών Τεμαχίων – Κινηματική Ανάλυση

Για τον προσδιορισμό των πιθανών ολισθήσεων που μπορεί να προκύψουν καθαρά λόγω του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε συνδυασμό με την γεωμετρία του μετώπου του πρανούς διενεργήθηκε κινηματική ανάλυση, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία προσανατολισμού που προσδιορίστηκαν. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί κάποια τεκμηριωμένα και ομόφωνα αποδεκτά γεωμετρικά κριτήρια για τον προσδιορισμό των επιφανειών, ή των συνδυασμών επιφανειών, επί των οποίων μπορεί να προκύψουν ολισθήσεις, εφόσον ο Συντελεστής Ασφαλείας είναι μικρός. Οι μηχανισμοί αστοχίας που εξετάζονται είναι η επίπεδη ολίσθηση, η σφηνοειδής ολίσθηση και η ανατροπή. Τα κριτήρια αστοχίας είναι τα παρακάτω:

Επίπεδη	• Η επιφάνεια της ασυνέχειας να ανατέλλει (daylighting) στο μέτωπο • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$) • $\varphi_{\text{πρανούς}} > \varphi_{\text{ασυνέχειας}} > \varphi$
Σφηνοειδής	• Να δημιουργείται δίδρο τεμαχος από συνδυασμό δύο επιφανειών • Η τομή του δίδρου να ανατέλλει στο μέτωπο • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$) • $\varphi_{\text{πρανούς}} > \varphi_{\text{τομής}} > \varphi$
Ανατροπή	• $\varphi_{\text{ασυνέχειας}} > 70^\circ \leftarrow$ Υποκατακόρυφη ασυνέχεια • Διεύθυνση Κλίσης Ασυνέχειας // Διεύθυνση Κλίσης Πρανούς ($\pm 20^\circ$)

Όπου $\varphi_{\text{πρανούς}}$ η γωνία κλίσης του πρανούς, $\varphi_{\text{ασυνέχειας}}$ η γωνία κλίσης της ασυνέχειας, $\varphi_{\text{τομής}}$ η γωνία κλίσης της τομής των δύο επιφανειών και φ η γωνία τριβής της ασυνέχειας

Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό Dips (Rocscience Inc.).

5.4.5 Εντοπισμός Μεγάλων Επισφαλών Τεμαχίων

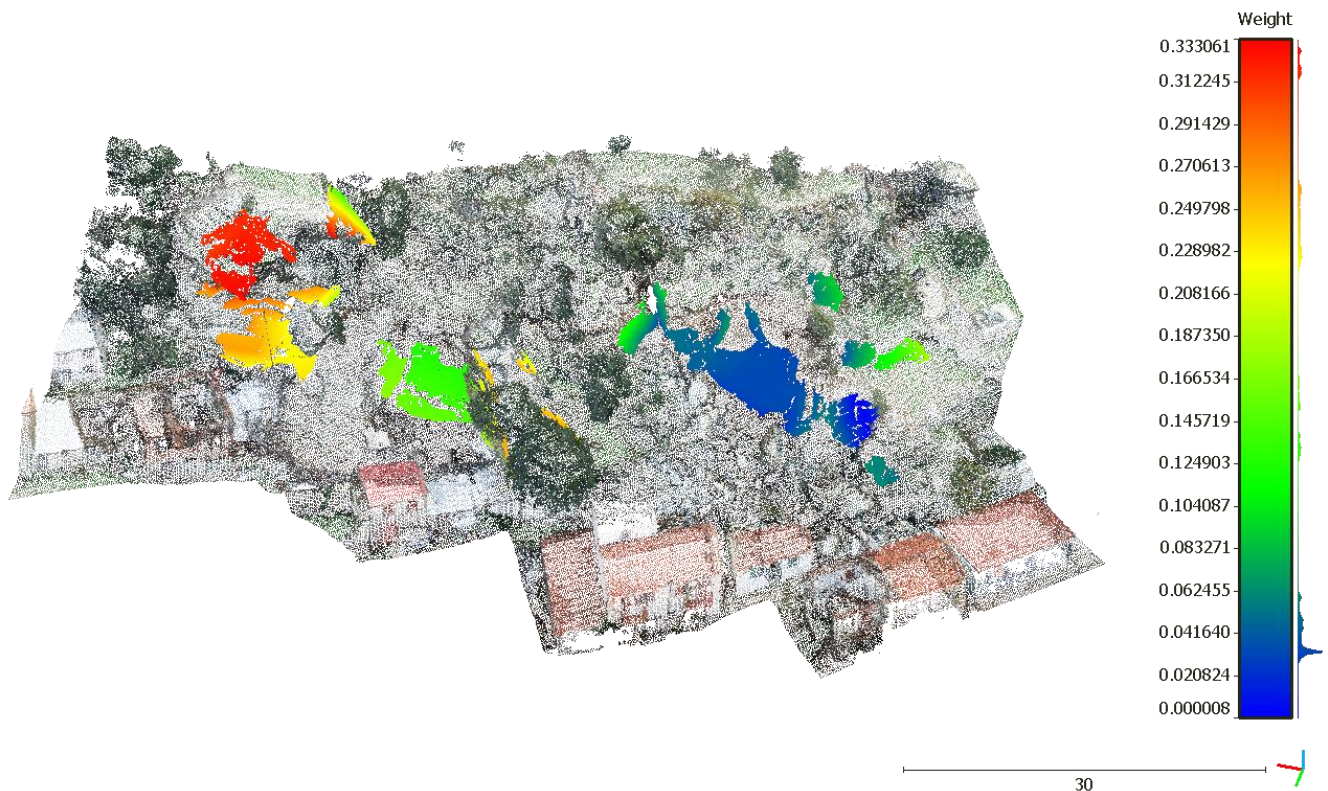
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω και αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2 Μηχανισμός Αστοχίας – Τεχνικογεωλογικό Μοντέλο, οι κύριες αστοχίες μεγάλων τεμαχίων στην συγκεκριμένη θέση ελέγχονται από μια κύρια J_1 επιφάνεια, η οποία τεμαχίζει σχεδόν κατακόρυφα το πρανές, αποκολλώντας

τεμάχη τα οποία ολισθαίνουν/ανατρέπονται. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.6.2 Προσδιορισμός Κύριων Επισηφλών Τεμαχών (Ενεργειακή Μέθοδος), χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του επιπέδου της J_1 :

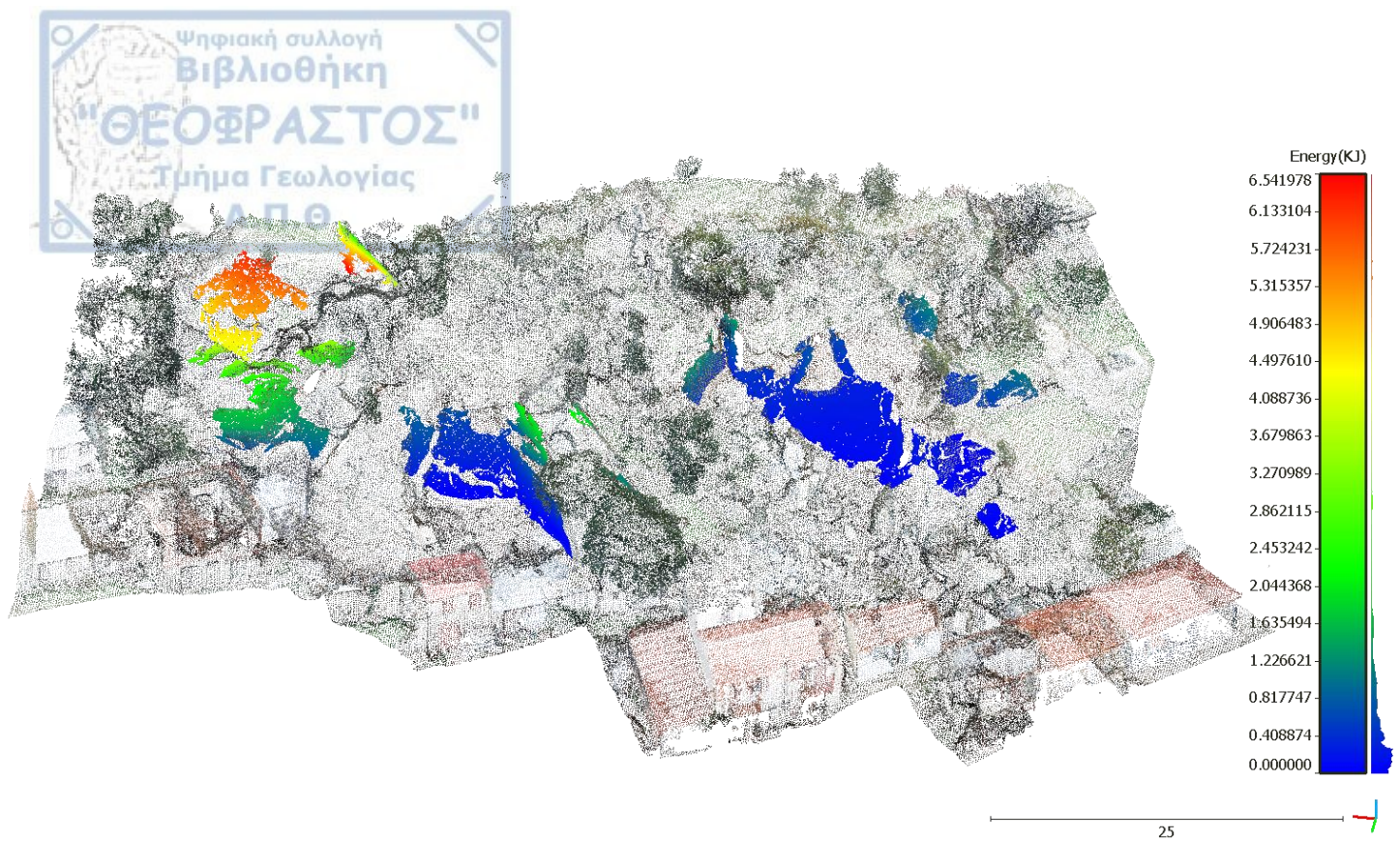
$$0.02953x + 0.97126y + 0.236183z - 4203666.5 = 0$$

η οποία προσδιορίστηκε κατά το στάδιο της κατηγοριοποίησης και προσδιορισμού των στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών (4.2.3.1 Στοιχεία Προσανατολισμού Επιφανειών).

Από την επεξεργασία του νέφους προέκυψε μια κύρια περιοχή αυξημένης επιδεκτικότητας σε ολίσθηση, η οποία χωροθετείται από σημεία όπου συγκεντρώνεται η περισσότερη μάζα μπροστά από την J_1 , εκεί δηλαδή που σχηματίζεται ένα μεγάλο επικρεμάμενο τέμαχος. Το αποτέλεσμα αυτό συνηγορεί με την απλή τεχνικογεωλογική παρατήρηση, κατά την οποία φαίνεται ότι το τέμαχος αυτό πράγματι στερείται υποστήριξης στην βάση του, και κρατάται μόνο από την τριβή και την συνοχή επί της J_1 . Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο πως εντοπίζεται ακόμη ένα επισηφές επικρεμάμενο τέμαχος, ακριβώς πάνω από την θέση όπου συνέβη η υπό μελέτη βραχοκατάπτωση το οποίο είναι όμως αρκετά μικρότερο και θεωρήθηκε πολύ λιγότερο πιθανό να αστοχήσει.



Εικόνα 46: Ισοδύναμο Επικρεμάμενο Βάρος ανά σημείο (σε KN)



Εικόνα 48: Ισοδύναμη Δυναμική Ενέργεια ανά σημείο (σε KJ)



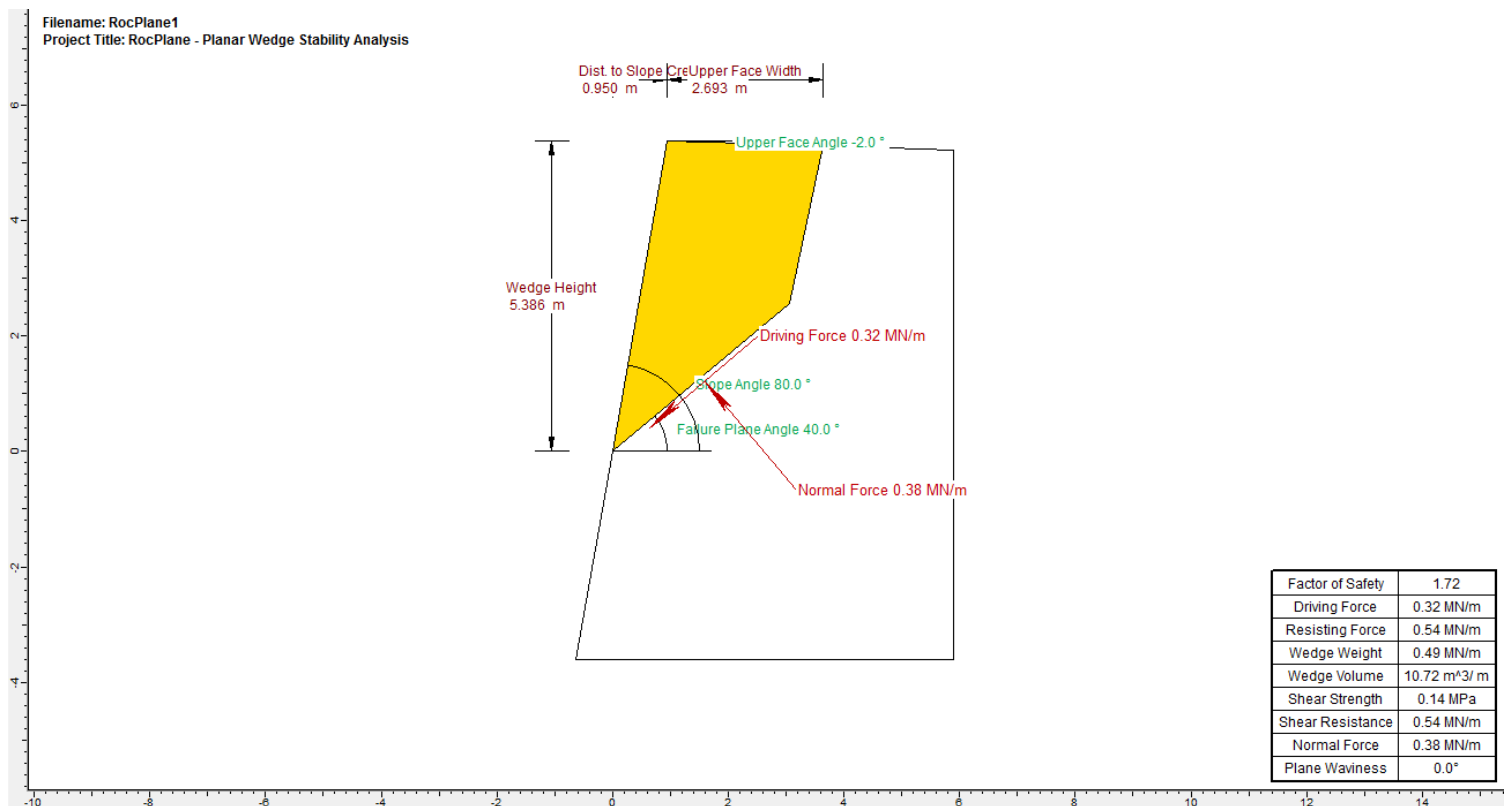
Εικόνα 47: Το κύριο επισφαλές τέμαχος που εντοπίστηκε σημειώνεται με κόκκινο πάνω στο νέφος

5.4.6 Ευστάθεια Κύριου Τεμάχους

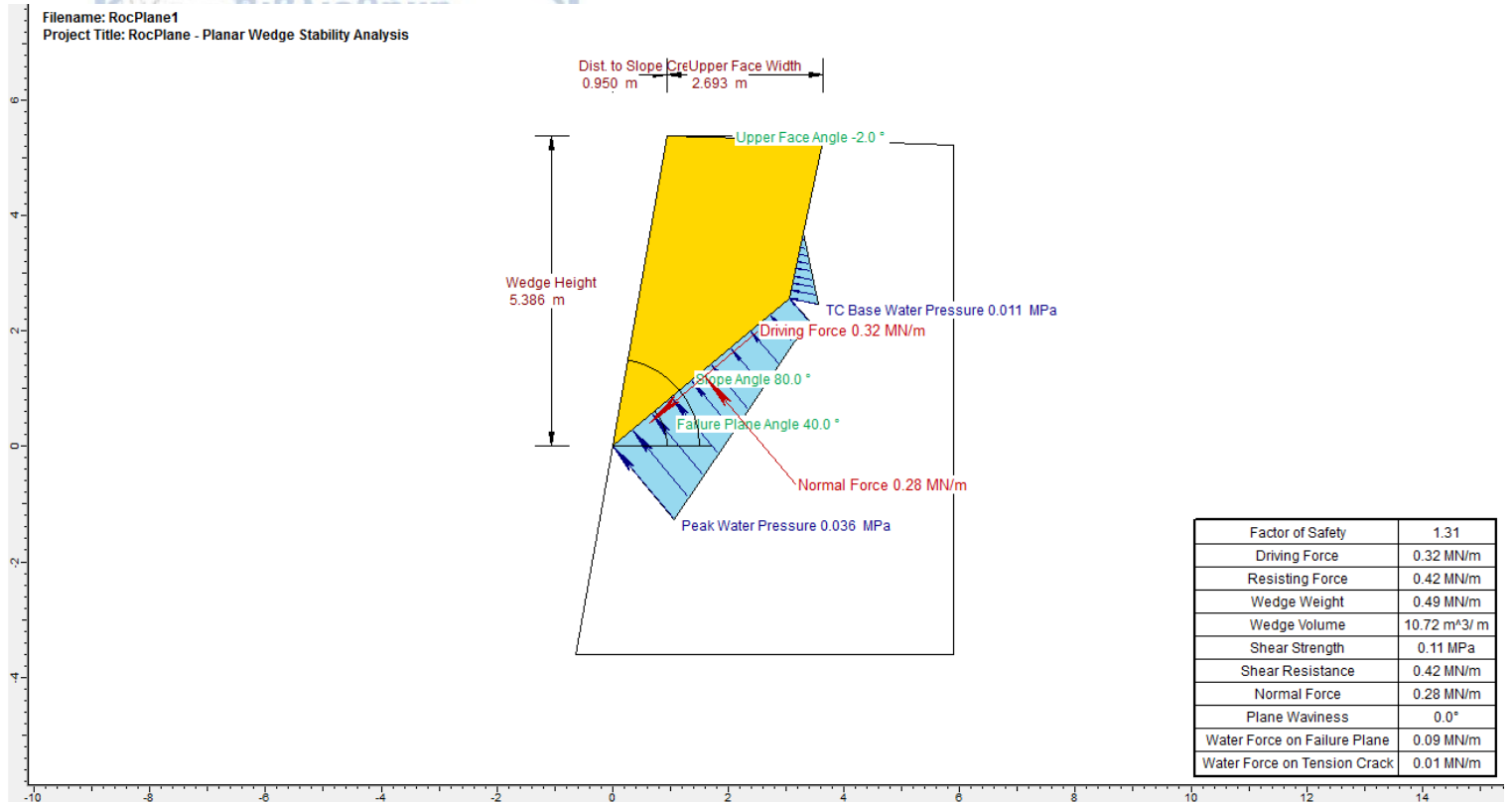
Αφού προσδιορίστηκε το κυριότερο επισφαλές τέμαχος, αναλύθηκε η ευστάθεια του. Ο όγκος του εκτιμήθηκε στην τάξη των 50 m^3 , που ισοδυναμεί με ένα βάρος 1450 KN ή 1.45 MN . Ακολούθως, μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό RocPlane χρησιμοποιώντας τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών του βράχου που έχουν αναφερθεί και υπολογιστεί προηγουμένως. Η προσομοίωση έγινε για ξηρές και υγρές συνθήκες (με 70% και 90% πλήρωση της ασυνέχειας J_1) καθώς και για συνθήκες σεισμού, χρησιμοποιώντας την σεισμική σταθερά σχεδιασμού που δίνεται από τον Ο.Α.Σ.Π. για την περιοχή (0.24). Τα αποτελέσματα έδειξαν ευστάθεια σε ξηρές συνθήκες. Εντούτοις, με >80% πλήρωση της J_1 με νερό ή σε συνθήκες σεισμού ο συντελεστής ασφαλείας γίνεται μικρότερος από 1.2, συνεπώς το τέμαχος βρίσκεται σε οριακή κατάσταση ισορροπίας και χρήζει μέτρων σταθεροποίησης.

	Συνθήκες			
	Ξηρές	Υγρές (70%)	Υγρές (90%)	Σεισμός ($\alpha=0.24$)
Συντελεστής Ασφαλείας (F)	1.72	1.31	1.05	1.11

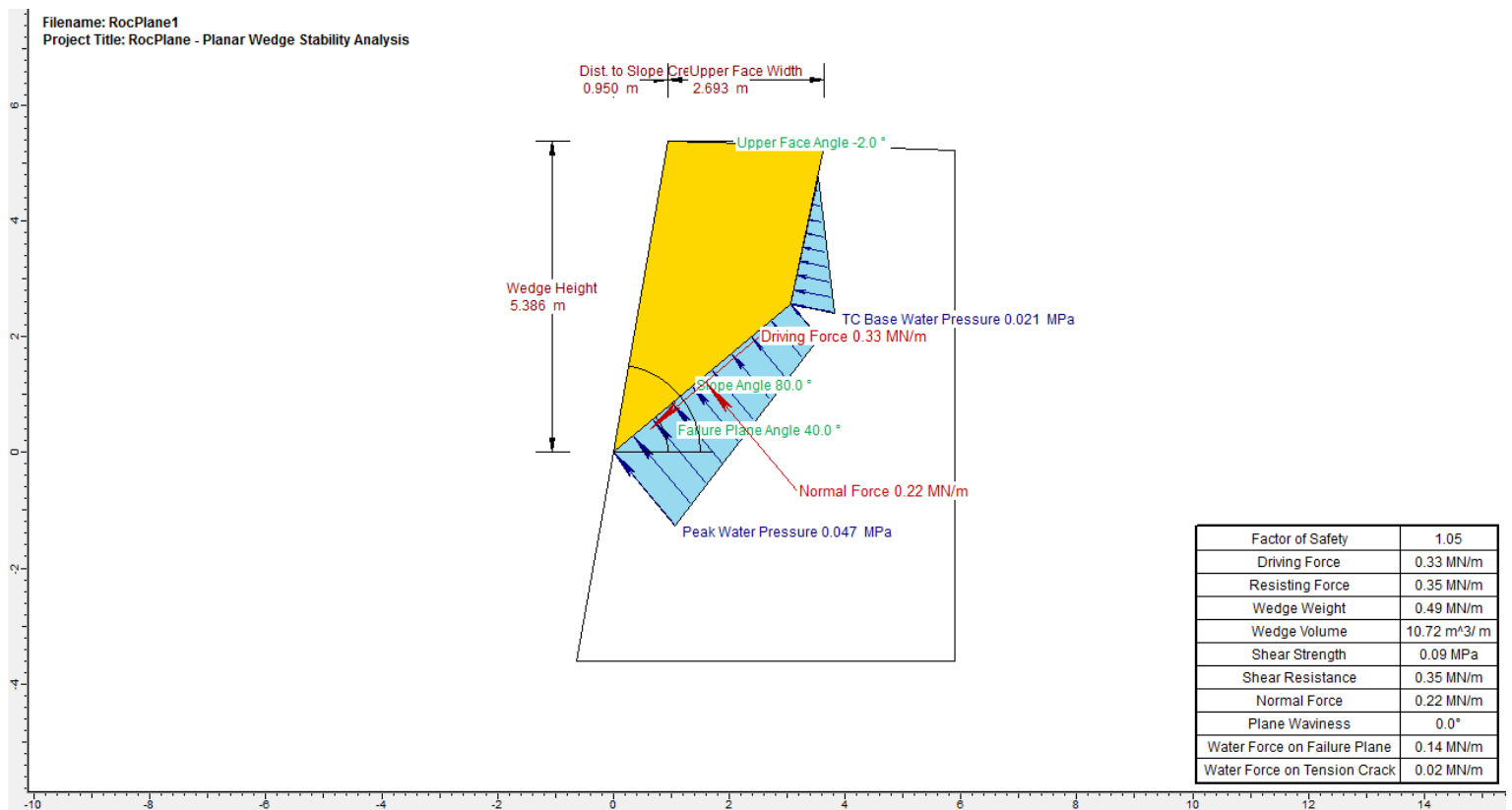
Πίνακας 7: Συντελεστής Ασφαλείας του επισφαλούς τεμάχους για τις διάφορες συνθήκες που εξετάστηκε.



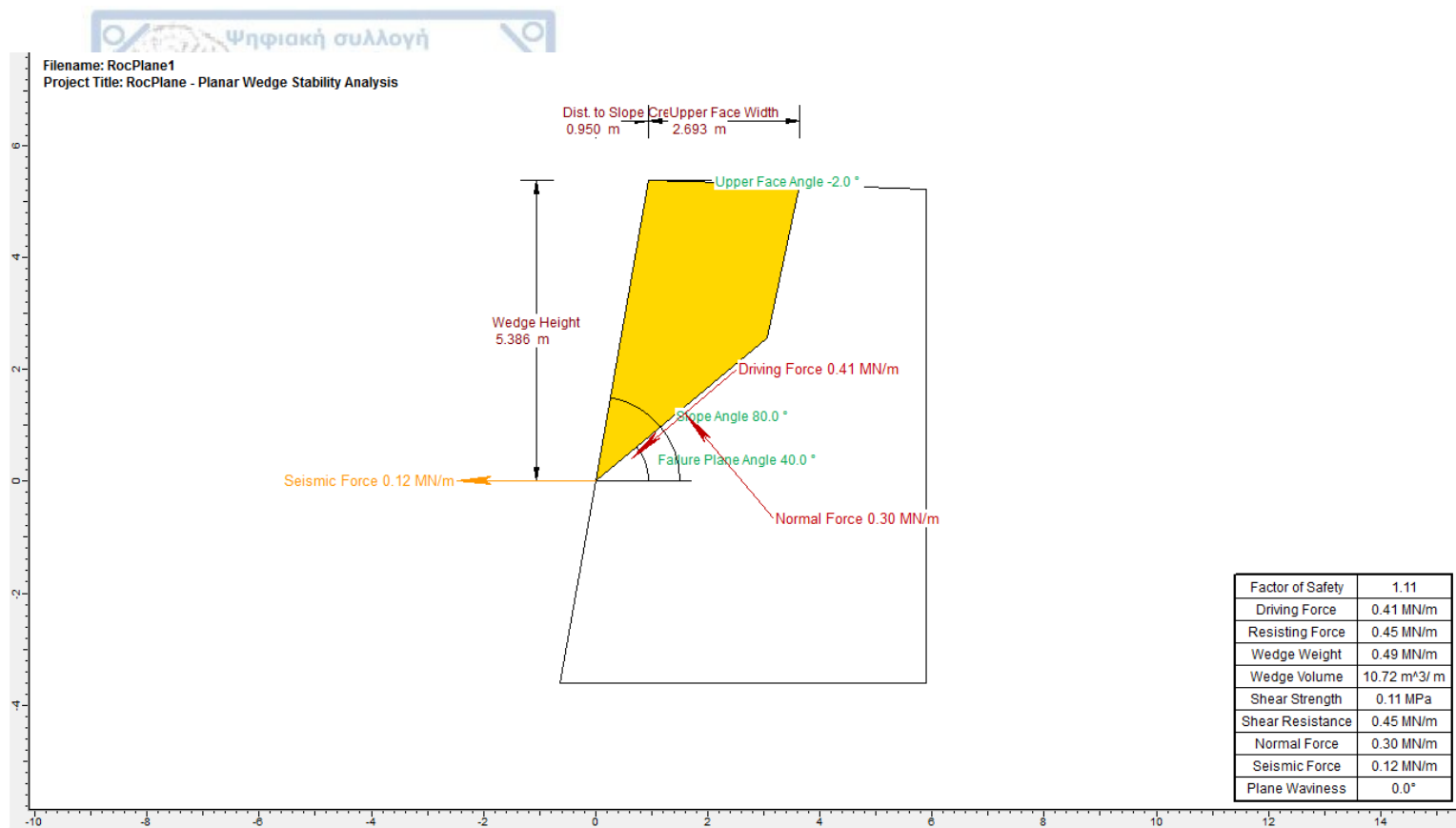
Εικόνα 49: Ανάλυση ευστάθειας σε ξηρές συνθήκες



Εικόνα 51: Ανάλυση ευστάθειας σε υγρές συνθήκες με 70% πλήρωση της ασυνέχειας



Εικόνα 50: Ανάλυση ευστάθειας σε υγρές συνθήκες με 90% πλήρωση της ασυνέχειας



Εικόνα 52: Ανάλυση ευστάθειας σε συνθήκες σεισμού, με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που προβλέπεται από τον σχεδιασμό του Ο.Α.Σ.Π.

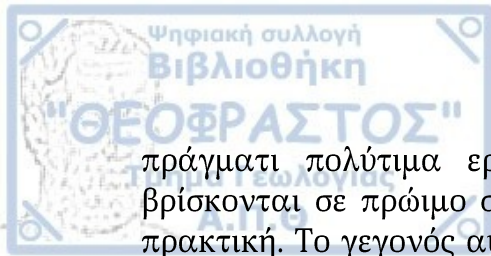
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθώς αναφέρθηκε στην εισαγωγή της εργασίας, ο σκοπός αυτής ήταν πολλαπλός και συνεπώς τα συμπεράσματα που προέκυψαν αναφέρονται ξεχωριστά σε κάθε έναν από τους αρχικούς στόχους που τέθηκαν.

Κατά πρώτο λόγο, και όπως αναλύθηκε και τεκμηριώθηκε προηγουμένως, η αστοχία της 24^{ης} Νοεμβρίου 2018 αποδίδεται κατά βάση στην έντονη βροχόπτωση των προηγουμένων ημερών. Οι γεωμετρικές και μηχανικές συνθήκες της αστοχίας δημιουργήθηκαν από την διάβρωση και την πιθανή ανθρώπινη παρέμβαση στη βάση του πρανούς, όπου υπήρχε μιας σαφής υποσκαφή, καθώς και από την πιθανότατη απομείωση της αντοχής ('άνοιγμα') της ασυνέχειας κατά τον σεισμό της 12^{ης} Ιουλίου 2016. Στο έδαφος αυτό, η απότομη φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της βροχής προκάλεσε την έναρξη της μετακίνησης και την τελική κατάρρευση του επικρεμάμενου τεμάχους.

Όσον αφορά την ευστάθεια του υπόλοιπου πρανούς, τα δεδομένα και οι αναλύσεις που έγιναν δείχνουν ότι υπάρχει ένας πιθανός κίνδυνος ολίσθησης, ο οποίος ωστόσο θα ήταν καλό να μελετηθεί ξεχωριστά και αναλυτικά ώστε να προσδιορισθεί η κατάλληλη μεθοδολογία αντιμετώπισης του. Το συγκεκριμένο συμβάν, παρότι προκάλεσε αρκετή αναταραχή, έθιξε το αίσθημα ασφάλειας πολλών κατοίκων, εκτόπισε κάποιους από τα σπίτια τους και απέφερε σημαντικές για τους ενδιαφερόμενους, υλικές ζημιές, ευτυχώς δεν απέβη θανατηφόρο. Εντούτοις, πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα μάθημα προς την επιστημονική κοινότητα και την πολιτεία, οι οποίες οφείλουν να αναγνωρίζουν και να παρακολουθούν διαρκώς τους εν δυνάμει γεωκινδύνους σε μια κατοικημένη περιοχή. Η συσσωρευμένη γνώση, καταγραφή και τεκμηρίωση τέτοιων συμβάντων ανά τον κόσμο κάνει πλέον ξεκάθαρη την ανάγκη θέσπισης ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αναγνώρισης, παρακολούθησης και αντιμετώπισης των κινδύνων αυτών, τόσο με νομοθεσίες περί πολεοδομίας, δόμησης κ.λ.π., όσο και με ενεργές πολιτικές παρακολούθησης και αντιμετώπισης.

Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση καινοτόμων τεχνολογιών προσφέρει την απαραίτητη δυνατότητα συγκέντρωσης και ταχείας, ημι-αυτοματοποιημένης επεξεργασίας υψηλής ακρίβειας δεδομένων, μεγάλης χωροχρονικής πυκνότητας, με μικρό οικονομικό και χρονικό κόστος. Επί αυτού, η εμπειρία που αποκτήθηκε από την παρούσα εργασία έδειξε πως οι τεχνολογίες αυτές (οι περισσότερες εκ των οποίων αναδείχθηκαν κυρίως μέσα στην τελευταία δεκαετία) αποτελούν



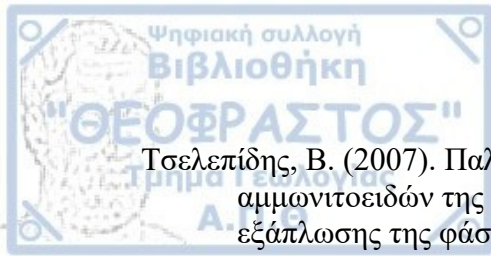
πράγματι πολύτιμα εργαλεία έρευνας. Παρά ταύτα, είναι γεγονός πως βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και δεν έχουν εδραιωθεί ακόμη στην μηχανική πρακτική. Το γεγονός αυτό έχει μια διπλή σημασία: πρώτον, πως η χρήση τους πρέπει να γίνεται πάντα με λεπτομερή επιστημονική επίβλεψη και κριτική αντιμετώπιση νέων μεθοδολογιών και αποτελεσμάτων και δεύτερον, πως αποτελούν ένα μάλλον πρόσφορο πεδίο έρευνας και καινοτομίας για την επόμενη πενταετία.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N., & Jackson, J. (1998). *Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean Region*. *Geophysical Journal International*, 133, 390–406.
- Barton, N. R., & Bandis, S. (1982). Effects Of Block Size On The Shear Behavior Of Jointed Rock. *The 23rd U.S Symposium on Rock Mechanics (USRMS)* (σσ. 739-760). Berkeley, California: American Rock Mechanics Association.
- Barton, N. R., & Bandis, S. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Στο N. R. Barton, & O. Stephansson (Επιμ.), *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints* (σσ. 603-610). Loen: Rotterdam: Balkema.
- Bemis, S., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M., Akcize, S., Thiele, S., & Bangash, H. (2014, December). Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69(A), σσ. 163-178. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- Calvi, V. (1941). *Earthquake catalogue Turkey and some neighboring areas*. Ankara: General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA).
- Chatzipetros, A., Kiratzi, A., Sboras, S., Zouros, N., & Pavlides, S. (2013). Active faulting in the north-eastern Aegean Sea Islands. *Tectonophysics* 597-598:106. doi:10.1016/j.tecto.2012.11.026
- Coulson, J. (1972). Shear strength of flat surfaces in rock stability of rock slopes. Στο E. Cording (Επιμ.), *13th 1971 U.S. Symposium of Rock Mechanics*, (σσ. 77-105).
- Dong, X. X. (2019, Αύγουστος). Reconstruction of Surficial Rock Blocks by Means of Rock Structure Modelling of 3D TLS Point Clouds: The 2013 Long-Chang Rockfall. *Rock Mechanics and Rock Engineering*(53), σσ. 671–689. doi:10.1007/s00603-019-01935-0
- Giani, G. P. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*. CRC Press.
- Goodman, R. E. (1995, Σεπτέμβριος). Block theory and its application. *Géotechnique*, 45, σσ. 383-423. doi:10.1680/geot.1995.45.3.383
- Harr, M. (1987). *Reliability-based design in civil engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Hasan Sözbilir, Ö. S. (2016). *Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey*. *Geodinamica Acta*,. doi:10.1080/09853111.2016.1175294
- Hasan Sözbilir, Ö. S. (2016, April 27). Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey. *Geodynamica Acta*, σσ. 273-294,. doi:10.1080/09853111.2016.1175294
- Hecht, J. (1972). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος -Νήσος Λέσβος, Φύλλο Πλωμάριον-Μυτιλήνη. Ελλάδα: Εθνικό Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.

- Hoek, E. (1989). A limit equilibrium analysis of surface crown pillar stability. *Surface crown pillar evaluation for active and abandoned metal mines*, 3-13. (M. Betourney, Συντάκτης) Ottawa: Dept. Energy, Mines & Resources Canada.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering. Revised 3rd Edition*. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- I.S.R.M. (1977). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*(15), σσ. 47-51.
- Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., & Harrap, R. (2009). . Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 194–199. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007>
- Makropoulos, K., Kaviris, G., & Kouskouna, V. (2012). *An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1425-1430. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1425-2012>
- Miller, S., Whyatt, J., & McHugh, E. (2004). Applications of the Point Estimation Method for stochastic rockslope engineering. *ARMA/NARMS 04-517*. Houston, TX: American Rock Mechanics Association. Ανάκτηση από <https://www.semanticscholar.org/paper/Applications-Of-The-Point-Estimation-Method-For-Miller-Whyatt/be1e36487aa67f97365a5f809a5f14ed4278a58b>
- Mountrakis, D., Sapountzis, E., Kiliadis, A., Eleftheriadis, G., & Christofides G. (1983). Paleogeographic conditions in the western Pelagonian margin in Greece during the initial rifting of the continental area. *Can. J. Earth Sci.*, vol.20, pp.1673-1681.
- Musson, R. M., Grünthal, G., & Stucchi, M. (2009). The comparison of macroseismic intensity scales. *Journal of Seismology*, Springer Verlag, 2009, 14 (2), pp.413-428. doi:10.1007/s10950-009-9172-0
- NTUA/EDCM (Επιμ.). (2017). *Σεισμός Λέσβου Mw 6.3, 12/6/2017*. ESRI. Ανάκτηση από <https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=5c7fa279f842492d9c86cd384679d74f>
- Öcal, N. (1968). *Seismicity and earthquake geography in Turkey, earthquake catalogue for 1850–1960 (Vol. 8)*. Istanbul: Publications of Kandilli Observatory Publications (in Turkish).
- Palmström, A. (2000). BLOCK SIZE AND BLOCK SIZE DISTRIBUTION. Melbourne: GeoEng2000.
- Palmstrom, A. (2001). Measurement and characterization of rock mass jointing. Στο V. M. Sharma (Επιμ.), *In-situ characterization of rocks*. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.
- Palmström, A., & Singh, R. (2001). THE DEFORMATION MODULUS OF ROCK MASSES - COMPARISONS BETWEEN IN SITU TESTS AND INDIRECT ESTIMATES. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16(3), σσ. 115-131.

- Pavlidis, S., Chatzipetros, A., & Sboras, S. (2018). Active faults as seismogenic sources in the Aegean region. 9th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology, Conference Paper.
- Riquelme, A. J. (2014, Ιούλιος). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, σσ. 38-52. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). *A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds*. *Computers & Geosciences*, Vol. 68, 38-52. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Riquelme, A., Abellan, A., & Tomás, R. (2015, June). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*(195).
- Rosenblueth, E. (1975). Point Estimates for probability moments. 72(10 (*Mathematics*)), 3812-3814. *Proc. National Academy of Sci.*
- SKOURTSOS, E. L.-I. (2019). Landslides induced by the 2017 Lesvos (North Eastern Aegean Sea) earthquake and engineering measures for landslide disaster mitigation. *15th International Congress of the Geological Society of Greece*. Athens: Bulletin of the Geological Society of Greece, Sp. Pub. 7.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. (R. Schuster, & R. Krizek, Επιμ.) *Special Report 176: Landslides: Analysis and control*, σσ. 11-33.
- Varnes, D. J. (χ.χ.). Slope movement types and processe. Washington D.C. : Special Report 176: Landslides: Analysis and control (Eds: Schuster, R.L and Krizek, R.J), Transportation and Road research board, National Academy of Science.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., & Kanamori, H. (1999, August). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, pp. 557-564.
- Θωμαΐδου, Ε. Α. (2009). Η Γεωλογική δομή της νήσου Λέσβου. Διδακτ. Διατρ. Α.Π.Θ.
- Κατσικάτσος Γ., Ματαράγκας Δ., Μιγκίρος Γ. , & Τριανταφύλλης Μ. (1982). Γεωλογική Μελέτη της Νήσου Λέσβου. Αθήνα: Ι.Γ.Μ.Ε.
- Κούκης, Γ. Χ., & Σαμπατακάκης, Ν. Σ. (2002). *Τεχνική Γεωλογία*. Παπασωτηρίου.
- Κωνσταντινίδης, Ι. (2019). ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDaR ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ «ΑΠΟΘΗΚΕΣ», ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ, ΕΛΛΑΔΑ. 66. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Βιβλιοθήκη τμ. Γεωλογίας 'Θεόφραστος'.
- Ανάκτηση από <http://geolib.geo.auth.gr/index.php/grelit/article/view/12397>
- Μουντράκης, Δ. (2010). *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. University Studio Press.
- Παπαδημητρίου, Π. (2018). *The 12 th June 2017 M w = 6.3 Lesvos earthquake from detailed seismological observations*. *Journal of Geodynamics* 115:23-42. doi:10.1016/j.jog.2018.01.009
- Παπαζάχου, Κ., & Παπαζάχος, Β. (2003). *Οι Σεισμοί της Ελλάδας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Σαμπατακάκης, Ν., & Κούκης, Γ. (2007). *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.



Τσελεπίδης, Β. (2007). Παλαιοντολογική και στρωματογραφική μελέτη των αμμωνιτοειδών της Επιδάουρου. Συμβολή στη γνώση της παλαιογεωγραφικής εξάπλωσης της φάσης Hallstatt στις ελληνίδες. Διδακτ. Διατρ. Α.Π.Θ.

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