



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας και αξιολόγηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση κατολισθητικών κινήσεων στον οικισμό Νατά της επαρχίας Πάφου, Κύπρος.

Διπλωματική Εργασία

Αγγελική Αχιλλίδου

Επιβλέπων Καθηγητής :

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας και αξιολόγηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση κατολισθητικών κινήσεων στον οικισμό Νατά της επαρχίας Πάφου, Κύπρος.

Διπλωματική Εργασία

Αγγελική Αχιλλίδου

Επιβλέπων Καθηγητής : Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τριμελή επιτροπή στις / /2024 :

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π (Υπογραφή)
Κωνσταντίνος Αθανασάς, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)
Παρασκευάς Τσαγγαράτος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Αθήνα, 2024

Copyright © Αχιλλίδου Αγγελική, 2024

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας και αξιολόγηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση κατολισθητικών κινήσεων στον οικισμό Νατά της επαρχίας Πάφου, Κύπρος.

Διπλωματική Εργασία

της

Αγγελικής Αχιλλίδου

Επιβλέπων Καθηγητής : Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2024

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται ο μηχανισμός αστοχίας ολισθαίνοντος πρανούς στην κοινότητα Νατάς της επαρχίας Πάφου, στην Κύπρο. Έπειτα από μελέτη του γεωλογικού υπόβαθρου, σε συνδυασμό με τα κλιματολογικά και τα σεισμικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, δίνεται ερμηνεία σχετικά με τη συμπεριφορά του πρανούς, η οποία ενισχύεται από καταγραφές μετακινήσεων που έγιναν με χρήση μέσων τηλεπισκόπησης. Κύριος παράγοντας που οδηγεί στην ολίσθηση του πρανούς είναι η δημιουργία επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που προσδίδει, επίσης, περιοδικό χαρακτήρα στις μετακινήσεις. Δεν υπάρχει άμεση σύνδεση των σεισμικών φαινομένων με την περιοδικότητα των μετακινήσεων.

Με βάση τα γεωμετρικά και τα γεωτεχνικά δεδομένα που λαμβάνονται ως αποτέλεσμα γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης, σχεδιάζεται μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας του πρανούς στο λογισμικό PLAXIS 2D LE. Μέσα από αναλύσεις διαφόρων σεναρίων, εντοπίζεται ο μηχανισμός αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς, ως μια επαλληλία περιστροφικών αστοχιών που δημιουργούν μια συνολική επιφάνεια ολίσθησης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις αναστροφές αναγλύφου που εντοπίζονται στον οικισμό.

Με χρήση του λογισμικού PLAXIS 2D LE εκπονήθηκαν, επίσης, παραμετρικές αναλύσεις σχετικά με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, με σκοπό την αξιολόγηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων. Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν συμπεραίνεται ότι όσο χαμηλότερο είναι το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο πιο σταθερό είναι το πρανός. Σε περιόδους που η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πλησιάζει το μέγιστο, απαιτείται ταπείνωσή της, για τη διασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς. Δεδομένων των χαρακτηριστικών των γεωυλικών που αποτελούν το πρανός και το επιθυμητό βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, η ταπείνωση θα πρέπει να γίνει με άντληση από γεωτρήσεις μεγάλου βάθους.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERING
SECTOR OF GEOLOGICAL SCIENCES

Failure Mechanism Investigation and Evaluation of Drainage Techniques for Arresting and Preventing Landslide Movements in Nata village, in Paphos, Cyprus

Diploma Thesis

By

Angeliki Achillidou

Supervisor: Constantinos Loupasakis, Professor N.T.U.A

Athens, 2024

Abstract

In this thesis takes place the investigation of the failure mechanism of a landslide slope in Nata village, in the district of Paphos, in Cyprus. By combining the geological background with the climatological and seismic data of the study area, an interpretation is given regarding the behavior of the slope. This interpretation is supported by remote sensing movement derived data. The landslide movement is characterized by periodicity and the main factor that leads to it, is the appearance of a perched water table after heavy rainfall, during the winter months. There is no direct relation between seismic phenomena and the periodicity of the movement.

Based on the geometric and geotechnical data obtained by drilling in the study area, a slope stability analysis model is designed in PLAXIS 2D LE. By analyzing different scenarios, the failure mechanism of the slope is identified as overlapping rotational failures that create an overall slip surface. This conclusion is confirmed by the relief inversions found in the village.

Using PLAXIS 2D LE, parametric analyzes regarding the water table level were, also, performed, in order to evaluate drainage techniques for the arrest and prevention of landslide movements. From the obtained results, it is concluded that by lowering the water table level, the stability of the slope is enhanced. In periods when the water table reaches the maximum level, it is required to lower it, in order to ensure stability. Based on the geological characteristics of the slope materials and the desired depth of the water table level, the lowering must be done by pumping from deep wells.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού διπλώματος της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καταρχάς, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και συγγραφής της παρούσας εργασίας. Με την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος και τις συμβουλές από την πολύχρονη εμπειρία του, με ώθησε να χρησιμοποιήσω τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και ταυτόχρονα να μελετήσω νέες πηγές και γνωστικά αντικείμενα, εξάγοντας, έτσι, μια εργασία βασισμένη σε σύγχρονες μεθόδους και μέσα αναλύσεων.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Χαράλαμπο Κοντοέ, Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), για την δυνατότητα που μου έδωσε να αξιοποιήσω τις υποδομές και τα δεδομένα της Επιχειρησιακής μονάδα «Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND» του ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ, και την Δρ. Σταυρούλα Αλατζά, για την καθοδήγηση που μου προσέφερε για την κατανόηση των μεθόδων τηλεπισκόπησης και των διεργασιών για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, μέσω των μεθόδων αυτών.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Διεύθυνση του Κλάδου Μηχανικής Γεωλογίας και Γεωκινδύνων του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου για την παροχή πληροφοριών και δεδομένων που αφορούν την περιοχή μελέτης και το υπό εξέταση πρανές.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ απευθύνεται στην οικογένεια μου, που με συνεχή στήριξη και αστείρευτη αγάπη βρισκόταν δίπλα μου σε όλη τη διαδρομή μου μέχρι σήμερα.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ - ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	2
1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	2
1.2 ΜΕΤΡΑ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΑΝΩΝ	9
1.3 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΝΑΤΑΣ, ΕΠΑΡΧΙΑ ΠΑΦΟΥ	11
2.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ	11
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	16
2.3 ΘΕΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	16
2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	18
2.5 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	21
2.5.1 Σχηματισμός Κανναβιού.....	23
2.5.2 Σύμπλεγμα Μαμωνιών.....	24
2.5.3 Σχηματισμός Λευκάρων.....	24
2.6 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΎΔΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	25
2.7 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	28
2.8 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΩΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ	42
3.1 ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	42
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SAR	42
3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΛΗΨΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ SAR	44
3.4 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΜΕΣΩ SAR	45
3.4.1 Χαρακτηριστικά επιφάνειας - σκεδαστών.....	46
3.4.2 Γεωμετρικές παραμορφώσεις.....	47
3.4.3 Κηλίδωση.....	49
3.5 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (INSAR).....	50
3.5.1 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης (Phase – unwrapping).....	52
3.5.2 Συνάφεια (Coherence).....	53
3.6 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (DINSAR)	54
3.6.1 Μέθοδος Σταθερών Σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry - PSI).....	54
3.6.2 StaMPS - Stanford Method for Persistent Scatterers	55
3.6.3 Μέθοδος Υποσυνόλων Μικρών Βάσεων (Small Baseline Subset – SBAS)	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	56
4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ SENTINEL-1.....	56
4.2 EUROPEAN GROUND MOTION SERVICE OF COPERNICUS	56
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	57
4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PLAXIS 2D LE ΚΑΙ Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	63
5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ	64
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ	67
5.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ	69
5.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	71
5.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ	75
5.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ Η ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΠΟΥ ΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΠΡΑΝΕΣ	77
5.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	79
5.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	84
6.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	84
6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	86
6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΜΗ-ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	88
6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΑΝΕΣ	89
7.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	89
7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΚΥΚΛΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ	90
7.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΜΗ-ΚΥΚΛΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ	90
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΣΩΜΑ ΟΛΙΣΘΑΙΝΟΥΣΑΣ ΜΑΖΑΣ.....	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΚΥΚΛΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ	119

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Καταπτώσεις βράχων (The Geological Society - http://www.ukgeohazards.info)	3
Εικόνα 2. Ανατροπή βράχου (British Geological Survey, 2024)	3
Εικόνα 3. Περιστροφική Ολίσθηση (Cruden and Varnes (1996), Highland and Bobrowsky (2008))	4
Εικόνα 4. Μεταθετική Ολίσθηση (Linn & Bobrowsky, 2008)	5
Εικόνα 5. Πλευρικές Εξαπλώσεις (USGS, 2004)	5
Εικόνα 6. Ροές Κορημάτων (Nettleton et al. , 2005)	6
Εικόνα 7. Ερπυσμός (The Geo Room, 2023)	7
Εικόνα 8. Μέθοδοι Σταθεροποίησης Πρανών (American Geosystems, LLC, 2016)	9
Εικόνα 9. Μέθοδοι Σταθεροποίησης Πρανών (Gadgil, Dept. of Earth Science, Goa University, 2018)	10
Εικόνα 10. Χάρτης κατανομής κατολισθήσεων στην επαρχία Πάφου (Scott Wilson et al. , 2010)	11
Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση γεωλογικής εξέλιξης Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2019)	13
Εικόνα 12. Γεωλογικός Χάρτης Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2016)	14
Εικόνα 13. Γεωλογικές Ζώνες Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2012)	15
Εικόνα 14. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) σε δορυφορική εικόνα (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2010)	17
Εικόνα 15. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) σε τοπογραφικό χάρτη (Scott Wilson et al. , 2010)	17
Εικόνα 16. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) (Scott Wilson et al. , 2010)	18
Εικόνα 17. (Αριστερά) Παραμόρφωση σε δρόμο στα όρια της κατολίσθησης	19
Εικόνα 18. (Δεξιά) Κτηριακή κατασκευή υπό κλίση λόγω των μετακινήσεων της κατολίσθησης	19
Εικόνα 19. Θέση λήψης Εικόνων 17 και 18, στο νοτιοδυτικό άκρο της κατολίσθησης	19
Εικόνα 20. Προβλήματα σε κτήρια που βρίσκονται στο φρύδι της κατολίσθησης	20
Εικόνα 21. Τεχνικογεωλογικός χάρτης κατολίσθησης (LI1417) (Scott Wilson et al. , 2010)	21
Εικόνα 22. Γεωλογική τομή A-A' κατολίσθησης (LI1417) (Scott Wilson et al. , 2010)	22
Εικόνα 23. Κατανομή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συγκριτικά με την κατανομή των κατολισθήσεων στην επαρχία Πάφου (Scott Wilson et al. , 2010)	26
Εικόνα 24. Διάγραμμα δεδομένων βροχόπτωσης που καταγράφηκαν στον σταθμό μέτρησης του Αεροδρομίου Πάφου, στο διάστημα 2018 - 2022	27
Εικόνα 25. Σεισμική κατανομή στην επαρχία Πάφου συγκριτικά με την κατανομή των κατολισθήσεων (Scott Wilson et al. , 2010)	29
Εικόνα 26. Χάρτης Ενεργών Σεισμολογικών Σταθμών του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/)	30

Εικόνα 27. Χάρτης Σεισμικότητας αισθητών σεισμών, με μέγεθος $M_I > 3$, για το διάστημα 1997 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου , http://www.gsd-seismology.org.cy/)	32
Εικόνα 28. Καταγραφή σεισμών μεγέθους $M_I > 2$ σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/)	33
Εικόνα 29. Καταγραφή όλων των σεισμών σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/).....	34
Εικόνα 30. Καταγραφή Σεισμών μεγέθους $M_I > 4.5$ σε ακτίνα 50 km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/)	35
Εικόνα 31. Αποτελέσματα αποκλισιομέτρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2012-2022)	37
Εικόνα 32. Αποτελέσματα αποκλισιομέτρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2022).....	38
Εικόνα 33. Αποτελέσματα αποκλισιομέτρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2022).....	39
Εικόνα 34. Αποτελέσματα αποκλισιομέτρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2022).....	40
Εικόνα 35. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λήψης εικόνας SAR (Michele Martone , Onboard Quantization for Interferometric and Multichannel Synthetic Aperture Radar (SAR) Systems, 2019)	45
Εικόνα 36. Σκέδαση ακτινοβολίας ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας των σκεδαστών (CCRS/CCT)	46
Εικόνα 37. Σκέδαση ακτινοβολίας σε σχέση με γεωμετρία θέασης και γεωμετρία χαρακτηριστικών της επιφάνειας (CCRS/CCT)	47
Εικόνα 38. Γεωμετρικές παραμορφώσεις – Παραμόρφωση κλίμακας πλευρικής απόστασης (CCRS/CCT).....	48
Εικόνα 39. Γεωμετρικές παραμορφώσεις – Σμίκρυνση (CCRS/CCT).....	48
Εικόνα 40. Γεωμετρικές παραμορφώσεις – Πτύχωση (CCRS/CCT)	49
Εικόνα 41. Γεωμετρία συστήματος InSAR (ESA, 2007)	50
Εικόνα 42. Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης (Osmanoglu et al., 2016)	52
Εικόνα 43. Αριστερά: το εξομαλυμένο συμβολογράφημα και Δεξιά: το σχετικό DEM του βουνού Αίτνα που δημιουργήθηκαν μέσω αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης και αναδόμησης εικονοστοιχείων (CCRS).....	53
Εικόνα 44. LOS μετακινήσεις στην περιοχή κοινότητας Νατάς για καθοδική τροχιά (EAA)	57
Εικόνα 45. LOS μετακινήσεις στην περιοχή κοινότητας Νατάς για ανοδική τροχιά (EAA)	58
Εικόνα 46. Καταγραφή Μετακινήσεων στην περιοχή της κοινότητας Νατάς (EGMS, https://egms.land.copernicus.eu/)	59
Εικόνα 47. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 1 (EGMS, https://egms.land.copernicus.eu/ , 19/6/2024)	60

Εικόνα 48. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 2 (EGMS, https://egms.land.copernicus.eu/ , 19/6/2024)	60
Εικόνα 49. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 3 (EGMS, https://egms.land.copernicus.eu/ , 19/6/2024)	61
Εικόνα 50. Θέσεις καταγραφής μετακινήσεων στον τεχνικογεωλογικό χάρτη της ολισθαίνουσας μάζας	61
Εικόνα 51. Το περιβάλλον εργασίας – σχεδίασης του λογισμικού PLAXIS 2D LE.....	64
Εικόνα 52. Δημιουργία νέου αρχείου στο PLAXIS 2D LE	64
Εικόνα 53. Ονομασία νέου μοντέλου, καθορισμός μονάδων μέτρησης και κατεύθυνσης της επιφάνειας αστοχίας	65
Εικόνα 54. Καρτέλα ρύθμισης των χαρακτηριστικών του μοντέλου	65
Εικόνα 55. Καθορισμός της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας (πάνω) και ρυθμίσεις του τρόπου εύρεσης επιφάνειας αστοχίας (κάτω αριστερά και δεξιά)	66
Εικόνα 56. Δημιουργία γεωμετρίας του υπό ανάλυση πρανούς.....	67
Εικόνα 57. Οι περιοχές από τις οποίες αποτελείται το προσομοίωμα του υπό ανάλυση πρανούς στην κοινότητα Νατάς.....	67
Εικόνα 58. Παράδειγμα (για την περιοχή R1) του τρόπου εισαγωγής των συντεταγμένων των σημείων που ορίζουν μια περιοχή (region) στο PLAXIS 2D LE.....	68
Εικόνα 59. Γεωμετρία μοντέλου υπό μελέτη πρανούς.....	68
Εικόνα 60. Ονομασία γεωυλικού και καθορισμός χρώματος και τρόπου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής του	69
Εικόνα 61. Καρτέλα εισαγωγής των γεωυλικών που αποτελούν το υπό ανάλυση μοντέλο στο PLAXIS 2D LE	69
Εικόνα 62. Τα τρία εδαφικά υλικά που δομούν το πρανές.....	70
Εικόνα 63. Καθορισμός των παραμέτρων αντοχής κάθε εδαφικού υλικού (παράδειγμα για τον σχηματισμό DisLefkara Chalk).....	70
Εικόνα 64. Καρτέλα εισαγωγής των εργαλείων για την εύρεση της επιφάνειας αστοχίας. 71	
Εικόνα 65. Καθορισμός των περιοχών εισαγωγής και εξαγωγής της επιφάνειας ολίσθησης	72
Εικόνα 66. Καθορισμός της θέσης του κανάβου και του αριθμού των κόμβων που τον αποτελούν.....	72
Εικόνα 67. Καθορισμός της θέσης της γραμμής από όπου θα διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης	72
Εικόνα 68. Παράδειγμα θέσης κανάβου και γραμμής από όπου θα διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης	73
Εικόνα 69. Καρτέλα εισαγωγής των εργαλείων για την εύρεση της επιφάνειας αστοχίας. 73	
Εικόνα 70. Καθορισμός των περιοχών εισαγωγής και εξαγωγής της επιφάνειας ολίσθησης	74
Εικόνα 71. Καθορισμός του συνόλου των γραμμικών τμημάτων που αποτελούν τη μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας.....	74
Εικόνα 72. Παράδειγμα μη κυκλικής επιφάνειας προς μελέτη	75
Εικόνα 73. Καρτέλα εισαγωγής του υδροφόρου ορίζοντα στο PLAXIS 2D LE.....	75
Εικόνα 74. Επιλογή τρόπου εισαγωγής πίεσης του νερού των πόρων στο προσομοίωμα στο PLAXIS 2D LE	76
Εικόνα 75. Εισαγωγή των σημείων που ορίζουν τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα	76

Εικόνα 76. Καρτέλα εισαγωγής των φορτίων που δρουν στο μοντέλο.....	77
Εικόνα 77. Καθορισμός του μεγέθους και της θέσης των κατανεμημένων φορτίων στο προσομοίωμα του υπό ανάλυση πρανούς στην κοινότητα Νατάς.....	78
Εικόνα 78. Φορτία που δρουν στο υπό εξέταση πρανές.....	78
Εικόνα 79. Καθορισμός τρόπου εισαγωγής του σεισμικού φορτίου στο μοντέλο.....	79
Εικόνα 80. Εισαγωγή σεισμικών συντελεστών για την επίλυση του μοντέλου υπό σεισμική φόρτιση.....	79
Εικόνα 81. Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων υποστήριξης.....	80
Εικόνα 82. Ονομασία και ορισμός είδους του στοιχείου υποστήριξης.....	80
Εικόνα 83. Παράδειγμα καθορισμού θέσης στοιχείου υποστήριξης.....	80
Εικόνα 84. Παράδειγμα καθορισμού χαρακτηριστικών στοιχείου υποστήριξης.....	81
Εικόνα 85. Καρτέλα υπολογισμού των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευστάθειας του μοντέλου.....	81
Εικόνα 86. Τρόπος εμφάνισης της επιφάνειας ολίσθησης και του συντελεστή ασφαλείας στο Output του λογισμικού.....	82
Εικόνα 87. Καρτέλα ελέγχου των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στο Output το λογισμικού.....	82
Εικόνα 88. Επιλογή εμφάνισης όλων των επιφανειών αστοχίας που ελέγχθηκαν από το λογισμικό.....	83
Εικόνα 89. Αποτέλεσμα ανάστροφης ανάλυσης για κυκλική αστοχία μικρού βάθους.....	85
Εικόνα 90. Κυκλικές επιφάνειες αστοχίας που εντοπίζονται στο προσομοίωμα.....	87
Εικόνα 91. Αποτελέσματα μελέτης μη-κυκλικών επιφανειών αστοχίας.....	88
Εικόνα 92. Γραφική παράσταση μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας των επιφανειών αστοχίας σε σχέση με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.....	92
Εικόνα 93. Αποτελέσματα Γεώτρησης ΒΗ8 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2010).....	98
Εικόνα 94. Αποτελέσματα Γεώτρησης ΒΗ9, (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2010).....	99
Εικόνα 95. Αποτελέσματα Γεώτρησης ΒΗ9 (Συνέχεια) (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2010).....	100
Εικόνα 96. Αποτελέσματα γεώτρησης ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/ , 2010).....	101
Εικόνα 97. Αναζήτηση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line).....	102
Εικόνα 98. Αποτέλεσμα αναζήτησης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line) - Κυκλική επιφάνεια αστοχίας Α.....	103
Εικόνα 99. Αναζήτηση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line).....	104
Εικόνα 100. Αποτέλεσμα αναζήτησης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line) - Κυκλική επιφάνεια αστοχίας Β.....	105
Εικόνα 101. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 1.....	106
Εικόνα 102. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 2.....	107
Εικόνα 103. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 3.....	108
Εικόνα 104. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Α για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια.....	109

Εικόνα 105. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια.....	110
Εικόνα 106. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια.....	111
Εικόνα 107. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -15m από την επιφάνεια.....	112
Εικόνα 108. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια.....	113
Εικόνα 109. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας B για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια.....	114
Εικόνα 110. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας B για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια.....	115
Εικόνα 111. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας B για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια.....	116
Εικόνα 112. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας B για Υ.Ο. -15m από την επιφάνεια.....	117
Εικόνα 113. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας B για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια.....	118
Εικόνα 114. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια.....	119
Εικόνα 115. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια.....	120
Εικόνα 116. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια.....	121
Εικόνα 117. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -15m από την επιφάνεια.....	122
Εικόνα 118. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια.....	123

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)	2
Πίνακας 2. Ταξινόμηση Κατολισθήσεων με βάση τον μηχανισμό ολίσθησης (BGS, 2024)	8
Πίνακας 3. Συμπληρωματικά γεωτεχνικά και ορυκτολογικά δεδομένα για δείγματα συνεκτικού εδάφους από επιλεγμένες τοποθεσίες σε όλη την Κύπρο (M. Charalambous, P.R. N. Hobbs and K. J. Northmore, 1986)	22
Πίνακας 4. Στρωματογραφική ταξινόμηση των μεσοζωικών πετρωμάτων της ΝΔ Κύπρου (K. J. Northmore, M. Charalambous, P. R. N. Hobbs and G. Petrides, 1986)	23
Πίνακας 5. Δεδομένα βροχόπτωσης που καταγράφηκαν στον σταθμό μέτρησης του Αεροδρομίου Πάφου, στο διάστημα 2018 – 2022 (Τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου, https://www.dom.org.cy/CLIMATOLOGY)	27
Πίνακας 6. Ενεργοί Σεισμολογικοί Σταθμοί του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου (http://www.gsd-seismology.org.cy/)	31
Πίνακας 7. Καταγραφή σεισμών μεγέθους $M_l > 2$ σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/)	34
Πίνακας 8. Καταγραφή Σεισμών μεγέθους $M_l > 4.5$ σε ακτίνα 50 km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, http://www.gsd-seismology.org.cy/)	35
Πίνακας 9. Περιγραφή σχηματισμών που εντοπίστηκαν από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις	36
Πίνακας 10. Μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών του ολισθαίνοντος πρανούς	41
Πίνακας 11. Δεδομένα αναλύσεων για ανοδική και καθοδική τροχιά	56
Πίνακας 12. Καθορισμός γεωυλικών που δομούν κάθε περιοχή της γεωμετρίας του μοντέλου	70
Πίνακας 13. Τιμές συνοχής και παραμένουσας γωνίας τριβής σχηματισμών του υπό μελέτη πρανούς (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου & British Geological Survey, 2010)	84
Πίνακας 14. Τιμές συνοχής και γωνίας τριβής μη διαταραγμένων σχηματισμών (Northmore et al., 1986)	84
Πίνακας 15. Αρχικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών στο προσομοίωμα	85
Πίνακας 16. Τελικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών στο προσομοίωμα, από την ανάστροφη ανάλυση	85
Πίνακας 17. Επίπεδα στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για κάθε περίπτωση μελέτης	89
Πίνακας 18. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τις κυκλικές επιφάνειες αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς	90
Πίνακας 19. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς	91

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού διπλώματος της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας πρανούς στην κοινότητα Νατάς της επαρχίας Πάφου, στην Κύπρο, καθώς επίσης και η μελέτη για αξιοποίηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατηγορίες των κατολισθητικών φαινομένων και τα μέτρα που λαμβάνονται για την ανάσχεσή τους, με συγκεκριμένη αναφορά στις κατολισθήσεις στην Κύπρο.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, δίνονται πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης της εν λόγω εργασίας, καθώς και το γεωλογικό και γεωτεχνικό υπόβαθρο, τα κλιματολογικά και τα σεισμικά δεδομένα για την περιοχή αυτή.

Ακολουθεί, στο τρίτο κεφάλαιο, η παρουσίαση της τηλεπισκόπησης και των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα για τον εντοπισμό και την καταγραφή εδαφικών μετακινήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η μελέτη για τον εντοπισμό μετακινήσεων που αφορούν το υπό εξέταση πρανές, αξιοποιώντας μεθόδους τηλεπισκόπησης. Η μελέτη αυτή έγινε με χρήση δεδομένων από την Επιχειρησιακή μονάδα «Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND» του ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ, καθώς και από το European Ground Motion Service, που περιλαμβάνεται στην υπηρεσία Copernicus Land Monitoring Service (Land | Copernicus n.d.). Τα δεδομένα των μετακινήσεων συσχετίζονται με τα δεδομένα πεδίου για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά της κατολίστεσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του λογισμικού PLAXIS 2D LE και περιγράφονται τα βήματα σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του προγράμματος που πρέπει να ακολουθούνται κατά την δημιουργία ενός μοντέλου ευστάθειας πρανούς. Τα βήματα αυτά εφαρμόζονται για τη δημιουργία του μοντέλου του υπό μελέτη πρανούς.

Ακολουθώντας, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πορεία και τα αποτελέσματα της αναστροφής ανάλυσης, καθώς και η διαδικασία εντοπισμού του μηχανισμού αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς στην κοινότητα Νατάς.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αναλύεται η διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης που λαμβάνει χώρα για τη μελέτη επιρροής της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς και παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται σύνοψη των συμπερασμάτων σχετικά με τις μετακινήσεις στην περιοχή μελέτης και τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του λογισμικού PLAXIS 2D LE, σχετικά με τη συμπεριφορά του υπό μελέτη πρανούς και την αξιοποίηση τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων.

Κεφάλαιο 1 : Κατολισθητικά φαινόμενα - Ευστάθεια πρανών

1.1 Ταξινόμηση και Μηχανισμοί Κατολισθήσεων

Ως «κατολισθήσεις» ή «μετακινήσεις μαζών» (Varnes, 1978) ορίζονται οι μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα σε φυσικά και τεχνητά πρανή.

Οι ταξινομήσεις των κατολισθήσεων βασίζονται σε παραμέτρους όπως ο τύπος – το είδος του υλικού κατολισθησης, ο τύπος και η ταχύτητα της κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή), η ενεργότητα του φαινομένου (ενεργή, ανενεργή, επαναδραστηριοποιημένη, κλπ), το αίτιο της κίνησης (σεισμός, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας), η μορφή της επιφάνειας ολίσθησης (επίπεδη, περιστροφική), η γεωμετρία και μορφολογία του πρανού, το περιβαλλοντικό καθεστώς, οι κλιματικές συνθήκες και ο μηχανισμός ολίσθησης.

Η ταξινόμηση των εδαφικών μετακινήσεων κατά Varnes (1978) γίνεται με βάση τον τύπο της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού και δεν περιλαμβάνει τις εδαφικές υποχωρήσεις και τις καταρρεύσεις.

Ανάλογα με τον τύπο της κίνησης διακρίνονται σε καταπτώσεις (falls), ανατροπές (topplings), ολισθήσεις (slides), πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads), ροές (flows), σύνθετες κινήσεις (complex) και ερπυσμοί (creep).

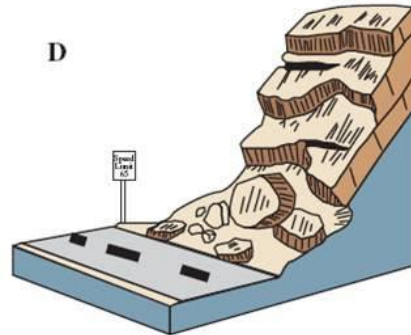
Ανάλογα με τον τύπο του υλικού που μετακινείται, διακρίνονται σε αυτές που εκδηλώνονται σε βραχώδες υπόβαθρο (bedrock) και σε αυτές που εκδηλώνονται σε επιφανειακά εδάφη (engineering soils), τα οποία διαχωρίζονται σε κορήματα (debris) και γαίες (earth).

Πίνακας 1. Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)

Τύπος Κίνησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού		
		Βραχώδες υπόβαθρο	Μηχανικά εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση		Κατάπτωση βράχων	Κατάπτωση κορημάτων	Κατάπτωση γαιών
Ανατροπή		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρική εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
			Ερπυσμός εδάφους	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

Κατάπτωση (Falls)

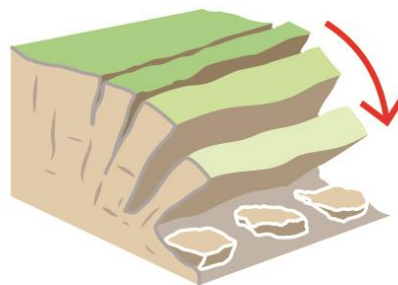
Αποκόλληση τμήματος βραχομάζας ή και συνεκτικού εδάφους, σε απότομο πρανές και κατά μήκος μιας επιφάνειας χωρίς ή με ελάχιστη διατμητική μετατόπιση. Ακολουθεί η ελεύθερη πτώση του τμήματος της βραχομάζας με κύλιση ή αναπήδηση. Η μετακίνηση είναι από πολύ μέχρι εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατό να έχουν προηγηθεί αυτής μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα.



Εικόνα 1. Καταπτώσεις βράχων (The Geological Society - <http://www.ukgeohazards.info>)

Ανατροπή (Toppling)

Η προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας γύρω από σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από τη βαρύτητα, από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές. Η ανατροπή της μάζας εξελίσσεται συνήθως σε πτώση ή ολίσθηση ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και της μετακινούμενης μάζας, καθώς και της επιφάνειας αποκόλλησης. Η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή στα αρχικά στάδια και να μετατραπεί σε εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια.



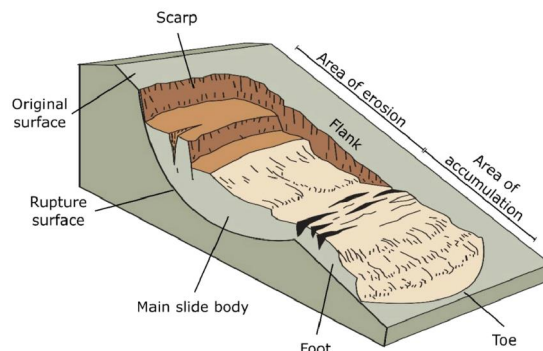
Rock topple

Εικόνα 2. Ανατροπή βράχου (British Geological Survey, 2024)

Ολισθήσεις (Slides)

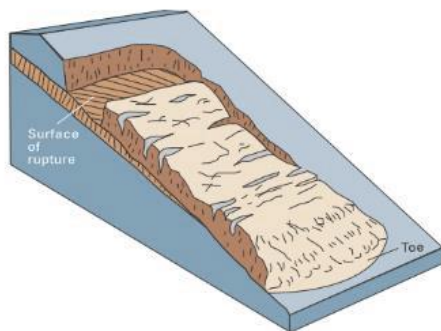
Ολίσθηση είναι η διατμητική παραμόρφωση-μετατόπιση και τέλος διατμητική θραύση του υλικού κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, εντός των ορίων μίας σχετικά στενής. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι επίπεδη ή κυκλική. Στους βραχώδεις σχηματισμούς η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να ταυτίζεται με καλά διαμορφωμένες επιφάνειες ασυνεχειών. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική ή ακαριαία (ταχεία), ανάλογα με την πρόοδο της διατμητικής θραύσης. Η μετακινούμενη μάζα μπορεί να παραμείνει ενιαία κατά την ολίσθηση ή να διαχωριστεί σε μικρότερες ανεξάρτητα κινούμενες μάζες. Οι ολισθήσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις περιστροφικές (rotational) και στις μεταθετικές (translational).

Οι περιστροφικές ολισθήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος κοίλων προς τα πάνω επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο σώμα της μετακινούμενης μάζας. Δηλαδή η ολίσθηση γίνεται πάνω σε μία κυλινδρική επιφάνεια, ο άξονας της οποίας θεωρείται παράλληλος προς την περιστροφή της κατολίσθησης. Στις κατολίσθησεις αυτές διακρίνεται με σαφήνεια μια ζώνη απομείωσης και μια ζώνη συσσώρευσης. Δηλαδή το ανώτερο τμήμα (κεφαλή) της μετακινούμενης μάζας κινείται προς τα κάτω ενώ στη βάση (πόδα) παρατηρείται ανύψωση. Εκδηλώνονται κυρίως σε ομοιογενή εδαφικά υλικά και, ως εκ τούτου, σε φυσικά πρανή αλλά και σε επιχώματα (φράγματα, επιχώματα οδοποιίας κ.α.). Επίσης μπορούν να εκδηλωθούν σε έντονα κατακερματισμένες βραχομάζες.



Εικόνα 3. Περιστροφική Ολίσθηση (Cruden and Varnes (1996), Highland and Bobrowsky (2008))

Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι μετακινήσεις κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση. Η βασική διαφορά τους από τις περιστροφικές ολισθήσεις είναι ότι, εξαιτίας της μορφής της επιφάνειας ολίσθησης, δεν έχουν την τάση σταδιακής εξισορρόπησης της ασταθούς μάζας. Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι γενικά πιο αβαθείς από τις περιστροφικές. Στους εδαφικούς σχηματισμούς η επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται από στρωματογραφικές μεταβάσεις ή από μεταβολές στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, ενώ στους βραχώδεις σχηματισμούς, η επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται από επιφάνειες ασυνεχειών.



Εικόνα 4. Μεταθετική Ολίσθηση (Linn & Bobrowsky, 2008)

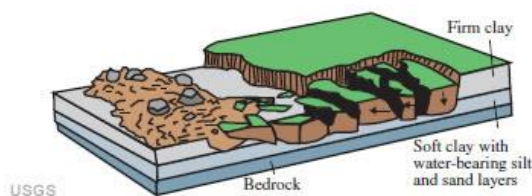
Πλευρικές Εξαπλώσεις (Lateral Spreads)

Ως Πλευρικές Εξαπλώσεις ορίζονται οι υποοριζόντιες μετακινήσεις πάνω σε στρώσεις με ασθενή μηχανικά υλικά. Οι μετακινήσεις αυτές διευκολύνονται από την παρουσία διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών. Οι Πλευρικές Εξαπλώσεις διακρίνονται σε δύο τύπους, τις Εξαπλώσεις Τεμαχών (Block Spreads) , τις Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (Liquefaction Spreads) και τις Σύνθετες Πλευρικές Εξαπλώσεις (Complex Spreads).

Οι Εξαπλώσεις Τεμαχών εκδηλώνονται σε βραχώδεις σχηματισμούς που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων. Τεμάχια του υπερκείμενου σχηματισμού συνθλίβουν το υποκείμενο στρώμα. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα, χωρίς όμως να διαμορφώνεται καλά καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης ή επιφάνεια που να ελέγχει τη μετακίνηση. Η κίνησή τους είναι εξαιρετικά αργή.

Οι Εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης εκδηλώνονται σε ευαίσθητες αργίλους ή σε ρευστοποιήσιμους σχηματισμούς. Λαμβάνει χώρα βαθμιαία θραύση, η οποία ξεκινά από μία θέση και εξελίσσεται προς τα πίσω έως τη στέψη της αστοχίας. Τα αποσπώμενα τεμάχια αρχικά καθιζάνουν με ή χωρίς περιστροφή ενώ στη συνέχεια μπορεί να υπάρξει εξώθηση και ροή του ρευστοποιημένου υλικού και των υπερκείμενων τεμαχίων. Αποτελεί αιφνίδιο φαινόμενο που εξελίσσεται με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα, χωρίς σημαντική προειδοποίηση. Αίτια εκδήλωσης των εξαπλώσεων αυτών είναι η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων (έντονες βροχοπτώσεις και λιώσιμο χιονιού), οι σεισμικές δονήσεις και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (εκσκαφές και επιβολή φορτίσεων).

Σύνθετες, πλευρικές εξαπλώσεις έχουν καταγραφεί, με τον μηχανισμό γένεσης ορισμένων από αυτών να μην έχει διευκρινιστεί επαρκώς.



Εικόνα 5. Πλευρικές Εξαπλώσεις (USGS, 2004)

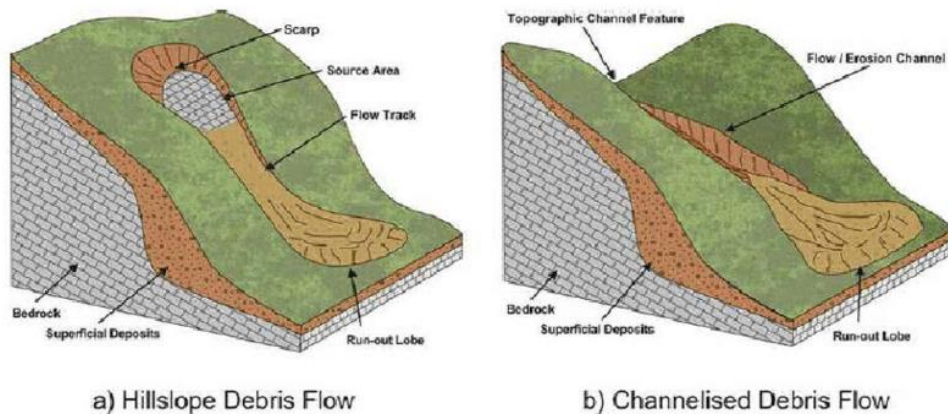
Ροές (Flows)

Οι ροές εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά αλλά και σε βραχώδεις σχηματισμούς. Μπορούν να είναι υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές. Διαφέρουν από τις ολισθήσεις στην απουσία καλά διαμορφωμένων επιφανειών ολίσθησης και στην έντονη αναμόχλευση και παραμόρφωση της μετακινούμενης μάζας.

Οι Ροές βραχωδών σχηματισμών είναι εξαιρετικά αργές παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος των ασυνεχειών της βραχομάζας χωρίς να ορίζεται μια σαφής επιφάνεια ολίσθησης. Σχετίζονται με φαινόμενα κάμψης, πτύχωσης κ.α.

Ροές Κορημάτων (Debris Flows) χαρακτηρίζονται οι μετακινήσεις ξηρών έως υγρών εδαφικών αδρομερών υλικών. Η ταχύτητα και η μορφή τους διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό των υλικών αλλά και ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε λεπτομερή υλικά, υλικά που αυξάνουν την κινητικότητά τους. Με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων μεταβαίνουν σε ροές γαιών. Η παραμόρφωση και αναμόχλευση του υλικού που ρέει είναι πολύ έντονη και η δομή του διαφοροποιείται από αυτή στην αρχική του θέση. Τα υλικά διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις και τελικά καταλαμβάνουν εκτάσεις πολύ μεγαλύτερες από την έκταση που καταλάμβαναν αρχικά.

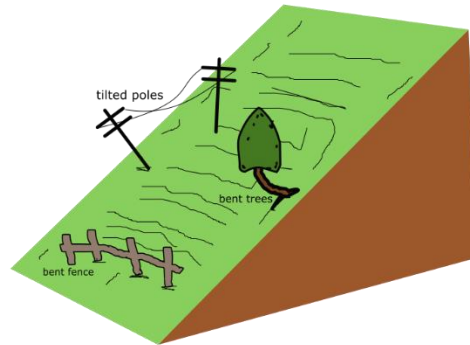
Οι Ροές γαιών (Earth flows), σε αντιστοιχία με τις ροές κορημάτων, είναι ροές εδαφικών υλικών που περιέχουν το ελάχιστο 50% λεπτομερές κλάσμα (άμμο, ιλύ και άργιλο). Η ταχύτητα και η μορφή τους διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό των υλικών αλλά και ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε λεπτομερή υλικά. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγάλη τότε οι κινήσεις είναι εξαιρετικά γρήγορες και αναφέρονται ως ροές λάσπης ή λασποροές (mud flows). Εκδηλώνονται με έναυσμα τις έντονες βροχοπτώσεις ή το γρήγορο λιώσιμο του πάγου και έχουν ιδιαίτερα καταστροφικές συνέπειες.



Εικόνα 6. Ροές Κορημάτων (Nettleton et al. , 2005)

Ερπυσμοί (Creep)

Ερπυσμοί χαρακτηρίζονται οι αργές ροές που εκδηλώνονται στα επιφανειακά στρώματα του εδαφικού μανδύα ή στο μανδύα αποσάθρωσης των πετρωμάτων. Οι ερπυσμοί προσβάλουν μεγάλες εκτάσεις, με μέγιστο βάθος μετακινούμενης μάζας τα 2-3m. Στο σώμα των μετακινούμενων μαζών συνήθως εμφανίζονται κυματοειδείς παραμορφώσεις και συνήθως δεν εκδηλώνονται εφελκυστικές και διατμητικές ρωγμές. Δείκτες ερπυστικών κινήσεων είναι και οι κάμπψεις κορμών δέντρων καθώς και η εκτροπή στύλων από την κατακόρυφο.




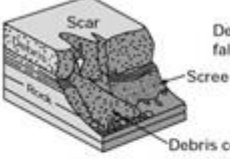
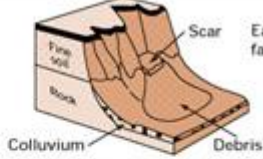
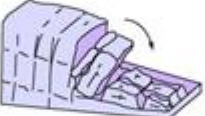


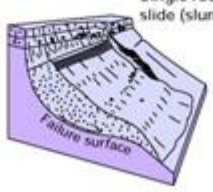
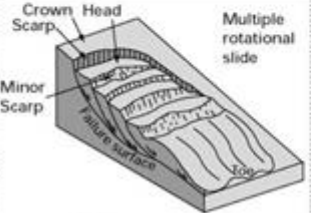

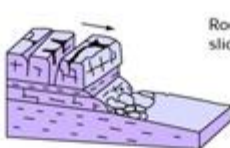

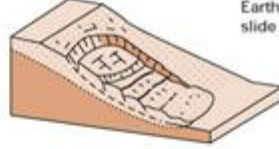
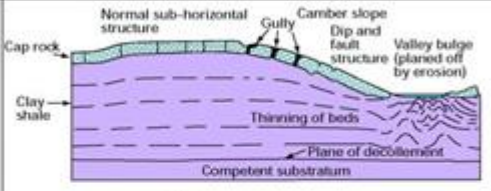

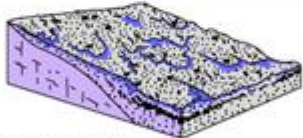



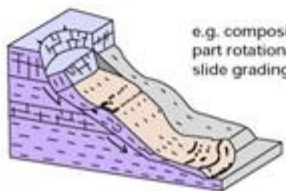
(c)The Geo Room

Εικόνα 7. Ερπυσμός (The Geo Room, 2023)

Σύνθετες Μετακινήσεις Πρανών (Composite - Complex Slides)

Πρόκειται για μετακινήσεις που αποτελούνται από συνδυασμό μετακινήσεων. Όταν διαφορετικού τύπου μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα ή σχεδόν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές της κατολισθαίνουσας μάζας, τότε η κίνηση αναφέρεται ως Σύνθετη (Composite slide). Όταν μια μετακίνηση σε διαφορετικά στάδια εξέλιξής της μεταβαίνει σε άλλη μορφή μετακίνησης, τότε αναφέρεται ως Σύνθετη (Complex slide).

Πίνακας 2. Ταξινόμηση Κατολισθήσεων με βάση τον μηχανισμό ολίσθησης (BGS, 2024)

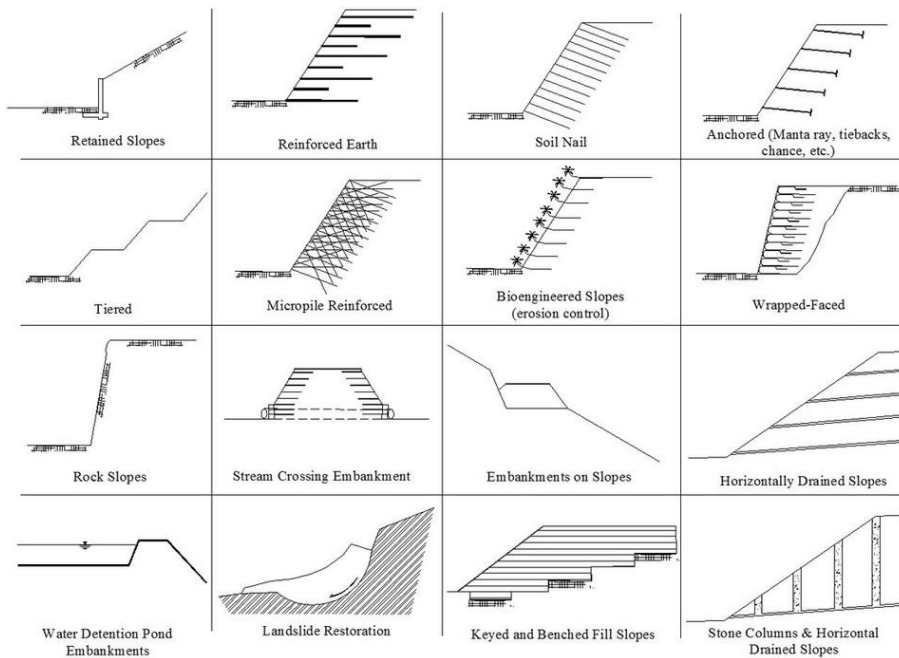
Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		 Rock fall	 Debris fall Scree Debris cone	 Earth fall Fine soil Rock Colluvium Debris cone
	TOPPLES	 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Earth topple Cracks Debris cone
SLIDES	Rotational	 Single rotational slide (slump) Failure surface	 Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface	 Successive rotational slides
	Translational (Planar)	 Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
SPREADS				 Earth spread e.g. cambering and valley bulging
FLOWS	 Solifluction flows (Periglacial debris flows)		 Debris flow	 Earth flow (mud flow)
COMPLEX	 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe	

BGS © NERC

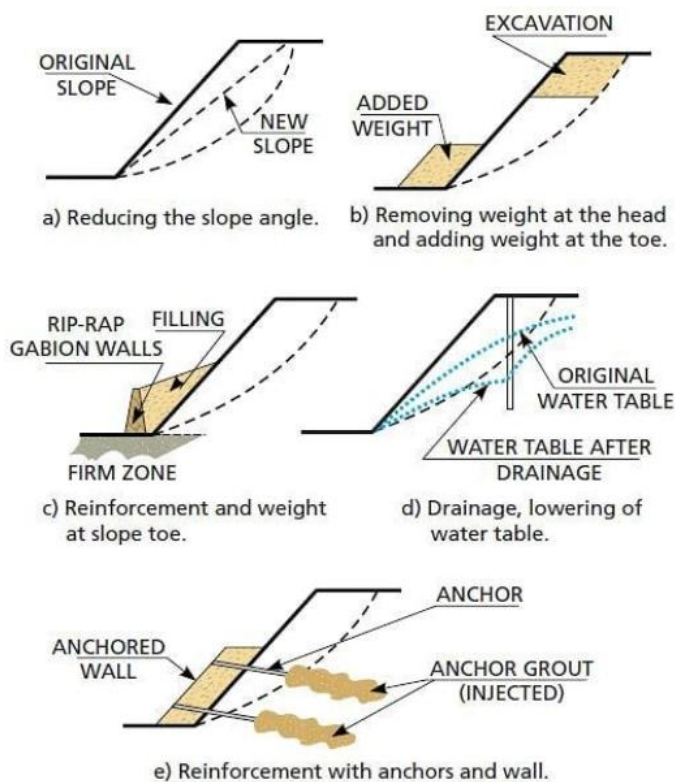
1.2 Μέτρα ανάσχεσης κατολισθήσεων – Μέθοδοι σταθεροποίησης πρανών

Επί της αρχής, η επίτευξη της ευστάθειας ενός πρανούς μπορεί να γίνει με ελάττωση των δυνάμεων που προκαλούν ολίσθηση, με ενίσχυση των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση ή και τα δύο.

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τους Abramson et al. (2002), για τη ελάττωση των δυνάμεων που προκαλούν ολίσθηση, προτείνεται αλλαγή της κλίσης του πρανούς με εκσκαφή και απομάκρυνση υλικού από κατάλληλα επιλεγμένη περιοχή της ολισθαίνουσας μάζας και καταβιβασμός της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην ασταθή περιοχή με σκοπό τη μείωση των υδροστατικών πιέσεων. Αντίστοιχα, για την ενίσχυση των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση, προτείνεται αποστράγγιση υδάτων, κατασκευή έργων αντιστήριξης, όπως για παράδειγμα τοίχοι αντιστήριξης (βαρύτητας, αντηριδωτοί, διαφραγματικοί, προβολότοιχοι, πασσαλότοιχοι) και αντίβαρα ποδός, επιτόπου ενίσχυση του πρανούς με εδαφοηλώσεις και οποιαδήποτε μέθοδος βελτίωσης του εδάφους για την αύξηση της διατμητικής του αντοχής.



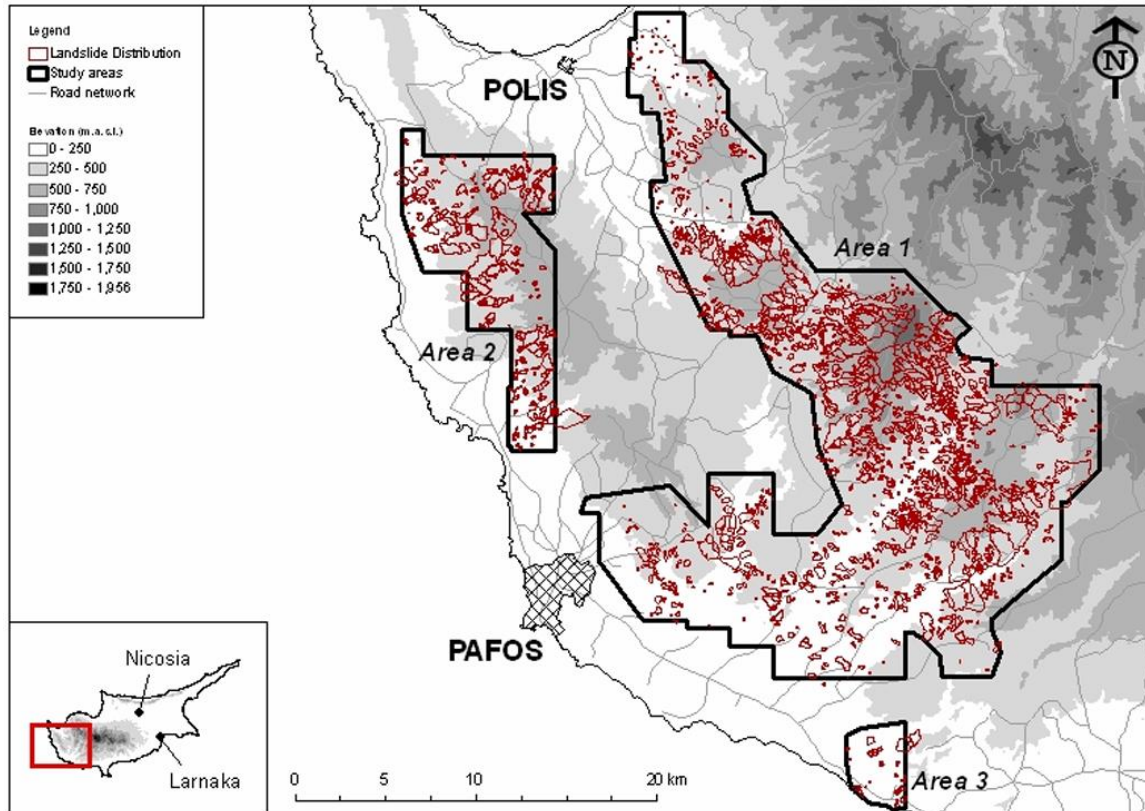
Εικόνα 8. Μέθοδοι Σταθεροποίησης Πρανών (American Geosystems, LLC, 2016)



Εικόνα 9. Μέθοδοι Σταθεροποίησης Πρανών (Gadgil, Dept. of Earth Science, Goa University, 2018)

1.3 Κατολισθήσεις στην Κύπρο

Στην Κύπρο φαινόμενα κατολισθήσεων και άλλων προβλημάτων ευστάθειας πρανών εμφανίζονται στις ημιορεινές και ορεινές περιοχές, όπου η απότομη μορφολογία και η παρουσία αδύνατων και ευαίσθητων λιθολογιών και γεωλογικών συνθηκών προκαλούν την εκδήλωσή τους. Τα σημαντικότερα προβλήματα εστιάζονται σε περιοχές των επαρχιών Πάφου και Λεμεσού. Οι κατολισθήσεις στις περιοχές αυτές σχετίζονται με τα αργιλομπετονιτικά στρώματα των Σχηματισμών Κανναβιού και Μονής και του Συμπλέγματος Μαμωνιών, καθώς και με τις Κατώτερες Μάργες του Σχηματισμού Λευκάρων, τις μάργες του Σχηματισμού της Λευκωσίας και τα αργιλικά κορήματα. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ο χάρτης κατανομής των κατολισθήσεων στην επαρχία Πάφου.



Εικόνα 10. Χάρτης κατανομής κατολισθήσεων στην επαρχία Πάφου (Scott Wilson et al., 2010)

Κεφάλαιο 2 : Η περιοχή μελέτης – κοινότητα Νατάς, επαρχία Πάφου

2.1 Συνοπτική παρουσίαση Γεωλογίας της Κύπρου

Η Κύπρος αποτελεί ένα νησί όπου η γεωλογία υπήρξε πρωταρχικός παράγοντας στη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντός της και αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντας στην ιστορική, πολιτιστική και κοινωνικοοικονομική εξέλιξή του, τόσο κατά την αρχαιότητα όσο και κατά τους νεότερους χρόνους. Η γένεση του νησιού ήταν το αποτέλεσμα μιας σειράς πολύπλοκων γεωλογικών διεργασιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στη δημιουργία του φυσικού περιβάλλοντος του νησιού και πρόσφεραν σημαντικούς ορυκτούς πόρους, ιδιαίτερα χαλκό.

Η Κύπρος χωρίζεται σε τέσσερις γεωλογικές ζώνες, όπως παρουσιάζεται στους χάρτες στις Εικόνες 12 και 13 : το Οφιολιθικό Σύμπλεγμα του Τροόδους, το Σύμπλεγμα Μαμωνιών, την Ακολουθία της Κερύνειας και την Ιζηματογενή Ακολουθία του Τροόδους.

Το Οφιολιθικό Σύμπλεγμα του Τροόδους είναι ένα πλήρως αναπτυγμένο κομμάτι ωκεάνιου φλοιού και ανώτερου μανδύα, με πετρώματα της ακολουθίας του μανδύα, πλουτώνια,

φλεβικά και ηφαιστειακά πετρώματα και χημικά ιζήματα. Δεσπόζει του κεντρικού τμήματος του νησιού, έχει χαρακτηριστικό επίμηκες και θολωτό σχήμα (δόμος) και αποτελεί τον γεωλογικό πυρήνα της Κύπρου. Εμφανίζεται, κυρίως, στην οροσειρά του Τροόδους και στην περιοχή του Δάσους Λεμεσού και Ακαπνούς, στα νότια της οροσειράς. Η δημιουργία του ξεκίνησε το Ανώτερο Κρητιδικό (92 εκ. χρόνια), όταν άρχισε να ανοίγει ο Νότιος Ατλαντικός ωκεανός και η Αφρικανική Πλάκα κινήθηκε βορειότερα, δημιουργώντας διαδοχικές ζώνες καταβύθισης, ως αποτέλεσμα του σπασίματος του παλαιού Άνω Τριαδικού ωκεάνιου φλοιού και την καταβύθιση ενός τμήματός του κάτω από το άλλο. Στο βυθό του ωκεανού της Νεοτηθύος, στην ευρύτερη περιοχή της σημερινής Ανατολικής Μεσογείου, ο πυκνός και βαρύς καταβυθιζόμενος ωκεάνιος φλοιός προκάλεσε τη μετανάστευση της τάφρου προς τα πίσω με αποτέλεσμα, βορειότερα, πάνω από τη ζώνη καταβύθισης, να προκληθεί ταυτόχρονη διεύρυνση του ωκεανού, άνοδος μάγματος και δημιουργία του ωκεάνιου φλοιού του Τροόδους, σε μια ζώνη υπερ-καταβύθισης. Ο ωκεάνιος φλοιός του Τροόδους σχηματίστηκε, αναδύθηκε και τοποθετήθηκε στη σημερινή του θέση μέσα από σύνθετες τεκτονικές και γεωλογικές διεργασίες, λόγω της σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Ευρασιατικής από το βορρά και της Αφρικανικής από το νότο. Σήμερα η στρωματογραφία του παρουσιάζει τοπογραφική αναστροφή, με τα κατώτερα πετρώματα να εμφανίζονται στην κορυφή του, ενώ τα στρωματογραφικά ανώτερα βρίσκονται στις παρυφές του. Αυτή η φαινομενική αναστροφή οφείλεται στον τρόπο ανύψωσης του (δημιουργία δόμων) και στη διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων του.

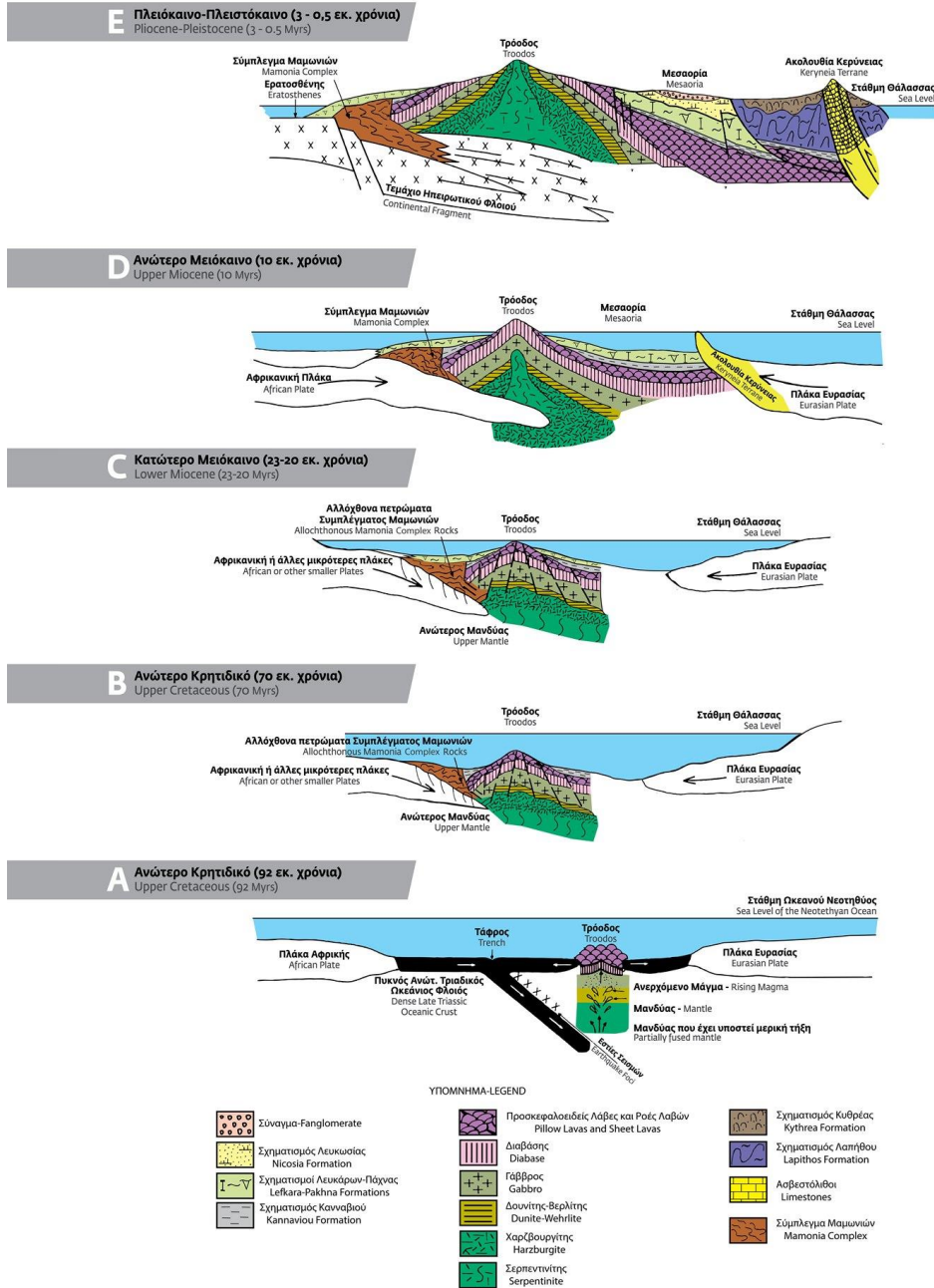
Το Σύμπλεγμα Μαμωνιών εμφανίζεται κυρίως στο νοτιοδυτικό τμήμα της Κύπρου. Αποτελείται από μια σειρά εκρηξιγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, των οποίων η ηλικία κυμαίνεται από το Μέσο Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Κρητιδικό (230 – 75 εκ. χρόνια). Τα πετρώματα αυτά, που είναι αλλόχθονα σε σχέση με τα υπερκείμενα αυτόχθονα ανθρακικά πετρώματα και τα οφιολιθικά πετρώματα του Τροόδους, επωθήθηκαν κατά το Μαιστρίχτιο, πάνω και δίπλα στη Ζώνη του Τροόδους.

Η Ακολουθία της Κερύνειας είναι η βορειότερη γεωλογική ζώνη της Κύπρου. Έχει τοξοειδή διάταξη με διεύθυνση ανατολή – δύση με κυρίαρχο χαρακτηριστικό τις επωθήσεις τεκτονικών τεμαχίων προς νότο. Στη βάση της αποτελείται κυρίως από μια σειρά αλλόχθονων ομογενών και ανακρυσταλωμένων ασβεστολίθων, δολομιτών και μαρμάρων, ηλικίας Περμο – Λιθανθρακοφόρου μέχρι Κατώτερου Κρητιδικού (350 – 135 εκ. χρόνια). Ακολουθούν τα νεότερα αυτόχθονα θαλάσσια ιζήματα Ανώτερου Κρητιδικού μέχρι Μέσου Μειοκαίνου (67 – 15 εκ. χρόνια), πάνω από τα οποία επωθήθηκαν τα παλαιότερα αλλόχθονα πετρώματα.

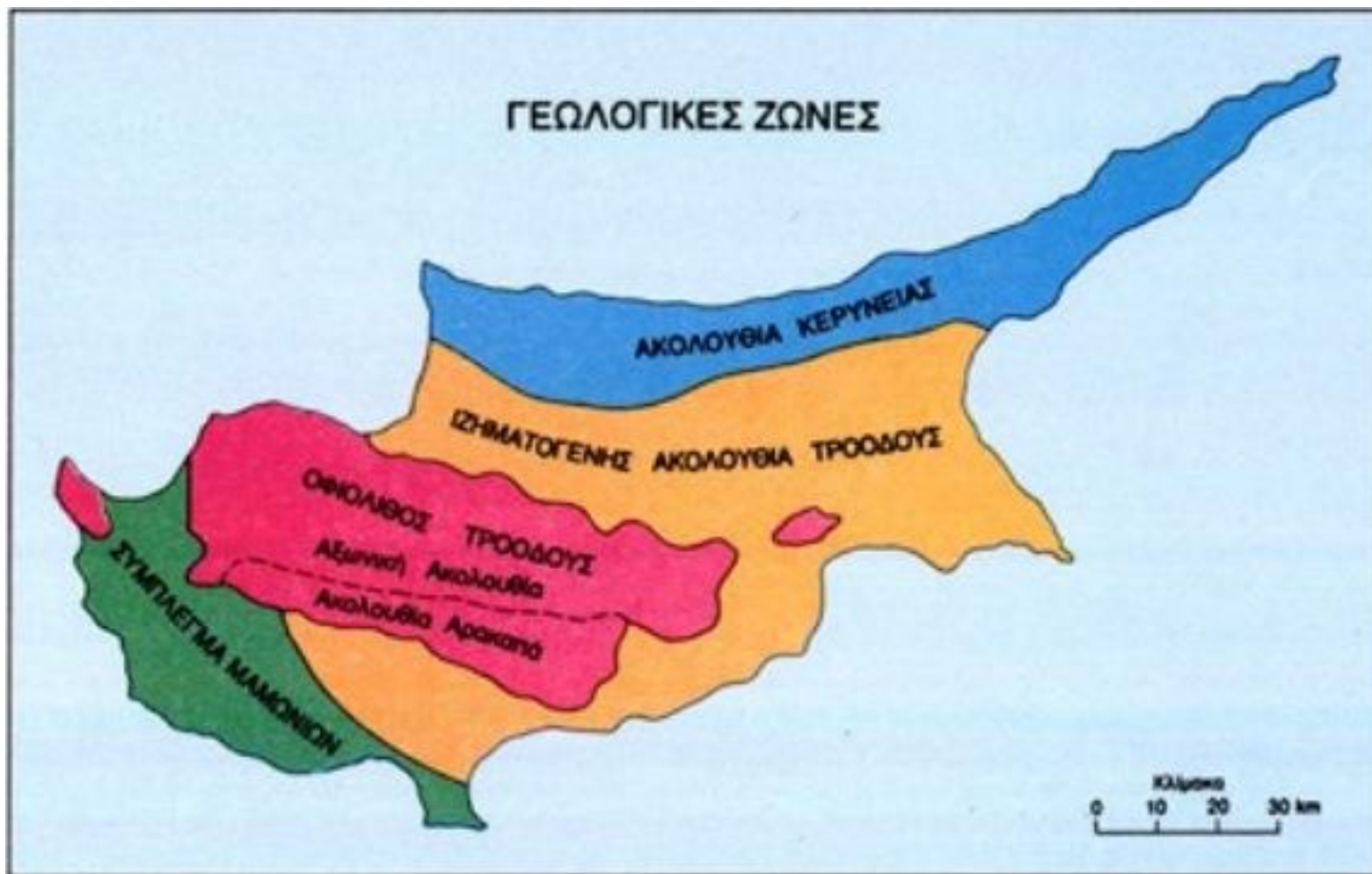
Η Ιζηματογενής Ακολουθία του Τροόδους αποτελείται από αυτόχθονα πετρώματα, ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού – Πλειστόκαινου (67 εκ. χρόνια) μέχρι πρόσφατα. Καλύπτει κυρίως τον χώρο μεταξύ των Ζωνών της Ακολουθίας της Κερύνειας και του Τροόδους (Μεσαορία) καθώς και το νότιο τμήμα του νησιού. Αποτελείται από μπετονιτικές αργίλους, ηφαιστειοκλαστικούς ψαμμίτες, μάργες, κρητίδες, κερατολίθους, ασβεστολίθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες, εβαπορίτες και κλαστικά ιζήματα.

Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας του Οφιόλιθου του Τρόδου (Α) και της γεωλογικής εξέλιξης της Κύπρου (Β-Ε)

Schematic presentation of the genesis of the Troodos Ophiolite (A)
and the evolution of the Island of Cyprus (B-E)



Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση γεωλογικής εξέλιξης Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2019)



Εικόνα 13. Γεωλογικές Ζώνες Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2012)

2.2 Ιστορικό περιοχής

Η Κύπρος είναι ένα νησί στα ανατολικά της Μεσογείου. Στην περιοχή της επαρχίας Πάφου, που βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του νησιού, έχει καταγραφεί σημαντικός αριθμός προβλημάτων ευστάθειας πρανών, κατολισθητικών φαινομένων και εδαφικών υποχωρήσεων, ιδιαίτερα σε θέσεις με υψηλό υψόμετρο. Σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις, τα προβλήματα αυτά οδήγησαν στην μερική ή ολική μεταφορά και μετεγκατάσταση οικισμών. Ιστορικά, αναφέρεται ότι τα προβλήματα ευστάθειας πρανών αποτελούσαν μέρος της καθημερινότητας των ανθρώπων που ζούσαν στην περιοχή αυτή. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι κύριες αιτίες της εμφάνισης των προβλημάτων αυτών είναι οι έντονες βροχοπτώσεις και τα σεισμικά φαινόμενα. Παραδοσιακά, οι οικισμοί κτίζονταν σε θέσεις κοντά στην επαφή συνεκτικών αργιλικών εδαφών και κρητίδων, όπου υπήρχαν φυσικές πηγές νερού. Οι θέσεις αυτές, όπως αποδείχτηκε τελικά, είναι ευάλωτες ως προς τα προβλήματα αυτά.

Η συγκεκριμένη εργασία είναι επικεντρωμένη σε μία κοινότητα της επαρχίας Πάφου, τη Νατά, η οποία στο παρελθόν έχει πληγεί με σοβαρά προβλήματα ευστάθειας πρανών και κατολισθητικά φαινόμενα, αλλά είναι ενεργά και επηρεάζουν την περιοχή ακόμα και σήμερα.

Αναλυτικότερα, η Νατά είναι κοινότητα της επαρχίας Πάφου, με περίπου 300 κατοίκους, που βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλαγιά της κοιλάδας του ποταμού Ξέρου, σε υψόμετρο περίπου 210 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Συνορεύει με άλλα μικρά χωριά της επαρχίας Πάφου, στα οποία έχουν επίσης παρατηρηθεί αντίστοιχα προβλήματα. Το 1953, η κοινότητα είχε πληγεί από μια σειρά σεισμικών φαινομένων που είχαν ως αποτέλεσμα την καταστροφή του μεγαλύτερου μέρους του οικισμού και έτσι οι κάτοικοι μετεγκαταστάθηκαν σε νέα θέση, σε ψηλότερο σημείο της πλαγιάς. Σήμερα, ο πληθυσμός της κοινότητας παρουσιάζει αύξηση, κυρίως λόγω της ανάπτυξης σε τουριστικές υποδομές τόσο στην ίδια την κοινότητα όσο και στην ευρύτερη επαρχία Πάφου. Παραμορφώσεις σε υποδομές της κοινότητας υποδεικνύουν μετακινήσεις του εδάφους, οι οποίες επιβεβαιώνονται και καταγράφονται στο πεδίο με χρήση κλισιομέτρων αλλά και μέσω συστημάτων τηλεπισκόπησης.

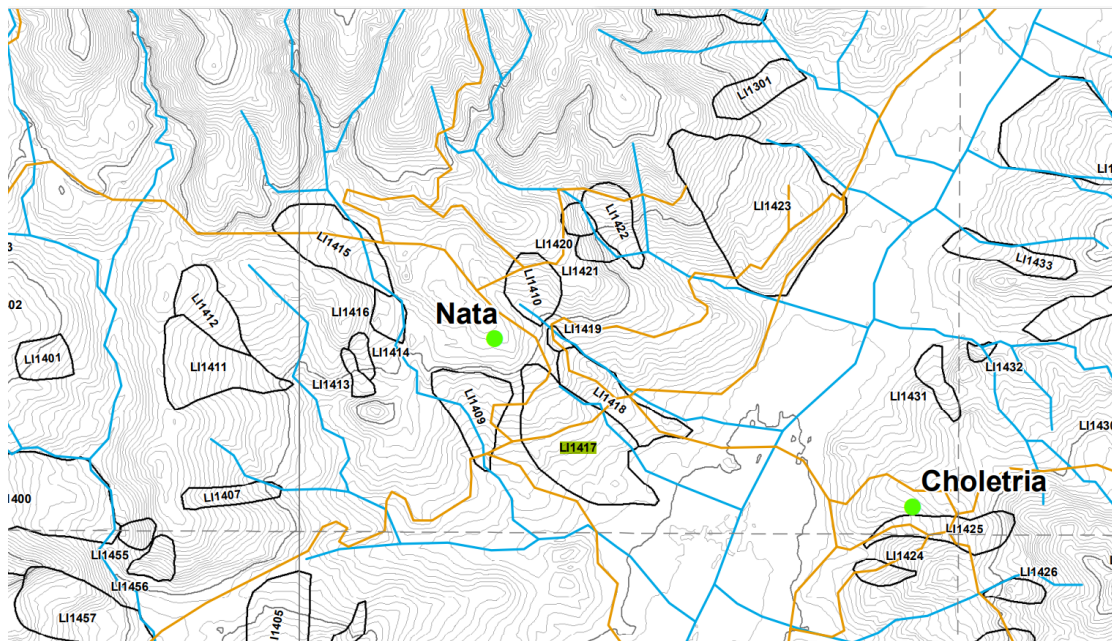
2.3 Θέση περιοχής μελέτης και χαρακτηριστικά κατολίσθησης

Η προς μελέτη κατολίσθηση της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκεται στα νοτιοανατολικά της κοινότητας Νατάς και έχει αριθμό καταγραφής LI1417 στο αρχείο του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου. Το μήκος της κατολίσθησης φτάνει τα 694,17m και η υψομετρική διαφορά από τη στέψη μέχρι τον πόδα της κατολίσθησης είναι 97,59m. Σύμφωνα με τη μελέτη που έγινε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου και το GSD, έχει ταξινομηθεί ως βαθιά εδρασμένη ολίσθηση τεμαχών και ροή γαιών, με αργή κίνηση ή εποχιακά ενεργή. Έχει, επιπλέον, χαρακτηριστεί ως πρανές σε πλευρά κοιλάδας, όπου ασθενές πέτρωμα υπόκειται ισχυρού πετρώματος και συγκεκριμένα όπου ο σχηματισμός Κανναβιού και το σύμπλεγμα Μαμωνιών υπόκεινται του σχηματισμού των

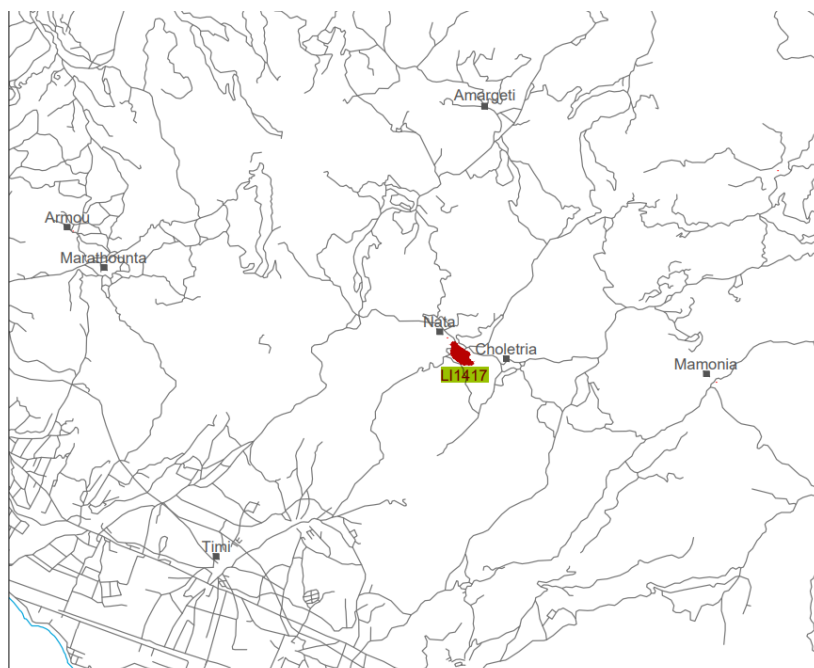
Λευκάρων ή και της Πάχνας. Τα στοιχεία υπογείων υδάτων εντός της περιοχής της κατολίσθησης παρουσιάζουν εποχική διαρροή νερού σε μορφή πηγής και εποχικά υγρά ή ελώδη εδάφη.



Εικόνα 14. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) σε δορυφορική εικόνα (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2010)



Εικόνα 15. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) σε τοπογραφικό χάρτη (Scott Wilson et al., 2010)



Location Plan

1:100,000

Εικόνα 16. Τοποθεσία υπό-μελέτη κατολίσθησης (LI1417) (Scott Wilson et al., 2010)

2.4 Επιπτώσεις κατολίσθησης

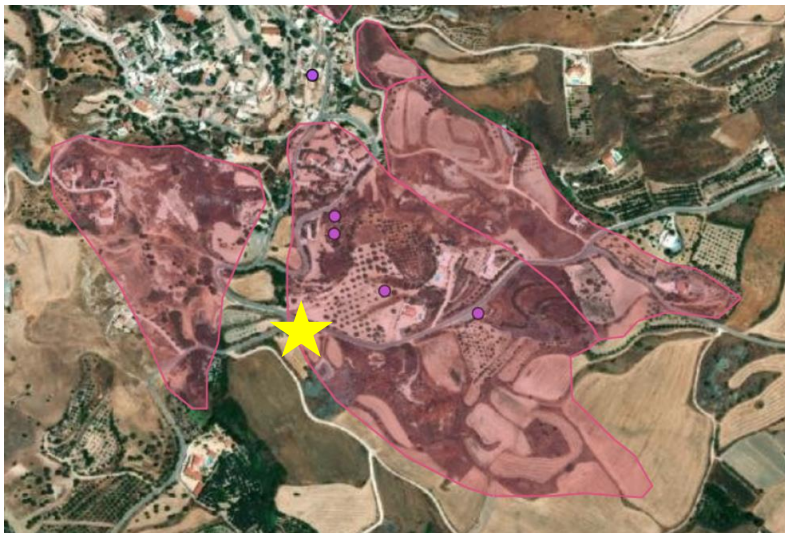
Το καλοκαίρι του 2023 και την άνοιξη του 2024 πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στο χωριό και στην ευρύτερη περιοχή της κοινότητας Νατάς, προκειμένου να αξιολογηθεί η κατάσταση της περιοχής που επηρεάζεται από το ολισθαίνον πρανές. Της παρουσιάζεται της Εικόνες 17 έως 20, η κατολίσθηση αυτή επηρεάζει κτήρια κατοικιών, κύριους δρόμους και άλλα έργα κοινής ωφέλειας που βρίσκονται εντός της χαρτογραφημένης περιοχή του ολισθαίνοντος πρανούς. Συγκεκριμένα, της Εικόνες 17 και 18, παρουσιάζονται παραμορφώσεις σε κύριο δρόμο του χωριού και σε αγροτικό κτήριο, στο νοτιοδυτικό άκρο της κατολίσθησης και στην Εικόνα 20, ζημιές παλαιότερων και καινούργιων κτηρίων κατοικιών στο φρύδι της κατολίσθησης.



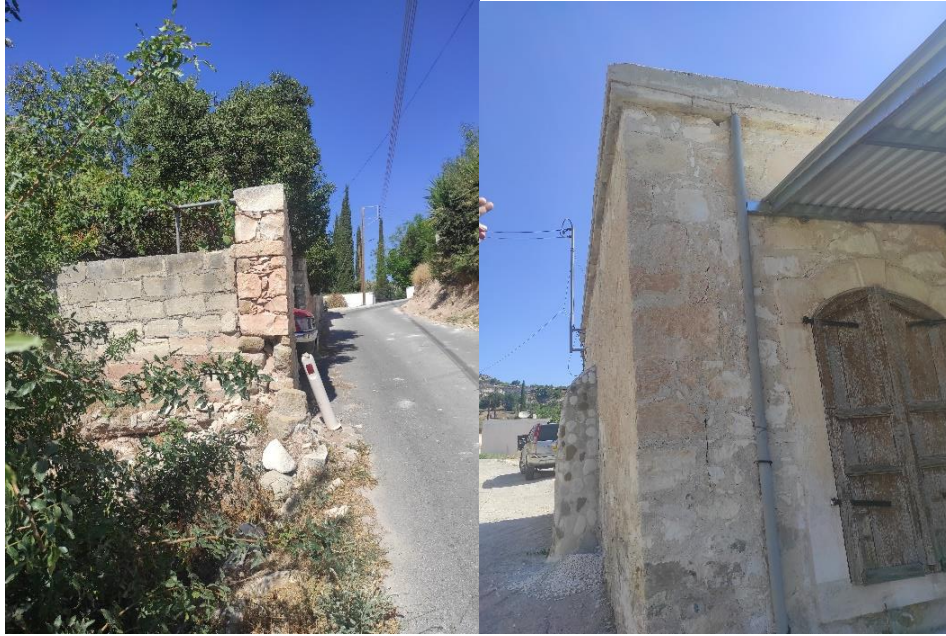
Εικόνα 17. (Αριστερά) Παραμόρφωση σε δρόμο στα όρια της κατολίσθησης



Εικόνα 18. (Δεξιά) Κτηριακή κατασκευή υπό κλίση λόγω των μετακινήσεων της κατολίσθησης



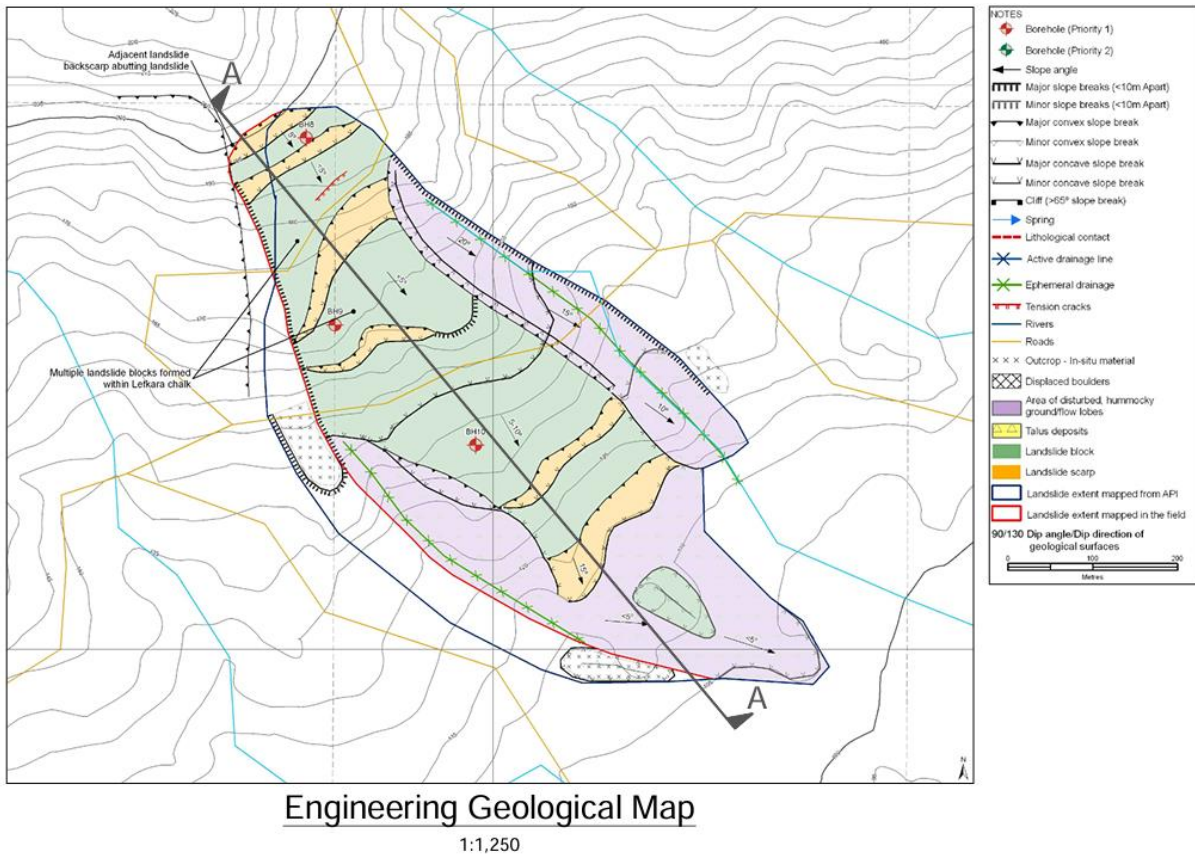
Εικόνα 19. Θέση λήψης Εικόνων 17 και 18, στο νοτιοδυτικό άκρο της κατολίσθησης



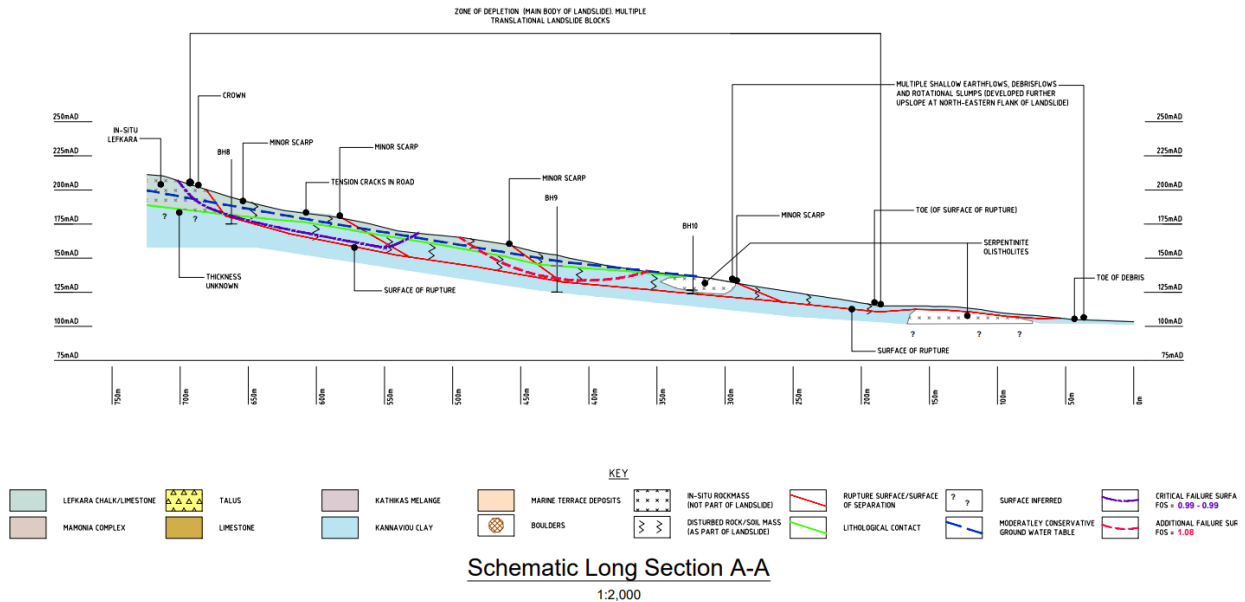
Εικόνα 20. Προβλήματα σε κτήρια που βρίσκονται στο φρύδι της κατολίθησης

2.5 Γεωλογικό υπόβαθρο περιοχής μελέτης

Στην περιοχή μελέτης, ο σχηματισμός Κανναβιού και το σύμπλεγμα Μαμωνίων υπόκεινται του σχηματισμού των Λευκάρων ή και της Πάχνας, όπως φαίνεται στον τεχνικογεωλογικό χάρτη και στην τομή της κατολίθησης στις Εικόνες 21 και 22.



Εικόνα 21. Τεχνικογεωλογικός χάρτης κατολίθησης (L11417) (Scott Wilson et al., 2010)



Εικόνα 22. Γεωλογική τομή A-A' κατολίθωσης (LI1417) (Scott Wilson et al., 2010)

Πίνακας 3. Συμπληρωματικά γεωτεχνικά και ορυκτολογικά δεδομένα για δείγματα συνεκτικού εδάφους από επιλεγμένες τοποθεσίες σε όλη την Κύπρο (M. Charalambous, P.R. N. Hobbs and K. J. Northmore, 1986)

Stratigraphical divisions		Summary litho-stratigraphy
CHROMITE FLOODS SEDIMENTARY SUCCESSTION	Alluvium	Cemented and uncemented superficial deposits
	Terrace deposits	
	Fanglomerate	Marl with subordinate gypsum, calcarenite and marly chalk
	Athalassa	
	Nicosia	
	Kalavassos	
	Koronia	
	Pakhna	Chalk, calcarenite and limestone with subordinate marl
	Terra	
	Lefkara	
	Moni	
Kannaviou	Umber, radiolarite bentonitic clay, volcanoclastic sandstones and melange	
Perapedhi		
M A O M O P N L I E A X	Sedimentary	Mamonia Complex
	Igneous and Sedimentary	
	Serpentinites	
	Metamorphics	

FIG. 3.5: Stratigraphical Classification of the Mesozoic rocks of SW Cyprus

		LAPIERRE 1975	SWARBRICK and ROBERTSON 1980	
C R E T A C E O U S	Upper	LEFKARA FM MONI FM KANNAVIΟΥ FM TROODOS COMPLEX	LEFKARA FM KATHIKAS FM KANNAVIΟΥ FM TROODOS COMPLEX	
	Lower	<u>MAMONIA COMPLEX</u> PETRA ΤΟΥ ROMIOY FM MAMONIA FM	<u>MAMONIA COMPLEX</u> <u>DHIARIZOS GROUP</u> <u>AYIOS PHOTIOS GROUP</u> MAVROKOLYMBOS FM AKAMAS MEMBER EPISKOPI FM	
J U R A S S I C	Upper	CHERT UNIT		
	Middle			
	Lower	HALOBIA LIMESTONE UNIT	KHOLETRIA MEMBER MARONA FM	
T R I A S S I C	Upper	LIMESTONE, CHERTS, LAVAS, BRECCIAS SANDSTONE WITH FOSSIL PLANT UNIT	PHASOULA FM LOUTRA TIS APHRODITIS FM PETRA ΤΟΥ ROMIOY FM	
	Middle		VLAMBOUROUS FM Also AYIA VARVARA FM: Metamorphics	

FM= Formation

2.5.1 Σχηματισμός Κανναβιού

Ο Σχηματισμός Κανναβιού πήρε το όνομα του από το χωριό Κανναβιού, που βρίσκεται στο κέντρο-ανατολικό τμήμα της περιοχής κοντά στη δυτική περιφέρεια της οροσειράς του Τροόδους. Παρουσιάζει τη μεγαλύτερη του ανάπτυξη στην δυτική Κύπρο, όπου εμφανίζεται να υπέρκειται των λαβών του Τροόδους ή και του σχηματισμού του Πέρα Πεδίου και είναι ηλικίας Καμπαίου μέχρι Μέσου Μαιστρίχτιου, 75 - 70 εκατομμυρίων χρόνων.

Επικαλύπτεται από τα πετρώματα του Συπλέγματος Μαμωνιών, τον Σχηματισμό Κάθηκα, τον Σχηματισμό Λευκάρων ή τον Σχηματισμό Μονής. Στη νοτιοδυτική Κύπρο τα ιζήματα Κανναβιού είναι πολύ εκτεταμένα, φθάνοντας σε πάχος τα 650 μέτρα, και διακρίνονται δύο κύριες περιοχές εμφάνισής τους. Στη χερσόνησο του Ακάμα, τη Μαραθούντα και την Αρχιμανδρίτα, τα ιζήματα Κανναβιού εμφανίζονται μέσα από τεκτονικά παράθυρα των υπερκείμενων και επωθημένων πετρωμάτων του Συμπλέγματος Μαμωνιών. Στην περιοχή Κανναβιού-Στατού, εμφανίζονται γύρω από το ανυψωμένο όριο της οροσειράς του Τροόδους.

Ο Σχηματισμός Κανναβιού είναι μια ακολουθία μπεντονιτικών αργίλων με ενστρώσεις ηφαιστειοκλαστικών ιλυολίθων, ραδιολαριτών και μαγγανιούχων πηλιτών. Στα ανώτερα στρωματογραφικά τμήματα της ακολουθίας εμφανίζονται παχυστρωματώδεις

ανοικτόχρωμοι ηφαιστειοκλαστικοί ψαμμίτες. Οι μπεντονιτικοί άργιλοι του σχηματισμού, ιδιαίτερα στην νοτιοδυτική Κύπρο, είναι έντονα διαταραγμένοι και τεκτονισμένοι στις περιοχές όπου καλύπτονται από νεότερα ιζήματα και η επαφή τους βρίσκεται σε πλήρη ασυμφωνία.

2.5.2 Σύμπλεγμα Μαμωνιών

Το Σύμπλεγμα Μαμωνιών παίρνει το όνομά του από το χωριό Μαμώνια της επαρχίας Πάφου, όπου υπάρχουν τυπικές εμφανίσεις πετρωμάτων του συμπλέγματος αυτού. Τα πετρώματα του συμπλέγματος Μαμωνιών εμφανίζονται μεταξύ του Σχηματισμού Κανναβίου ή του Οφιόλιθου Τροόδους και του Σχηματισμού των Λευκάρων.

Το Σύμπλεγμα περιλαμβάνει ένα ποικίλο σύνολο αλλόχθονων, έντονα παραμορφωμένων ιζηματογενών πετρωμάτων Τριασικού έως Κάτω Κρητιδικού, πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων που εναποτέθηκαν σε Τριτογενή ανθρακικά πετρώματα και στον οφιόλιθο του Τροόδους κατά τη διάρκεια του Μαιστρίχτιου. Παρατηρούνται, επίσης, έντονα κατακερματισμένες και αναμειγμένες συγκεντρώσεις πετρωμάτων του συμπλέγματος Μαμωνιών με τεμάχια οφιολιθικών πετρωμάτων του Τροόδους, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως συνονθυλεύματα (mélange).

Τα πετρώματα του συμπλέγματος Μαμωνιών μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες γεωλογικές ενότητες ή ομάδες, οι οποίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε θυγατρικούς σχηματισμούς ή μέλη. Η κατώτερη ομάδα, ομάδα του Διαρίζου, περιλαμβάνει πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα τριασικής-ιουρασικής ηλικίας, που αποτελούνται κυρίως από εκρηξιγενή και δευτερεύοντα πλουτώνια πετρώματα με αλκαλικό χαρακτήρα, υφαλογενείς ασβεστόλιθους και ημιπελαγικά ιζήματα. Η ανώτερη ομάδα, ομάδα Αγίου Φωτίου, είναι εξ ολοκλήρου ιζηματογενής, αποτελούμενη κυρίως από ραδιολάρυτες λεπτής στρωμάτωσης, ιλύολιθους, πηλίτες, ασβεστόλιθους, καλκαρενίτες και χαλαζιακούς ψαμμίτες. Σερπεντινίτες και μεταμορφωμένα πετρώματα είναι, επίσης, τεκτονικά συσχετιζόμενα με τον Σχηματισμό Μαμωνιών.

2.5.3 Σχηματισμός Λευκάρων

Ο Σχηματισμός των Λευκάρων πήρε το όνομά του από το χωριό Λεύκαρα, στο οποίο εντοπίστηκε έντονη ανάπτυξή του, αποτελείται από πελαγικές μάργες και άσπρες κρητίδες με παρουσία ή μη κερατόλιθων και επικάθεται με πλήρη ασυμφωνία πάνω στις μπεντονιτικές αργίλους του Σχηματισμού της Κανναβίου.

Ο πετρογραφικός χαρακτήρας και τα πάχη των στρωμάτων που αναπτύχθηκαν διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, λόγω των διαφορετικών συνθηκών ιζηματογένεσης κατά την εναπόθεση του Σχηματισμού των Λευκάρων.

Η ανάπτυξη του Σχηματισμού αντιπροσωπεύεται με τέσσερα στρωματογραφικά μέλη: τις Κατώτερες Μάργες, τις Κρητίδες και τους Κερατόλιθους, τις Κρητίδες και τις Ανώτερες Μάργες.

Τα κατώτερα πετρώματα του σχηματισμού των Λευκάρων είναι γκριζες ή ροδόχροες - καστανόχροες, λεπτοστρωματώδεις μάργες με ροδόχρους - καστανόχρους κονδύλους και φακοειδείς συγκεντρώσεις κερατόλιθων καθώς επίσης μαργαϊκές κρητίδες προς την κορυφή του μέλους. Το πάχος του μέλους κυμαίνεται μεταξύ 25 - 100 μέτρα και εμφανίζεται τοπικά σε κοιλάματα της επιφάνειας των λαβών ή των Σχηματισμών του Πέρα Πεδίου και της Κανναβιού.

Ακολουθεί το μέλος με τις κρητίδες και τους κερατόλιθους, το οποίο, αποτελείται από πολύ καλά στρωμένες λευκές κρητίδες, γκριζες μαργαϊκές κρητίδες και σε μικρότερο βαθμό γκριζες μάργες και πυριτιωμένα στρώματα. Λόγω της πετρολογικής του σύστασης, αντιστέκεται στην διάβρωση και σχηματίζει απότομους κρημνούς.

Το μέλος των Κρητίδων είναι μια σειρά ιζηματογενών πετρωμάτων που υπέρκειται του μέλους των κρητίδων και κερατόλιθων, δεν περιέχει κερατόλιθους και χαρακτηρίζεται από πλευρικές λιθολογικές αλλαγές. Το κατώτερο τμήμα του αποτελείται από συμπαγείς κρητίδες ή από πολύ καλά στρωμένες κρητίδες. Το ανώτερο τμήμα του αποτελείται από ομαλές στρώσεις φυλλωδών και ελαφρώς μαργαϊκών κρητίδων. Το πάχος της ενότητας κυμαίνεται από 70 έως 250 μέτρα.

Το μέλος των Ανώτερων Μαργών συναντάται στα ανώτερα στρώματα του Σχηματισμού και παρουσιάζει μια τυπική λιθολογία από γκριζες μάργες, οι οποίες αναπτύσσονται σταδιακά από τις υποκείμενες κρητίδες μέσω μιας μεταβατικής ζώνης από εναλλασσόμενα στρώματα κρητίδων, μαργαϊκών κρητίδων και μαργών. Τοπικά εντοπίζονται φυλλώδη στρώματα πλούσια σε οργανική ύλη, προς την κορυφή του μέλους, λειμωνιτικοί κόνδυλοι και πολύ κοντά στην επαφή με τον υπερκείμενο Σχηματισμό της Πάχνας, λεπτά στρώματα ασβεστιτικού ψαμμίτη. Το πάχος του παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση από 3 έως 200 μέτρα.

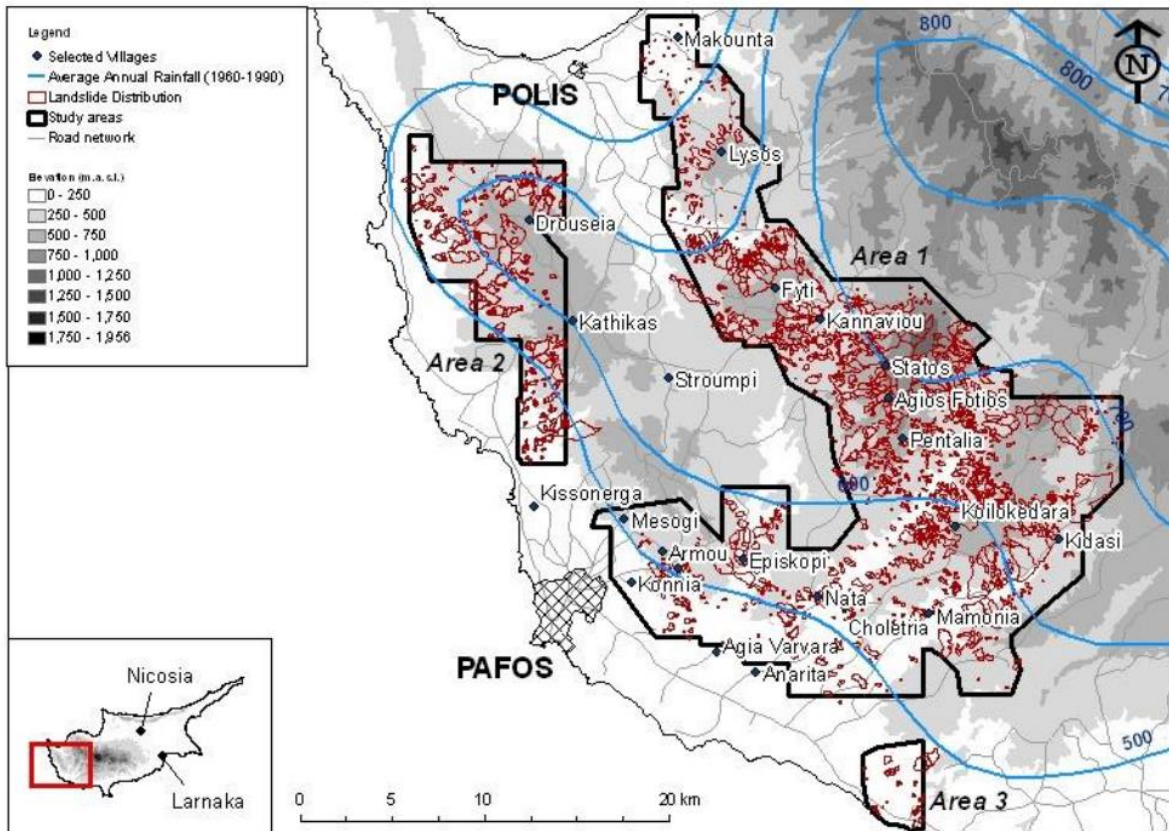
2.6 Βροχόπτωση και Υπόγεια Ύδατα στην περιοχή μελέτης

Λόγω του ημίξηρου κλίματος της ευρύτερης περιοχής, τα υπόγεια ύδατα συναντώνται συνήθως σε βάθη μεγαλύτερα από το βάθος του επιπέδου ολίσθησης του πρανούς. Ωστόσο, κοντά στην επιφάνεια, εντοπίζονται επικρεμάμενοι υδροφόροι ορίζοντες, οι οποίοι ενισχύονται εποχιακά από βροχοπτώσεις.

Οι έντονες χειμερινές βροχοπτώσεις που σημειώνονται στις ορεινές περιοχές της Επαρχίας Πάφου επιδρούν στην έναρξη ή/και επανενεργοποίηση κατολισθήσεων. Εκτός από την ενίσχυση της επιφανειακής διάβρωσης, το νερό που απορροφάται στο έδαφος αυξάνει τη ειδική πυκνότητα των υλικών του πρανούς, διασπά χημικά τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων του υλικού, προκαλεί διάγκωση των μπεντονικών αργίλων και λιπαίνει πιθανά

επίπεδα αστοχίας. Η πίεση του νερού εντός των επιπέδων του εδάφους ή του βράχου, όπως αντανακλάται από το πιεζομετρικό επίπεδο, έχει σημαντική επίδραση στη διατμητική αντοχή των υλικών του πρανούς. Μια άνοδος του πιεζομετρικού επιπέδου μετά από παρατεταμένες βροχοπτώσεις και ενισχυμένη ροή των υπόγειων υδάτων έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες πιέσεις πόρων και επακόλουθη μείωση της διατμητικής αντοχής.

Επικρεμάμενοι υδροφόροι οριζόντες εντοπίζονται συχνά σε εδάφη του Σχηματισμού Κανναβιού και του Συμπλέγματος Μαμωνιών και σε πρανή συνονθυλευμάτων (mélange) που καλύπτονται από κορήματα κρητίδων. Οι επικρεμάμενοι υδροφόροι οριζόντες είναι ιδιαίτερα συνηθισμένοι όπου επιφανειακές εναποθέσεις ή θραύσματα ρηχής ολίσθησης (π.χ. κορήματα κρητίδων, κοκκώδη κολλούβια) έχουν υψηλότερη διαπερατότητα από το υποκείμενο υλικό του πρανούς (π.χ. ιλύες και άργιλοι). Αυτοί οι υδροφόροι οριζόντες μπορεί να αποτελούν προσωρινό ή μόνιμο χαρακτηριστικό ενός πρανού και ποικίλλουν σημαντικά με τις βροχοπτώσεις, τη ροή των υπόγειων υδάτων και τις κινήσεις των κατολισθήσεων. Η μεταβαλλόμενη φύση των επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους και αναμφίβολα έχει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και επανενεργοποίηση αβαθών κατολισθήσεων. Είναι ξεκάθαρο ότι οι έντονες χειμερινές βροχοπτώσεις είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τόσο τη βραχυπρόθεσμη όσο και τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των πρανών.

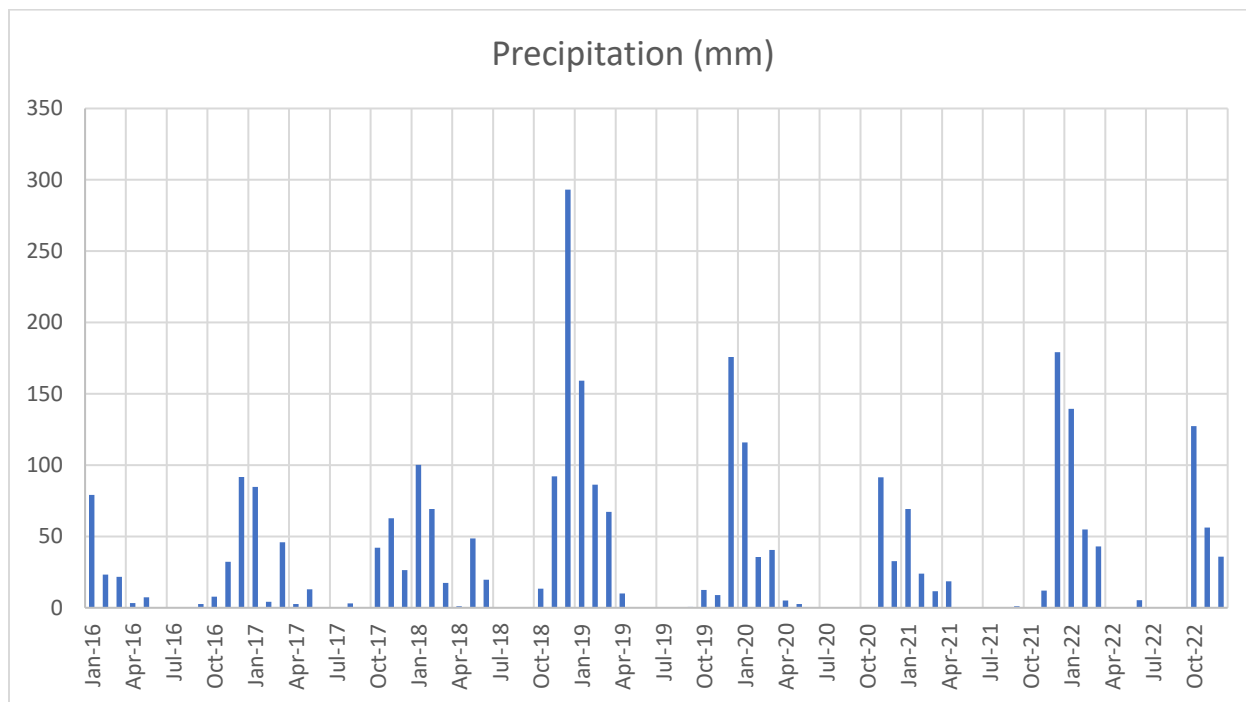


Εικόνα 23. Κατανομή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συγκριτικά με την κατανομή των κατολισθήσεων στην επαρχία Πάφου (Scott Wilson et al., 2010)

Δεδομένα βροχόπτωσης, για το διάστημα 2018 – 2022, που καταγράφηκαν στον σταθμό του Αεροδρομίου Πάφου, ο οποίος είναι ο κοντινότερος σταθμός μέτρησης στην περιοχή μελέτης της κοινότητας Νατάς της επαρχίας Πάφου, από το Τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και στο διάγραμμα στην Εικόνα 24. (Τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου - <https://www.dom.org.cy>)

Πίνακας 5. Δεδομένα βροχόπτωσης που καταγράφηκαν στον σταθμό μέτρησης του Αεροδρομίου Πάφου, στο διάστημα 2018 – 2022 (Τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου, <https://www.dom.org.cy/CLIMATOLOGY>)

Precipitation (mm)									
2018		2019		2020		2021		2022	
Month	Perc. (mm)	Month	Perc. (mm)	Month	Perc. (mm)	Month	Perc. (mm)	Month	Perc. (mm)
Jan-18	100.3	Jan-19	159.2	Jan-20	115.9	Jan-21	69.3	Jan-22	139.4
Feb-18	69.2	Feb-19	86.2	Feb-20	35.7	Feb-21	24	Feb-22	55
Mar-18	17.4	Mar-19	67.2	Mar-20	40.6	Mar-21	11.5	Mar-22	42.9
Apr-18	1	Apr-19	10.1	Apr-20	5.1	Apr-21	18.5	Apr-22	0
May-18	48.6	May-19	0	May-20	2.7	May-21	0.1	May-22	0.4
Jun-18	19.6	Jun-19	0	Jun-20	0.3	Jun-21	0	Jun-22	5.4
Jul-18	0	Jul-19	0	Jul-20	0	Jul-21	0	Jul-22	0
Aug-18	0	Aug-19	0.2	Aug-20	0.1	Aug-21	0.1	Aug-22	0
Sep-18	0.1	Sep-19	0.6	Sep-20	0	Sep-21	1.1	Sep-22	0
Oct-18	13.4	Oct-19	12.4	Oct-20	0	Oct-21	0.4	Oct-22	127.3
Nov-18	92.1	Nov-19	8.9	Nov-20	91.4	Nov-21	12	Nov-22	56.2
Dec-18	293.1	Dec-19	175.7	Dec-20	32.8	Dec-21	179.2	Dec-22	35.8



Εικόνα 24. Διάγραμμα δεδομένων βροχόπτωσης που καταγράφηκαν στον σταθμό μέτρησης του Αεροδρομίου Πάφου, στο διάστημα 2018 - 2022

2.7 Σεισμικότητα στην περιοχή μελέτης

Η Κύπρος είναι σεισμικά ενεργή και στο παρελθόν έχουν καταγραφεί πολλοί καταστροφικοί σεισμοί. Οι πιο σοβαροί, συμβαίνουν κατά μήκος της νότιας ακτής που περιλαμβάνει το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής της Πάφου.

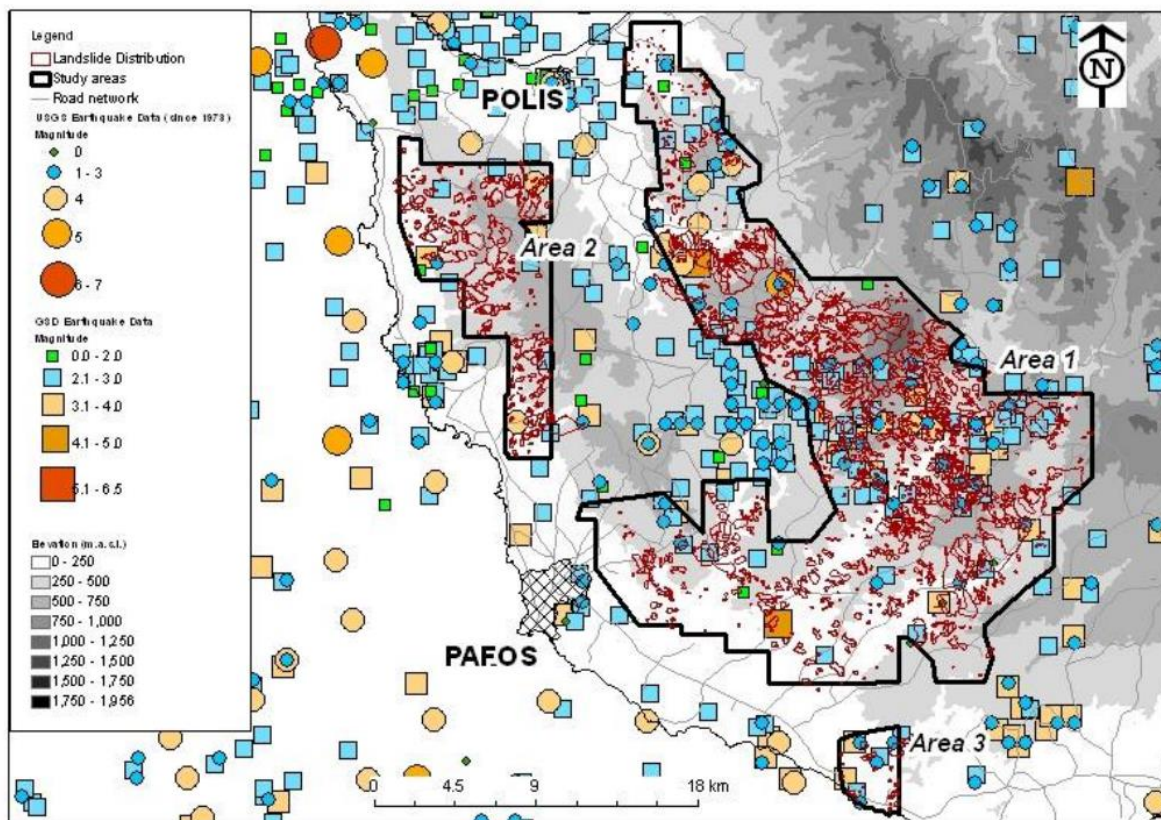
Οι σεισμικές επιταχύνσεις, οι αλλαγές γωνίας κλίσης ασταθών επιπέδων και οι πιθανές θιξοτροπικές επιδράσεις σε αργιλικά στρώματα, ως αποτελέσματα σεισμών, προκαλούν την έναρξη ολισθήσεων ή επανενεργοποίηση υπάρχουσων κατολισθήσεων.

Οι σεισμικές επιταχύνσεις προκαλούν παροδικές αλλαγές στην τάση, οι οποίες μπορούν να ρωγματώσουν και να σπάσουν βραχώδεις μάζες, να καταστρέψουν τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων του υλικού και να οδηγήσουν σε συνολική μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού του πρανού, με αποτέλεσμα να ενεργοποιούν ολισθήσεις, καταρρεύσεις και άλλα βαρυτικά φαινόμενα (π.χ. πτώσεις βράχων) σε πρανή.

Οι αλλαγές στη γωνία κλίσης επιπέδων αδυναμίας μπορούν επίσης να ενεργοποιήσουν ολίσθηση του πρανού. Πρανή που βρίσκονται σε οριακή ισορροπία είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην έναρξη ολίσθησης ή στην επανενεργοποίηση υπάρχουσων κατολισθήσεων καθώς ενδέχεται ακόμα και μικρές αλλαγές στη γωνία κλίσης να προκαλέσουν ολίσθηση.

Επιπλέον, τα θιξοτροπικά φαινόμενα που προκύπτουν από επιταχύνσεις του εδάφους μπορούν να έχουν σημαντικό ρόλο στην ενεργοποίηση ολισθήσεων σε υπάρχον αργιλικό υλικό ροής κορημάτων, ιδιαίτερα μπετονιτικών αργίλων του Σχηματισμού Κανναβιού.

Το γεωλογικό υπόβαθρο, η τοπογραφία και το κλίμα στην περιοχή της Πάφου είναι τέτοιο ώστε να διευκολύνεται η εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων. Από αρχεία που διατηρούνται στο Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, συμπεραίνεται ότι, παρόλο που σεισμοί έχουν ενεργοποιήσει μετακινήσεις πρανών στο παρελθόν, είναι συχνά μόνο ένας από τους παράγοντες που συνδυαστικά έθεσαν σε κίνηση μια εδαφική ή βραχώδη μάζα που βρισκόταν στα πρόθυρα αστοχίας ή είχε υποστεί αστοχία στο παρελθόν.



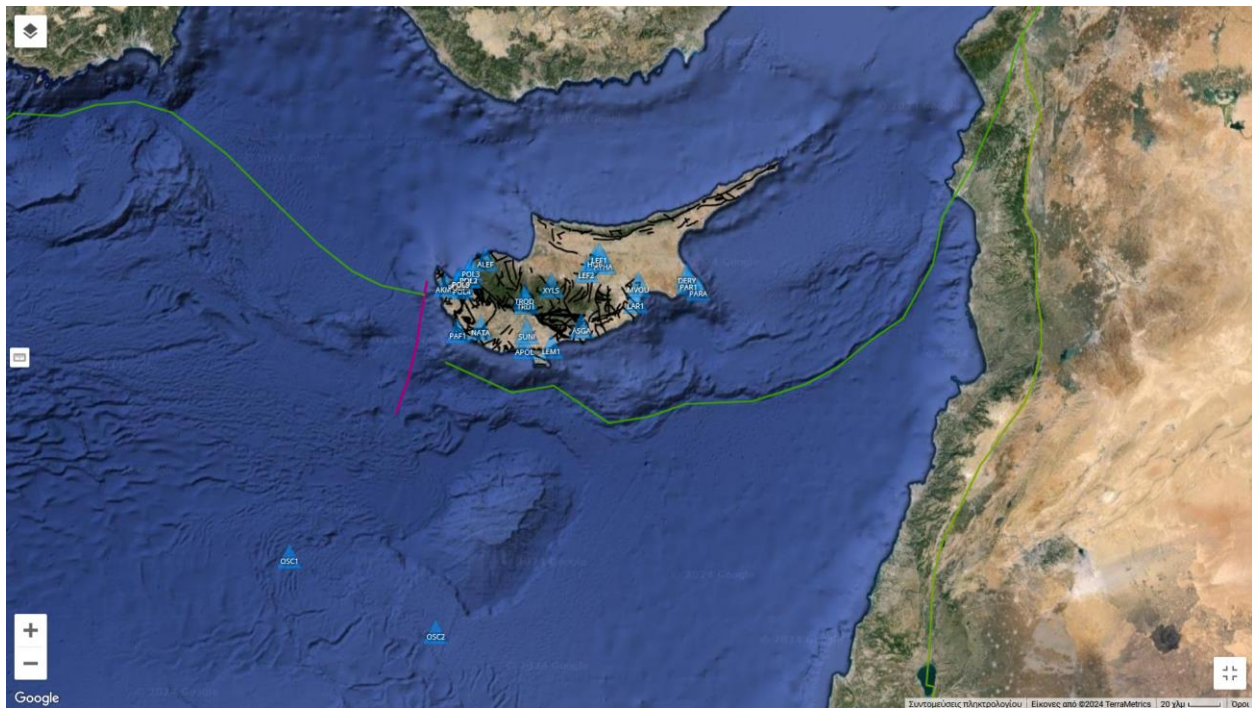
Εικόνα 25. Σεισμική κατανομή στην επαρχία Πάφου συγκριτικά με την κατανομή των κατολισθήσεων (Scott Wilson et al., 2010)

Η σεισμική δραστηριότητα της Κύπρου και της ευρύτερης περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου παρακολουθείται από το Σεισμολογικό Κέντρο του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου.

Το Σεισμολογικό Δίκτυο της Κύπρου αποτελείται από 28 σεισμολογικούς σταθμούς : 14 μόνιμους, εκ των οποίων οι 12 είναι χερσαίοι και οι άλλοι 2 είναι υποθαλάσσιοι, και 14 σταθμούς καταγραφής εδαφικής επιτάχυνσης σε αστικά κέντρα και άλλες υπό μελέτη περιοχές. Στην Εικόνα 26 και στον Πίνακα 6 αναγράφονται οι σεισμολογικοί σταθμοί που είναι ενεργοί σήμερα.

Όπως αναγράφεται, στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, υπάρχει εγκατεστημένος σεισμολογικός σταθμός. Στην Εικόνα 27 φαίνεται ο χάρτης σεισμικότητας των σεισμών που έγιναν αισθητοί, με μέγεθος $M_I > 3$, το χρονικό διάστημα 1997-2022. Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται ο χάρτης σεισμικότητας του δυτικού τμήματος της Κύπρου, με έμφαση στο κίτρινο πλαίσιο, το οποίο αποτυπώνει περιοχή ακτίνας 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα Νατάς, για καταγραφές σεισμών μεγέθους $M_I > 2$. Στον Πίνακα 7 αναγράφονται οι καταγραφές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 28 για την περιοχή γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα Νατάς. Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή όλων των σεισμολογικών καταγραφών σε ακτίνα 10 km γύρω από την

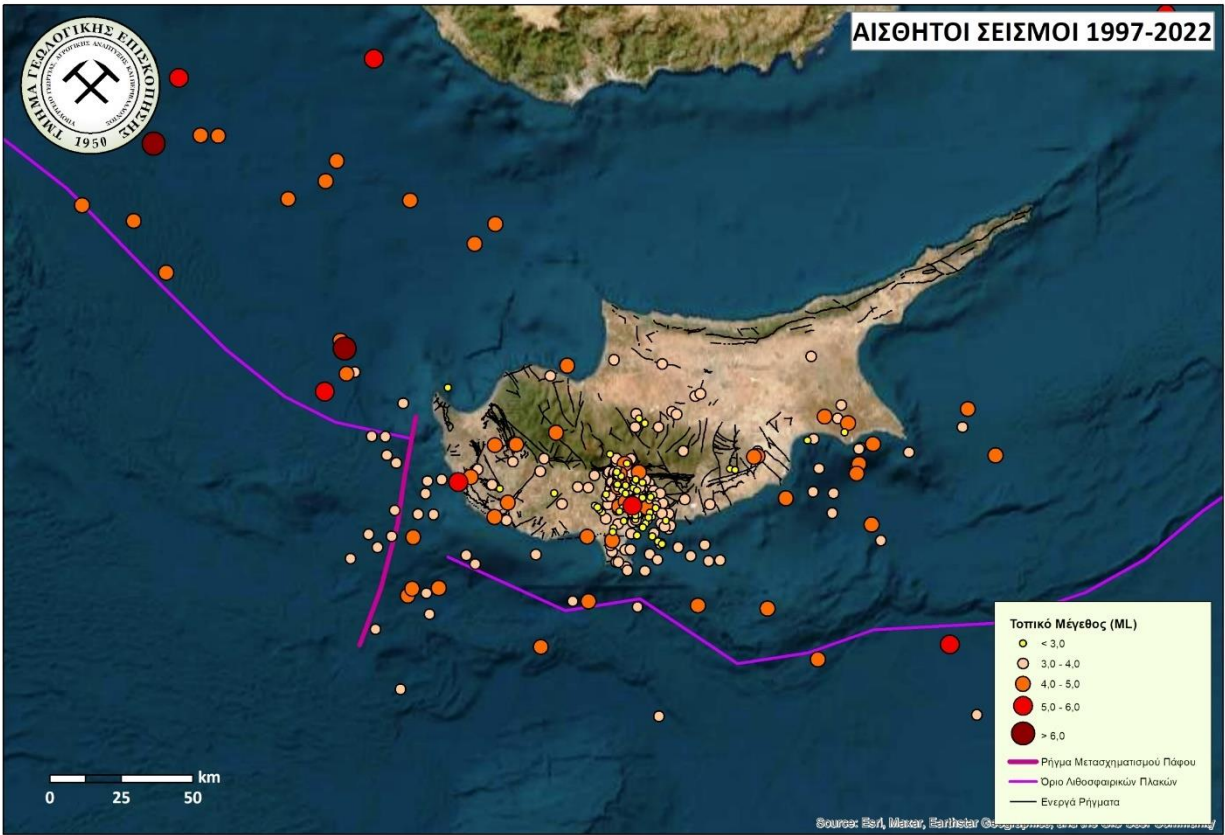
περιοχή του σεισμολογικού σταθμού της κοινότητας Νατάς για το διάστημα 2013-2022. Αντίστοιχα, στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι σεισμολογικές καταγραφές μεγέθους $M_I > 4.5$ σε ακτίνα 50 km γύρω από την περιοχή του σεισμολογικού σταθμού της κοινότητας Νατάς για το διάστημα 2013-2022 και στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται η χωρική τους κατανομή. (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου - <http://www.gsd-seismology.org.cy>)



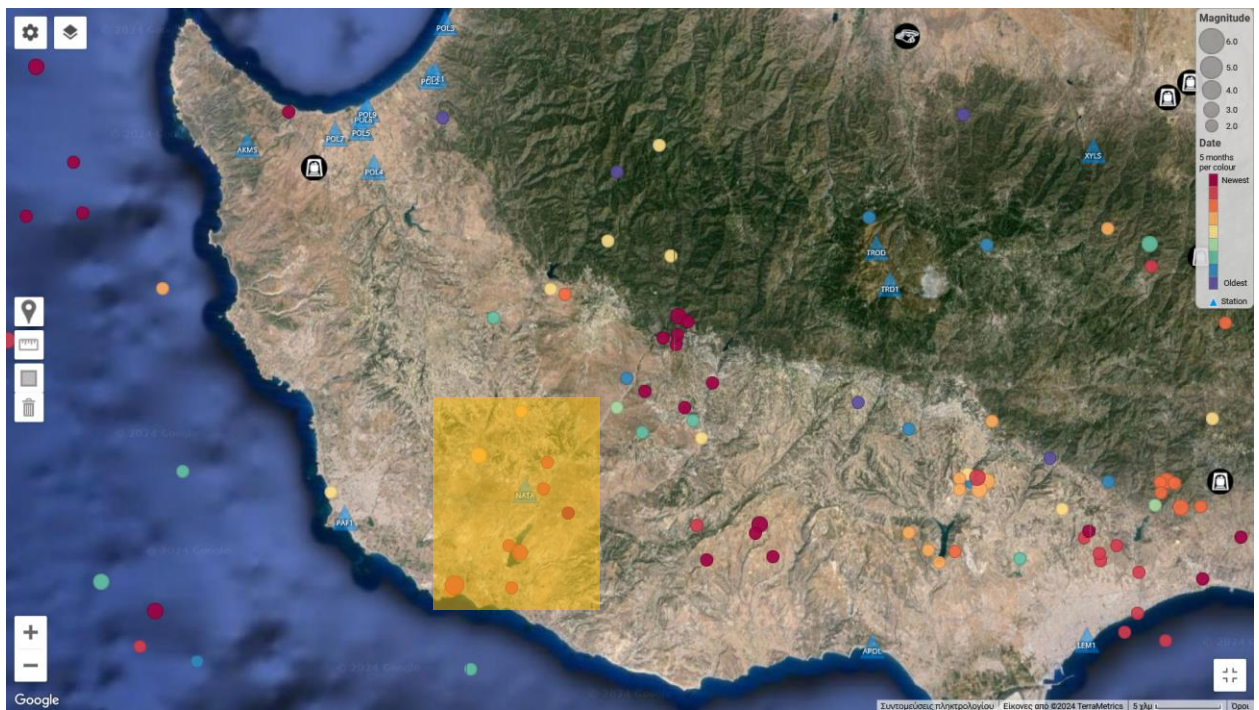
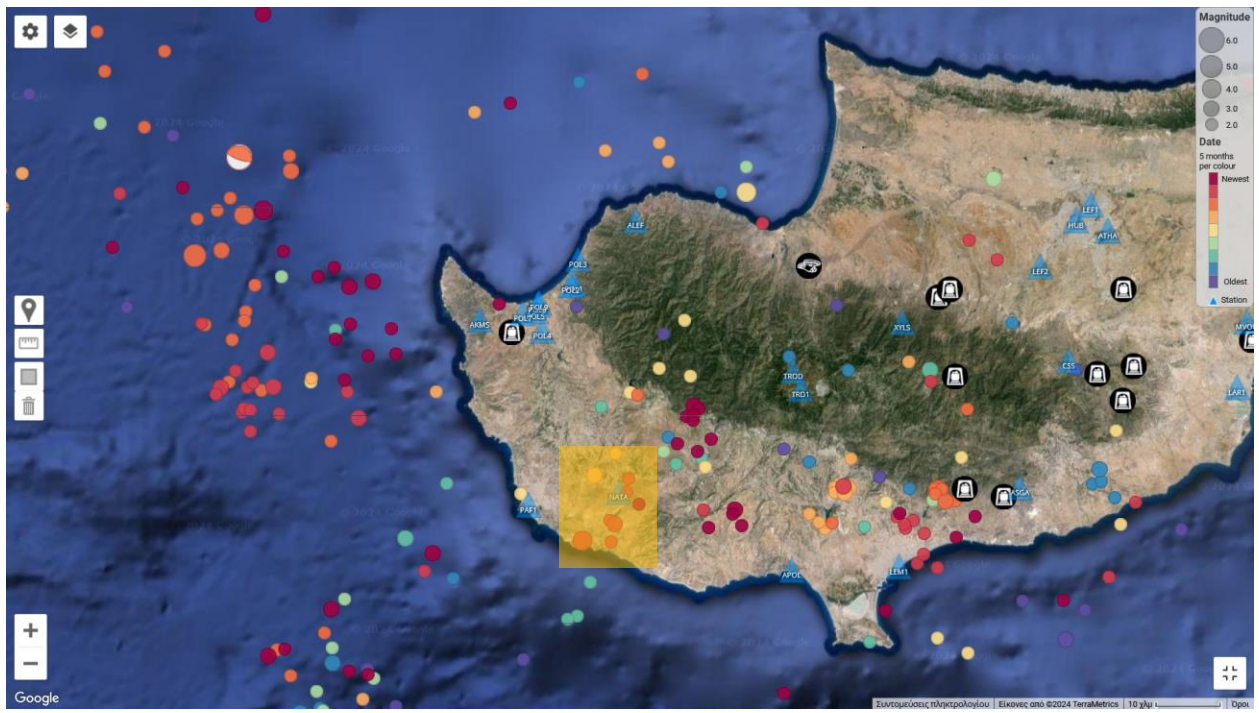
Εικόνα 26. Χάρτης Ενεργών Σεισμολογικών Σταθμών του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

Πίνακας 6. Ενεργοί Σεισμολογικοί Σταθμοί του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου (<http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

NW	Station	Name
CQ	AKMS	Akamas
CQ	ALEF	Alefka (new)
CQ	APOL	The Sanctuary of Apollo Hylates
CQ	ASGA	Asgata
CQ	ATHA	Athalassa
CQ	DERY	Deryneia
CQ	HUB	GSD_Lefkosia
CQ	LAR1	Larnaka (Acc)
CQ	LEF1	Lefkosia (Acc)
CQ	LEF2	Deftera, Lefkosia (Acc)
CQ	LEM1	Lemesos (Acc)
CQ	MVOU	Maurovouni
CQ	NATA	Nata
CQ	OSC1	CSNet OBS 1
CQ	OSC2	CSNet OBS 4
CQ	PAF1	Pafos (Acc)
CQ	PAR1	Paralimni (Acc)
CQ	PARA	Paralimni
CQ	POL1	Κοινοτικά Γραφεία Αργάκας (Acc)
CQ	POL2	Δημοτικό Σχολείο Αργάκας (Acc)
CQ	POL3	Δασικός Σταθμός Γιαλιάς (Acc)
CQ	POL4	Κοινοτικά Γραφεία Χρυσοχούς (Acc)
CQ	POL5	Πυροσβεστική Υπηρεσία Πόλης Χρυσοχούς (Acc)
CQ	POL6	Δημαρχείο Πόλης Χρυσοχούς (Acc)
CQ	POL7	Πολυδύναμο Κέντρο Χρυσοχούς (Acc)
CQ	POL8	Λύκειο Πόλης Χρυσοχούς (Acc)
CQ	POL9	Αποθήκες Τμήματος Ανάπτυξης Υδάτων (Acc)
CQ	SUNI	Souni
CQ	TRD1	Plateia Troodous (Acc)
CQ	TROD	Troodos
CQ	XYLS	Χυλιатов



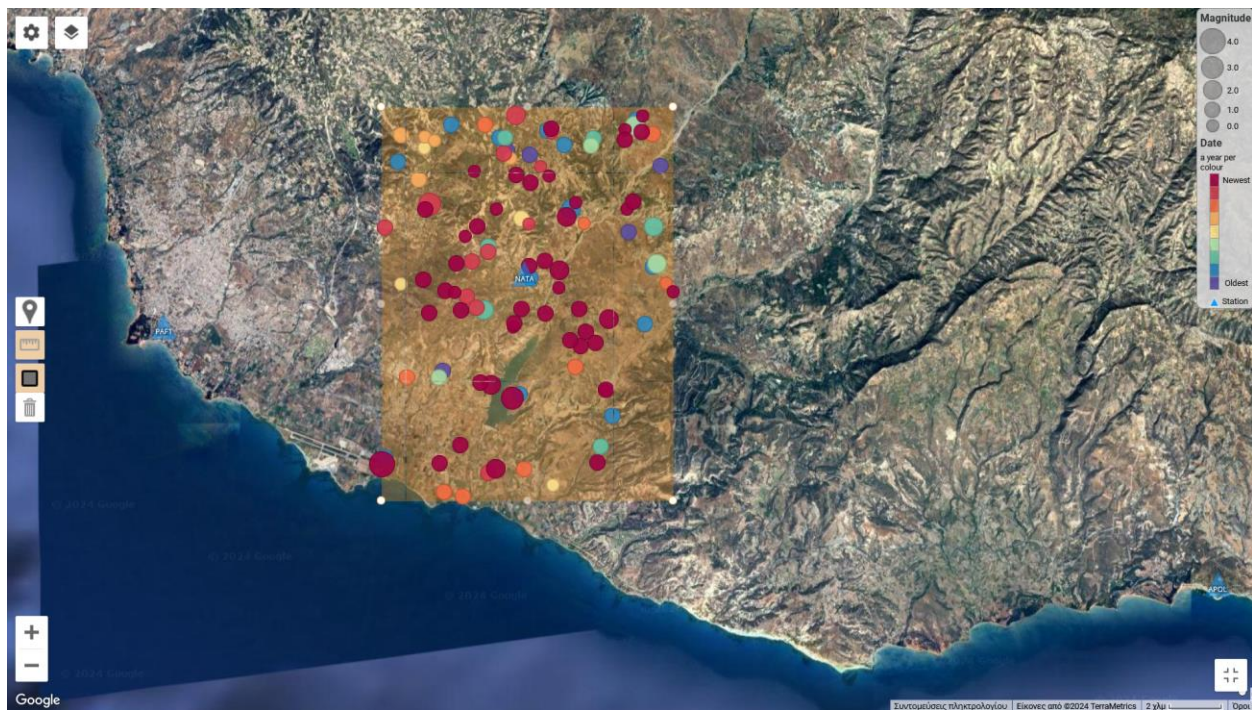
Εικόνα 27. Χάρτης Σεισμικότητας αισθητών σεισμών, με μέγεθος $M_l > 3$, για το διάστημα 1997 - 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)



Εικόνα 28. Καταγραφή σεισμών μεγέθους $M_I > 2$ σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

Πίνακας 7. Καταγραφή σεισμών μεγέθους $M_I > 2$ σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

a/a	Date & Time	Location	Depth (km)	Magnitude
1	2022-04-09 13:42:58.209 UTC	34.7987°N, 32.5875°E	23.69 km	2.2 MI
2	2022-04-30 05:27:07.610 UTC	34.7802°N, 32.5843°E	20.05 km	2.0 MI
3	2022-10-21 01:45:24.889 UTC	34.7632°N, 32.6052°E	34.65 km	2.1 MI
4	2022-04-26 19:05:23.610 UTC	34.7405°N, 32.5555°E	15.36 km	2.7 MI
5	2022-04-26 20:02:21.140 UTC	34.7358°N, 32.5643°E	20.00 km	3.9 MI
6	2021-08-31 09:18:49.610 UTC	34.8030°N, 32.5295°E	22.54 km	3.0 MI
7	2021-08-31 09:20:12.790 UTC	34.8338°N, 32.5658°E	17.08 km	2.5 MI
8	2022-03-25 13:55:43.060 UTC	34.7113°N, 32.5575°E	40.40 km	2.3 MI
9	2022-03-07 19:58:58.520 UTC	34.7092°N, 32.5057°E	43.50 km	2.2 MI



Εικόνα 29. Καταγραφή όλων των σεισμών σε ακτίνα 10km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)



Εικόνα 30. Καταγραφή Σεισμών μεγέθους $M_I > 4.5$ σε ακτίνα 50 km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

Πίνακας 8. Καταγραφή Σεισμών μεγέθους $M_I > 4.5$ σε ακτίνα 50 km γύρω από τον σεισμολογικό σταθμό στην κοινότητα της Νατάς, στην επαρχία Πάφου, για το διάστημα 2013 – 2022 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <http://www.gsd-seismology.org.cy/>)

Id	Date/Time (UTC)	Time RMS	Latitude	Longitude	Magnitude (M _I)	Reference Elevation	Depth	Depth Error	Num. Stations	Num. Phases	Azimuth Gap	Analysis Type	Place	Major Place
20220426-7	2022-04-26 19:11:35.860 UTC	0.81	34.7130°N	32.5093°E	4.7	0.09 km	20.00 km	31.61	28	41	94	Manual	FELT EARTHQUAKE	10.0 km SE of Pafos
20170318-8	2017-03-18 18:15:27.470 UTC	0.42	34.4627°N	32.1795°E	4.6	0.00 km	48.79 km	4.23	12	18	153	Manual	FELT EARTHQUAKE; Mediterranean Sea	40.0 km SW of Pafos
20150415-11	2015-04-15 08:25:12.660 UTC	0.35	34.8238°N	32.3690°E	5.6	0.00 km	27.62 km	0.88	9	14	137	Manual	FELT EARTHQUAKE	8.0 km NW of Pafos

2.8 Γεωτεχνικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Για τη διερεύνηση των εδαφικών συνθηκών που επικρατούν στο ολισθαίνον πρανές, εκτελέστηκαν τρεις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου. Η γεώτρηση ΒΗ08 (EG2010/012), βάθους 20.0m, όπως φαίνεται στον τεχνικογεωλογικό χάρτη της Εικόνας 21, έγινε κοντά στο φρύδι του πρανούς, ενώ οι γεωτρήσεις ΒΗ09 (EG2010/014), βάθους 26.0m, και ΒΗ10 (EG2010/006), βάθους 18.0m, έγιναν στο κυρίως σώμα του πρανούς.

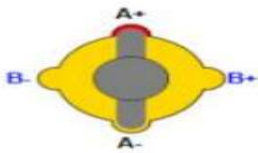
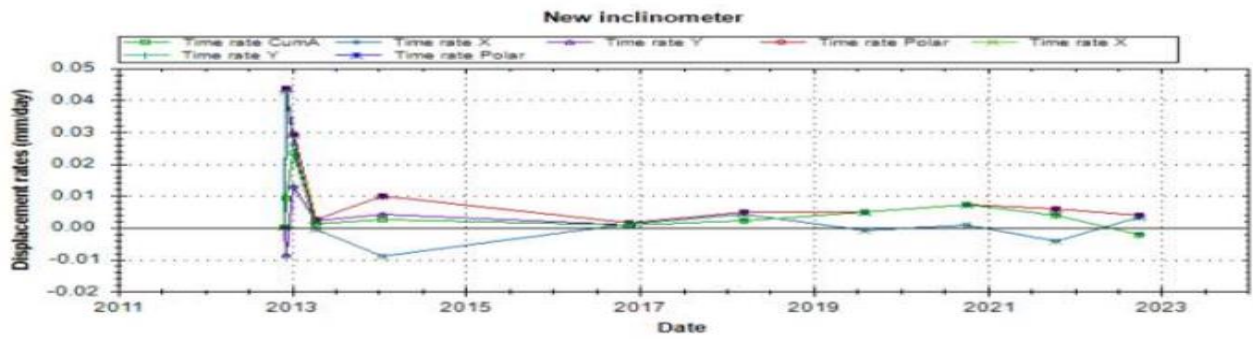
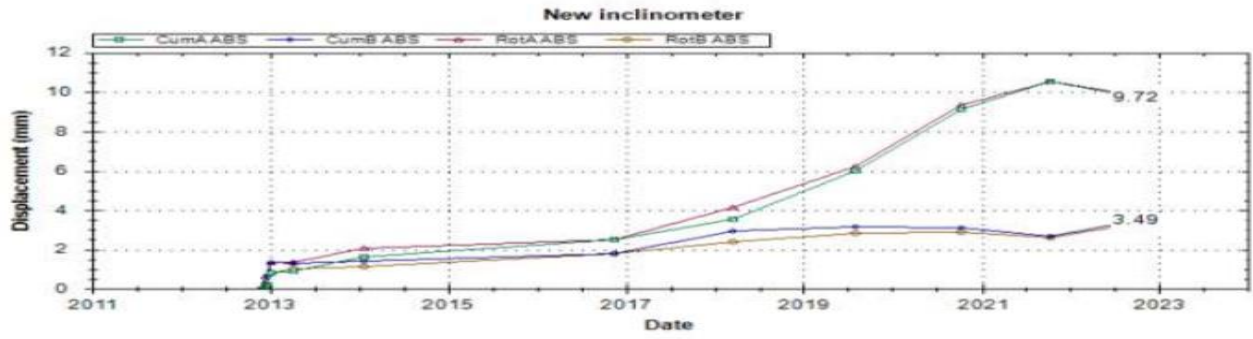
Τα αποτελέσματα των τριών αυτών γεωτρήσεων έδειξαν ότι το υπό εξέταση πρανές αποτελείται από δύο κύρια στρώματα σχηματισμών και τοπική εμφάνιση ενός τρίτου σχηματισμού. Πιο συγκεκριμένα, το κατώτερο στρώμα του πρανούς αποτελείται από τον Σχηματισμό Κανναβιού και το ανώτερο στρώμα, από τον Σχηματισμό των Λευκάρων, με τοπικές εμφανίσεις του Συμπλέγματος Μαμωνιών. Αναλυτικότερη περιγραφή των σχηματισμών αναγράφεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Περιγραφή σχηματισμών που εντοπίστηκαν από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

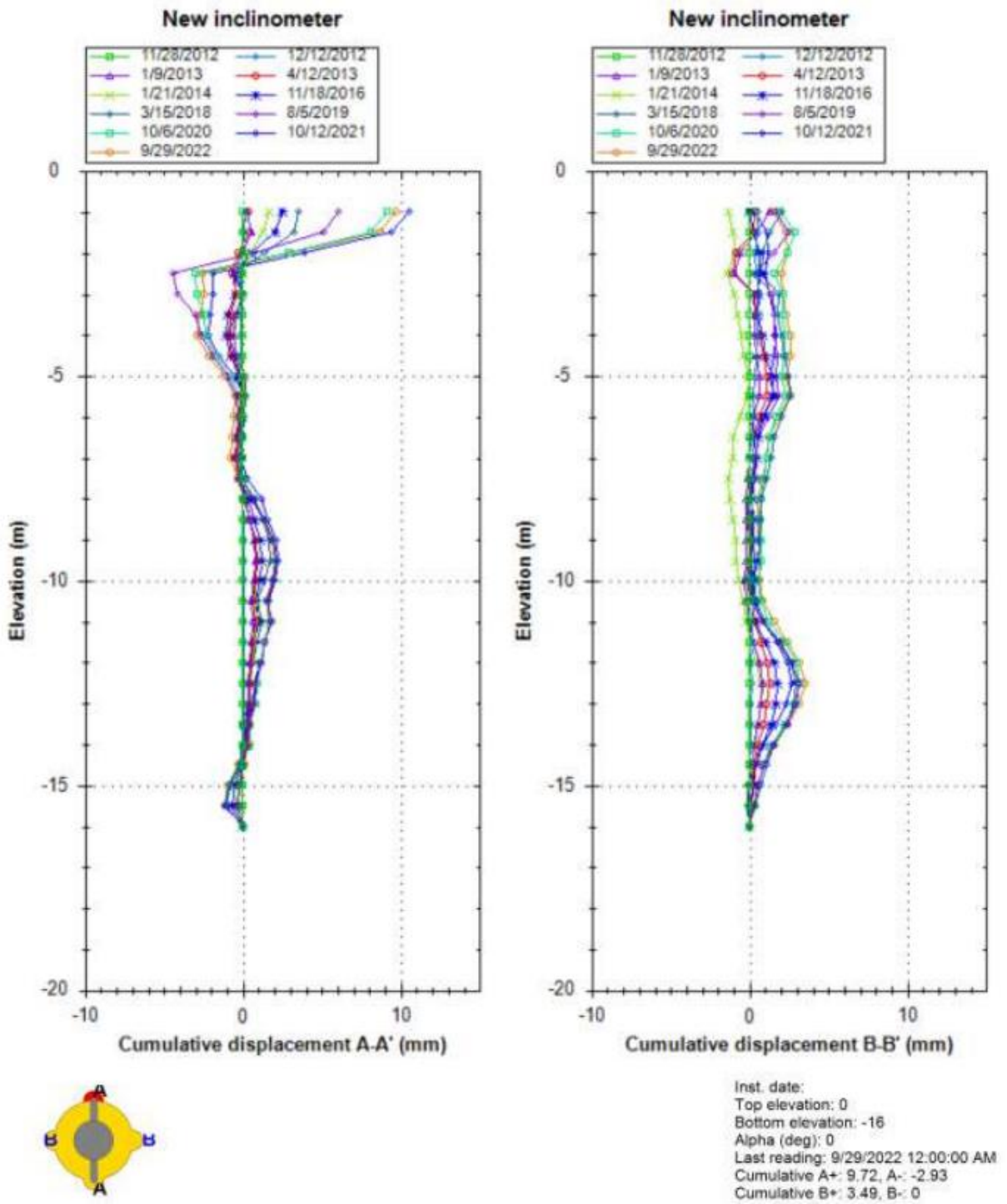
Όνομασία Σχηματισμού	Περιγραφή
Σχηματισμός Λευκάρων	Χαλαρά, γωνιακά, ανοιχτόχρωμα έως λευκά κορήματα κρητίδων και κερατολίθων, μεγέθους από 3x3cm μέχρι και μεγάλα μπλοκ, σε κύρια μάζα άμμου και ιλύος.
Σύμπλεγμα Μαμωνίων	Τεμάχια γκριζο-πράσινου έως σκούρου καφέ σερπεντινίτη, μεγάλης σκληρότητας, χαμηλής αντοχής.
Σχηματισμός Κανναβιού	Γκριζοπράσινη μπετονιτική άργιλος, εντελώς αποχρωματισμένη, κυρίως σκληρή, μαλακή σε σημεία.

Σημαντική επισήμανση αποτελεί ο εντοπισμός σποραδικών λείων επιφανειών (slickensides) στον σχηματισμό Κανναβιού και στις εμφανίσεις του συμπλέγματος Μαμωνιών, γεγονός που υποδεικνύει επιφάνειες αστοχίας στο συγκεκριμένο βάθος.

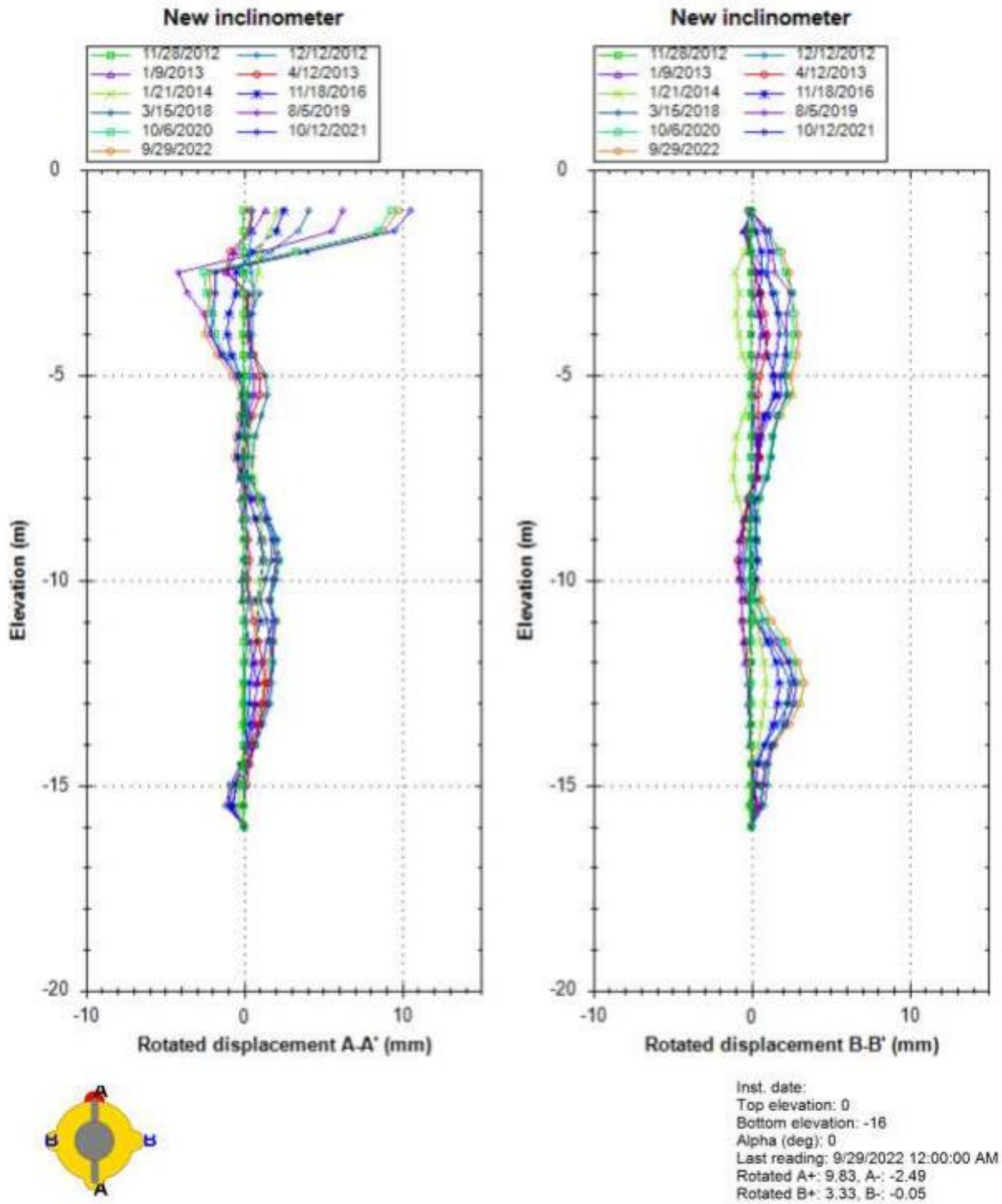
Επιπλέον, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των γεωτρήσεων, πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές διείδυσης SPT, των οποίων τα αποτελέσματα παραθέτονται στο Παράρτημα Α. Μετά την ολοκλήρωση των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, τοποθετήθηκε στη γεώτρηση ΒΗ10 αποκλισιομετρικός σωλήνας για την παρακολούθηση των μετακινήσεων του πρανούς. Τα αποτελέσματα του αποκλισιομέτρου παρατίθενται στις Εικόνες 31 έως 34. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρούνται ερπυστικές κινήσεις στα ανώτερα 3 m του εδάφους, κατά τον άξονα Α.



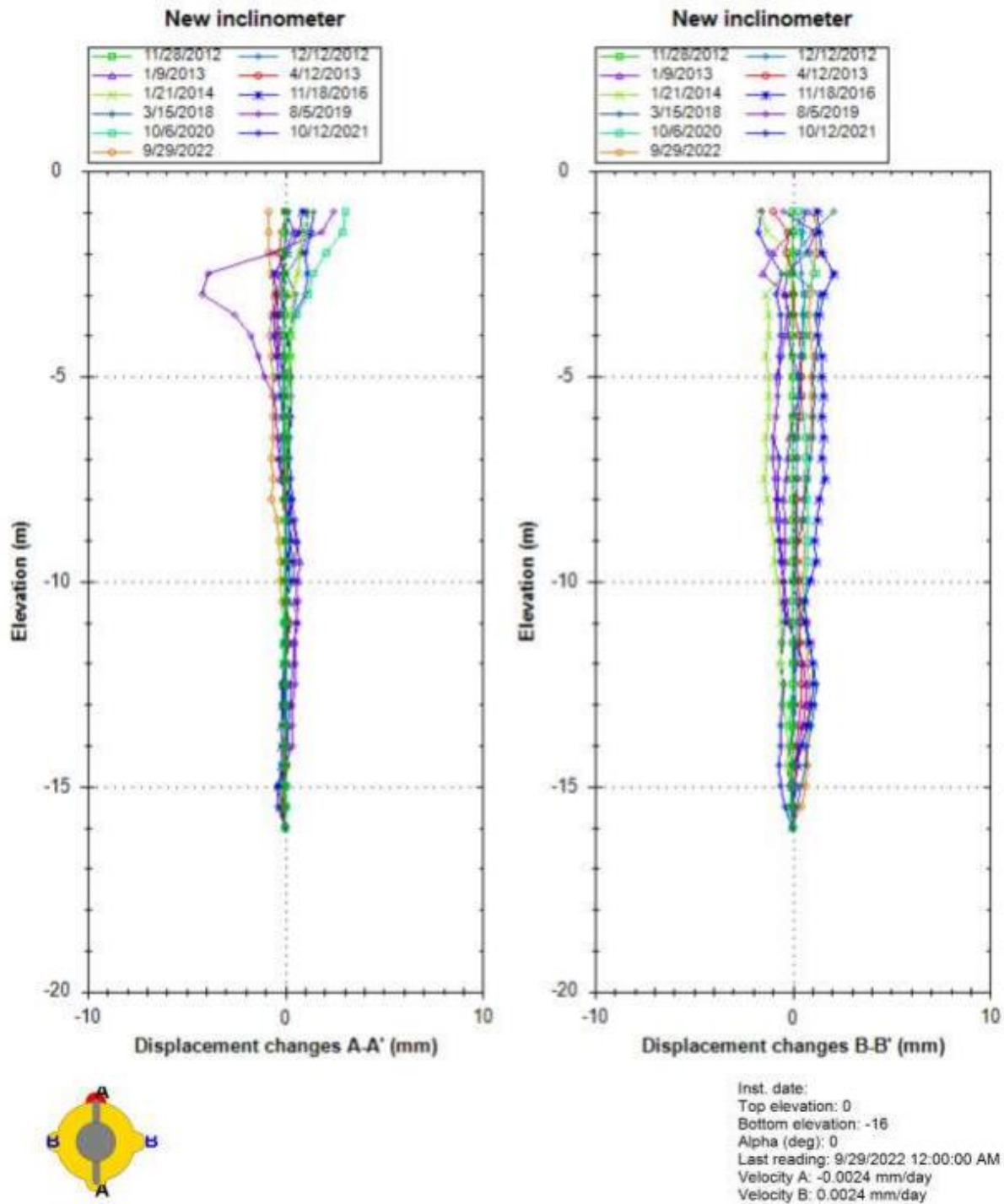
Εικόνα 31. Αποτελέσματα αποκλισιμέτρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2012-2022)



Εικόνα 32. Αποτελέσματα αποκλισιόμετρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2022)



Εικόνα 33. Αποτελέσματα αποκλισιόμετρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2022)



Εικόνα 34. Αποτελέσματα αποκλισιόμετρου στη γεώτρηση ΒΗ10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2022)

Δείγματα των σχηματισμών που λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις διαμορφώθηκαν σε δοκίμια για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής, συγκεκριμένα δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης, για τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων τους. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών που δομούν το υπό μελέτη πρανές αναγράφονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών του ολισθαίνοντος πρανούς

Ονομασία Σχηματισμού	Ειδικό Βάρος γ (kN/m ³)	Συνοχή c' (kPa)	Παραμένουσα Γωνία Τριβής ϕ'_r (°)
Σχηματισμός Λευκάρων	19	0	26 - 32
Σύμπλεγμα Μαμωνιών	18	0	12 - 16
Σχηματισμός Κανναβιού	17	3,7	10,8

Κεφάλαιο 3 : Η τηλεπισκόπηση ως μέθοδος παρατήρησης και μέτρησης μετακινήσεων

3.1 Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη της απόκτησης πληροφοριών για την επιφάνεια της Γης, με εξοπλισμό που δεν έρχεται σε επαφή με αυτή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ανίχνευσης και καταγραφής ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας και επεξεργασίας, ανάλυσης και εφαρμογής αυτών των δεδομένων.

Η διαδικασία της τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει μια αλληλεπίδραση μεταξύ της προσπίπτουσας φυσικής ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και των στόχων ενδιαφέροντος, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αμφοτέρων. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από τον στόχο, ανιχνεύεται και καταγράφεται από έναν αισθητήρα ο οποίος δεν έρχεται σε επαφή με τον στόχο και είναι εγκατεστημένος σε μια κινούμενη πλατφόρμα (π.χ. δορυφόρος). Τα συστήματα τηλεπισκόπησης χωρίζονται σε παθητικά και ενεργητικά, ανάλογα με την πηγή και το είδος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται.

Παθητικά Συστήματα Τηλεπισκόπησης είναι αυτά που χρησιμοποιούν ακτινοβολία που είναι φυσικά διαθέσιμη (π.χ. ηλιακή). Τα συστήματα αυτά μπορούν να λειτουργήσουν μόνο όταν η φυσική αυτή ακτινοβολία είναι διαθέσιμη. Για παράδειγμα, χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει μόνο κατά τη διάρκεια της μέρας που ο ήλιος φωτίζει τη Γη. Επιπλέον, σε περίπτωση ομίχλης, νέφωσης ή στο σκοτάδι, δεν μπορούν να ληφθούν καλής ποιότητας δεδομένα.

Αντίθετα, στα Ενεργητικά Συστήματα Τηλεπισκόπησης, ο δορυφόρος εκπέμπει ακτινοβολία προς τον υπό μελέτη στόχο και ο αισθητήρας ανιχνεύει και καταγράφει την ακτινοβολία που ανακλάται από τον στόχο. Αυτά τα συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας ή τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να ρυθμίσουν τον τρόπο που θα φωτίσουν τον στόχο, ώστε να γίνουν σωστές μετρήσεις. Στην κατηγορία των ενεργητικών συστημάτων, ανήκουν και τα Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar – SAR).

3.2 Χαρακτηριστικά συστήματος SAR

Ραντάρ είναι μια συσκευή μέτρησης εμβέλειας ή απόστασης. Αποτελείται από έναν πομπό, ένα δέκτη, μια κεραία και ένα ηλεκτρονικό σύστημα για την επεξεργασία και καταγραφή των δεδομένων. Μετρώντας τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της μετάδοσης ενός παλμού μικροκυμάτων και της λήψη ανακλώμενης - οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας από διαφορετικούς στόχους, μπορεί να προσδιοριστεί η απόστασή τους από το ραντάρ και, εν συνεχεία, η θέση τους.

Τα Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) αποτελούν συστήματα απεικόνισης με χρήση μικροκυμάτων. Έχουν τη δυνατότητα διεξόδου μέσα από σύννεφα, λόγω της χρήσης μικροκυμάτων και, ως ενεργά συστήματα, μπορούν να λειτουργούν κάθε ώρα της ημέρας.

‘Ανοιγμα’ ή ‘Διάφραγμα’ είναι ένας άλλος όρος για την κεραία του ραντάρ. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία, τόσο περισσότερες πληροφορίες μπορούν να ληφθούν και τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση της εικόνας. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου μεγέθους των κεραίων, η κίνηση του ραντάρ σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν μια μεγαλύτερη κεραία και να λάβουν τα επιθυμητά δεδομένα. Αυτή η διαδικασία, δίνει τον όρο ‘Συνθετικό Άνοιγμα’ ή ‘Συνθετικό Διάφραγμα’ στα συστήματα αυτά.

Τα συστήματα SAR λειτουργούν σε μια από τις ακόλουθες ζώνες μικροκυμάτων:

- Ζώνη X, με μήκος κύματος 2,4 – 3,75 cm και συχνότητα 8 – 12,5 GHz
- Ζώνη C, με μήκος κύματος 3,75 – 7,5 cm και συχνότητα 4 – 8 GHz
- Ζώνη S, με μήκος κύματος 7,5 – 15 cm και συχνότητα 2 – 4 GHz
- Ζώνη L, με μήκος κύματος 15 – 30 cm και συχνότητα 1 – 2 GHz
- Ζώνη P, με μήκος κύματος 30 – 100 cm και συχνότητα 0,3 – 1 GHz

Ανάλογα με το μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ, η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με διαφορετικό τρόπο με την επιφάνεια.

Σημαντικό ρόλο έχει επίσης και η πόλωση της ακτινοβολίας του σήματος. Τα περισσότερα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να εκπέμπουν ακτινοβολία μικροκυμάτων οριζόντια πολωμένη (H) ή κατακόρυφα πολωμένη (V). Ομοίως, η κεραία λαμβάνει την είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα πολωμένη οπισθοσκέδαση της ακτινοβολίας, ενώ ορισμένα ραντάρ μπορούν να λάβουν και τα δύο. Έτσι, υπάρχουν τέσσερις συνδυασμοί πόλωσης ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης:

- HH - για οριζόντια εκπομπή και οριζόντια λήψη
- VV - για κατακόρυφη εκπομπή και κατακόρυφη λήψη
- HV - για οριζόντια εκπομπή και κατακόρυφη λήψη
- VH - για κατακόρυφη εκπομπή και οριζόντια λήψη

Οι δύο πρώτοι συνδυασμοί πόλωσης χαρακτηρίζονται ως όμοια-πολωμένοι, επειδή η πόλωση της ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης είναι ίδιες, ενώ οι δύο τελευταίοι συνδυασμοί αναφέρονται ως διασταυρωμένοι-πολωμένοι, αφού η πόλωση της ακτινοβολίας εκπομπής και λήψης είναι αντίθετες η μία από την άλλη.

Αντίστοιχα με το μήκος κύματος, ανάλογα με την πόλωση εκπομπής και λήψης, η ακτινοβολία θα αλληλεπιδράσει διαφορετικά με την επιφάνεια.

Τόσο το μήκος κύματος όσο και η πόλωση επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο ένα ραντάρ «βλέπει» την επιφάνεια. Επομένως, οι εικόνες ραντάρ που συλλέγονται χρησιμοποιώντας

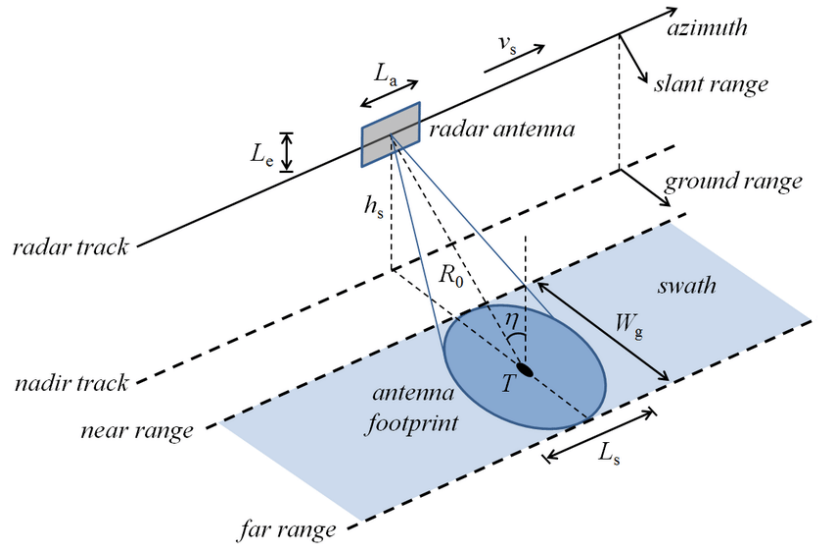
διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης και μήκους κύματος μπορούν να παρέχουν διαφορετικές και συμπληρωματικές πληροφορίες για τους στόχους στην επιφάνεια.

3.3 Γεωμετρία λήψης εικόνων SAR

Η διαδρομή που ακολουθεί ένας δορυφόρος ονομάζεται τροχιά. Ένας κύκλος τροχιάς ολοκληρώνεται όταν ο δορυφόρος περάσει από το ίδιο σημείο ακριβώς κάτω από τον δορυφόρο, στην επιφάνεια της γης, για δεύτερη φορά. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο ναδύρ.

Οι δορυφόροι έχουν σχεδιαστεί για να ακολουθούν μια σχεδόν πολική τροχιά (βορράς-νότος) η οποία, σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης (δύση-ανατολή), τους επιτρέπει να καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της γης σε μια ορισμένη χρονική περίοδο. Στη μια πλευρά της Γης, ο δορυφόρος ταξιδεύει προς τον Βόρειο Πόλο και εκτελεί ανοδική σάρωση και στη συνέχεια, στο δεύτερο μισό της τροχιάς, ταξιδεύει προς τον Νότιο Πόλο, εκτελώντας καθοδική σάρωση.

Ο δορυφόρος μεταφέρει ραντάρ με την κεραία να δείχνει προς την επιφάνεια της Γης, στο επίπεδο που είναι κάθετο στην τροχιά του. Η κλίση της κεραίας ως προς το ναδύρ ονομάζεται γωνία off-nadir και κυμαίνεται μεταξύ 20° και 50° . Καθώς ο δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από τη Γη, ο αισθητήρας «βλέπει» ένα συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειάς της. Η περιοχή που απεικονίζεται, ονομάζεται λωρίδα (swath) και καταγράφεται μέσω δέσμης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την κεραία υπό τη γωνία θέασης (look angle) σε σχέση με το ναδύρ, κατά μήκος της δέσμης ακτινοβολίας (Line of Sight - LOS). Λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης, η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) της ακτινοβολίας σε επίπεδο οριζόντιο έδαφος είναι μεγαλύτερη από την off-nadir γωνία. Η απόσταση μεταξύ του άξονα του δορυφόρου και του στόχου ονομάζεται πλευρική απόσταση (slant range) και η απόσταση από το σημείο ναδύρ μέχρι τον στόχο ονομάζεται επίγεια απόσταση (ground range). Το τμήμα της λωρίδας που βρίσκεται κοντά στο ναδύρ ονομάζεται εγγύς πλευρική απόσταση (near range), ενώ το τμήμα που βρίσκεται μακριά από το ναδύρ, ονομάζεται απώτερη πλευρική απόσταση (far range).



Εικόνα 35. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λήψης εικόνας SAR (Michele Martone, Onboard Quantization for Interferometric and Multichannel Synthetic Aperture Radar (SAR) Systems, 2019)

3.4 Απεικονίσεις μέσω SAR

Μια ψηφιακή εικόνα SAR αποτελείται από μια δισδιάστατη διάταξη σειρών και στηλών (μωσαϊκό) μικρών εικονοστοιχείων (pixel). Κάθε εικονοστοιχείο σχετίζεται με μια μικρή περιοχή της επιφάνειας της Γης (κυψέλη ανάλυσης – resolution cell) και δίνει έναν μιγαδικό αριθμό που φέρει δεδομένα πλάτους και φάσης του πεδίου μικροκυμάτων που οπισθοσκεδάζονται από όλους τους σκεδαστές εντός της αντίστοιχης κυψέλης ανάλυσης που προβάλλεται στο έδαφος. Κάθε σειρά της εικόνας σχετίζεται με διαφορετική θέση αζιμουθίου, ενώ κάθε στήλη υποδεικνύει διαφορετική θέση πλευρικής απόστασης (slant range).

Για να σχηματιστεί η εικόνα SAR, η ακτινοβολία πρέπει να εκτελέσει μια αμφίδρομη διαδρομή, από το ραντάρ στους σκεδαστές στο έδαφος και από τους σκεδαστές πίσω στο ραντάρ. Σκεδαστές σε διαφορετικές πλευρικές αποστάσεις από το ραντάρ (slant ranges) παρουσιάζουν διαφορετικές καθυστερήσεις μεταξύ εκπομπής και λήψης της ακτινοβολίας.

Λόγω της ημιτονοειδούς φύσης του εκπεμπόμενου σήματος, αυτή η καθυστέρηση, τ , είναι ισοδύναμη με μια διαφορά φάσης, φ , μεταξύ της εκπομπής και της λήψης του σήματος. Η διαφορά φάσης είναι επομένως ανάλογη με την απόσταση διαδρομής της ακτινοβολίας, $2R$, διαιρούμενη με το εκπεμπόμενο μήκος κύματος, λ .

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R$$

Η εικόνα SAR οπτικοποιείται μέσω χρωματικών επιπέδων της κλίμακας του γκρι (greyscale). Τα φωτεινά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές ισχυρά

οπισθοσκεδασμένης ακτινοβολίας, ενώ τα σκούρα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε ελαφρώς οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία.

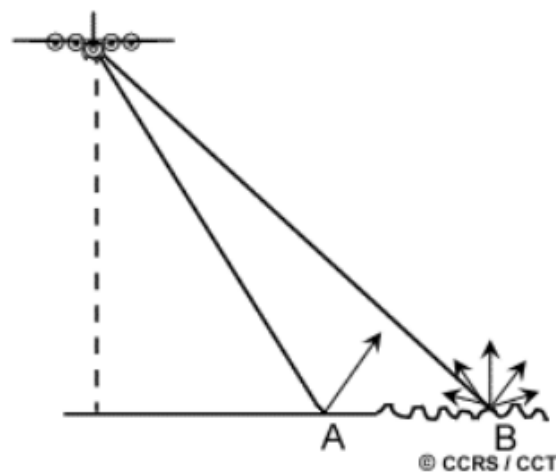
3.4.1 Χαρακτηριστικά επιφάνειας - σκεδαστών

Το πλάτος του πεδίου μικροκυμάτων που οπισθοσκεδάζονται εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, πέρα από τα χαρακτηριστικά του συστήματος ραντάρ, που έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας των σκεδαστών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών.

Η τραχύτητα της επιφάνειας των σκεδαστών αναφέρεται στις υψομετρικές διακυμάνσεις της επιφάνειας και αποτελεί το κυριότερο χαρακτηριστικό για τον καθορισμό του χρωματικού τονισμού της εικόνας SAR. Ένα ραντάρ αντιλαμβάνεται μια επιφάνεια ως τραχεία ή ομαλή, ανάλογα με το μήκος κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Όταν οι διακυμάνσεις του ύψους της επιφάνειας προσεγγίσουν το μέγεθος του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, τότε το ραντάρ αντιλαμβάνεται την επιφάνεια ως τραχεία.

Μια λεία επιφάνεια (A) προκαλεί κατοπτρική ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μόνο μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας επιστρέφει στο ραντάρ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι λείες επιφάνειες (π.χ. ήρεμη λεκάνη νερού) να εμφανίζονται με πιο σκούρο χρώμα σε μια εικόνα.

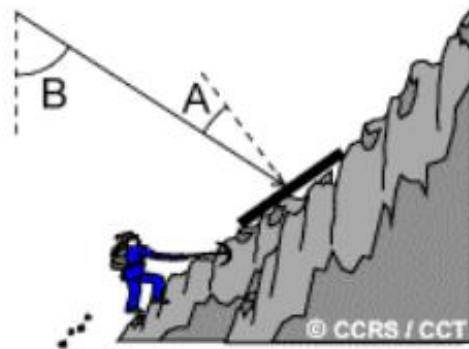
Μια τραχιά επιφάνεια (B) θα σκεδάσει την ακτινοβολία εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις και ένα σημαντικό ποσοστό της ακτινοβολίας θα επιστρέψει στο ραντάρ. Έτσι, οι τραχιές επιφάνειες (π.χ. αστικές περιοχές) φαίνονται πιο ανοιχτόχρωμες σε μια εικόνα.



Εικόνα 36. Σκέδαση ακτινοβολίας ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας των σκεδαστών (CCRS/CCT)

Η σχέση μεταξύ της γεωμετρίας θέασης και της γεωμετρίας των χαρακτηριστικών της επιφάνειας έχει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο η ακτινοβολία από το ραντάρ αλληλεπιδρά με τους σκεδαστές και, ως επακόλουθο, στην φωτεινότητά τους σε μια εικόνα.

Η τοπική γωνία πρόσπτωσης (local incidence angle) είναι η γωνία μεταξύ της δέσμης ακτινοβολίας του ραντάρ και της κάθετης ευθείας προς την κλίση της επιφάνειας στο σημείο πρόσπτωσης (A). Έτσι, η τοπική γωνία πρόσπτωσης λαμβάνει υπόψη την τοπική κλίση του εδάφους σε σχέση με τη δέσμη ακτινοβολίας του ραντάρ. Σε επίπεδο έδαφος, η τοπική γωνία πρόσπτωσης είναι ίδια με τη γωνία θέασης (look angle) (B) του ραντάρ. Για έδαφος με οποιοδήποτε είδος αναγλύφου, αυτό δεν ισχύει. Πλαγιές που βλέπουν προς το ραντάρ θα έχουν μικρές τοπικές γωνίες πρόσπτωσης, προκαλώντας σχετικά ισχυρή οπισθοσκέδαση, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα μια ανοιχτόχρωμη εμφάνιση στην εικόνα.



Εικόνα 37. Σκέδαση ακτινοβολίας σε σχέση με γεωμετρία θέασης και γεωμετρία χαρακτηριστικών της επιφάνειας (CCRS/CCT)

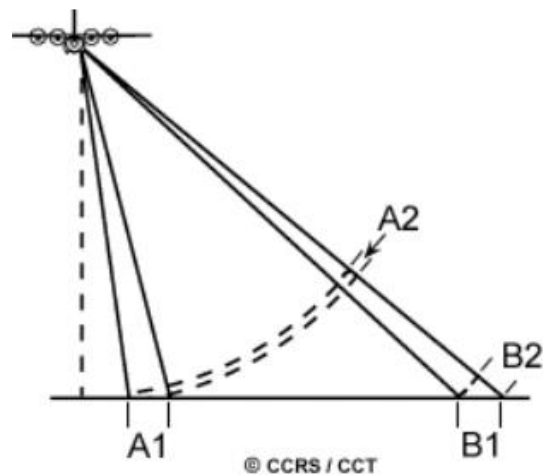
Η υγρασία επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός μέσου, οι οποίες επιδρούν στην απορρόφηση, στη μετάδοση και στην ανάκλαση της ακτινοβολίας. Έτσι, η περιεκτικότητα σε υγρασία επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι σκεδαστές αντανακλούν την ακτινοβολία και την εμφάνισή τους σε μια εικόνα. Η ανακλαστικότητα και η φωτεινότητα του μέσου αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία.

3.4.2 Γεωμετρικές παραμορφώσεις

Η περιοχή του εδάφους που απεικονίζεται σε κάθε κυψέλη ανάλυσης SAR εξαρτάται από την τοπογραφία και τη γεωμετρία θέασης του ραντάρ, καθώς μπορούν να προκαλέσουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα που προκύπτει.

Παραμόρφωση κλίμακας πλευρικής απόστασης (slant-range scale distortion) προκύπτει επειδή το ραντάρ μετρά την πλευρική απόσταση των στόχων, αντί την πραγματική οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της κλίμακας της εικόνας, από την εγγύς πλευρική απόσταση στην απώτερη πλευρική απόσταση. Παρόλο που οι στόχοι A1 και B1 έχουν το ίδιο μέγεθος στο έδαφος, οι

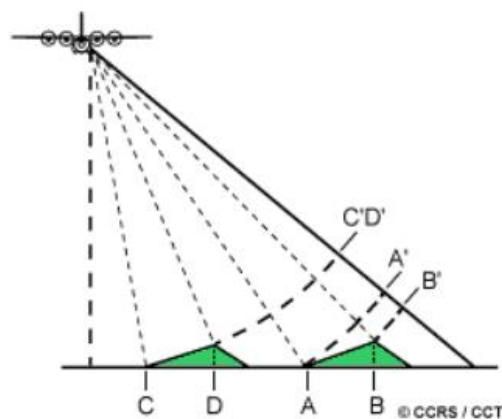
φαινομενικές διαστάσεις τους στην πλευρική απόσταση A2 και B2, είναι διαφορετικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι στόχοι στην εγγύς πλευρική απόσταση να εμφανίζονται συμπιεσμένοι σε σχέση με αυτούς στην απώτερη πλευρική απόσταση.



Εικόνα 38. Γεωμετρικές παραμορφώσεις - Παραμόρφωση κλίμακας πλευρικής απόστασης (CCRS/CCT)

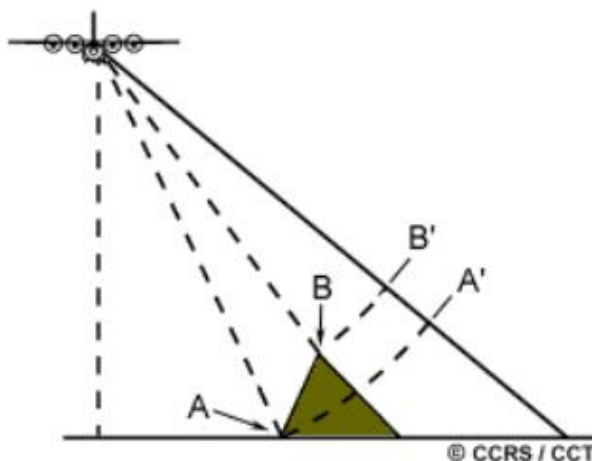
Λόγω διαφοροποιήσεων του ανάγλυφου (relief displacement), παρουσιάζονται γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως η σμίκρυνση (foreshortening) και η πτύχωση (layover).

Όταν η δέσμη του ραντάρ φτάσει στη βάση ενός ψηλού στόχου που βρίσκεται υπό κλίση προς το ραντάρ, πριν φτάσει στην κορυφή, θα προκύψει σμίκρυνση, αφού το ραντάρ μετρά την πλευρική απόσταση. Η απόσταση A προς B θα φαίνεται συμπιεσμένη και το μήκος της θα παρουσιαστεί λανθασμένα ως A' έως B'. Ανάλογα με τη γωνία κλίσης της πλαγιάς σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του ραντάρ, η σοβαρότητα του φαινομένου της σμίκρυνσης ποικίλλει. Μέγιστη σμίκρυνση εμφανίζεται όταν η δέσμη ραντάρ είναι κάθετη στην πλαγιά έτσι ώστε να απεικονίζονται η βάση και η κορυφή της πλαγιάς ταυτόχρονα (C έως D). Το μήκος της πλαγιάς θα μειωθεί σε πραγματικό μήκος μηδέν σε πλευρική απόσταση (C'D').



Εικόνα 39. Γεωμετρικές παραμορφώσεις - Σμίκρυνση (CCRS/CCT)

Πτύχωση συμβαίνει όταν η δέσμη του ραντάρ φτάσει στην κορυφή ενός ψηλού στόχου (B) πριν φτάσει στη βάση (A). Το σήμα που επιστρέφει από την κορυφή του στόχου θα ληφθεί πριν από το σήμα από τη βάση. Ως αποτέλεσμα, η κορυφή του στόχου μετατοπίζεται προς το ραντάρ σε σχέση με την πραγματική του θέση στο έδαφος και «απλώνει» τη βάση του στόχου (B' προς A').



Εικόνα 40. Γεωμετρικές παραμορφώσεις – Πτύχωση (CCRS/CCT)

Τόσο η σμίκρυνση όσο και η πτύχωση προκαλούν σκίαση στις εικόνες που προκύπτουν. Σκίαση προκύπτει όταν η δέσμη ακτινοβολίας δεν μπορεί να φωτίσει την επιφάνεια του εδάφους. Οι σκιές εμφανίζονται προς την απώτερη πλευρική απόσταση, πίσω από κατακόρυφους στόχους ή απότομες πλαγιές. Εφόσον η δέσμη του ραντάρ δεν φωτίζει την επιφάνεια, οι σκιασμένες περιοχές θα φαίνονται σκούρες σε μια εικόνα καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια για να οπισθοσκεδαστεί.

Με εικόνες από διαφορετικές κατευθύνσεις θέασης (look direction) και με χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) της περιοχής, οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν να διορθωθούν.

3.4.3 Κηλίδωση

Η παρουσία πολλών σκεδαστών μέσα σε κάθε κυψέλη ανάλυσης SAR δημιουργεί το φαινόμενο της κηλίδωσης, το οποίο είναι κοινό σε όλα τα συστήματα απεικόνισης RADAR. Η κηλίδωση εμφανίζεται ως μια κοκκώδης υφή με έντονες μεταβολές σε διαβαθμίσεις του γκρι («αλατοπίπερο») σε μια εικόνα, όταν ομογενείς περιοχές εδάφους που εκτείνονται σε πολλές κυψέλες ανάλυσης SAR απεικονίζονται με διαφορετικά πλάτη σε διαφορετικές κυψέλες ανάλυσης.

Το φαινόμενο αυτό είναι άμεση συνέπεια της υπέρθεσης των σημάτων που ανακλώνται από πολλούς μικρούς σκεδαστές, με διάσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος σήματος του ραντάρ, εντός της κυψέλης ανάλυσης. Αυτά τα σήματα, τα οποία έχουν τυχαία φάση λόγω

πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ των σκεδαστών, προσθέτουν στην άμεσα ανακλώμενη ακτινοβολία.

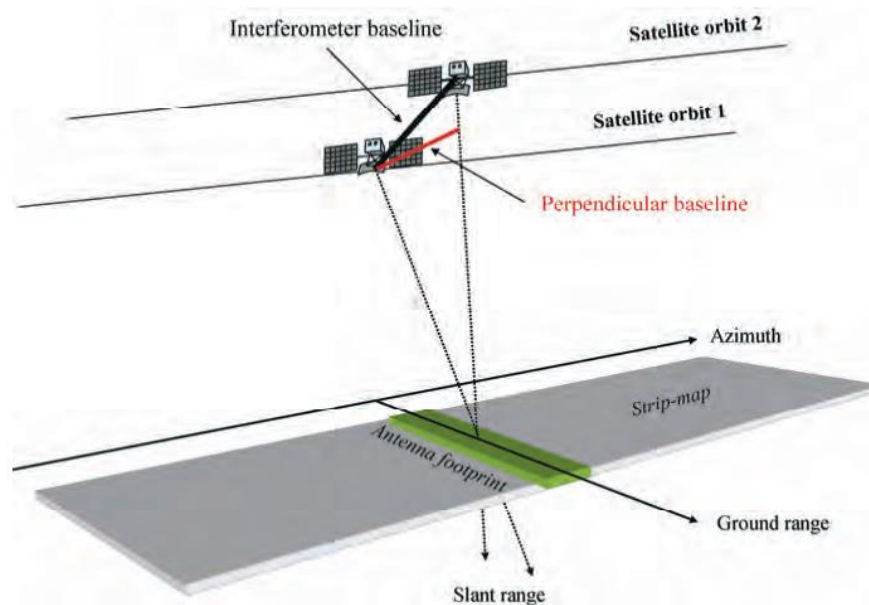
Η κηλίδωση έχει αντίκτυπο στην ποιότητα και τη χρησιμότητα των ανιχνευόμενων εικόνων SAR, αφού είναι ουσιαστικά μια μορφή θορύβου που υποβαθμίζει την ποιότητα μιας εικόνας και μπορεί να κάνει την ερμηνεία της (οπτική ή ψηφιακή) πιο δύσκολη.

Για τη μείωση του φαινομένου αυτού εφαρμόζονται μέθοδοι όπως η επεξεργασία περισσότερων εικόνων της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες εμφάνισης (multi-look processing), ή η χρήση χωρικού φίλτρου (spatial filtering) στην εικόνα εξόδου σε ψηφιακό περιβάλλον ανάλυσης.

3.5 Συμβολομετρία (InSAR)

Η συμβολομετρία είναι μια τεχνική απεικόνισης η οποία βασίζεται στην παρεμβολή των κυμάτων της ακτινοβολίας. Δύο ή περισσότερες εικόνες SAR στην ίδια περιοχή συνδυάζονται για την εξαγωγή πληροφοριών για την τοπογραφία της επιφάνειας ή την κίνησή της. Η παραγόμενη εικόνα ονομάζεται συμβολόγραμμα (interferogram).

Ένας δορυφόρος SAR μπορεί να παρατηρήσει την ίδια περιοχή από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες θέασης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε ταυτόχρονα, με δύο ραντάρ τοποθετημένα στην ίδια πλατφόρμα, είτε σε διαφορετικούς χρόνους, αξιοποιώντας επαναλαμβανόμενες τροχιές του ίδιου δορυφόρου. Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) ονομάζεται συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης (interferometer baseline) και η προβολή του κάθετα στην διεύθυνση της πλευρικής απόστασης ονομάζεται κάθετο διάνυσμα βάσης (perpendicular baseline).



Εικόνα 41. Γεωμετρία συστήματος InSAR (ESA, 2007)

Το συμβολόγραμμα SAR δημιουργείται με πολλαπλασιασμό (cross-multiplying), εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο, της πρώτης εικόνας SAR με το μιγαδικό συζυγές της δεύτερης. Έτσι, το πλάτος του συμβολογράμματος είναι το πλάτος της πρώτης εικόνας πολλαπλασιασμένο με αυτό της δεύτερης, ενώ η συμβολομετρική φάση της είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων.

Η διαφορά συμβολομετρικής φάσης μεταξύ δύο εικόνων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η τοπογραφία και η καμπυλότητα του εδάφους, ατμοσφαιρικοί παράγοντες όπως θερμοκρασία, πίεση και υγρασία, η παραμόρφωση του εδάφους και διάφοροι άλλοι θόρυβοι των μετρήσεων, μεταξύ των δύο λήψεων.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{disp} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise} + \Delta\varphi_{orb}$$

Όπου,

- $\Delta\varphi_{displacement} = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS}$,

και αναφέρεται στη διαφορά φάσης λόγω πιθανής παραμόρφωσης ή μετατόπισης του εδάφους, με :

LOS την προβολή του διανύσματος μετατόπισης του εδάφους κατά τη διεύθυνση της δέσμης ακτινοβολίας του ραντάρ.

- $\Delta\varphi_{topography} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{b_n}{r \sin\theta} \Delta Z$,

και αναφέρεται στη διαφορά φάσης λόγω ελλιπούς γνώσης της τοπογραφίας, με :

ΔZ την υψομετρική διαφορά, θ τη γωνία θέασης, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, b_n το κάθετο διάνυσμα βάσης και r την πλευρική απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του εδάφους.

- $\Delta\varphi_{flat} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{b_n s}{r \tan\theta}$,

και αναφέρεται στη διαφορά φάσης λόγω της καμπυλότητας του εδάφους, με :

λ, r, θ και b_n όπως αναφέρθηκαν παραπάνω για το $\Delta\varphi_{topo}$ και s τη διαφορά πλευρικής απόστασης (πλευρική μετατόπιση) των στόχων.

- $\Delta\varphi_{atmosphere}$

αναφέρεται στη διαφορά φάσης λόγω της μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως η μεταβολή της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας.

- $\Delta\varphi_{noise}$

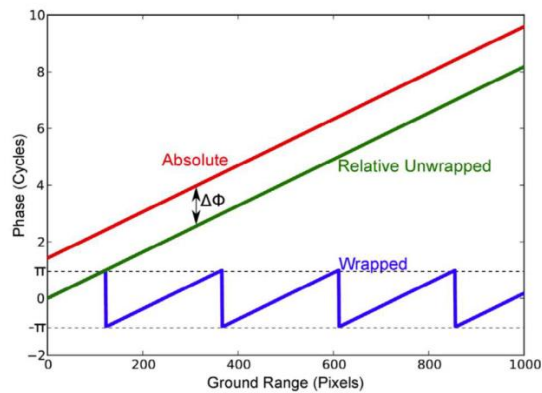
αναφέρεται στη διαφορά φάσης λόγω ύπαρξης πολλών σκεδαστών σε μια κυψέλη ανάλυσης και τις χρονικές διαφορές στα χαρακτηριστικά τους μεταξύ των δύο λήψεων. Ο

παράγοντας αυτός κυριαρχεί σε περιοχές με βλάστηση, όπου οι σκεδαστές δεν βρίσκονται στο έδαφος, αλλά στον όγκο ενός δέντρου.

3.5.1 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης (Phase – unwrapping)

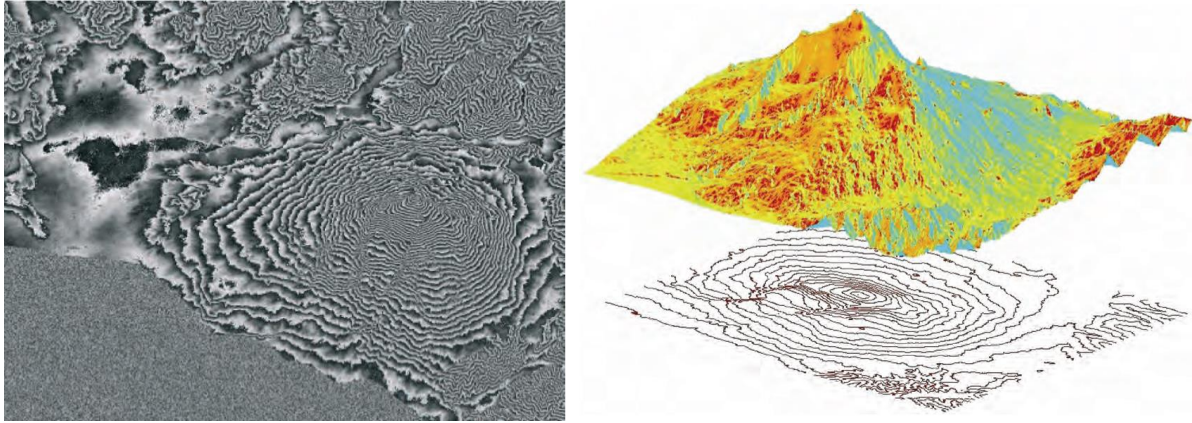
Το εξομαλυμένο συμβολόγραμμα παρέχει μια αμφίσημη μέτρηση του σχετικού υψομέτρου του εδάφους. Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων στο εξομαλυμένο συμβολόγραμμα παρέχει μια μέτρηση της πραγματικής διαφοράς υψομέτρου, αφού πρώτα διαγραφεί οποιοσδήποτε ακέραιος αριθμός των 2π κύκλων της συμβολομετρικής φάσης, με αποτέλεσμα να παίρνει τιμές από $-\pi$ έως π . Η διαδικασία πρόσθεσης του κατάλληλου ακέραιου πολλαπλάσιου του 2π στις τιμές φάσης, για την εύρεση της πραγματικής υψομετρικής διακύμανσης, ονομάζεται αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης.

$$\Psi = \varphi + n2\pi$$



Εικόνα 42. Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης (Osmanoglu et al., 2016)

Όταν οι συμβολομετρικές φάσεις αποκατασταθούν, λαμβάνεται ένας χάρτης υψομετρικών διαφορών. Αυτό είναι το πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί ένα DEM. Στη συνέχεια, ο χάρτης υψομετρικών διαφορών του SAR αναφέρεται σε ένα συμβατικό ελλειψοειδές (πχ WGS84) και η αναδόμηση εικονοστοιχείων σε έναν κάρναβο (πχ UTM).



Εικόνα 43. Αριστερά: το εξομαλυμένο συμβολογράφημα και Δεξιά: το σχετικό DEM του βουνού Αίτνα που δημιουργήθηκαν μέσω αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης και αναδόμησης εικονοστοιχείων (CCRS)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, επίσης, ότι οι αποκαταστημένες τιμές που προκύπτουν, λαμβάνοντας υπόψη και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε, μπορούν να μετατραπούν σε τιμές εδαφικής παραμόρφωσης.

3.5.2 Συνάφεια (Coherence)

Ο θόρυβος φάσης μπορεί να υπολογιστεί για ένα ζεύγος εικόνων SAR από το μέγεθος της τοπικής συνάφειας, γ . Η τοπική συνάφεια είναι ο συντελεστής συσχέτισης του ζεύγους των εικόνων SAR υπολογισμένου σε ένα μικρό χωρικό παράθυρο εύρους μερικών εικονοστοιχείων, όταν όλα τα επιμέρους στοιχεία της φάσης έχουν εκτιμηθεί.

Οι τιμές της συνάφειας κυμαίνονται από 0, όταν υπάρχει πλήρης αποσυσχέτιση και η συμβολομετρική φάση οφείλεται μόνο σε θόρυβο, μέχρι 1, στην περίπτωση πολύ καλής συσχέτισης των ιδιοτήτων του στόχου μεταξύ δύο λήψεων και δεν υπάρχει θόρυβος στη φάση.

Οι χρονικές διαφορές των χαρακτηριστικών σκέδασης ενός στόχου επηρεάζουν τη συνάφεια ενός συμβολομετρικού ζεύγους. Τα υδάτινα σώματα, λόγω της συνεχούς κίνησής τους, χαρακτηρίζονται από πλήρη αποσυσχέτιση και παρουσιάζονται σκοτεινά σε μια εικόνα συνάφειας. Αντίστοιχα, η βλάστηση, με αύξηση της πυκνότητας ή του ύψους της, μειώνει τη συνάφεια ενός συμβολομετρικού ζεύγους.

Η συνολική συνάφεια μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα διάφορων πηγών αποσυσχέτισης, ως εξής:

$$\gamma_{total} = \gamma_{geom} + \gamma_{surf} + \gamma_{temp} + \gamma_{vol} + \gamma_{thermal} + \gamma_{Doppler}$$

Όπου:

γ_{geom} , η γεωμετρική αποσυσχέτιση

γ_{surf} , η επιφανειακή αποσυσχέτιση

γ_{temp} , η χρονική αποσυσχέτιση

γ_{vol} , η αποσυσχέτιση λόγω του φαινομένου σκέδασης (volume scattering effect)

$\gamma_{thermal}$, η θερμική αποσυσχέτιση

$\gamma_{Doppler}$, η κεντροειδής αποσυσχέτιση Doppler

3.6 Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR)

Ο όρος «Διαφορική Συμβολομετρία» (Differential SAR Interferometry- DInSar) χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη διαδικασία παραγωγής συμβολογραμμάτων από τα οποία έχει αφαιρεθεί η φάση της τοπογραφίας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ανίχνευση παραμορφώσεων και μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω της σχετικής διαφοράς της θέσης των σκεδαστών σε δύο χρονικά διαφορετικές λήψεις. Η διαδικασία αυτή βρίσκει εφαρμογή στην καταγραφή και παρακολούθηση σεισμικών φαινομένων, κατολισθήσεων και καθιζήσεων , καθώς επίσης και σε τομείς όπως η γεωφυσική και η ηφαιστειολογία.

Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα προϋπαρχόντων ψηφιακών μοντέλων εδάφους με ικανοποιητική ακρίβεια, διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης και αφαίρεσης της τοπογραφίας έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικούς τύπους DInSAR.

Επιπλέον, η ύπαρξη φαινομένων χρονικής και γεωμετρικής αποσυσχέτισης οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων διαχρονικής ανάλυσης για την επεξεργασία μεγάλου αριθμού λήψεων SAR μιας συγκεκριμένης περιοχής ενδιαφέροντος. Οι μέθοδοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών και τη μέθοδο των υποσυνόλων μικρών βάσεων.

3.6.1 Μέθοδος Σταθερών Σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry - PSI)

Η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών αναπτύχθηκε με σκοπό να αντιμετωπίσει τα προβλήματα χρονικής και γεωμετρικής αποσυσχέτισης και τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Βασίζεται στον εντοπισμό σταθερών στόχων επί του εδάφους οι οποίοι έχουν διαστάσεις μικρότερες από αυτές του κελιού ανάλυσης της εικόνας SAR και παρουσιάζουν σταθερή ανακλαστικότητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ως διαδικασία, έχει αφετηρία τη λήψη μιας σειράς εικόνων, με ίδια εικόνα αναφοράς, μιας συγκεκριμένης περιοχής. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ανάλυση χρονοσειρών των τιμών φάσης για την διόρθωση σφαλμάτων που προέρχονται από χρονική και γεωμετρική αποσυσχέτιση των εικόνων. Τέλος, γίνεται διόρθωση της επίδρασης της μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών στη φάση, με βάση την εικόνα αναφοράς. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, λαμβάνονται δεδομένα μεγέθους και ταχύτητας των παραμορφώσεων μιας περιοχής για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

3.6.2 StaMPS - Stanford Method for Persistent Scatterers

Η μέθοδος Stanford για σταθερούς σκεδαστές διαφέρει από τη μέθοδο σταθερών σκεδαστών ως προς τα κριτήρια επιλογής των εικονοστοιχείων των σταθερών σκεδαστών. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει να γίνει εφαρμογή της μεθόδου StaMPS, ανεξαρτήτως ύπαρξης ανθρωπογενών κατασκευών, σε διάφορα εδάφη.

Αρχικά, χρησιμοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον εντοπισμό των σταθερών σκεδαστών. Η επιλογή των σταθερών σκεδαστών βασίζεται στη διασπορά εύρους (amplitude), δεδομένης μιας μέγιστης τιμής παραμέτρου 0,4. Μόνο τα εικονοστοιχεία σταθερών σκεδαστών με υψηλή τιμή συνάφειας, άρα υψηλή σταθερότητα φάσης, θεωρούνται σταθεροί σκεδαστές.

3.6.3 Μέθοδος Υποσυνόλων Μικρών Βάσεων (Small Baseline Subset – SBAS)

Οι σκεδαστές της μεθόδου των υποσυνόλων μικρών βάσεων διαφέρουν από τους σκεδαστές της μεθόδου σταθερών σκεδαστών ως προς το μέγεθος, τη γεωμετρία λήψης και το υλικό από το οποίο αποτελούνται, με αποτέλεσμα να απαιτούν διαφορετικές μεθόδους προσέγγισης για την εξαγωγή δεδομένων μετακίνησης και παραμόρφωσής τους.

Η μέθοδος SBAS βασίζεται στην εξέταση σκεδαστών που είναι διάσπαρτοι στον χώρο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χωρική τους πυκνότητα. Εικόνες που ανήκουν σε διαφορετικά υποσύνολα μικρών βάσεων συνδέονται με κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να περιοριστεί η χρονική και γεωμετρική τους αποσυσχέτιση και οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας και τελικά να ληφθούν συμβολογράμματα υψηλά συσχετισμένα.

Κεφάλαιο 4 : Μελέτη μετακινήσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος

4.1 Επεξεργασία εικόνων Sentinel-1

Η μελέτη των LOS μετακινήσεων της ολισθαίνουσας μάζας στην περιοχή της κοινότητας Νατάς έγινε με χρήση δεδομένων από την Επιχειρησιακή μονάδα «Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND» του ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ. Για τον εντοπισμό των εδαφικών μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (PSI). Οι απεικονίσεις του δορυφόρου Sentinel-1 καλύπτουν το χρονικό διάστημα από 20 Φεβρουαρίου 2016 έως 20 Δεκεμβρίου 2021, για την ανοδική τροχιά και από 12 Οκτωβρίου 2015 έως 17 Σεπτεμβρίου 2022, για την καθοδική τροχιά. Η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών εφαρμόστηκε σε 136 εικόνες της ανοδικής τροχιάς και σε 139 εικόνες της καθοδικής τροχιάς, καλύπτοντας την επιφάνεια της Κύπρου.

Στα πλαίσια της μεθόδου σταθερών σκεδαστών, πραγματοποιήθηκε η αλυσίδα επεξεργασίας P-PSI (Paroutsis et al, 2020). Αυτή η αλυσίδα επεξεργασίας είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη, παραλληλισμένη έκδοση της μεθόδου σταθερών σκεδαστών (PSI), η οποία αναπτύχθηκε και εφαρμόζεται στην Επιχειρησιακή μονάδα «Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND» του ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με το λογισμικό Stanford για σταθερούς σκεδαστές (StaMPS) (Hooper et al., 2007), αφού προηγηθεί προ-επεξεργασία τους με το υπολογιστικό περιβάλλον για επεξεργασία γεωδαιτικών εικόνων InSAR, ISCE (Fattahi et al., 2017, Rosen et al., 2012). Ατμοσφαιρικές διορθώσεις επιτυγχάνονται με τη χρήση του λογισμικού Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise - TRAIN (Bekaert et al., 2015).

Πίνακας 11. Δεδομένα αναλύσεων για ανοδική και καθοδική τροχιά

Δορυφόρος	Τροχιά	Path	Αριθμός Εικόνων	Χρονική Κάλυψη	Πρωτεύουσα Εικόνα
Sentinel-1	Ascending	160	136	20/02/2016-20/12/2021	10 Ιουνίου 2019
	Descending	167	139	12/10/2015-17/09/2022	12 Απριλίου 2019

4.2 European Ground Motion Service of Copernicus

Σε συνδυασμό με τα δεδομένα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο BEYOND, έγινε χρήση δεδομένων από το European Ground Motion Service, το οποίο περιλαμβάνεται στην υπηρεσία Copernicus Land Monitoring Service (Land | Copernicus n.d.). Οι εικόνες SAR που προέρχονται από τον δορυφόρο Sentinel-1 παρέχουν πληροφορίες σχετικά με μετακινήσεις του εδάφους σε όλη την Ευρώπη, με ακρίβεια χιλιοστού, και αξιοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας φραγμάτων, γεφυρών, σιδηροδρόμων και κτιρίων, η αξιολόγηση της πιθανότητας φυσικών κινδύνων

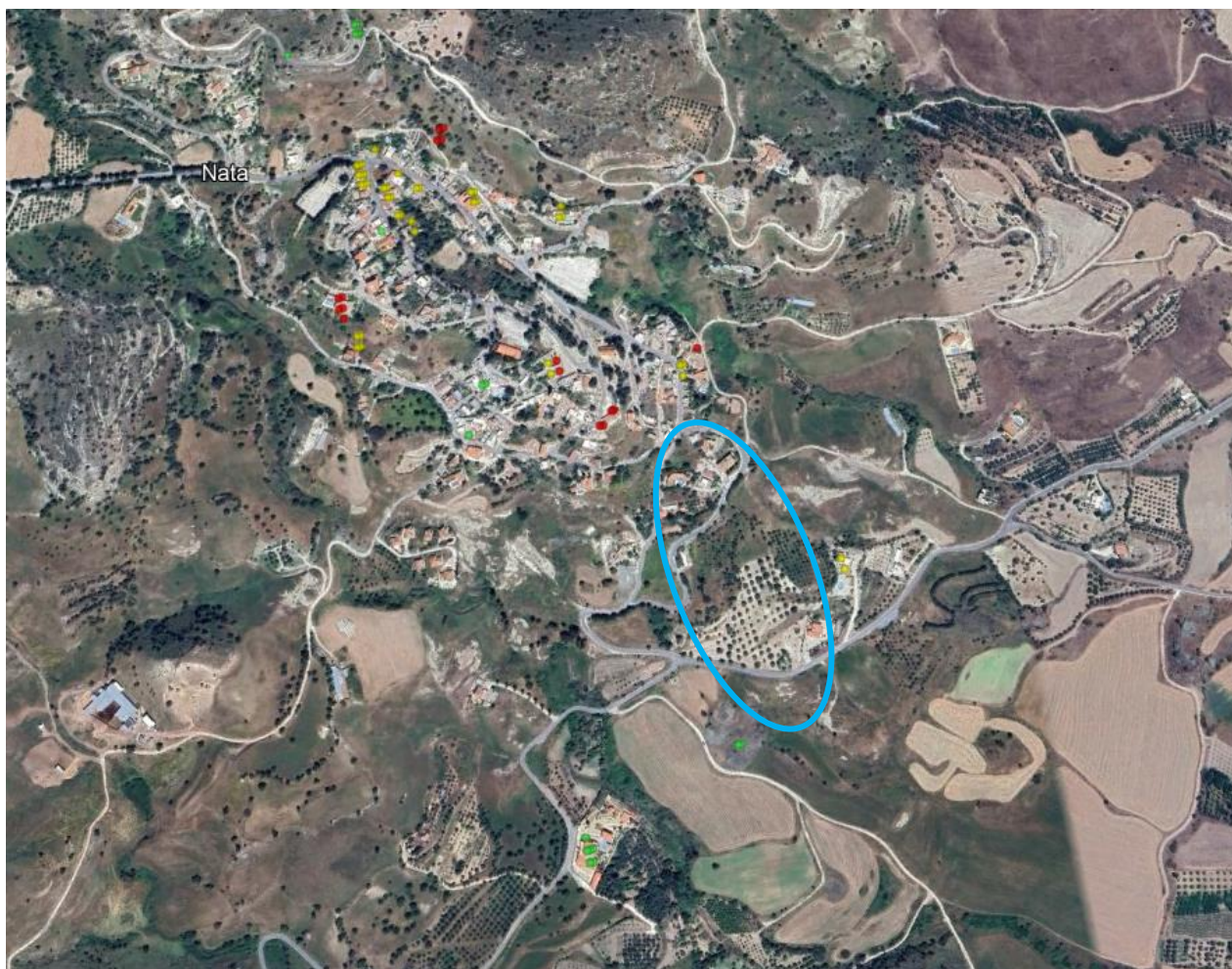
όπως οι κατολισθήσεις ή οι καθιζήσεις και η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, όπως η απόψυξη του μόνιμου παγετού (permafrost) και η παράκτια καθίζηση. Τα βασικά στοιχεία του European Ground Motion Service (EGMS) είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο στη διεύθυνση <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>.

4.3 Αποτελέσματα

Οι LOS μετακινήσεις στην κοινότητα Νατάς από την ανάλυση του BEYOND παρουσιάζονται στις Εικόνες 44 και 45. Παρατηρείται ότι οι σκεδαστές στις εικόνες αυτές δεν εντοπίζονται εντός της περιοχής της υπό μελέτης κατολίσθησης (γαλάζιο πλαίσιο). Παρ' όλα αυτά, στην ευρύτερη περιοχή της κοινότητας Νατάς, εντοπίζονται σκεδαστές που δίνουν δεδομένα μετακινήσεων. Οι μετακινήσεις αυτές είναι πιθανό να συνδέονται με άλλα ολισθαίνοντα πρανή στην περιοχή της κοινότητας.

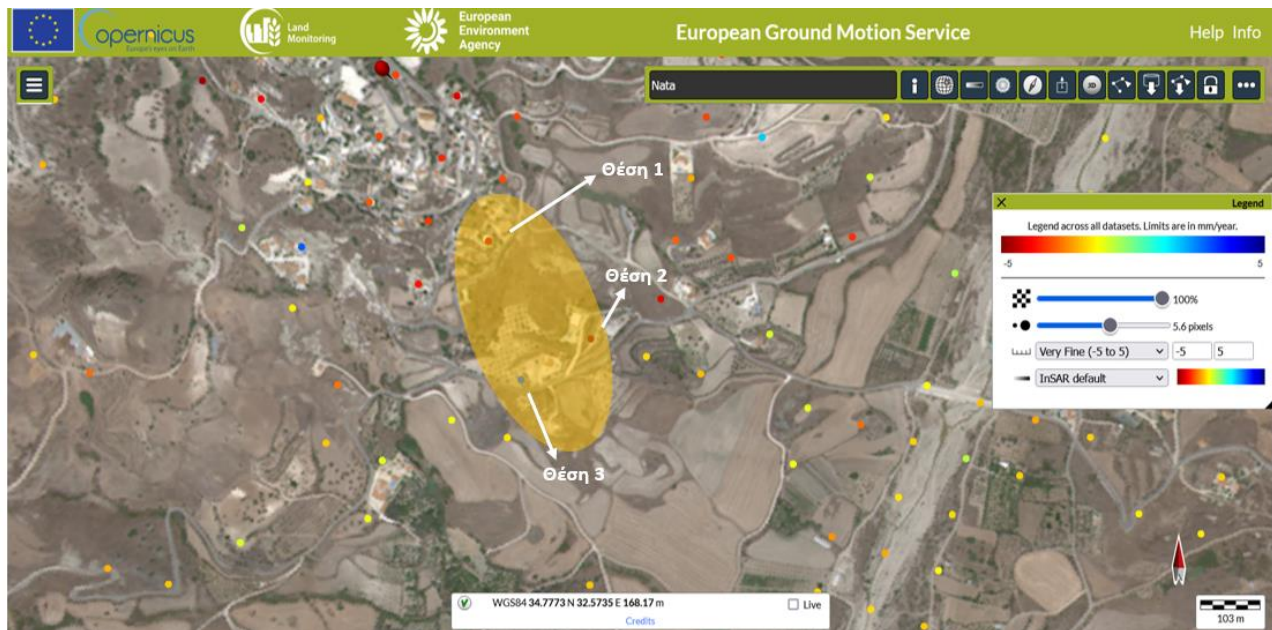


Εικόνα 44. LOS μετακινήσεις στην περιοχή κοινότητας Νατάς για καθοδική τροχιά (EAA)



Εικόνα 45. LOS μετακινήσεις στην περιοχή κοινότητας Νατάς για ανοδική τροχιά (ΕΑΑ)

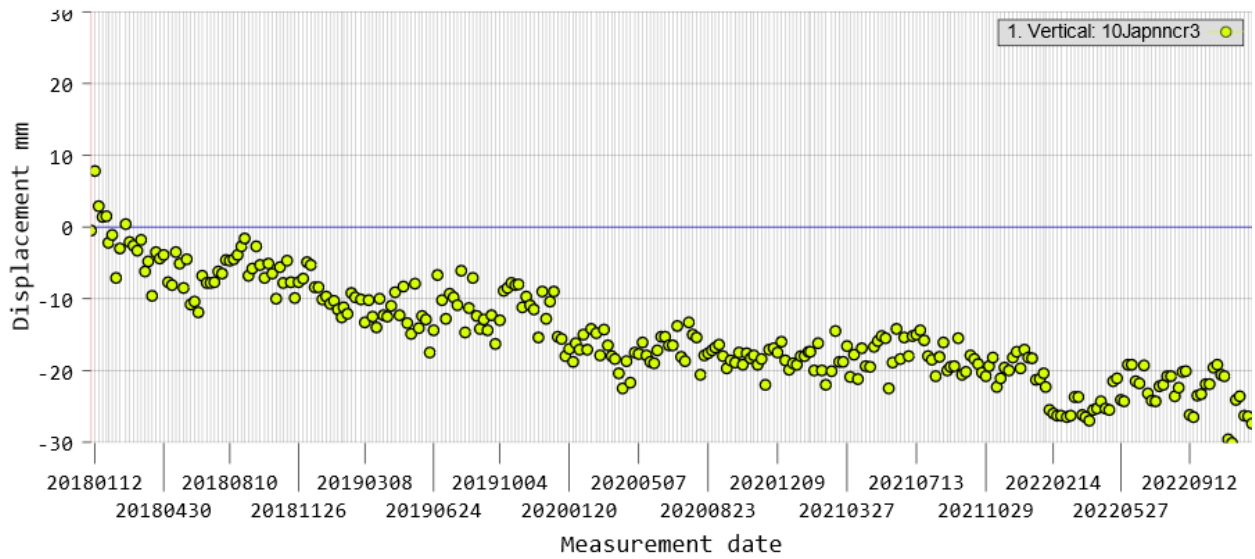
Οι κατακόρυφες μετακινήσεις από τα δεδομένα του EGMS παρουσιάζονται στην Εικόνα 46. Οι θέσεις 1, 2 και 3 αποτελούν θέσεις σκεδαστών που βρίσκονται πάνω στην ολισθαίνουσα μάζα της υπό μελέτη κατολίθησης. Στην Εικόνα 46 παρουσιάζεται ο κάρναβος των σκεδαστών στην περιοχή της κοινότητας Νατάς και με χρωματική κλίμακα οι μετακινήσεις που καταγράφονται από κάθε σκεδαστή. Όπως φαίνεται στο υπόμνημα, με θερμά χρώματα παρουσιάζονται οι αρνητικοί ρυθμοί μετακίνησης στον κατακόρυφο άξονα των σκεδαστών, δηλαδή οι ρυθμοί «βύθισης» των σκεδαστών, ενώ με ψυχρά χρώματα παρουσιάζονται οι θετικοί ρυθμοί μετακίνησης στον κατακόρυφο άξονα των σκεδαστών, δηλαδή οι ρυθμοί «ανύψωσης» τους. Το κίτρινο σχήμα περικλείει περίπου την περιοχή που καταλαμβάνει η ολισθαίνουσα μάζα και τους σκεδαστές πάνω σε αυτή, οι μετακινήσεις των οποίων σχολιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 46. Καταγραφή Μετακινήσεων στην περιοχή της κοινότητας Νατάς (EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>)

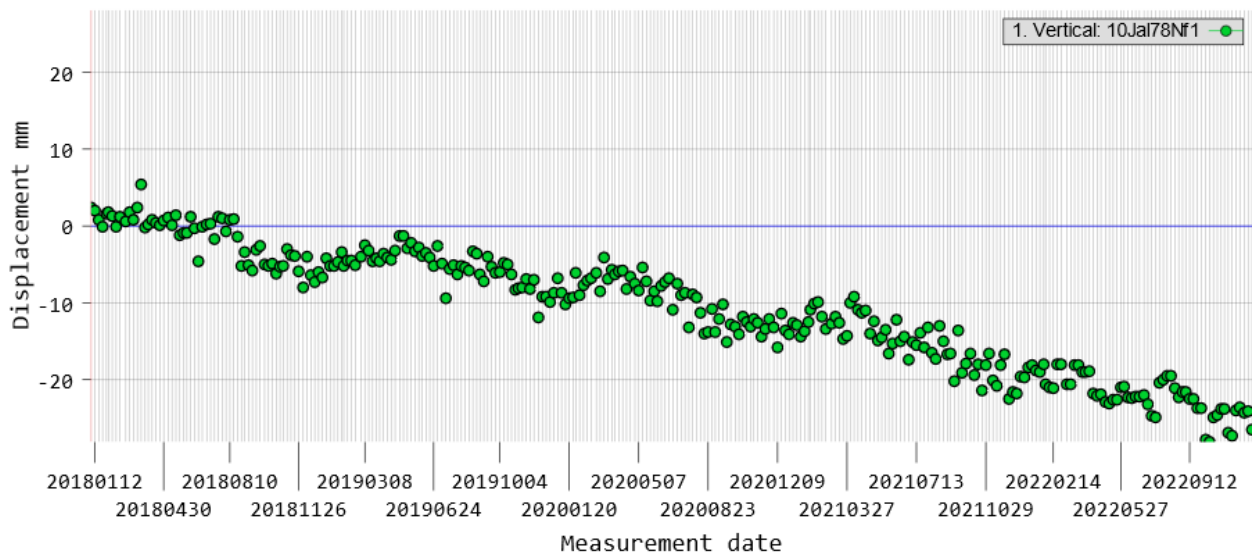
Οι Εικόνες 47, 48 και 49 παρουσιάζουν αναλυτικά τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν σε κάθε σκεδαστή στις Θέσεις 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα στις Εικόνες 47 και 48, οι σκεδαστές στις Θέσεις 1 και 2 παρουσιάζουν βύθιση, με ρυθμό $-4.40 \text{ mm}/\text{έτος}$ και $-5.10 \text{ mm}/\text{έτος}$, αντίστοιχα. Αντίθετα, στην Εικόνα 49, ο σκεδαστής στη Θέση 3 φαίνεται να παρουσιάζει ανύψωση, με ρυθμό $+3.10 \text{ mm}/\text{έτος}$. Αυτό εξηγείται με βάση τη θέση του στο σώμα της ολισθαίνουσας μάζας. Όπως φαίνεται στον τεχνικογεωλογικό χάρτη της Εικόνας 50, ο σκεδαστής στη Θέση 3 βρίσκεται πάνω σε αναστροφές αναγλύφου – ανυψώσεις (convex slope) στο νοτιοδυτικό όριο της ολισθαίνουσας μάζας. Κατά την κίνηση του κυρίως σώματος της κατολίσθησης, δημιουργούνται ζώνες απομείωσης και ζώνες συσσώρευσης. Ο σκεδαστής στη Θέση 3 βρίσκεται σε ζώνη συσσώρευσης και, λόγω αναστροφής αναγλύφου, όσο το κυρίως σώμα της ολισθαίνουσας μάζας βυθίζεται, ο σκεδαστής φαίνεται να ανυψώνεται.

Dataset: Vertical
Point ID: 10Japnncr3
Position: 1606650.00 N 6376950.00 E 194.40 m
Mean velocity: -4.40 mm/year
RMSE: 2.50 mm

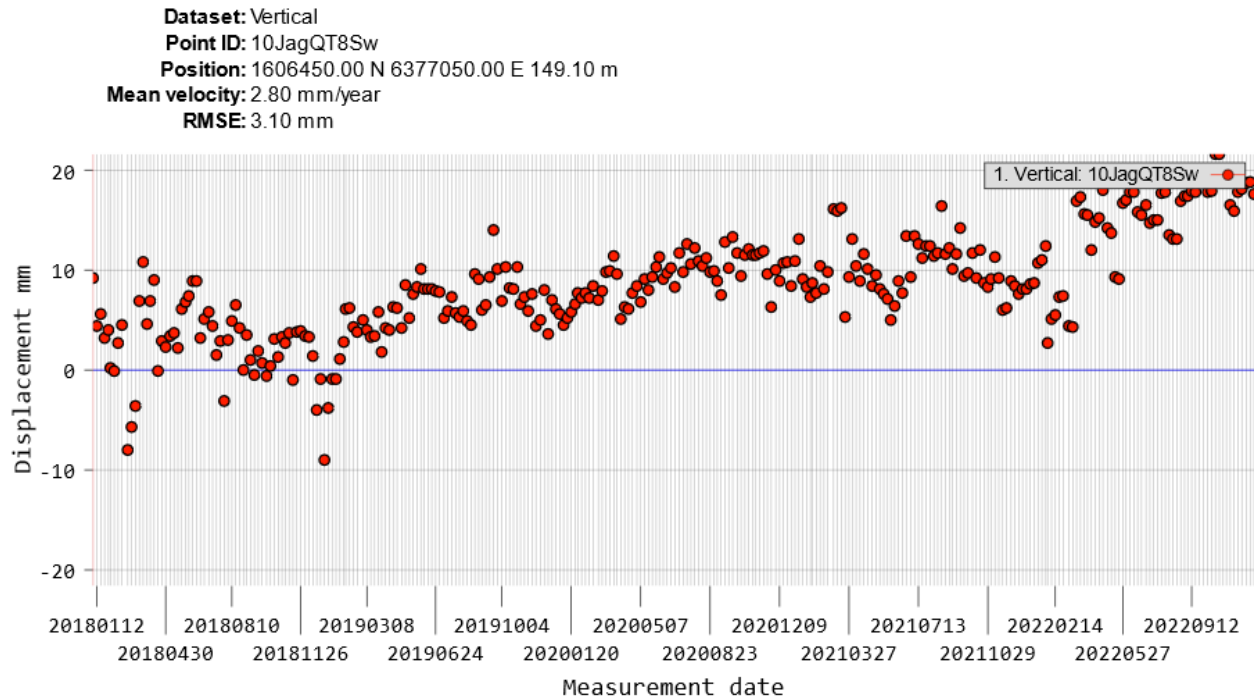


Εικόνα 47. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 1 (EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>, 19/6/2024)

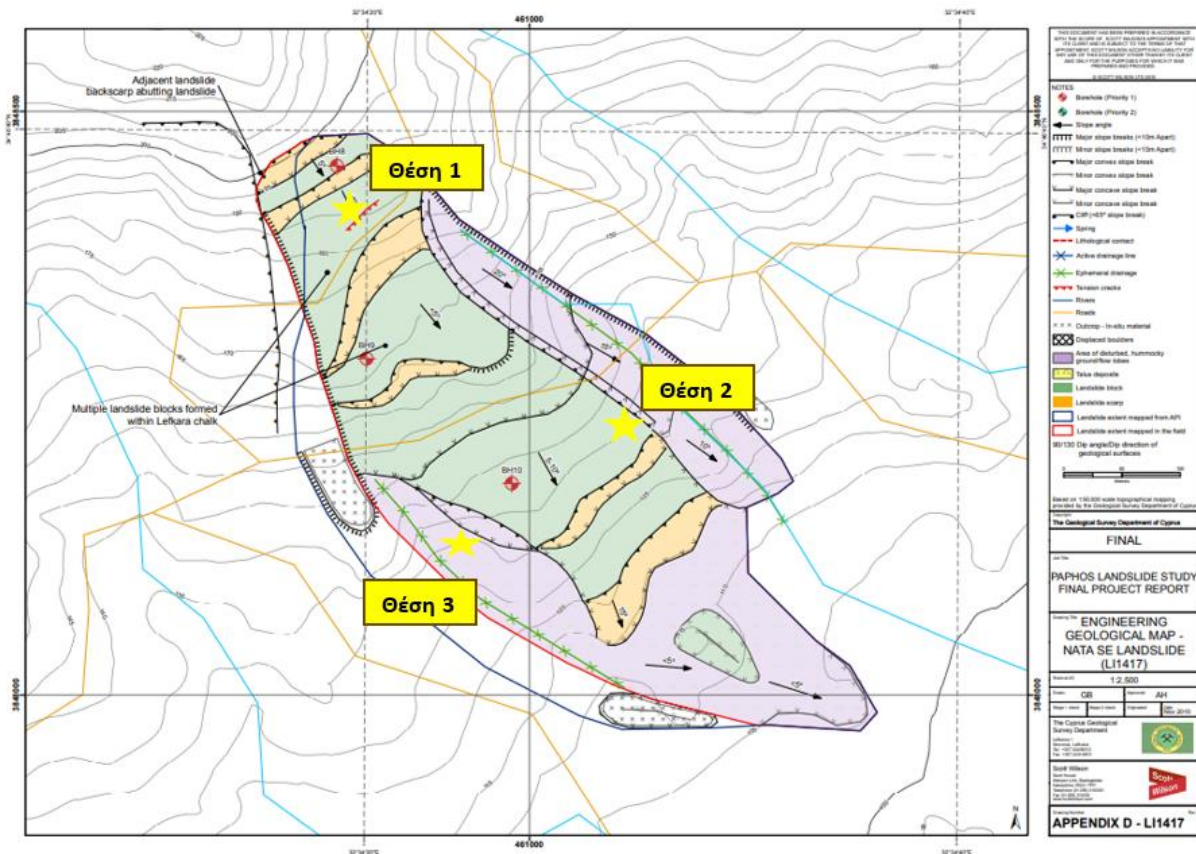
Dataset: Vertical
Point ID: 10Jal78Nf1
Position: 1606550.00 N 6377150.00 E 154.20 m
Mean velocity: -5.10 mm/year
RMSE: 1.70 mm



Εικόνα 48. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 2 (EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>, 19/6/2024)



Εικόνα 49. Καταγραφή Κατακόρυφων Μετακινήσεων στη Θέση 3 (EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>, 19/6/2024)



Εικόνα 50. Θέσεις καταγραφής μετακινήσεων στον τεχνικογεωλογικό χάρτη της ολισθαίνουσας μάζας

4.4 Συσχέτιση δεδομένων πεδίου με δεδομένα τηλεπισκόπησης

Στα διαγράμματα των δεδομένων των μετακινήσεων των σκεδαστών στις Εικόνες 47, 48 και 49 παρατηρούνται μεταβολές στις τιμές των μετακινήσεων, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν σχεδόν περιοδικές. Συγκρίνοντας τις μετακινήσεις με τα κλιματολογικά και τα σεισμικά δεδομένα, συμπεραίνεται ότι ο κύριος παράγοντας που ενισχύει την ολίσθηση του πρανούς είναι η δημιουργία επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα κατά τους χειμερινούς μήνες. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα στις Εικόνες 47, 48 και 49, κατά την περίοδο μέχρι και 3 μήνες μετά από έντονη βροχόπτωση, η μετακίνηση των σκεδαστών αυξάνεται, ενώ κατά την περίοδο χαμηλών επιπέδων βροχόπτωσης ή ανομβρίας, η μετακίνηση των σκεδαστών ελαττώνεται. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, παρόλο που δεν φαίνεται να υπάρχει άμεση σύνδεση των σεισμικών καταγραφών στην περιοχή μελέτης με την περιοδικότητα των μετακινήσεων των σκεδαστών, τα σεισμικά φαινόμενα ενισχύουν την ολίσθηση του πρανούς και μπορούν να έχουν καταστροφικά αποτελέσματα, ανάλογα με το μέγεθός τους και με την ύπαρξη ή όχι επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα.

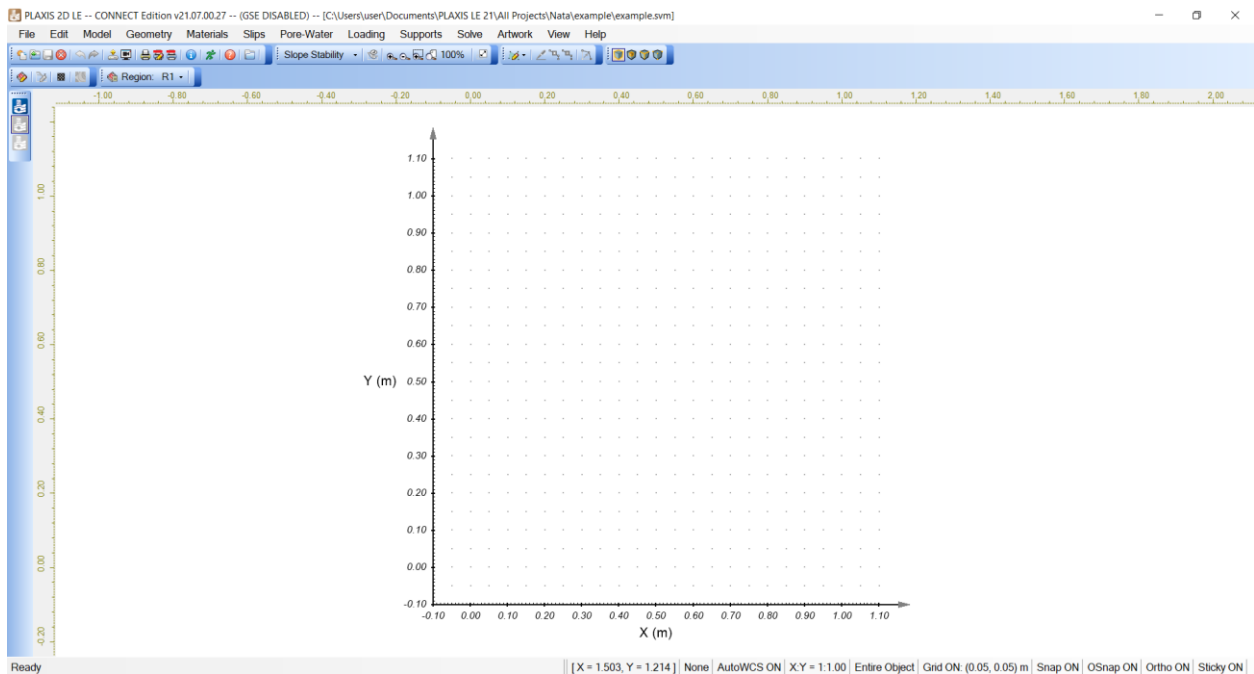
Κεφάλαιο 5 : Το λογισμικό PLAXIS 2D LE και η δημιουργία μοντέλου ευστάθειας πρανούς

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λογισμικού PLAXIS 2D LE και τα βήματα για τη δημιουργία του μοντέλου ευστάθειας του υπό μελέτη πρανούς, σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του προγράμματος.

Για τη μοντελοποίηση του πρανούς, τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας, την ανάστροφη και την παραμετρική ανάλυση της κατολίσθησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PLAXIS 2D LE της BENTLEY, με έκδοση PLAXIS LE CONNECT Edition V21. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα λογισμικό δισδιάστατης γεωτεχνικής ανάλυσης με τη χρήση της μεθόδου οριακής ισορροπίας (Limit Equilibrium Method) και χρησιμοποιείται για την ανάλυση προβλημάτων ευστάθειας πρανών.

Σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του λογισμικού (PLAXIS 2D/3D LE Slope Stability Analysis Theory Manual 2021), τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για τη δημιουργία ενός μοντέλου ευστάθειας πρανούς με το λογισμικό PLAXIS 2D LE, είναι τα εξής:

- 1) Δημιουργία νέου μοντέλου – αρχείου
- 2) Καθορισμός χαρακτηριστικών του μοντέλου
- 3) Εισαγωγή γεωμετρίας του πρανούς
- 4) Καθορισμός ιδιοτήτων των γεωυλικών που αποτελούν το πρανές
- 5) Καθορισμός χαρακτηριστικών της επιφάνειας ολίσθησης
- 6) Εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα
- 7) Εισαγωγή εξωτερικών φορτίων ή σεισμικών φορτίων που δρουν στο πρανές, αν υπάρχουν
- 8) Εισαγωγή στοιχείων υποστήριξης του πρανούς, αν υπάρχουν
- 9) Ανάλυση ευστάθειας του πρανούς και εμφάνιση αποτελεσμάτων της ανάλυσης

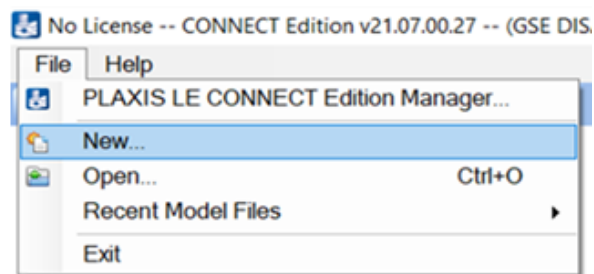


Εικόνα 51. Το περιβάλλον εργασίας - σχεδίασης του λογισμικού PLAXIS 2D LE

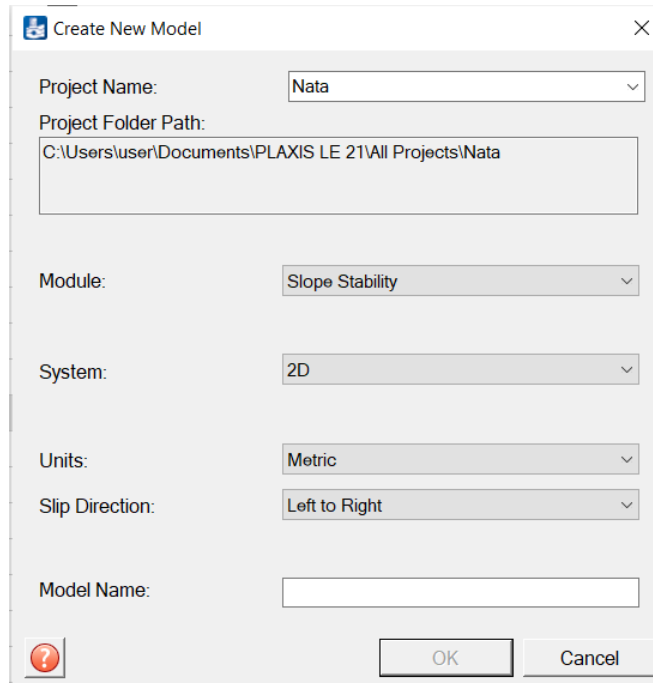
Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται για τη δημιουργία του μοντέλου ανάλυσης του υπό εξέταση πρανούς στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, της επαρχίας Πάφου.

5.1 Δημιουργία νέου μοντέλου και καθορισμός των χαρακτηριστικών του

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία του μοντέλου στο PLAXIS 2D LE είναι η δημιουργία νέου αρχείου μέσω της καρτέλας File στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού. Ακολουθεί η ονομασία του αρχείου και ο καθορισμός του συστήματος μονάδων μέτρησης (Metric ή Imperial) και της κατεύθυνσης της επιφάνειας ολίσθησης (Left to Right ή Right to Left), στην καρτέλα Create New Model. Για την προσομοίωση του υπό εξέταση πρανούς στην κοινότητα Νατάς, επιλέχθηκε μετρικό σύστημα μονάδων μέτρησης (Metric) και κατεύθυνση επιφάνειας ολίσθησης Left to Right.



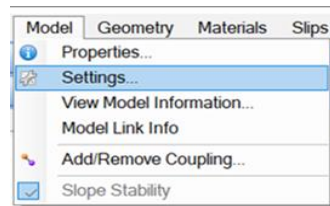
Εικόνα 52. Δημιουργία νέου αρχείου στο PLAXIS 2D LE



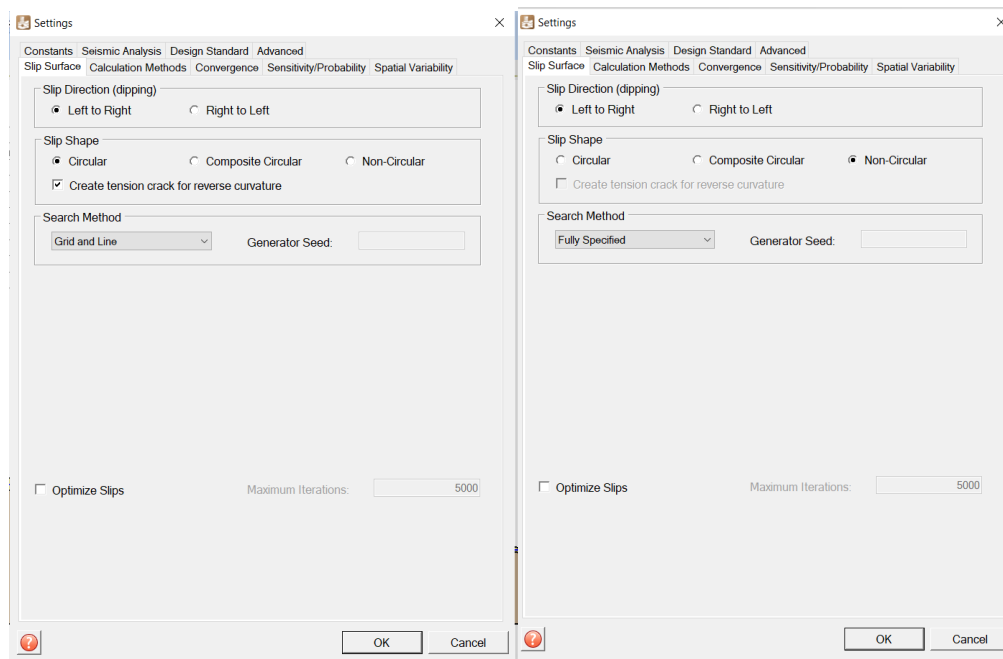
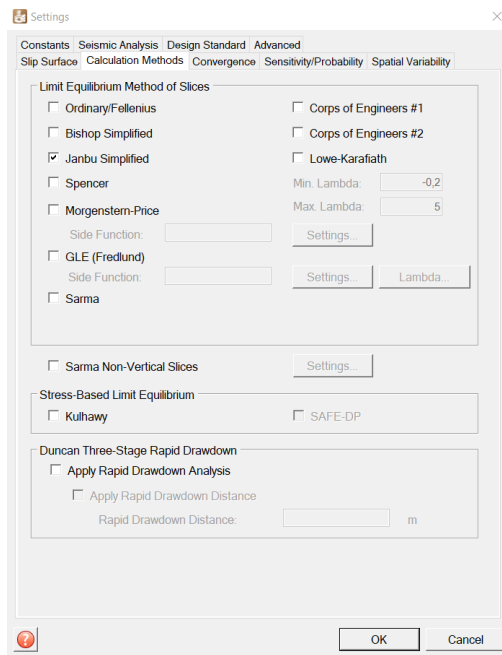
Εικόνα 53. Ονομασία νέου μοντέλου, καθορισμός μονάδων μέτρησης και κατεύθυνσης της επιφάνειας αστοχίας

Το δεύτερο βήμα είναι ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του μοντέλου ευστάθειας. Από την καρτέλα Model και την επιλογή Settings καθορίζεται ο τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας ολίσθησης του πρανούς και η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας.

Για το μοντέλο του υπό εξέταση πρανούς έγιναν δύο αναλύσεις. Η πρώτη ανάλυση έγινε για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Circular), με κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά (Left to Right). Για την εύρεση της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης επιλέγηκε η μέθοδος 'Grid and Line' και για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κατά την ανάλυση ευστάθειας του πρανούς επιλέγηκε η μέθοδος Jambu Simplified. Η δεύτερη ανάλυση έγινε για μη-κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Non-Circular), πλήρως καθορισμένη ('Fully Specified') και με μέθοδο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας την Jambu Simplified. Η δεύτερη ανάλυση έχει ως στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του πρανούς.



Εικόνα 54. Καρτέλα ρύθμισης των χαρακτηριστικών του μοντέλου



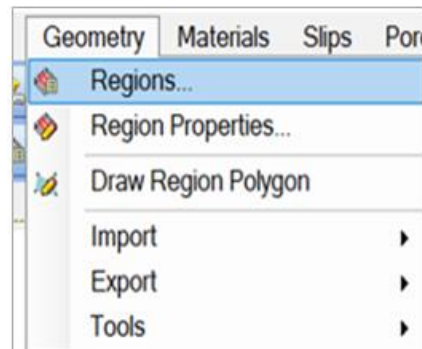
Εικόνα 55. Καθορισμός της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας (πάνω) και ρυθμίσεις του τρόπου εύρεσης επιφάνειας αστοχίας (κάτω αριστερά και δεξιά)

Αφού καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου ανάλυσης, εισάγεται η γεωμετρία του πρανούς.

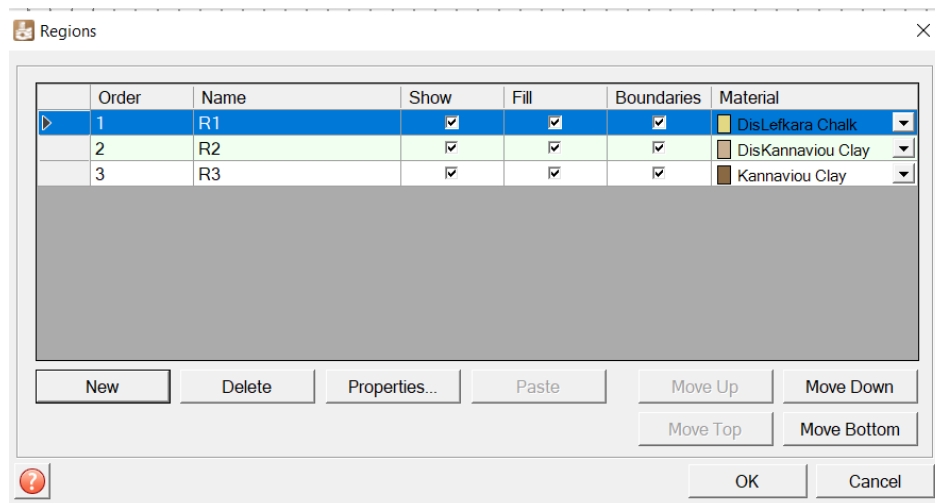
5.2 Εισαγωγή γεωμετρίας του πρανούς

Η γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου ορίζεται από ένα σύνολο περιοχών (Regions), με κάθε μια από αυτές να αποτελείται από ένα γεωυλικό. Οι περιοχές πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους και να μην επικαλύπτονται, για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Οι επιμέρους περιοχές της γεωμετρίας διαμορφώνονται με την εισαγωγή των συντεταγμένων (x,y) των σημείων κάθε σχήματος, ή με την εισαγωγή σχήματος, σχεδιασμένου σε διαφορετικό σχεδιαστικό πρόγραμμα, υπό μορφή αρχείου dxf. Για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας του υπό μελέτη πρανούς, έγινε εισαγωγή των συντεταγμένων των σημείων κάθε ξεχωριστής περιοχής.

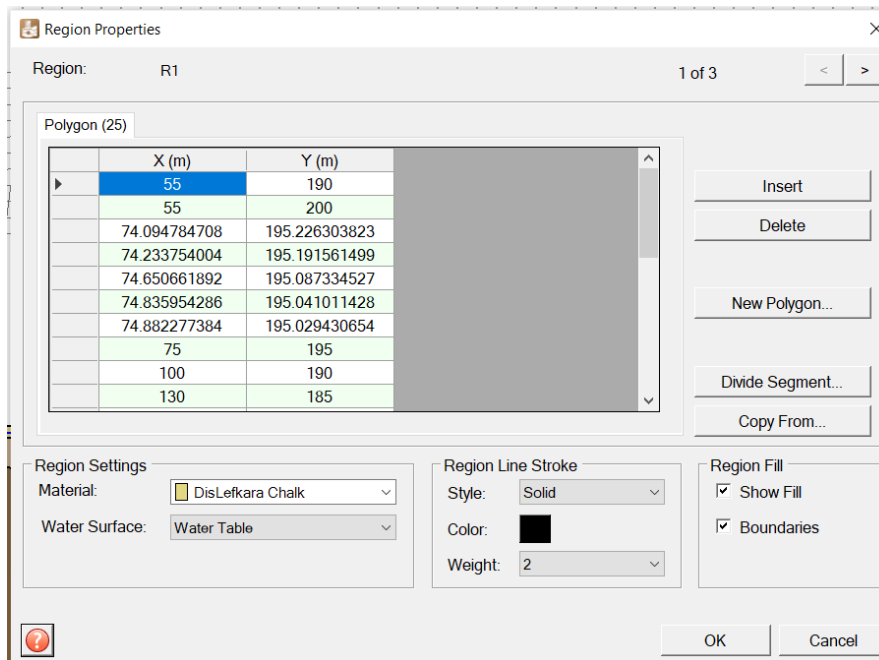
Από την καρτέλα Geometry και την επιλογή Regions εισάγονται οι επιμέρους περιοχές της γεωμετρίας του πρανού. Για το μοντέλο του υπό μελέτη πρανούς, ορίστηκαν τρεις περιοχές και ονομάστηκαν R1, R2, R3, όπως φαίνεται στην Εικόνα 57. Από την επιλογή Properties, εισάγονται σε πίνακα οι συντεταγμένες των σημείων που αποτελούν την κάθε περιοχή. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής, δημιουργείται η συνολική γεωμετρία του μοντέλου.



Εικόνα 56. Δημιουργία γεωμετρίας του υπό ανάλυση πρανούς

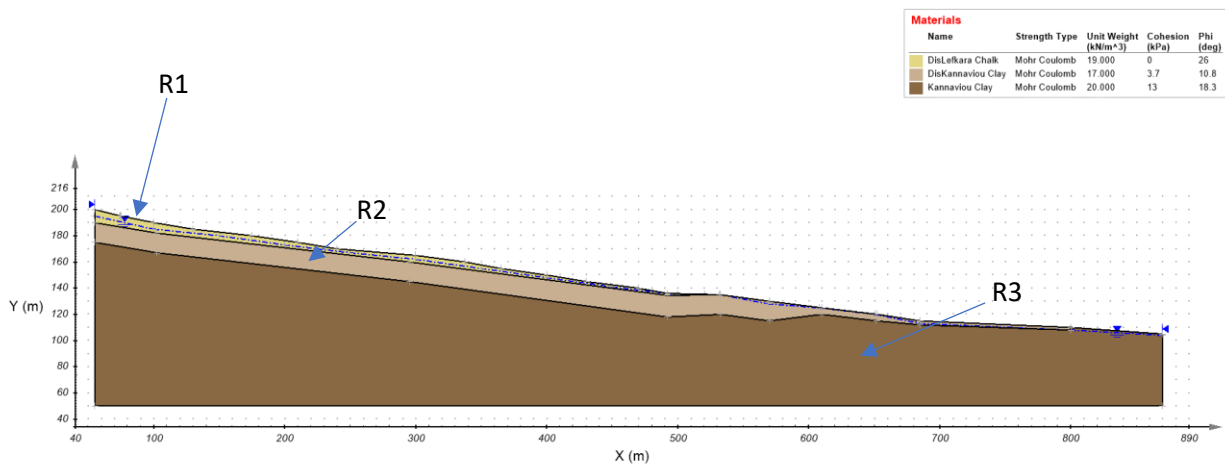


Εικόνα 57. Οι περιοχές από τις οποίες αποτελείται το προσομοίωμα του υπό ανάλυση πρανούς στην κοινότητα Νατάς



Εικόνα 58. Παράδειγμα (για την περιοχή R1) του τρόπου εισαγωγής των συντεταγμένων των σημείων που ορίζουν μια περιοχή (region) στο PLAXIS 2D LE

Η γεωμετρία του μοντέλου του υπό μελέτη πρανούς προκύπτει από το τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής και από τα δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Η περιοχή R1 αποτελείται από σημεία που σχηματίζουν το ανάγλυφο της περιοχής και το βάθος εντοπισμού του επιφανειακού σχηματισμού. Η περιοχή R2 προσομοιώνει τη διαταραγμένη αργιλική περιοχή του πρανούς. Προσδιορίζεται από σημεία στην επιφάνεια επαφής με τον επιφανειακό σχηματισμό (R1) και το βάθος εντοπισμού των slickensides στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Η περιοχή R3 προσομοιώνει αδιατάραχτη αργιλική περιοχή του πρανούς. Ως σύνολο σημείων προσδιορίζεται από το βάθος εντοπισμού των slickensides και το βάθος εντοπισμού του σχηματισμού στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που αφορά τη μελέτη και τα δεδομένα πεδίου. Η γεωμετρία του πρανούς παρουσιάζεται στην Εικόνα 59.

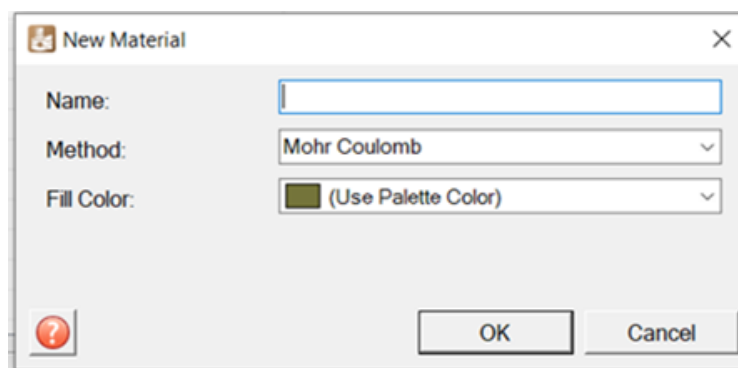


Εικόνα 59. Γεωμετρία μοντέλου υπό μελέτη πρανούς

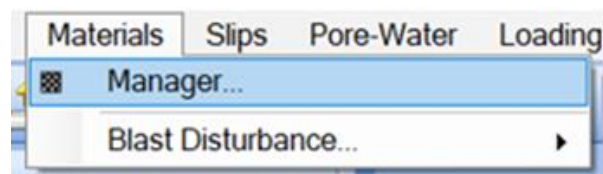
Αφού σχεδιαστεί η γεωμετρία του πρανούς, στο επόμενο βήμα καθορίζονται τα γεωυλικά που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή (region) και οι ιδιότητές τους.

5.3 Καθορισμός των ιδιοτήτων των γεωυλικών που αποτελούν το πρανές

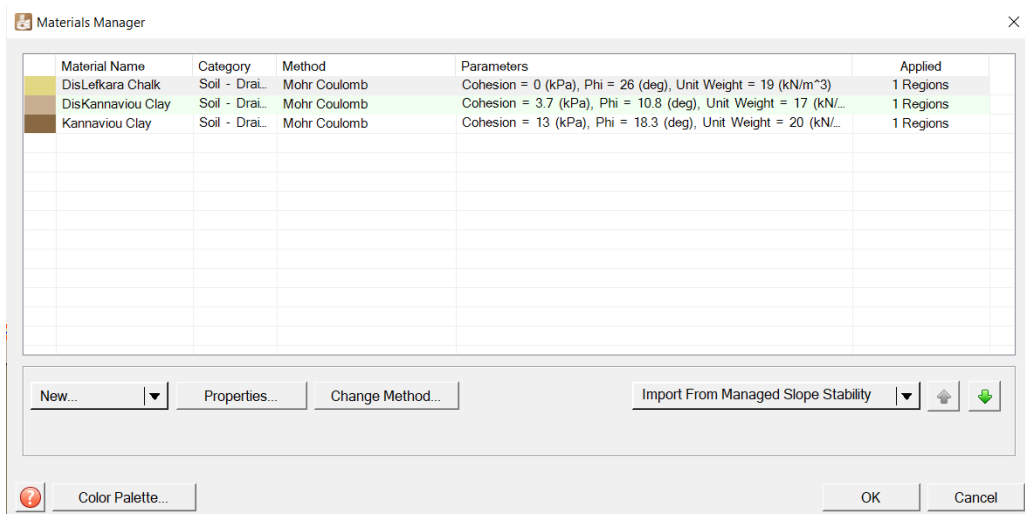
Ο σωστός καθορισμός των ιδιοτήτων των γεωυλικών που αποτελούν το υπό ανάλυση πρανές είναι εξαιρετικά σημαντικός για τη λήψη σωστών αποτελεσμάτων. Από την καρτέλα Materials και την επιλογή Manager, εισάγονται τα γεωυλικά που αποτελούν το πρανές. Για κάθε γεωυλικό ορίζεται ένα όνομα, το χρώμα εμφάνισής του στην οθόνη και το κριτήριο με το οποίο υπολογίζεται η διατμητική του αντοχή. Για το προς ανάλυση μοντέλο του πρανούς στην κοινότητα Νατάς, επιλέγηκαν τρία γεωυλικά με ονόματα και χρώματα εμφάνισης όπως φαίνονται στην Εικόνα 62. Όλα τα γεωυλικά είναι εδαφικά, ως εκ τούτου, επιλέγηκε για όλα το κριτήριο Mohr-Coulomb ως κριτήριο υπολογισμού της διατμητικής αντοχής τους.



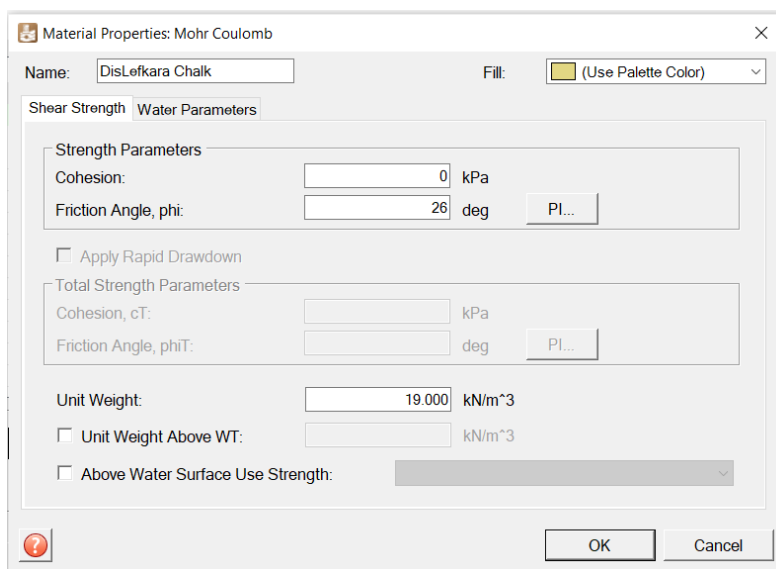
Εικόνα 60. Ονομασία γεωυλικού και καθορισμός χρώματος και τρόπου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής του



Εικόνα 61. Καρτέλα εισαγωγής των γεωυλικών που αποτελούν το υπό ανάλυση μοντέλο στο PLAXIS 2D LE



Εικόνα 62. Τα τρία εδαφικά υλικά που δομούν το πρανές



Εικόνα 63. Καθορισμός των παραμέτρων αντοχής κάθε εδαφικού υλικού (παράδειγμα για τον σχηματισμό DisLefkara Chalk)

Αφού καθοριστούν όλα τα γεωυλικά και οι ιδιότητές τους, στη συνέχεια προσδιορίζεται η περιοχή στην οποία αντιστοιχούν. Για το προς ανάλυση μοντέλο του πρανούς της κοινότητας Νατάς, τα γεωυλικά που δομούν κάθε περιοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12. Καθορισμός γεωυλικών που δομούν κάθε περιοχή της γεωμετρίας του μοντέλου

Όνομα Περιοχής	Όνομα Γεωυλικού που αποτελείται η περιοχή
R1	DisLefkara Chalk
R2	DisKannaviou Clay
R3	Kannaviou Clay

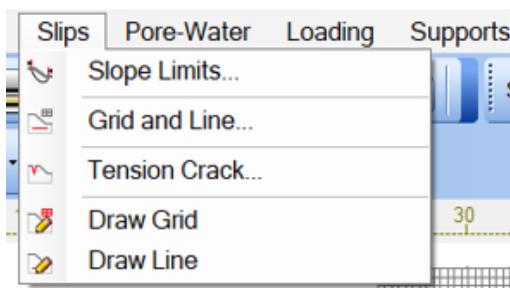
5.4 Καθορισμός χαρακτηριστικών την επιφάνειας ολίσθησης

Κατά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του μοντέλου του πρανούς, επιλέγεται η μορφή της επιφάνειας αστοχίας που θέλουμε να εντοπίσουμε και η μέθοδος εύρεσής της. Με βάση αυτά, εμφανίζονται διαφορετικές επιλογές στην καρτέλα Slips.

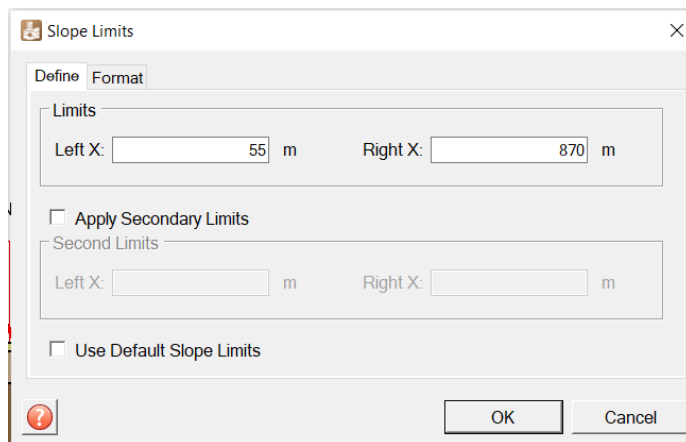
Για το υπό μελέτη πρανές έγιναν αναλύσεις για δύο διαφορετικούς τύπους επιφανειών αστοχίας. Στην πρώτη ανάλυση, επιλέγηκε κυκλική (Circular) επιφάνεια αστοχίας και μέθοδος εύρεσής της η μέθοδος 'Grid and Line'. Με βάση αυτές τις επιλογές, στην καρτέλα Slips, το λογισμικό δίνει τις εξής δυνατότητες ως προς την εύρεση της σωστής επιφάνειας αστοχίας:

- Μετακίνηση των ορίων έναρξης και τέλους της επιφάνειας αστοχίας εντός της γεωμετρίας του πρανούς
- Εισαγωγή κανάβου με όσους κόμβους θεωρούνται απαραίτητοι
- Εισαγωγή γραμμής από την οποία θα διέρχεται η επιφάνεια αστοχίας
- Εισαγωγή εφελκυστικής ρωγμής, αν υπάρχει

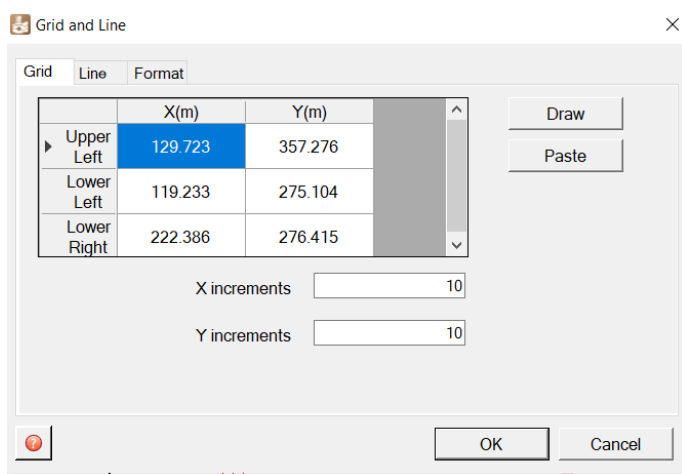
Οι ακριβείς επιλογές που έγιναν για την πρώτη ανάλυση του υπό μελέτη πρανούς φαίνονται στις Εικόνες 65 έως 67. Κατά την πρώτη ανάλυση γίνεται μελέτη για τον εντοπισμό κυκλικών επιφανειών αστοχίας μικρού βάθους. Με βάση αυτό, ρυθμίζεται ανάλογα η θέση του κανάβου και της γραμμής από την οποία θα διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης. Παράδειγμα θέσης του κανάβου και της γραμμής φαίνεται στην Εικόνα 68.



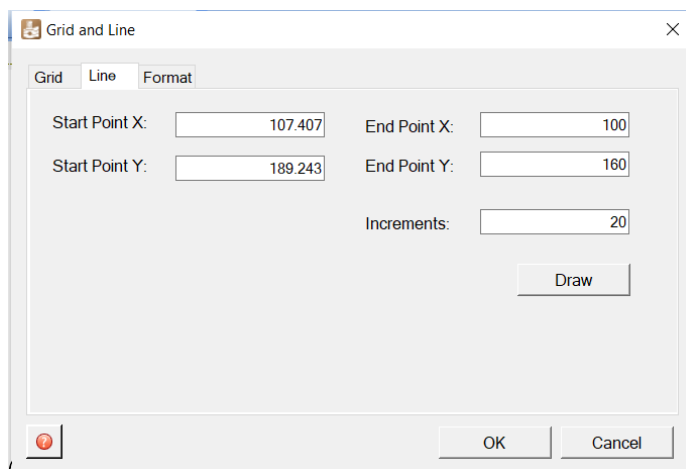
Εικόνα 64. Καρτέλα εισαγωγής των εργαλείων για την εύρεση της επιφάνειας αστοχίας



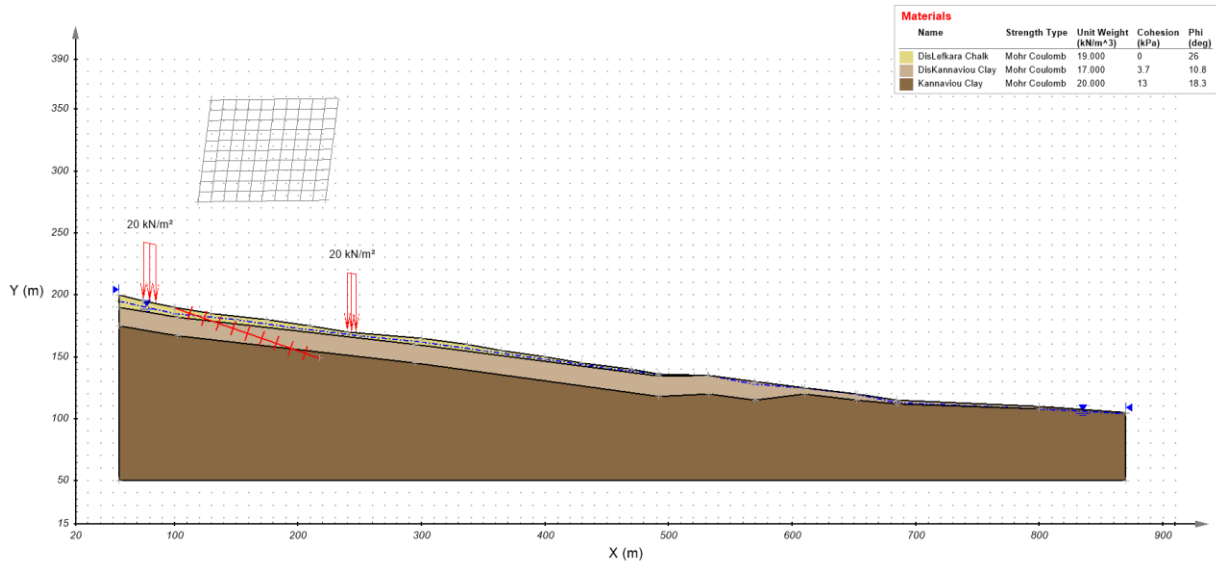
Εικόνα 65. Καθορισμός των περιοχών εισαγωγής και εξαγωγής της επιφάνειας ολίσθησης



Εικόνα 66. Καθορισμός της θέσης του κανάβου και του αριθμού των κόμβων που τον αποτελούν



Εικόνα 67. Καθορισμός της θέσης της γραμμής από όπου θα διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης

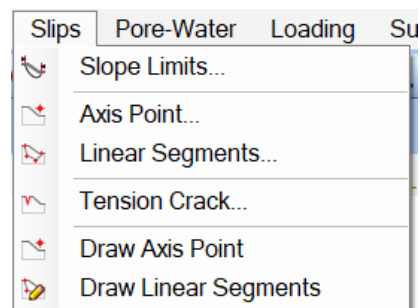


Εικόνα 68. Παράδειγμα θέσης κανάβου και γραμμής από όπου θα διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης

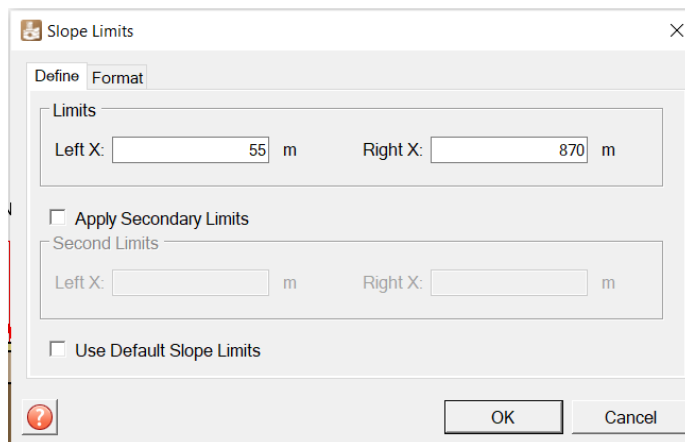
Στη δεύτερη ανάλυση, επιλέχθηκε μη-κυκλική (Non-Circular), πλήρως καθορισμένη ('Fully Specified') επιφάνεια αστοχίας. Με βάση αυτές τις επιλογές, στην καρτέλα Slips, το λογισμικό δίνει τις εξής δυνατότητες ως προς την εύρεση της σωστής επιφάνειας αστοχίας:

- Μετακίνηση των ορίων έναρξης και τέλους της επιφάνειας αστοχίας εντός της γεωμετρίας του πρανούς
- Προσδιορισμός κεντρικού σημείου περιστροφής της επιφάνειας αστοχίας, αν χρειάζεται
- Εισαγωγή της μη-κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης, ως σύνολο γραμμικών τμημάτων (line segments)
- Εισαγωγή εφελκυστικής ρωγμής, αν υπάρχει

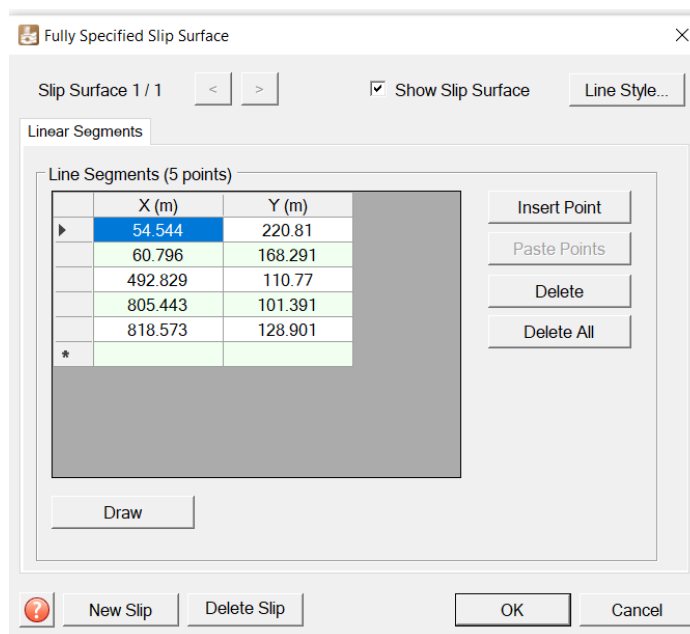
Οι ακριβείς επιλογές που έγιναν για τη δεύτερη ανάλυση του υπό μελέτη πρανούς φαίνονται στις Εικόνες 70 και 71. Κατά τη δεύτερη ανάλυση μελετάται η ευστάθεια διαφόρων μη κυκλικών επιφανειών εντός της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής. Παράδειγμα μη κυκλικής επιφάνειας προς μελέτη φαίνεται στην Εικόνα 72.



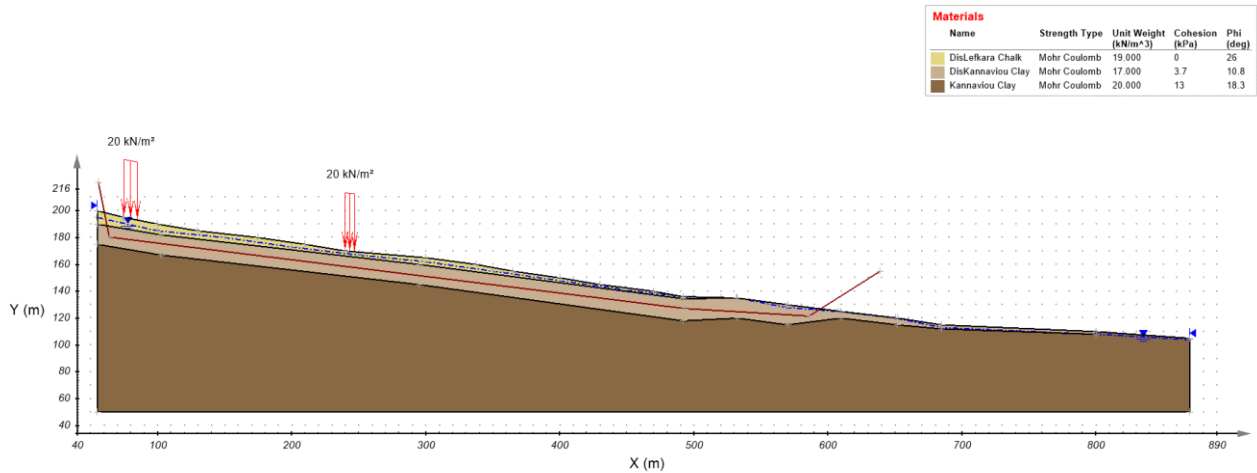
Εικόνα 69. Καρτέλα εισαγωγής των εργαλείων για την εύρεση της επιφάνειας αστοχίας



Εικόνα 70. Καθορισμός των περιοχών εισαγωγής και εξαγωγής της επιφάνειας ολίσθησης



Εικόνα 71. Καθορισμός του συνόλου των γραμμικών τμημάτων που αποτελούν τη μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας

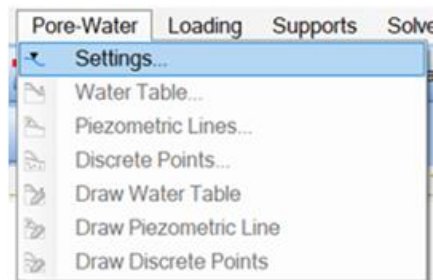


Εικόνα 72. Παράδειγμα μη κυκλικής επιφάνειας προς μελέτη

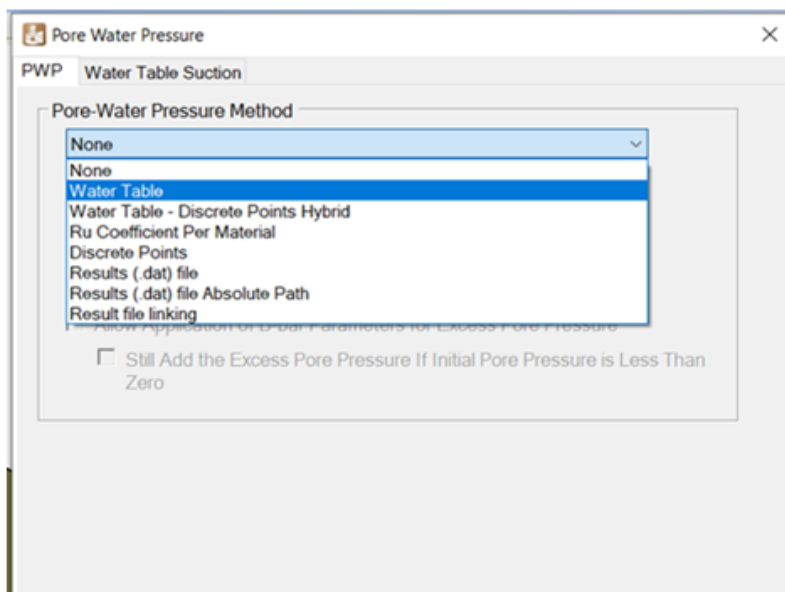
5.5 Εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα

Ο καθορισμός της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται μέσω της καρτέλας Pore-Water και την επιλογή της μεθόδου Water Table.

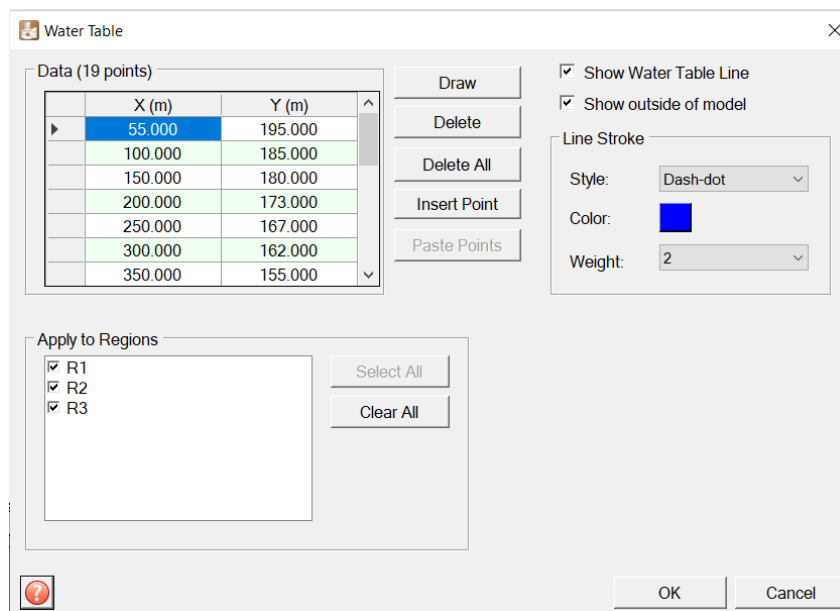
Για το υπό ανάλυση πρανές, ο υδροφόρος ορίζοντας εισάγεται στο μοντέλο υπό μορφή σημείων με συντεταγμένες (x,y), όπως φαίνεται στην Εικόνα 75. Σημειώνεται ότι, λόγω διεξαγωγής παραμετρικών αναλύσεων σχετικά με τη μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, στην Εικόνα 75 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες μόνο μιας περίπτωσης επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. Αναλυτικότερη περιγραφή για τις υπό εξέταση περιπτώσεις του επιπέδου στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, στο πλαίσιο της παραμετρικής ανάλυσης, γίνεται στο Κεφάλαιο 7.



Εικόνα 73. Καρτέλα εισαγωγής του υδροφόρου ορίζοντα στο PLAXIS 2D LE



Εικόνα 74. Επιλογή τρόπου εισαγωγής πίεσης του νερού των πόρων στο προσομοίωμα στο PLAXIS 2D LE

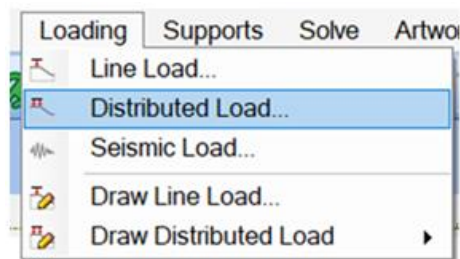


Εικόνα 75. Εισαγωγή των σημείων που ορίζουν τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα

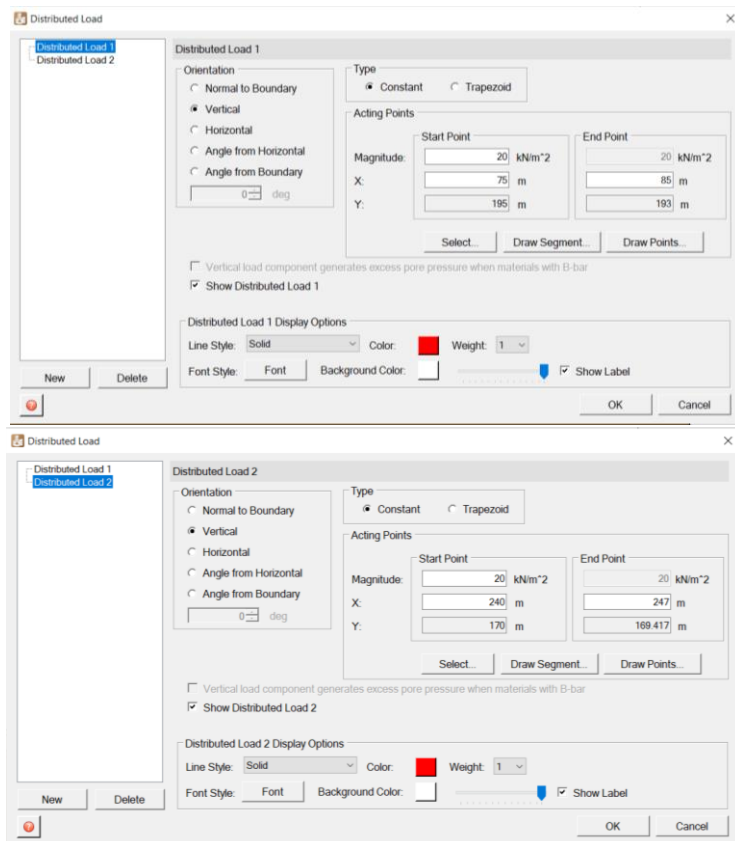
5.6 Εισαγωγή εξωτερικών φορτίων ή σεισμικών φορτίων που δρουν στο πρανές

Σε περίπτωση που υπάρχουν φορτία που ασκούνται στην επιφάνεια της γεωμετρίας του μοντέλου, πρέπει να εισαχθούν σε αυτό. Λόγω της δισδιάστατης φύσης της ανάλυσης που μπορεί να εκτελέσει το λογισμικό PLAXIS 2D LE, τα φορτία που μπορούν να εισαχθούν είναι είτε γραμμικά είτε καταναμημένα. Η εισαγωγή φορτίου στο μοντέλο γίνεται μέσω της καρτέλας Loading, με το Line Load, αν πρόκειται για γραμμικό φορτίο, ή με το Distributed Load, αν πρόκειται για καταναμημένο φορτίο. Στην καρτέλα που εμφανίζεται, προσδιορίζεται η θέση του φορτίου, το μέγεθός του σε kPa, και ο τρόπος επιβολής του στην επιφάνεια που δρα, δηλαδή αν είναι κάθετο ή με κλίση ως προς αυτή.

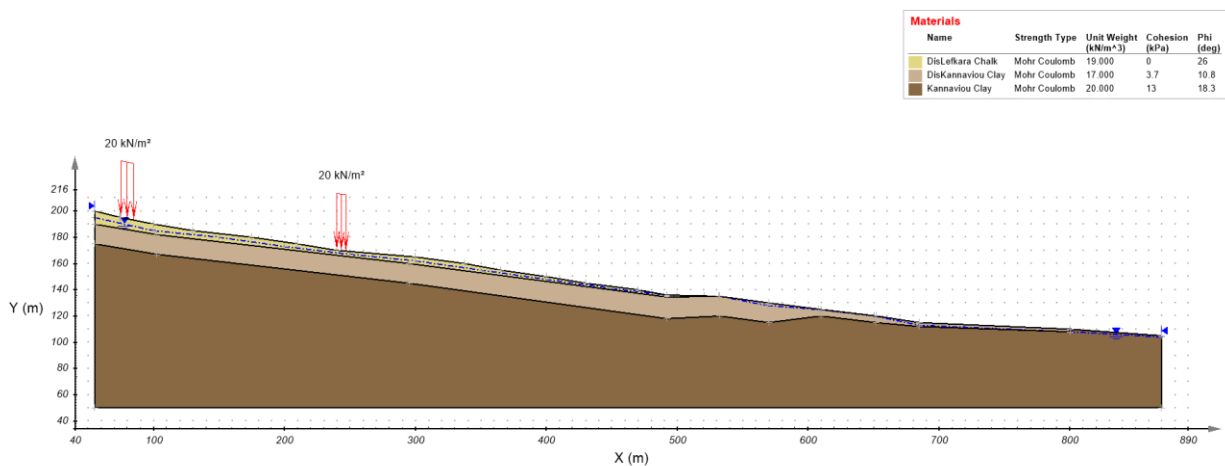
Για τη δημιουργία του μοντέλου του υπό εξέταση πρανούς στην κοινότητα Νατάς, τοποθετούνται δύο καταναμημένα φορτία των 20 kPa, που δρουν κάθετα στην επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 78. Τα φορτία αυτά προσομοιάζουν διώροφα οικιστικά κτήρια που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του σώματος της κατολίσθησης. Το μέγεθος των φορτίων υπολογίστηκε με βάση τους ορόφους κάθε κτηρίου, θεωρώντας ότι κάθε όροφος έχει φορτίο 10 kPa. Η θέση των φορτίων επιλέγηκε με βάση τη θέση τους στο σώμα της κατολίσθησης και σύμφωνα με την τομή που έχουμε επιλέξει για την ανάλυση.



Εικόνα 76. Καρτέλα εισαγωγής των φορτίων που δρουν στο μοντέλο



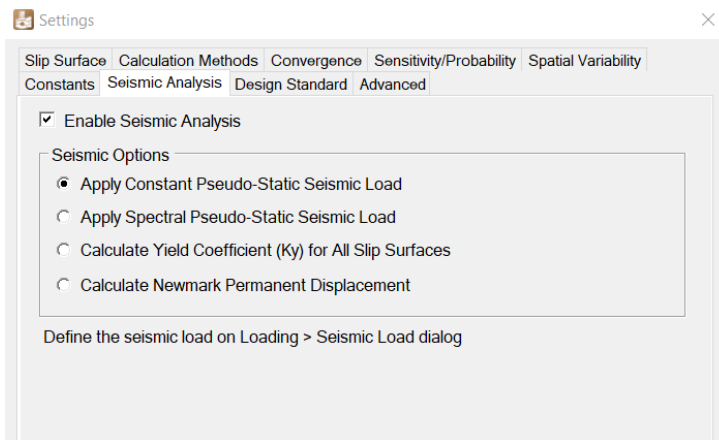
Εικόνα 77. Καθορισμός του μεγέθους και της θέσης των καταναμημένων φορτίων στο προσομοίωμα του υπό ανάλυση πρανούς στην κοινότητα Νατάς



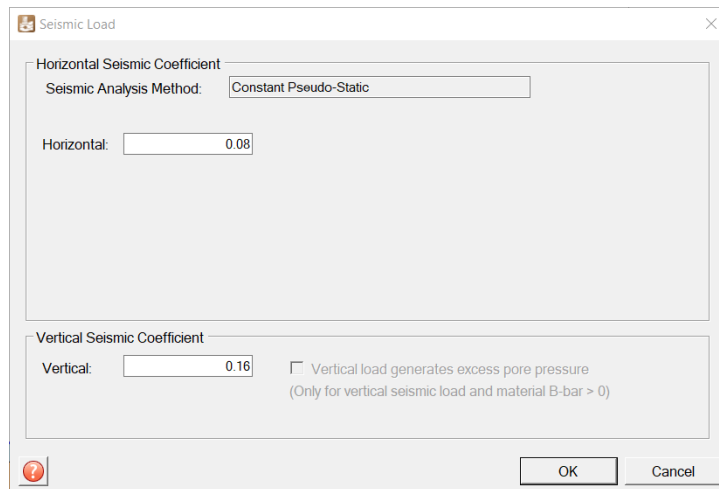
Εικόνα 78. Φορτία που δρουν στο υπό εξέταση πρανές

Εκτός από την επιλογή εισαγωγής καταναμημένου ή γραμμικού φορτίου, στο PLAXIS 2D LE δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής σεισμικού φορτίου στην ανάλυση ευστάθειας πρανούς. Αυτό είναι δυνατό αν στις ρυθμίσεις της καρτέλας Model γίνει επιλογή εκπόνησης σεισμικής

ανάλυσης. Από την καρτέλα Loading και την επιλογή Seismic Load, εισάγονται οι σεισμικοί συντελεστές για την πραγματοποίηση της σεισμικής ανάλυσης.



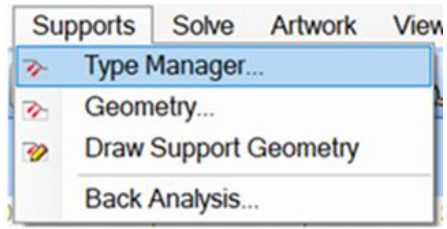
Εικόνα 79. Καθορισμός τρόπου εισαγωγής του σεισμικού φορτίου στο μοντέλο



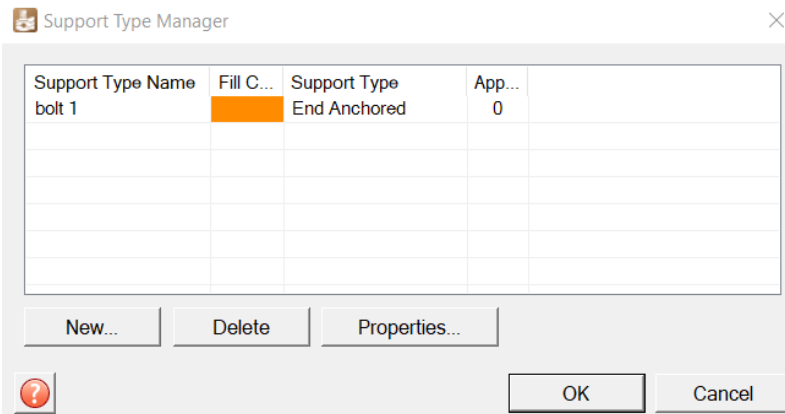
Εικόνα 80. Εισαγωγή σεισμικών συντελεστών για την επίλυση του μοντέλου υπό σεισμική φόρτιση

5.7 Εισαγωγή στοιχείων υποστήριξης του πρανούς

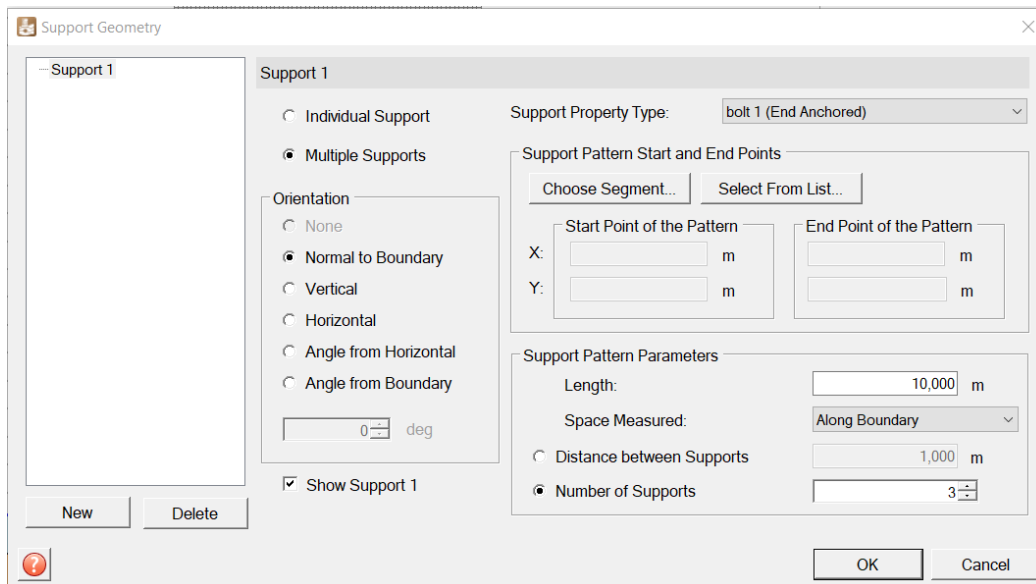
Για την προσομοίωση προϋπάρχουσας υποστήριξης στο πρανές ή για την μελέτη επίδρασης πιθανών μέτρων υποστήριξης στην ευστάθεια του προς μελέτη πρανούς, είναι δυνατή η εισαγωγή στοιχείων υποστήριξης από την καρτέλα Supports. Από την επιλογή Type Manager, γίνεται εισαγωγή του τύπου της υποστήριξης και των ιδιοτήτων της. Από την επιλογή Geometry, ορίζεται η ποσότητα των όμοιων στοιχείων υποστήριξης που θα τοποθετηθούν στο μοντέλο, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και η θέση τους.



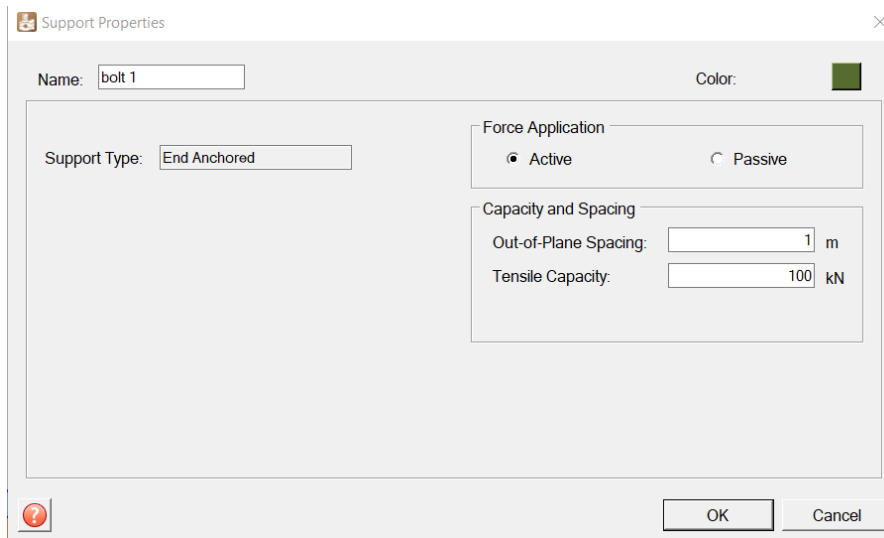
Εικόνα 81. Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων υποστήριξης



Εικόνα 82. Ονομασία και ορισμός είδους του στοιχείου υποστήριξης



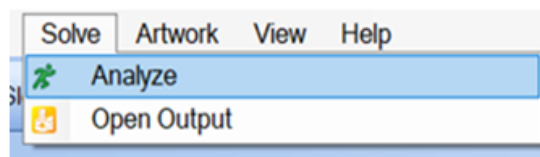
Εικόνα 83. Παράδειγμα καθορισμού θέσης στοιχείου υποστήριξης



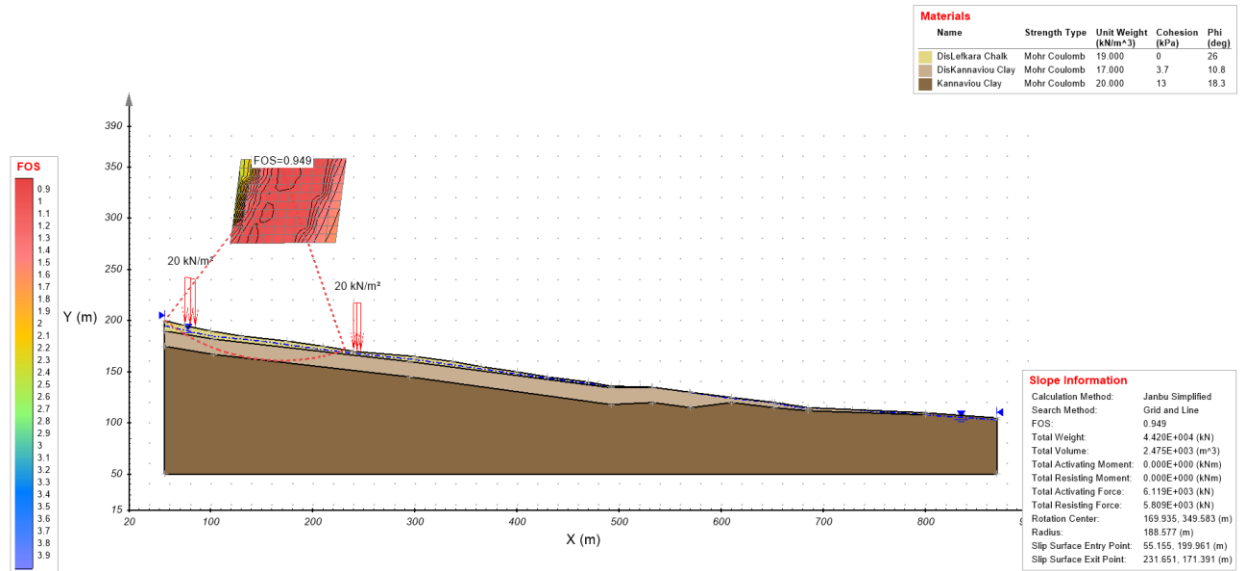
Εικόνα 84. Παράδειγμα καθορισμού χαρακτηριστικών στοιχείου υποστήριξης

5.8 Ανάλυση ευστάθειας του πρανούς και εμφάνιση αποτελεσμάτων της ανάλυσης

Με την ολοκλήρωση του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του μοντέλου του υπό ανάλυση πρανούς, ακολουθεί η πραγματοποίηση της ανάλυσης ευστάθειας και η εύρεση του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, μέσω της επιλογής Analyze από την καρτέλα Solve. Αφού το λογισμικό εκτελέσει τους απαραίτητους υπολογισμούς, παρουσιάζει στον χρήστη τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας, μέσω της επιλογής Open Output.

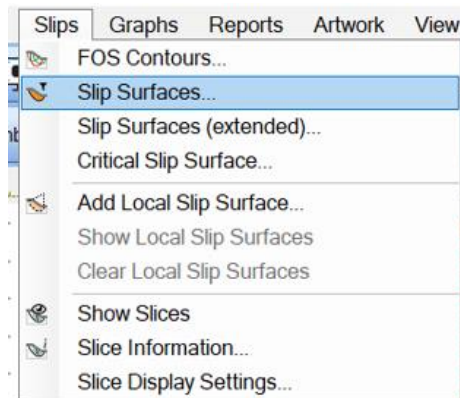


Εικόνα 85. Καρτέλα υπολογισμού των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευστάθειας του μοντέλου

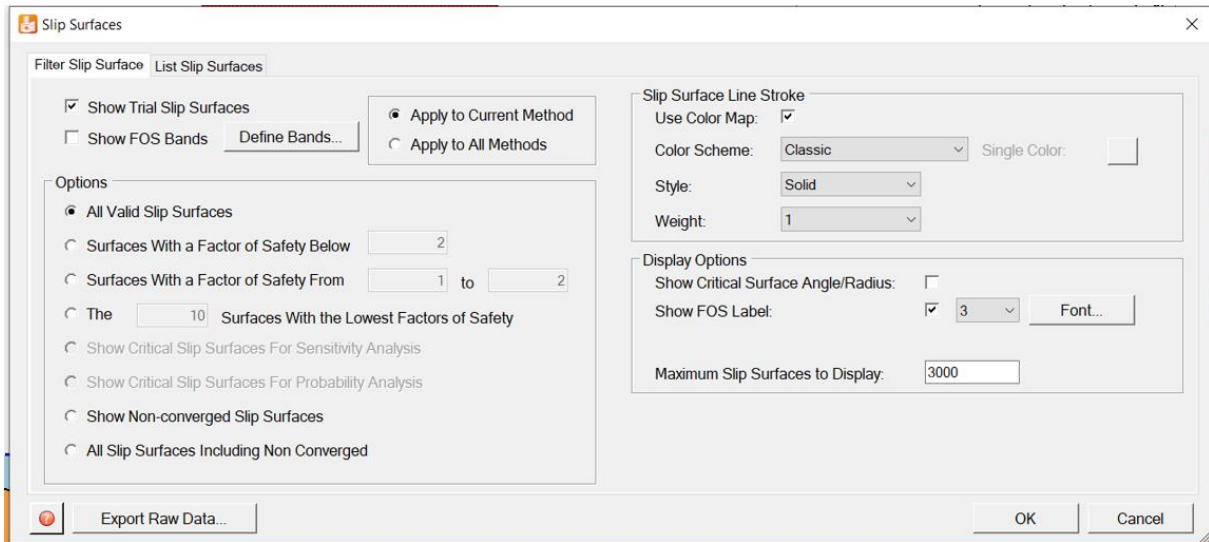


Εικόνα 86. Τρόπος εμφάνισης της επιφάνειας ολίσθησης και του συντελεστή ασφαλείας στο Output του λογισμικού

Στο Output παρουσιάζεται η δυσμενέστερη επιφάνεια αστοχίας και ο συντελεστής ασφαλείας της. Από την καρτέλα Slips της επιφάνειας προβολής των αποτελεσμάτων του προγράμματος, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει όλους τους μηχανισμούς αστοχίας που ελέγχθηκαν από το λογισμικό και τους συντελεστές ασφαλείας του καθενός.



Εικόνα 87. Καρτέλα ελέγχου των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στο Output το λογισμικού



Εικόνα 88. Επιλογή εμφάνισης όλων των επιφανειών αστοχίας που ελέγχθηκαν από το λογισμικό

Κεφάλαιο 6 : Ανάστροφη ανάλυση και εντοπισμός του μηχανισμού αστοχίας του πρανούς στην περιοχή μελέτης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάστροφη ανάλυση και η διαδικασία εντοπισμού του μηχανισμού αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς στην κοινότητα Νατάς. Η ανάστροφη ανάλυση λαμβάνει χώρα με σκοπό την επιβεβαίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών που δομούν το υπό μελέτη πρανές. Σημειώνεται ότι, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, ως επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα θεωρείται το μέσο επίπεδο και δεν μεταβάλλεται κατά τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται.

6.1 Ανάστροφη ανάλυση

Για την κατολίθωση στην κοινότητα Νατάς εκπονήθηκε μελέτη από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου σε συνεργασία με το British Geological Survey (BGS). Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής, υπολογίστηκαν οι τιμές συνοχής και παραμένουσας γωνίας τριβής των διαταραγμένων γεωυλικών που δομούν το πρανές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 13. Από άλλες έρευνες που έγιναν για τους συγκεκριμένους σχηματισμούς από μη διαταραγμένα δείγματα (Northmore et al., 1986), λήφθηκαν οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 13. Τιμές συνοχής και παραμένουσας γωνίας τριβής σχηματισμών του υπό μελέτη πρανούς (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου & British Geological Survey, 2010)

Όνομα σχηματισμού	Συνοχή c' (kPa)	Παραμένουσα Γωνία Τριβής ϕ_r' ($^\circ$)
Διαταραγμένη κιμωλία/κρητίδα σχηματισμού Λευκάρων	0	26
Διαταραγμένος αργιλικός σχηματισμός Κανναβιού	3,7	10,8

Πίνακας 14. Τιμές συνοχής και γωνίας τριβής μη διαταραγμένων σχηματισμών (Northmore et al., 1986)

Όνομα Σχηματισμού	Συνοχή c' (kPa)	Γωνία Τριβής ϕ' ($^\circ$)
Κιμωλία/Κρητίδα σχηματισμού Λευκάρων	51 - 76	26 - 32
Άργιλος σχηματισμού Κανναβιού	13 - 50	18,3 - 29,7

Η ανάστροφη ανάλυση του υπό μελέτη πρανούς γίνεται με σκοπό να επιβεβαιώσει τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών και την ορθότητα του μοντέλου του υπό μελέτη πρανούς που δημιουργήθηκε. Σημειώνεται ότι η ανάστροφη ανάλυση γίνεται για

κυκλικό μηχανισμό αστοχίας μικρού βάθους. Αρχικά καθορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών στο μοντέλο, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

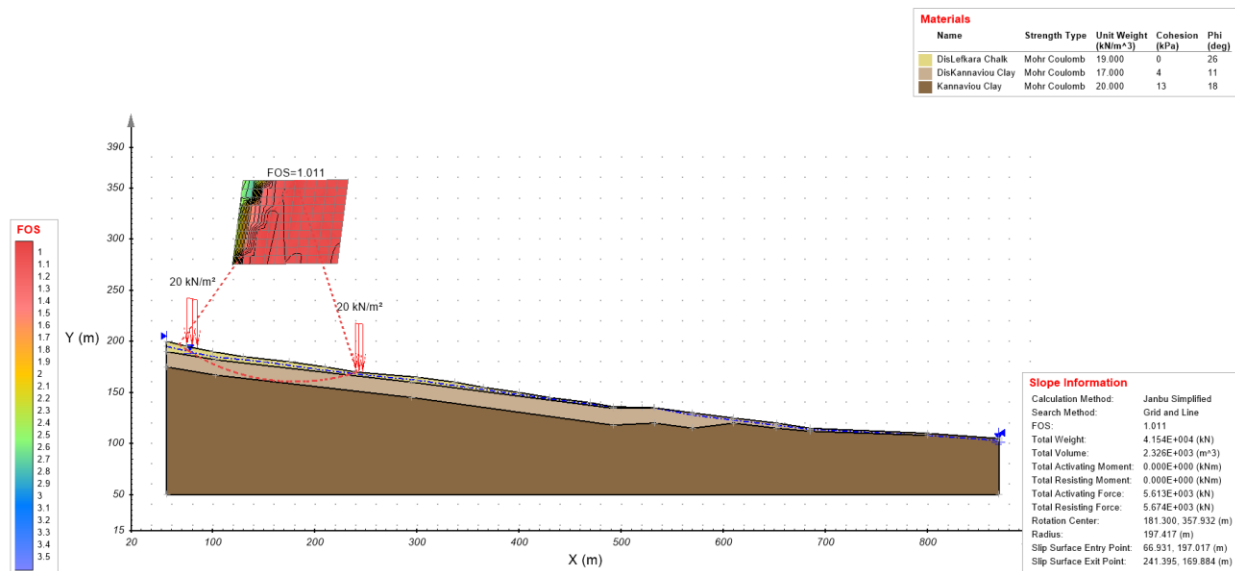
Πίνακας 15. Αρχικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλικών στο προσομοίωμα

Περιοχή	Ονομασία Σχηματισμού	Ειδικό βάρος, γ (kN/m ³)	Συνοχή, c' (kPa)	Γωνία Τριβής ϕ' (°)
R1	DisLefkara Chalk	19	51	26
R2	DisKannaviou Clay	17	13	18
R3	Kannaviou Clay	20	13	18

Με μεταβολή της τιμής συνοχής και γωνίας τριβής των σχηματισμών, προέκυψαν οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που φαίνονται στον Πίνακα 16 και στην Εικόνα 89, οι οποίες δίνουν συντελεστή ασφαλείας $FS = 1.01$. Σημειώνεται ότι η μεταβολή των τιμών συνοχής και γωνίας τριβής του αδιατάραχτου σχηματισμού στην περιοχή R3, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 16. Τελικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλικών στο προσομοίωμα, από την ανάστροφη ανάλυση

Περιοχή	Ονομασία Σχηματισμού	Ειδικό βάρος, γ (kN/m ³)	Συνοχή, c' (kPa)	Γωνία Τριβής ϕ' (°)
R1	DisLefkara Chalk	19	0	26
R2	DisKannaviou Clay	17	4	11
R3	Kannaviou Clay	20	13	18



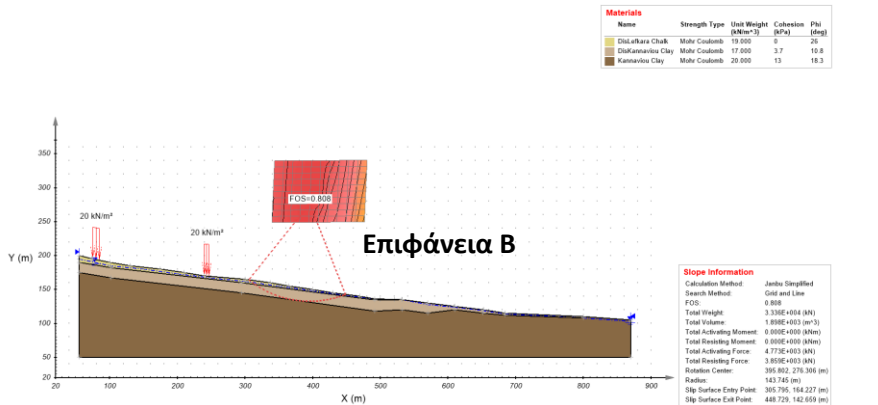
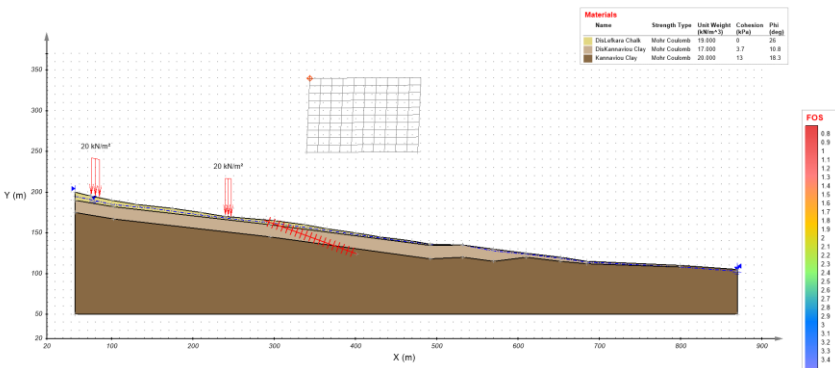
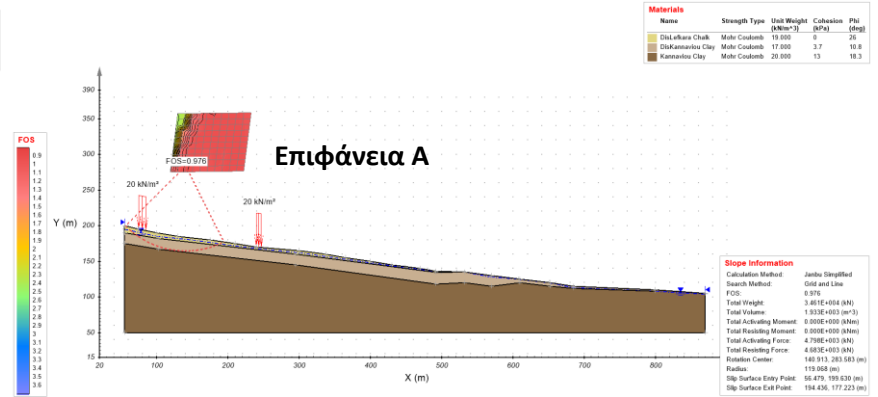
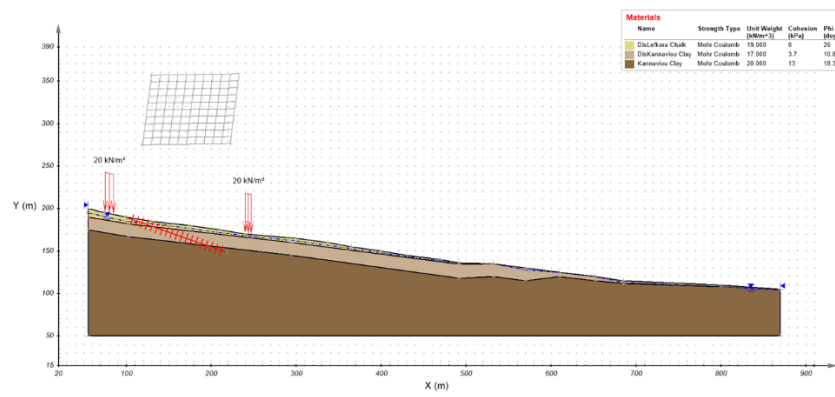
Εικόνα 89. Αποτέλεσμα ανάστροφης ανάλυσης για κυκλική αστοχία μικρού βάθους

Τα αποτελέσματα της ανάστροφης ανάλυσης συνάδουν με αυτά που προέκυψαν από τη μελέτη που έγινε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου και το British Geological Survey. Έτσι, επιβεβαιώνεται η ορθότητα του μοντέλου ευστάθειας που δημιουργήθηκε.

6.2 Μελέτη για εντοπισμό κυκλικής επιφάνειας αστοχίας

Για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας του υπό μελέτη πρανού, η πρώτη ανάλυση αφορά κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, η προς εύρεση επιφάνεια αστοχίας ορίζεται ως κυκλική (circular) και ως μέθοδος εύρεσής της, η μέθοδος κανάβου και γραμμής ('Grid and Line').

Για την εύρεση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας του πρανού, απαιτείται τοποθέτηση του κανάβου και της γραμμής στο μοντέλο σε λογικές θέσεις. Με μεταβολή της θέσης και του σχήματος του κανάβου και της γραμμής, εντοπίζουμε στο μοντέλο δύο επάλληλες κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, βάθους περίπου 25m από την επιφάνεια. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται εικόνες και αποτελέσματα από διάφορες θέσεις του κανάβου και της γραμμής. Στην Εικόνα 90 παρουσιάζονται οι δύο κυκλικές επιφάνειες αστοχίας που εντοπίζονται. Ορίζεται ως επιφάνεια Α αυτή που παρουσιάζεται στο πάνω μέρος της Εικόνας 90 και ως επιφάνεια Β αυτή που παρουσιάζεται στο κάτω μέρος της.

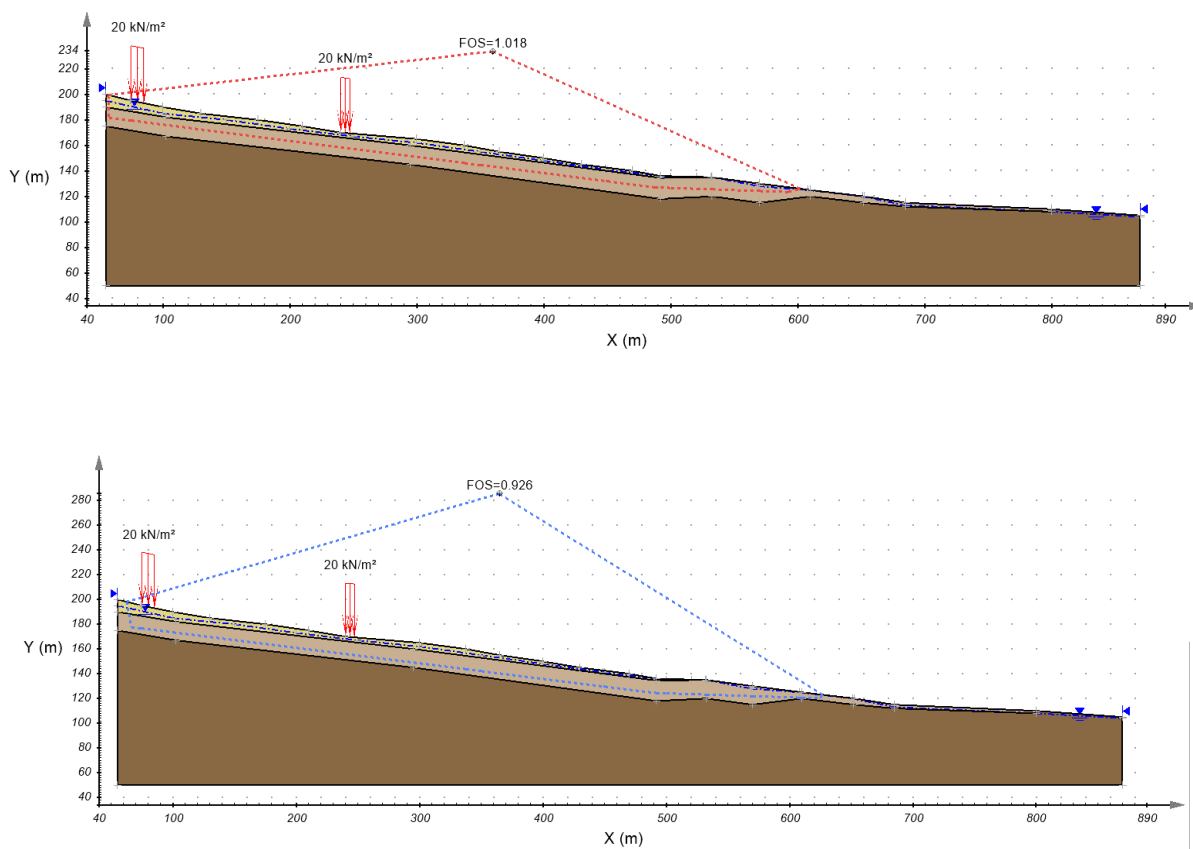


Εικόνα 90. Κυκλικές επιφάνειες αστοχίας που εντοπίζονται στο προσομοίωμα

6.3 Μελέτη για εντοπισμό μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας

Η δεύτερη ανάλυση για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας του υπό μελέτη πρανού, αφορά μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, η προς εύρεση επιφάνεια αστοχίας ορίζεται ως μη-κυκλική (Non-circular) και πλήρως καθορισμένη ('Fully Specified').

Η μελέτη για τον εντοπισμό μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας αφορά τη διαταραγμένη αργιλική περιοχή (R2). Εξετάζονται διάφορες μη κυκλικές επιφάνειες εντός της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής, με σκοπό να προσδιοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας τους. Σημειώνεται ότι εξετάστηκαν και μη-κυκλικές επιφάνειες εκτός της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής, οι οποίες έδωσαν υψηλό συντελεστή ασφαλείας και δεν προκαλούν αστοχία του πρανού. Στην Εικόνα 91 και στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται μερικές επιφάνειες που μελετήθηκαν και τα αποτελέσματα που έδωσαν.



Εικόνα 91. Αποτελέσματα μελέτης μη-κυκλικών επιφανειών αστοχίας

6.4 Συμπεράσματα για τον μηχανισμό αστοχίας του πρανούς

Τα συμπεράσματα που εξάγονται για τον μηχανισμό αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς στην κοινότητα Νατάς, προκύπτουν συνδυαστικά από τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η εκτεταμένη αστοχία του εν λόγω πρανούς διαμορφώνεται από μια επαλληλία περιστροφικών αστοχιών που δημιουργούν μια συνολική επιφάνεια ολίσθησης σε βάθος 25m από την επιφάνεια. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις αναστροφές αναγλύφου που εντοπίζονται στον οικισμό.

Κεφάλαιο 7 : Παραμετρική ανάλυση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για το υπό μελέτη πρανές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση για τη μελέτη επιρροής της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς στην κοινότητα Νατάς.

7.1 Καθορισμός περιπτώσεων επιπέδων στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για την παραμετρική ανάλυση

Για την παραμετρική ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας, καθορίζονται τα επίπεδα στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 17. Η επιλογή των επιπέδων στάθμης έγινε με βάση τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των γεωυλικών του υπό μελέτη πρανούς. Η ανάλυση αυτή έχει σκοπό τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με πιθανές μεθόδους αποστράγγισης, ως μέτρα για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων.

Πίνακας 17. Επίπεδα στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για κάθε περίπτωση μελέτης

Περίπτωση	Λεπτομέρειες	Βάθος από την επιφάνεια (m)
[1]	<i>Μέγιστο επίπεδο στάθμης ΥΟ</i>	2
[2]	<i>Μέσο επίπεδο στάθμης ΥΟ</i>	5
[3]	<i>Επίπεδο στάθμης ΥΟ στην επαφή της διαταραγμένης περιοχής κλωλιάς του σχηματισμού Λευκάρων και της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του σχηματισμού Κανναβιού</i>	8
[4]	<i>Επίπεδο στάθμης ΥΟ εντός της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του σχηματισμού Κανναβιού</i>	15
[5]	<i>Επίπεδο στάθμης ΥΟ στην επαφή της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του σχηματισμού Κανναβιού και της μη-διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του σχηματισμού Κανναβιού</i>	25

7.2 Παραμετρική ανάλυση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για κυκλική αστοχία

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, κατά τη μελέτη ευστάθειας του πρανούς στην κοινότητα Νατάς, εντοπίστηκαν επάλληλες κυκλικές επιφάνειες αστοχίας, βάθους περίπου 25m από την επιφάνεια. Για κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες, ακολουθεί παραμετρική ανάλυση σχετικά με τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας τους, συγκριτικά με το επίπεδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στο Παράρτημα Δ παρατίθενται τα αποτελέσματα από το λογισμικό PLAXIS 2D LE για κάθε επιφάνεια και για κάθε περίπτωση επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας των δύο κυκλικών επιφανειών αστοχίας, για κάθε περίπτωση επιπέδου στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Πίνακας 18. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τις κυκλικές επιφάνειες αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς

Επιφάνεια A		Επιφάνεια B	
Περίπτωση	FS	Περίπτωση	FS
[1]	0,838	[1]	0,708
[2]	0,976	[2]	0,808
[3]	1,115	[3]	0,907
[4]	1,369	[4]	1,236
[5]	1,529	[5]	1,423

7.3 Παραμετρική ανάλυση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για μη-κυκλική αστοχία

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, εντός της διαταραγμένης αργιλικής περιοχής του πρανούς στην περιοχή της κοινότητας Νατάς, εντοπίστηκαν μη-κυκλικές επιφάνειες που, για μέσο επίπεδο στάθμης υδροφόρου ορίζοντα, είτε αστοχούν είτε ισορροπούν οριακά. Για τις επιφάνειες αυτές πραγματοποιήθηκε, επίσης, παραμετρική ανάλυση σχετικά με τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας τους συγκριτικά με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στο Παράρτημα Ε παρατίθενται τα αποτελέσματα από το λογισμικό PLAXIS 2D LE για μια επιφάνεια που, για μέσο επίπεδο στάθμης υδροφόρου ορίζοντα, έχει συντελεστή ασφαλείας περίπου ίσο με ένα ($FS \approx 1$), για κάθε περίπτωση επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. Στον Πίνακα 19, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας της επιφάνειας αυτής για κάθε περίπτωση επιπέδου στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

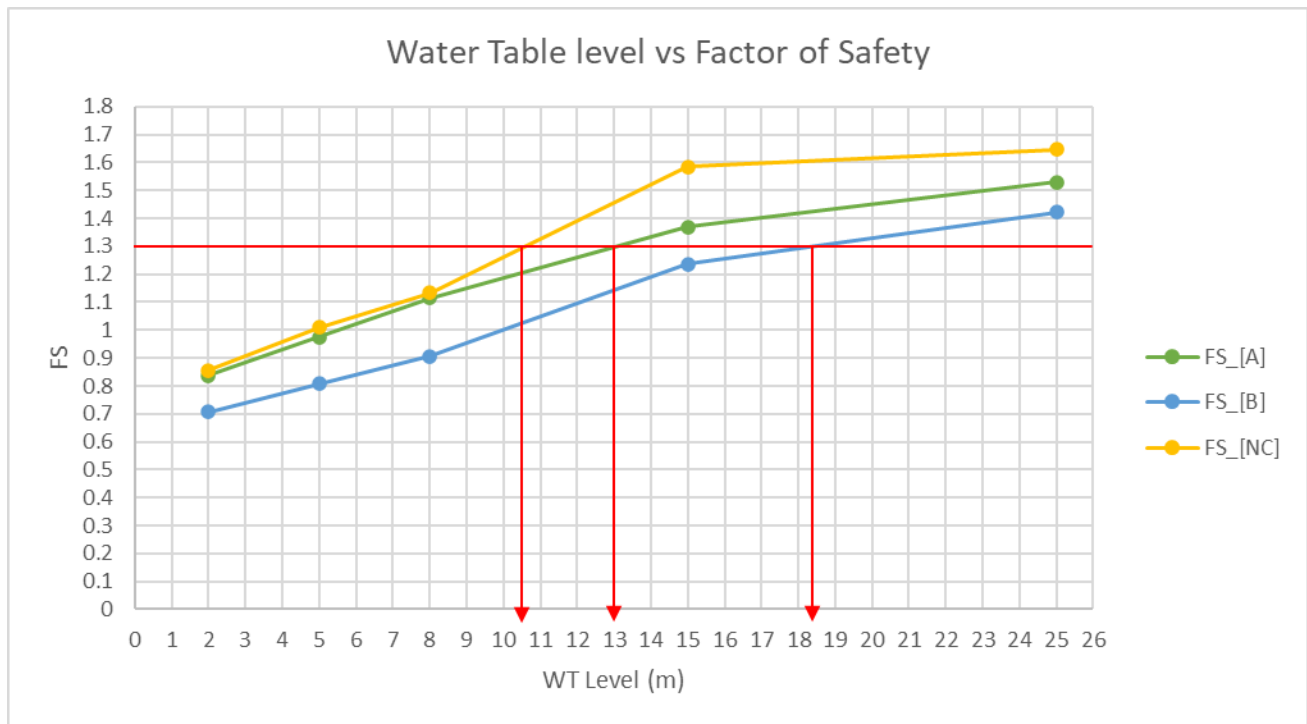
Πίνακας 19. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για μη κυκλική επιφάνεια αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς

Μη-κυκλική επιφάνεια αστοχίας	
Περίπτωση	FS
[1]	0.856
[2]	1.009
[3]	1.134
[4]	1.585
[5]	1.647

7.4 Συμπεράσματα για την ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς συγκριτικά με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα

Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχει καθοριστική σημασία για την ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς. Συγκεκριμένα, όσο χαμηλότερο το επίπεδο της στάθμης τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ασφαλείας των επιφανειών, άρα τόσο πιο σταθερό το πρανές. Σε περιόδους που η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πλησιάζει το μέγιστο, απαιτείται ταπείνωσή της, για τη διασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς.

Στην Εικόνα 92 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα σχετικά με τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας των επιφανειών αστοχίας συγκριτικά με τη μεταβολή του επιπέδου της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να βρίσκεται περίπου στα 20m από την επιφάνεια, ούτως ώστε το πρανές να είναι σταθερό και να έχει συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 1.3 , σύμφωνα με την Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Η ταπείνωση αυτή θα πρέπει να γίνει με άντληση από γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, δεδομένης της μικρής διαπερατότητας του υλικού του πρανούς και του βάθους που πρέπει να φτάσει ο υδροφόρος ορίζοντας.



Εικόνα 92. Γραφική παράσταση μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας των επιφανειών αστοχίας σε σχέση με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα

Κεφάλαιο 8 : Σύνοψη και Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη διαδικασία εντοπισμού του μηχανισμού αστοχίας της κατολίθησης στην περιοχή κοινότητας Νατάς της επαρχίας Πάφου στην Κύπρο. Επίσης, μέσω παραμετρικών αναλύσεων, αξιολογεί τεχνικές αποστράγγισης ως μέσο για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων στον οικισμό.

Για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας της κατολίθησης, αρχικά, μελετήθηκαν τα γεωλογικά, τα γεωτεχνικά, τα κλιματολογικά και τα σεισμικά δεδομένα της περιοχής μελέτης. Συνδυαστικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετακινήσεων που εντοπίστηκαν με τη χρήση της τεχνικής συμβολομετρίας με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR). Τα δεδομένα αυτά παραχωρήθηκαν από το κέντρο BEYOND Centre for Earth Observation Research and Satellite Remote Sensing του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και από το European Ground Motion Service του Copernicus.

Με βάση τον περιοδικό χαρακτήρα των μετακινήσεων που καταγράφηκαν, σε σύγκριση με τα κλιματολογικά και τα σεισμικά δεδομένα κατά τη χρονική στιγμή καταγραφής τους, συμπεραίνεται ότι ο κύριος παράγοντας που ενισχύει την ολίσθηση του πρανούς είναι η δημιουργία επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα κατά τους χειμερινούς μήνες. Δεν φαίνεται να υπάρχει άμεση σύνδεση των σεισμικών καταγραφών στην περιοχή μελέτης με την περιοδικότητα των μετακινήσεων των σκεδαστών. Παρόλα αυτά, τα σεισμικά φαινόμενα μπορούν να ενισχύσουν την ολίσθηση του πρανούς και να έχουν καταστροφικά αποτελέσματα, ανάλογα με το μέγεθός τους και με την ύπαρξη ή όχι επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα.

Στο πλαίσιο της μελέτης για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας του υπό μελέτη πρανούς στην κοινότητα Νατάς, εκπονήθηκαν αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού δισδιάστατης γεωτεχνικής ανάλυσης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας PLAXIS 2D LE. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η εκτεταμένη αστοχία του εν λόγω πρανούς διαμορφώνεται από μια επαλληλία περιστροφικών αστοχιών που δημιουργούν μια συνολική επιφάνεια ολίσθησης σε βάθος 25m από την επιφάνεια. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις αναστροφές αναγλύφου που εντοπίζονται στον οικισμό.

Με χρήση του λογισμικού PLAXIS 2D LE εκπονήθηκαν, επίσης, παραμετρικές αναλύσεις σχετικά με το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, με σκοπό την αξιολόγηση των τεχνικών αποστράγγισης για την ανάσχεση των κατολισθητικών κινήσεων. Οι παραμετρικές αναλύσεις αυτές, έγιναν στις δύο επάλληλες κυκλικές επιφάνειες αστοχίας A και B και στην μη-κυκλική επιφάνεια αστοχίας, της οποίας ο συντελεστής ασφαλείας $FS \approx 1$ για μέσο επίπεδο στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (-5m από την επιφάνεια), που εντοπίστηκαν μέσω της μελέτης στο PLAXIS 2D LE. Οι περιπτώσεις που αναλύθηκαν αφορούσαν στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στα -2, -5, -8, -15 και -25m από την επιφάνεια. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι το επίπεδο στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχει καθοριστική σημασία για την ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς. Συγκεκριμένα, όσο χαμηλότερη η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο πιο σταθερό είναι το πρανές. Σε περιόδους που το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα πλησιάζει το μέγιστο, απαιτείται ταπεινώσή του, για τη διασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να βρίσκεται περίπου στα 20m από την επιφάνεια, ούτως ώστε το πρανές να είναι σταθερό και να έχει συντελεστή ασφαλείας τουλάχιστον 1.3 , σύμφωνα με την Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να γίνει με άντληση από γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, δεδομένης της μικρής διαπερατότητας του υλικού του πρανούς και του βάθους που πρέπει να φτάσει ο υδροφόρος ορίζοντας. Ο κλίμακος των γεωτρήσεων θα είναι αποτέλεσμα δοκιμαστικών αντλήσεων που θα πραγματοποιηθούν με σκοπό την επίτευξη του καταβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό επίπεδο.

Αναφορές – Βιβλιογραφία

Abramson, L.W. (2002) Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, Hoboken

Alatza, Stavroula-Drosoula E., (2020) "Multi-Temporal SAR Interferometry for Monitoring Ground Deformation in Greece (Ph.D Dissertation).", Athens <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.19802>.

Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca, (2001) "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 39, NO. 1, JANUARY 2001

Bekaert, D. P. S., et al. (2015) "Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques." Remote Sensing of Environment 170 (2015): 40-47.

Costantini, Mario, Federico Minati, Francesco Trillo, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali, Emanuele Passera, John Dehls, et al., (2021) "European Ground Motion Service (EGMS)." In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 3293-96. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553562>.

Crosetto, Michele, Oriol Monserrat, María Cuevas-González, Núria Devanthéry, and Bruno Crippa, (2016) "Persistent Scatterer Interferometry: A Review.", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115 (May): 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.

EarthData - NASA, "What Is Remote Sensing? | Earthdata.", December 2021. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>.

EarthData - NASA, "What Is Synthetic Aperture Radar? | Earthdata.", April 2020. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>.

"EGMS White Paper.", 2017

European Ground Motion Service, Copernicus Land Monitoring Service (Land | Copernicus n.d.). <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>.

Fattahi, Heresh, Mark Simons, and Piyush Agram. (2017) "InSAR time-series estimation of the ionospheric phase delay: An extension of the split range-spectrum technique." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 55.10 (2017): 5984-5996.

Kyriakou E., Hadjigeorgiou J., (2008) "Ignoring Engineering Geology A Costly Mistake At Pentalia", 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management

K. J. Northmore, M. Charalambous, P. R. N. Hobbs and G. Petrides, (1986) "Engineering geology of the Kannaviou, 'Melange' and Mamonia Complex formations - Phiti/Statos area, S W Cyprus"

M. Charalambous, P.R. N. Hobbs and K. J. Northmore , (1986) “Supplementary geotechnical and mineralogical data for cohesive soil samples from selected sites across Cyprus”

Natural Resources Canada, (2019) “Fundamentals of Remote Sensing” <https://naturalresources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>.

Pantazis, T.M. (1969) “Landslides in Cyprus.”, Bulletin No. 4 of the Geological Survey Department. Ministry of Commerce and Industry, pp. 1-20.

Papoutsis, I., Kontoes, C., Alatza, S., Apostolakis, A., & Loupasakis, C., (2020) “InSAR greece with parallelized persistent scatterer interferometry: A national ground motion service for big copernicus sentinel-1 data”, Remote Sensing, 12(19), 3207.

PLAXIS 2D/3D LE Slope Stability Analysis Theory Manual 2021

Rosen, Paul A., et al. (2012) "The InSAR scientific computing environment." EUSAR 2012; 9th European conference on synthetic aperture radar. VDE, 2012.

Scott Wilson, British Geological Survey (B.G.S.), Geological Survey Department of Cyprus (G.S.D.), (2010) “Study of Landslide in Areas of Paphos District, Cyprus”, Final Project Report

Varnes DJ (1978) “Slope movement types and processes”. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds), Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33

Wolfgang Keydel, (2004) “Normal and Differential SAR Interferometry”, Microwaves and Radar Institute, German Aerospace Research Centre (DLR), Oberpfaffenhofen

Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ), Τεύχος 11: Γεωλογικές και Γεωτεχνικές Έρευνες και Μελέτες, 2003

Λουπασάκης Κ.,(2013) Κατολισθήσεις Ι & ΙΙ, Τεχνική Γεωλογία & Γεωκίνδυνοι, ΕΜΠ

Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου - <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>

Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου – Σεισμολογικό Δίκτυο- <http://www.gsd-seismology.org.cy>

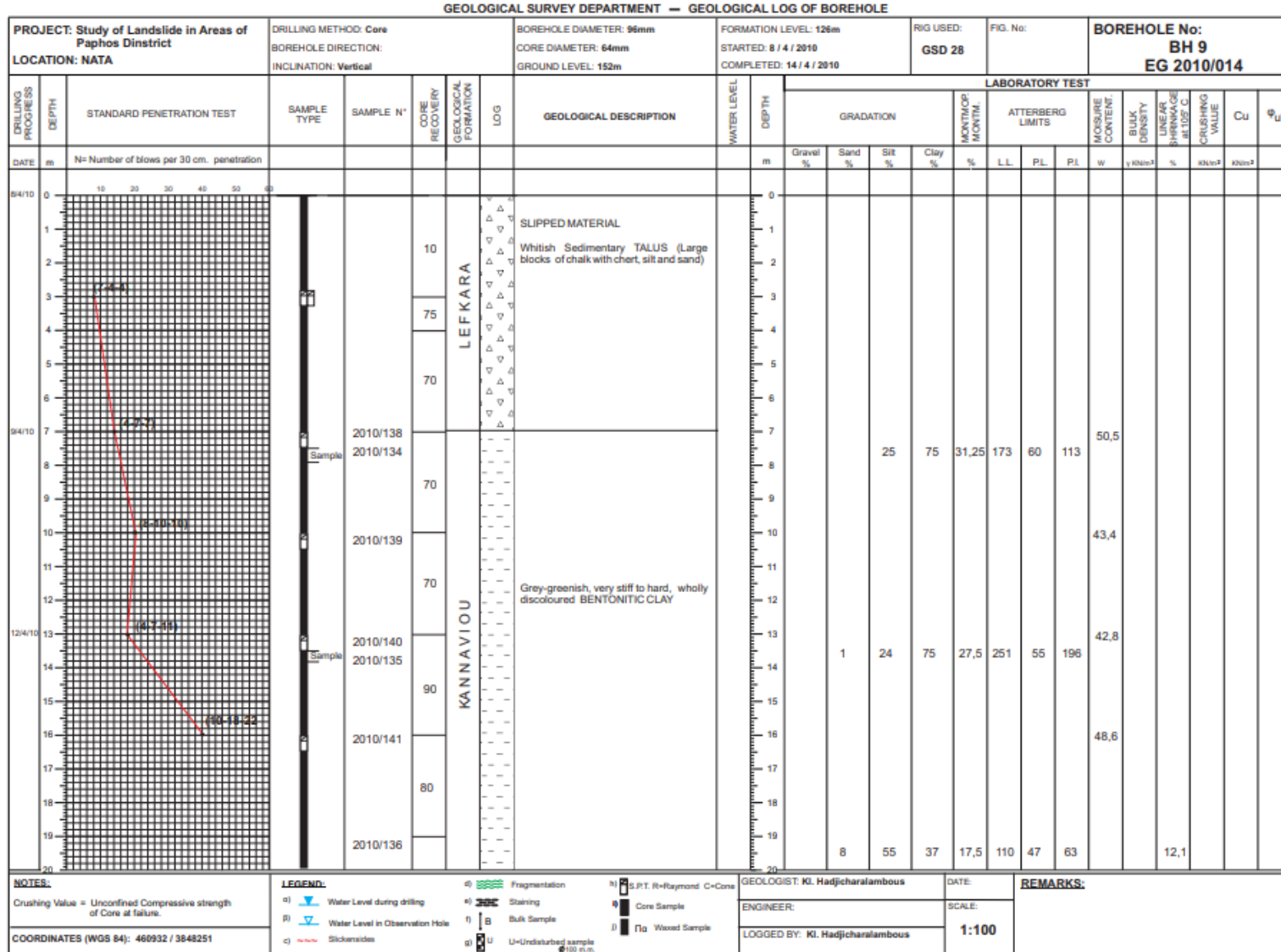
Τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου - <https://www.dom.org.cy/CLIMATOLOGY>

Παράρτημα Α : Αποτελέσματα γεωτρήσεων στο σώμα
ολισθαίνουσας μάζας

GEOLOGICAL SURVEY DEPARTMENT — GEOLOGICAL LOG OF BOREHOLE


PROJECT: Study of Landslide in Areas of Paphos Dinstriat LOCATION: NATA		DRILLING METHOD: Core BOREHOLE DIRECTION: INCLINATION: Vertical		BOREHOLE DIAMETER: 96mm CORE DIAMETER: 64mm GROUND LEVEL: 186m		FORMATION LEVEL: 166m STARTED: 30 / 3 / 2010 COMPLETED: 7 / 4 / 2010		RIG USED: GSD 28		FIG. No:		BOREHOLE No: BH 8 EG 2010/012												
DRILLING PROGRESS	DEPTH	STANDARD PENETRATION TEST	SAMPLE TYPE	SAMPLE N°	CORE RECOVERY	GEOLOGICAL FORMATION	LOG	GEOLOGICAL DESCRIPTION	WATER LEVEL	DEPTH	LABORATORY TEST													
											GRADATION				MONTHS OF MONTH	ATTERBERG LIMITS			MOISTURE CONTENT	BULK DENSITY	LINEAR SHRINKAGE AT 105°C	CRUSHING VALUE	Cu	Φ _u
DATE	m	N= Number of blows per 30 cm. penetration							m	Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %	%		LL	PL	PI						
30/3/10	0																							
	1																							
	2																							
	3																							
	4																							
	5																							
	6																							
	7																							
31/3/10	7																							
	8																							
	9																							
	10																							
	11																							
	12																							
24/4/10	13																							
	14																							
	15																							
	16																							
	17																							
	18																							
	19																							
	20																							

Εικόνα 93. Αποτελέσματα Γεώτρησης ΒΗ8 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2010)



Εικόνα 94. Αποτελέσματα Γεώτρησης BH9, (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2010)

GEOLOGICAL SURVEY DEPARTMENT — GEOLOGICAL LOG OF BOREHOLE

PROJECT: Study of Landslide in Areas of Paphos District LOCATION: NATA		DRILLING METHOD: Core BOREHOLE DIRECTION: INCLINATION: Vertical		BOREHOLE DIAMETER: 96mm CORE DIAMETER: 64mm GROUND LEVEL: 152m		FORMATION LEVEL: 126m STARTED: 8 / 4 / 2010 COMPLETED: 14 / 4 / 2010		RIG USED: GSD 28	FIG. No:	BOREHOLE No: BH 9 EG 2010/014															
DRILLING PROGRESS	DEPTH	STANDARD PENETRATION TEST	SAMPLE TYPE	SAMPLE N°	CORE RECOVERY	GEOLOGICAL FORMATION	LOG	GEOLOGICAL DESCRIPTION	WATER LEVEL	DEPTH	LABORATORY TEST														
											GRADATION				MOISTURE CONTENT	ATTERBERG LIMITS			MOISTURE CONTENT	BULK DENSITY	LINEAR SHRINKAGE at 105° C	CRUSHING VALUE	Cu	Φ _u	
DATE	th	N= Number of Blows per 30 cm. penetration							m	Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %	%		LL	PL	PI							W
13/4/10	20			2010/137	95	KANNAVIOU		Gray, hard to very hard, strong, SANDSTONE slickensides from 20,000 21,00m		20															
	21				15								28	56	16		68	28	40			20,52	3755		
	22				15				Greenish, soft to stiff wholly discoloured BENTONITIC CLAY																
	26							26,0m Bottom of Borehole																	

NOTES:
Crushing Value = Unconfined Compressive strength of Core at failure.
COORDINATES (WGS 84): 460932 / 3848251

LEGEND:
 a) Water Level during drilling
 b) Water Level in Observation Hole
 c) Slickensides
 d) Fragmentation
 e) Staining
 f) Bulk Sample
 g) U-Undisturbed sample
 h) S.P.T. R=Raymond C=Core
 i) Core Sample
 j) Washed Sample

GEOLOGIST: **Kl. Hadjicharalambous**
 ENGINEER:
 LOGGED BY: **Kl. Hadjicharalambous**

DATE:
SCALE:
1:100

REMARKS:

Εικόνα 95. Αποτελέσματα Γεώτρησης ΒΗ9 (Συνέχεια) (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2010)

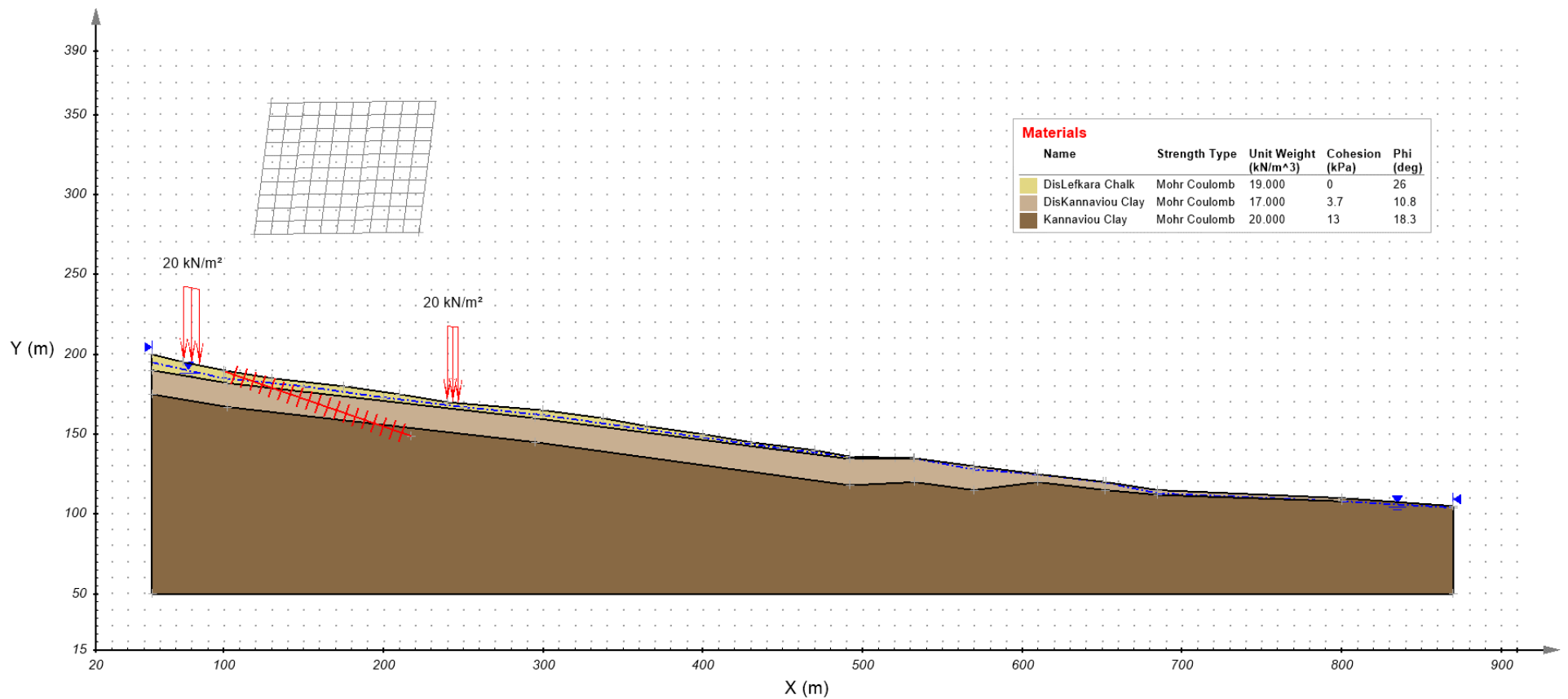
GEOLOGICAL SURVEY DEPARTMENT — GEOLOGICAL LOG OF BOREHOLE

PROJECT: Study of Landslide in Areas of Paphos District LOCATION: NATA		DRILLING METHOD: Core BOREHOLE DIRECTION: INCLINATION: Vertical		BOREHOLE DIAMETER: 120mm CORE DIAMETER: 96mm GROUND LEVEL: 136m		FORMATION LEVEL: 118m STARTED: 1 / 3 / 2010 COMPLETED: 4 / 3 / 2010		RIG USED: GSD 28		FIG. No:		BOREHOLE No: BH 10 EG 2010/006															
DRILLING PROGRESS DEPTH	STANDARD PENETRATION TEST	SAMPLE TYPE	SAMPLE N°	CORE RECOVERY	GEOLOGICAL FORMATION	LOG	GEOLOGICAL DESCRIPTION	WATER LEVEL	DEPTH	LABORATORY TEST																	
										GRADATION				MONTMOP MONTM		ATTERBERG LIMITS			MOISTURE CONTENT		BULK DENSITY		LINEAR SHRINKAGE at 105° C		CRUSHING VALUE		Cu
DATE	m	N= Number of blows per 30 cm. penetration							m	Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %	%	LL	PL	PI	w	y	K _{10m} ²	%	K _{10m} ²	K _{10m} ²	K _{10m} ²			
13/10	0	10	20	30	40	50	60		0																		
	1						Whitish TALUS: Loose angular and subangular chalk fragments (up to 3x3cm), in a sandy silty matrix		1																		
	2								2																		
20/10	3						Dark brown, completely decomposed, hard SERPENTINITE, very weak. In places staining are encountered		3																		
	4								4																		
	5								5	15	22	38	25	30	74	36	38										
	6								6																		
30/10	7						Green, grey-green, slightly discoloured, moderately strong SERPENTINITE fragments. Evidences of slickensides at the depth of 5,80-9,20m		7																		
	8								8																		
	9								9																		
	10						Brown-greenish, completely discoloured BENTONITIC CLAY, with, in places, serpentinite fragments		10																		
	11								11			60	40	23,8	118	37	81										
	12								12																		
	13								13																		
40/10	14						Green, fresh BENTONITIC CLAY, very hard		14																		
	15								15																		
	16								16	5	53	42	2,5	96	41	55											
	17								17																		
	18								18																		
	19								19																		
	20						18,00m Bottom of Borehole		20																		

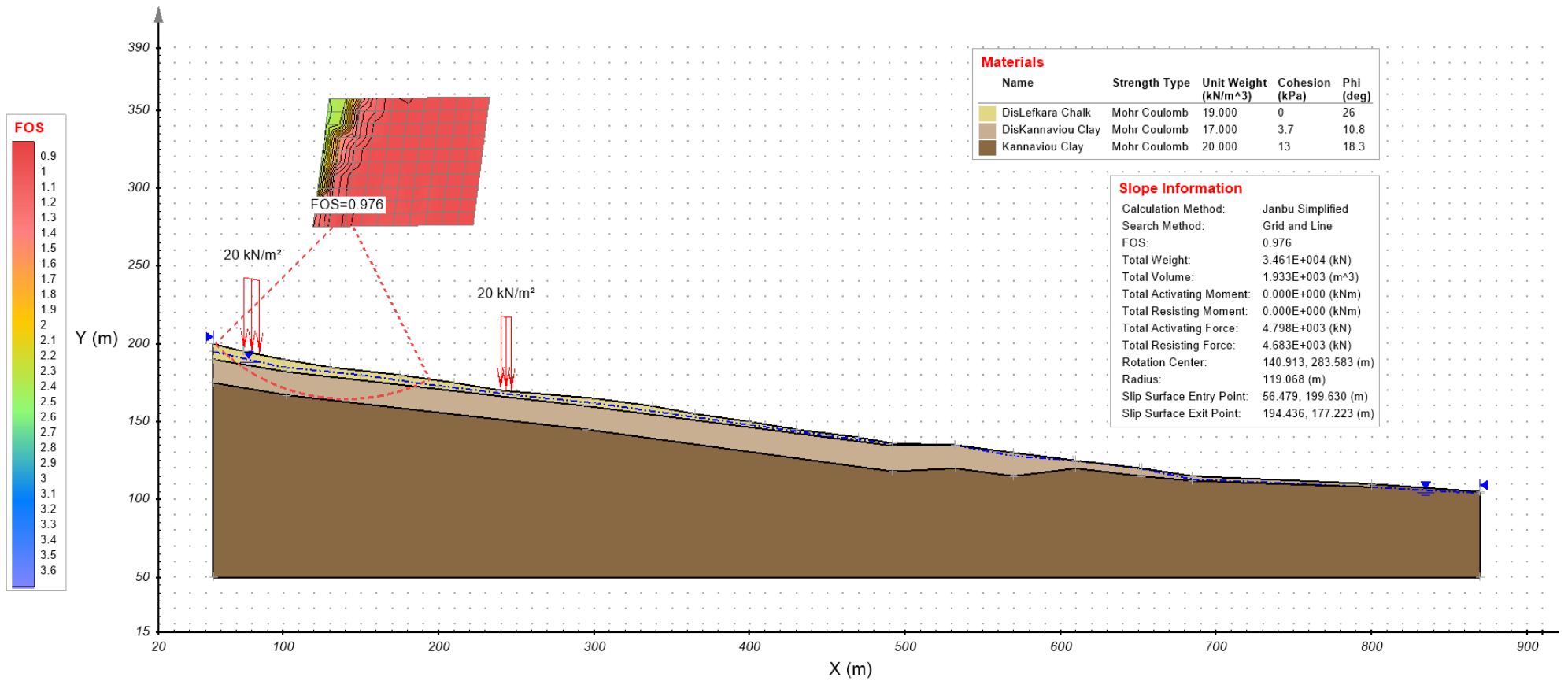
NOTES: Crushing Value = Unconfined Compressive strength of Core at failure. COORDINATES (WGS 84): 461060 / 3848220	LEGEND: (W) Water Level during drilling (R) Water Level in Observation Hole (S) Slickensides (F) Fragmentation (S) Staining (B) Bulk Sample (U) Undisturbed sample (C) Core Sample (W) Washed Sample (100) 100 mm	GEOLOGIST: Kl. Hadjicharalambous ENGINEER: LOGGED BY: Kl. Hadjicharalambous	DATE: SCALE: 1:100	REMARKS: Unable to take U4 (undisturbed) sample
---	--	---	--------------------------	---

Εικόνα 96. Αποτελέσματα γεώτρησης BH10 (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, <https://www.moa.gov.cy/moa/gsd/>, 2010)

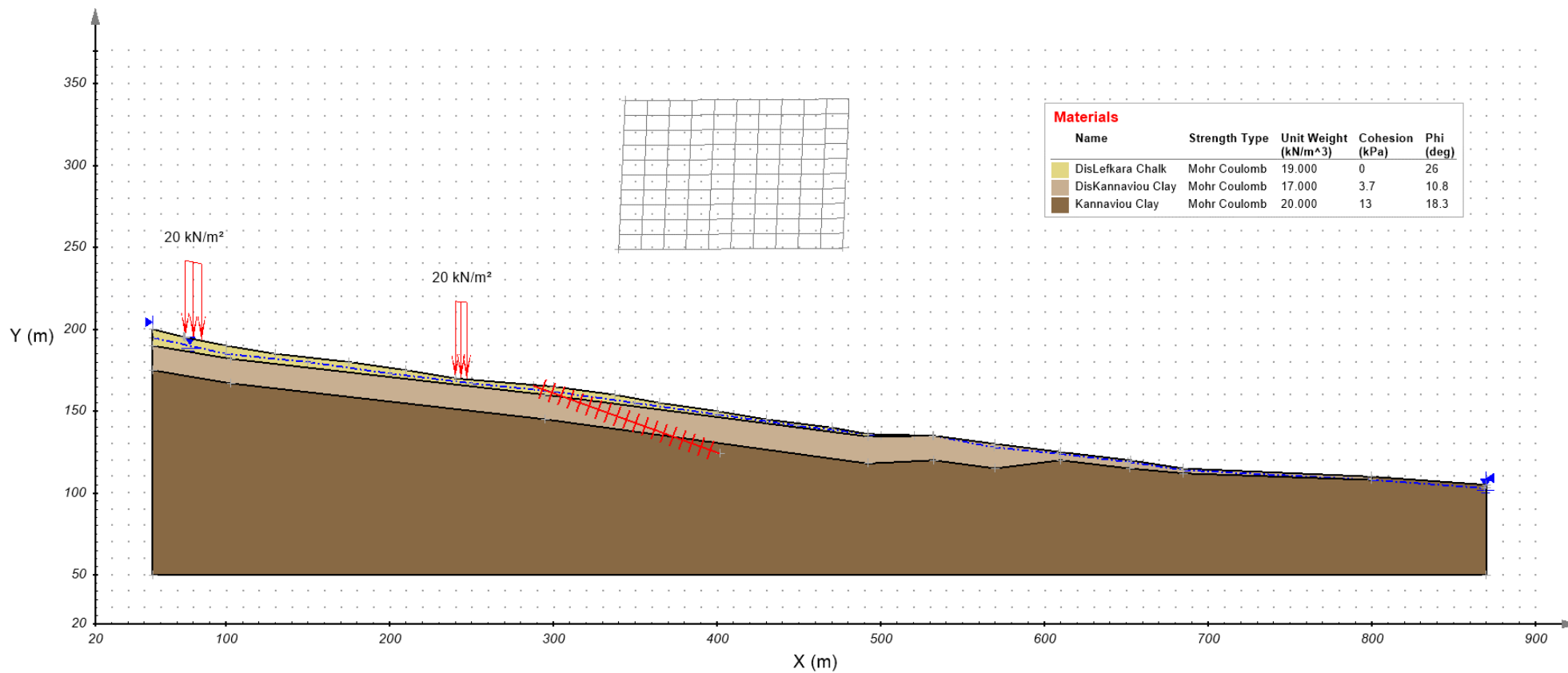
Παράρτημα Β : Μελέτη για εντοπισμό κυκλικής αστοχίας



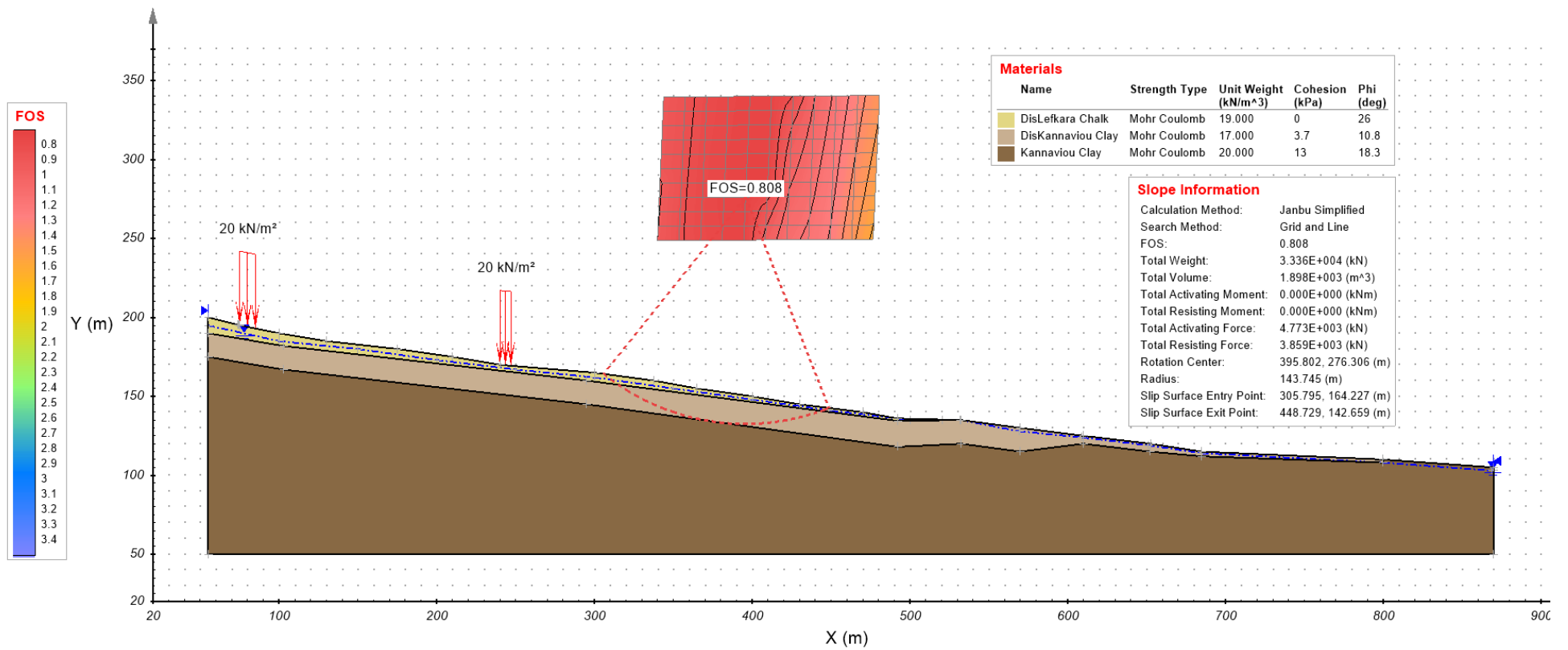
Εικόνα 97. Αναζήτηση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line)



Εικόνα 98. Αποτέλεσμα αναζήτησης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line) - Κυκλική επιφάνεια αστοχίας A

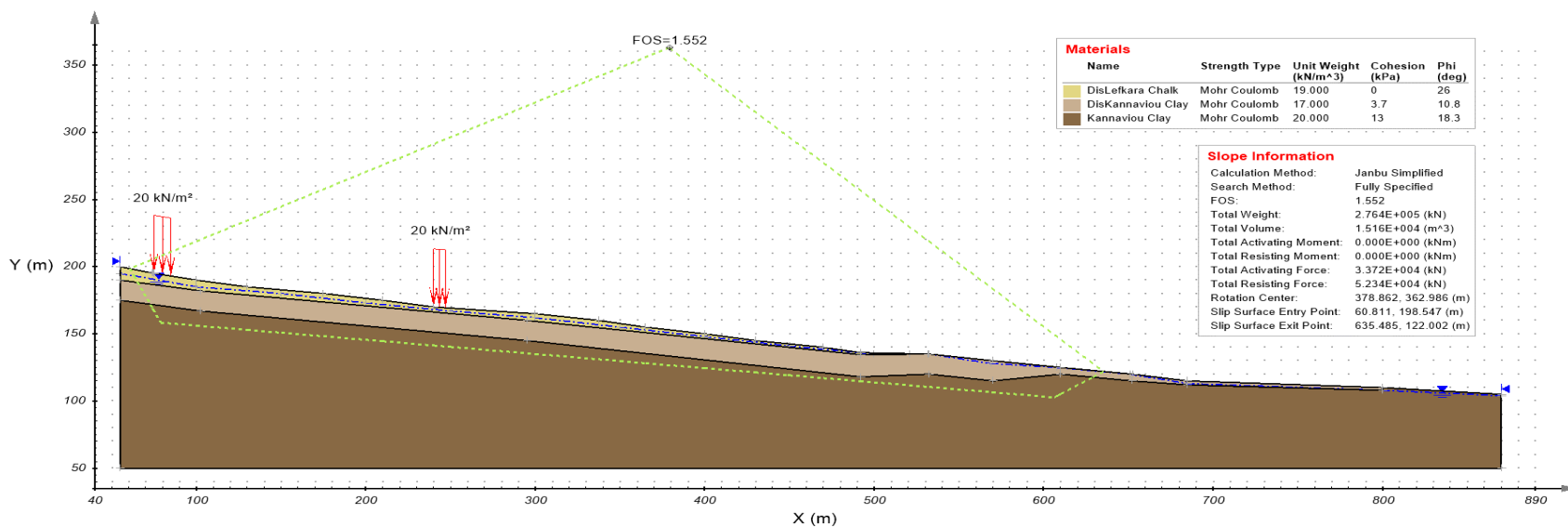
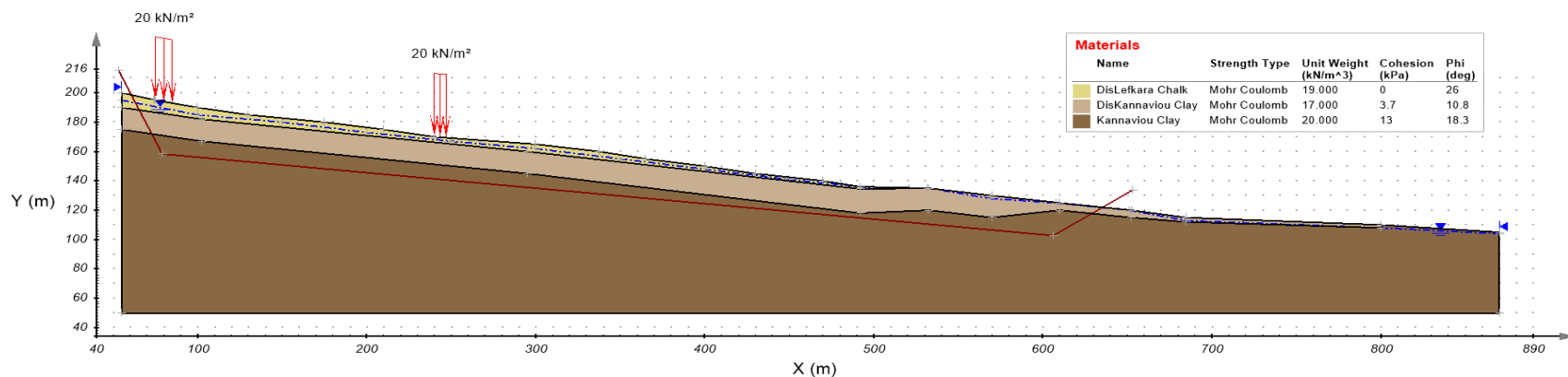


Εικόνα 99. Αναζήτηση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line)

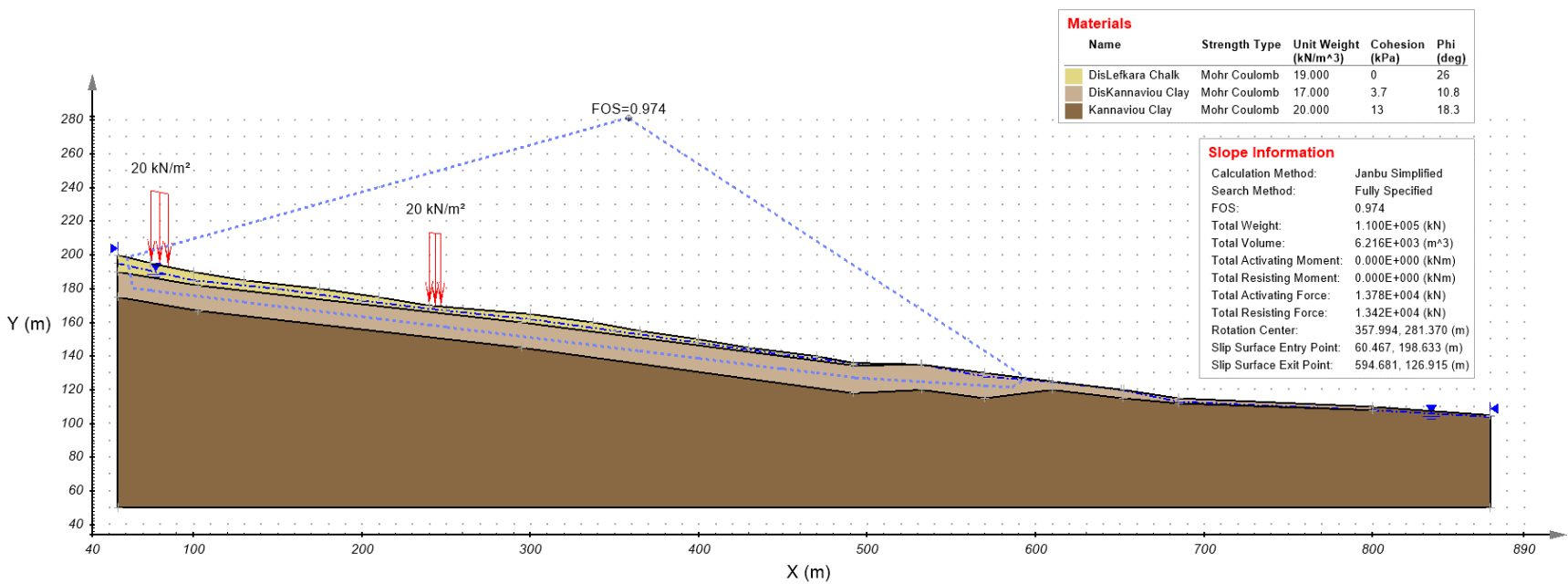
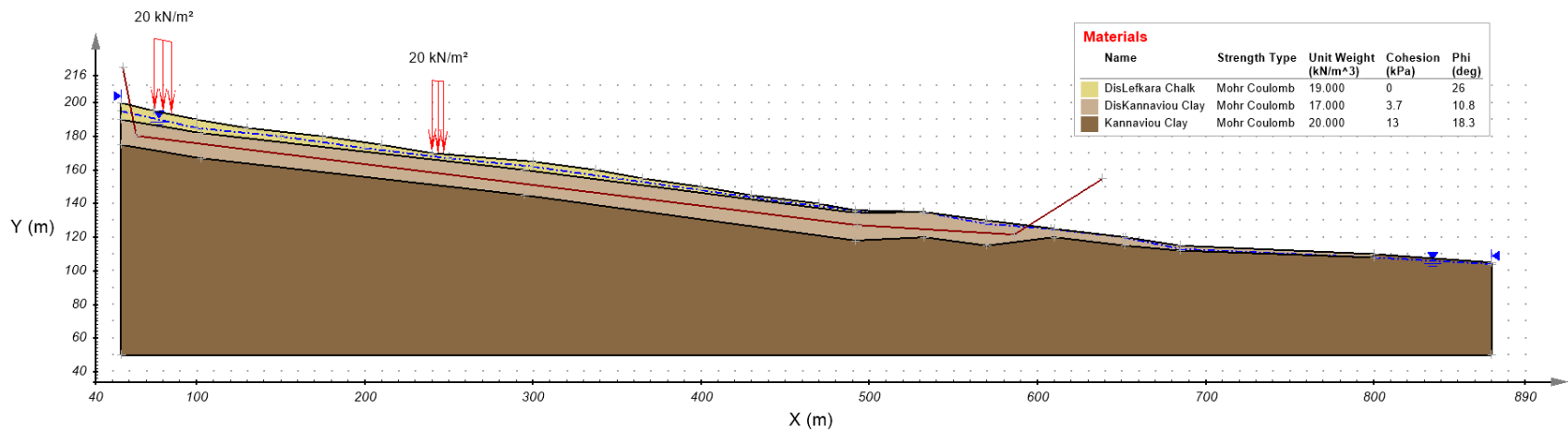


Εικόνα 100. Αποτέλεσμα αναζήτησης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με τη μέθοδο κανάβου και γραμμής (Grid and Line) - Κυκλική επιφάνεια αστοχίας B

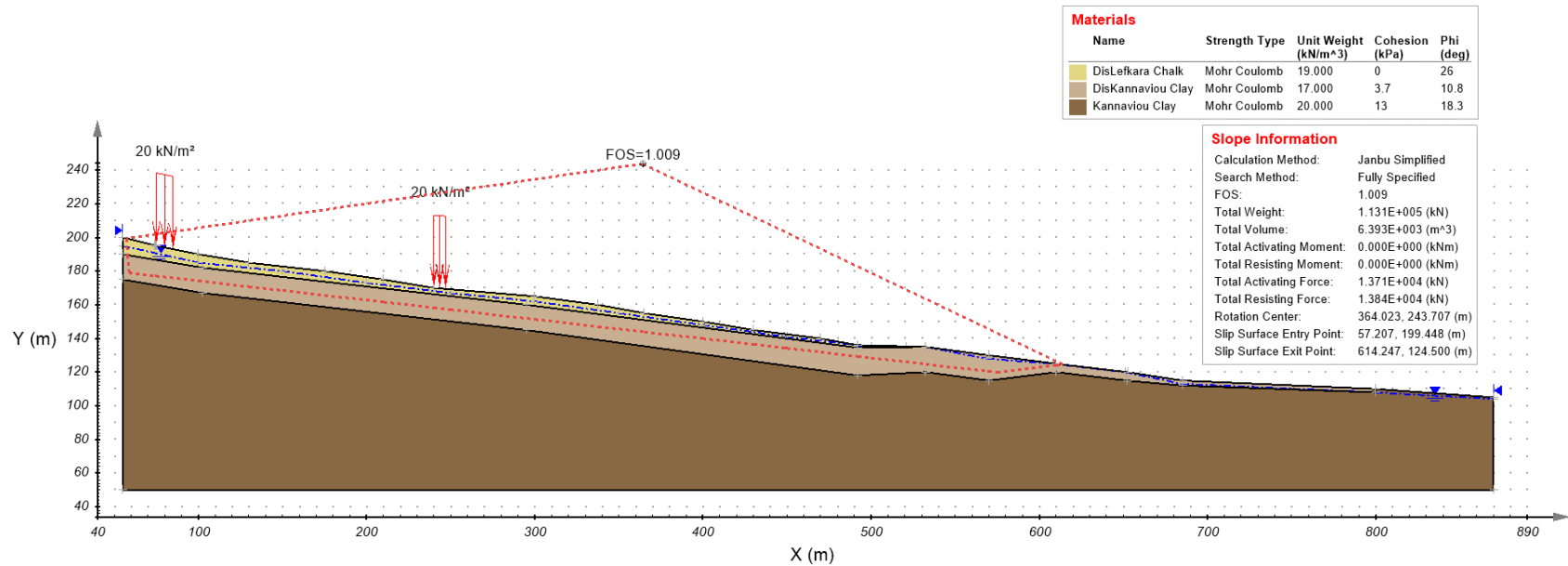
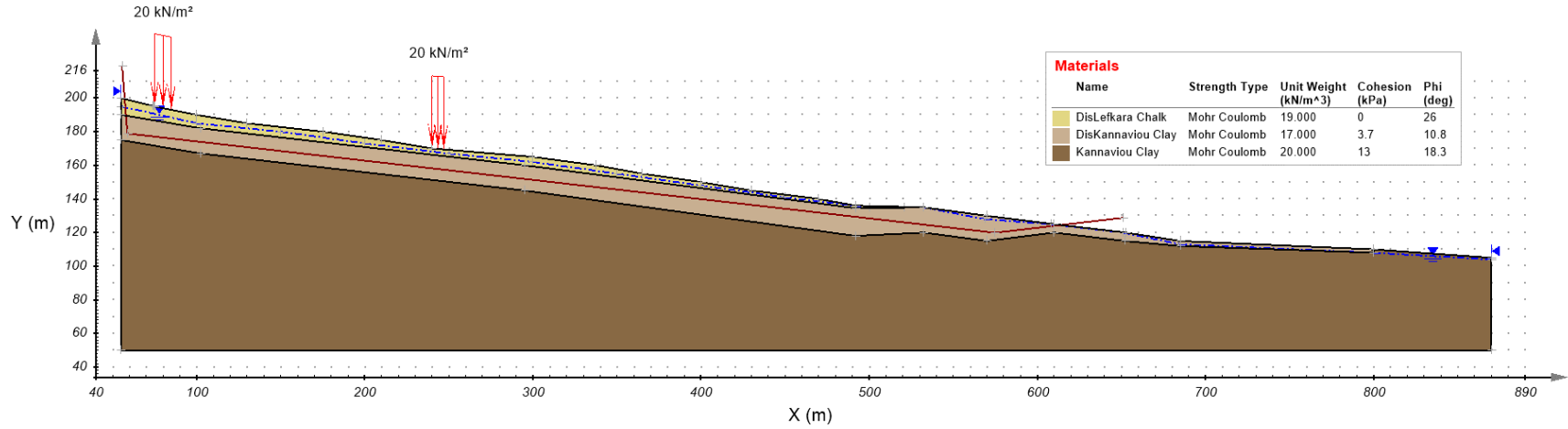
Παράρτημα Γ : Μελέτη για εντοπισμό μη κυκλικής αστοχίας



Εικόνα 101. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 1

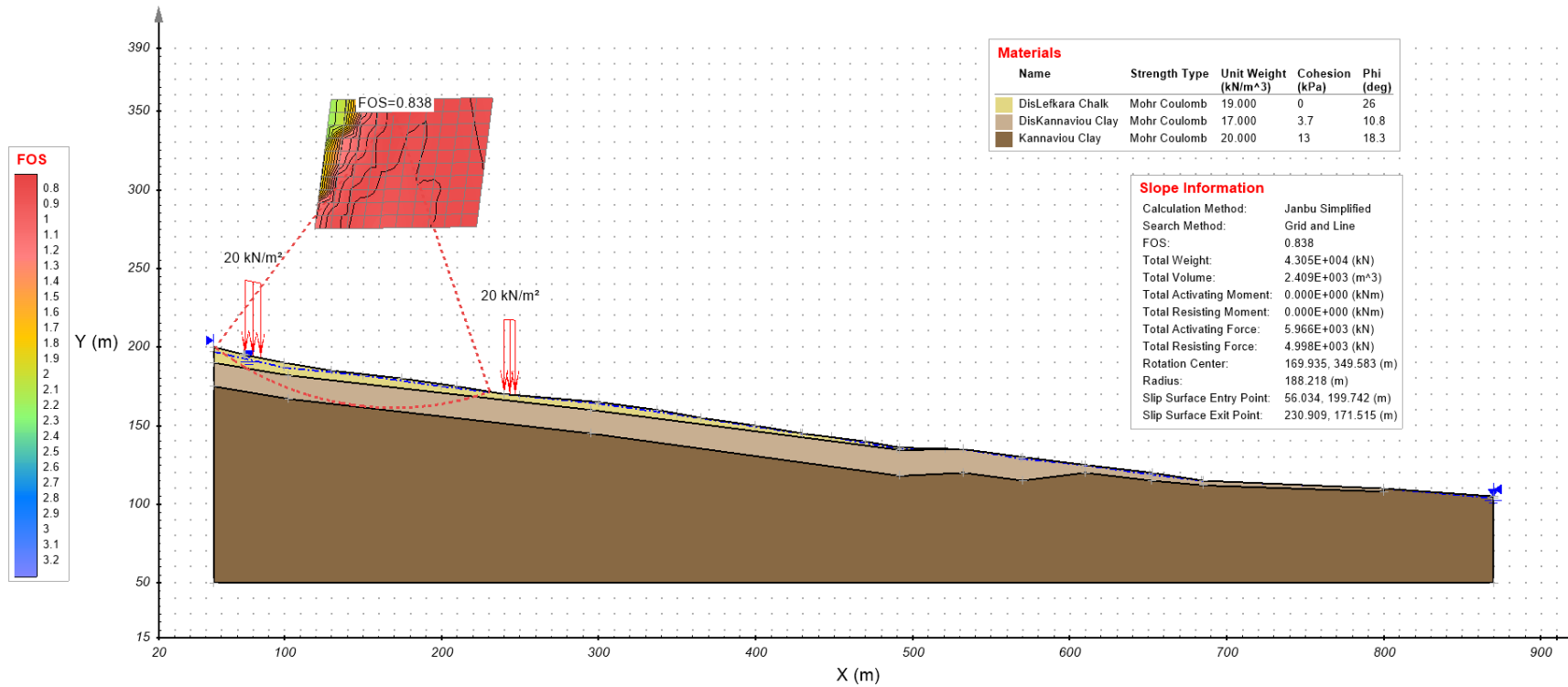


Εικόνα 102. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 2

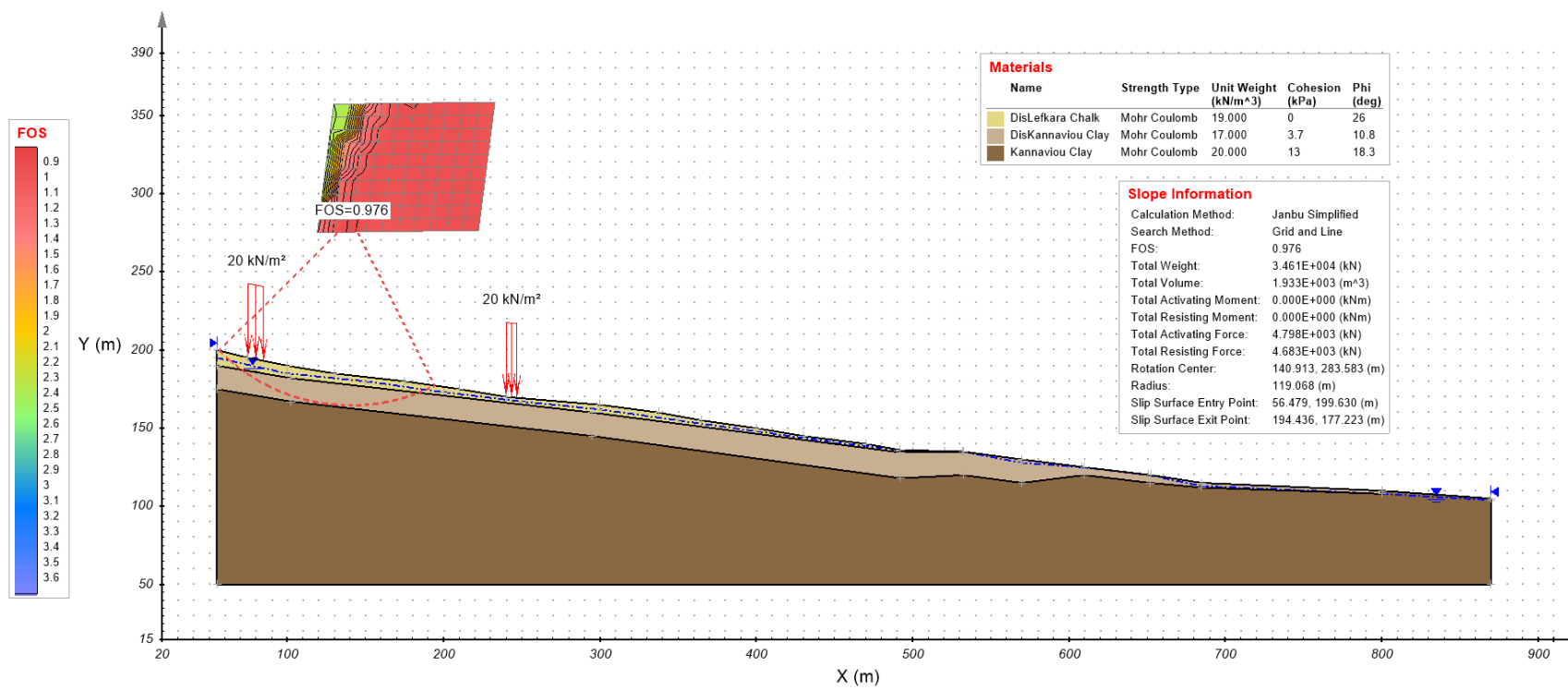


Εικόνα 103. Αναζήτηση μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας - Δοκιμαστική Επίλυση 3

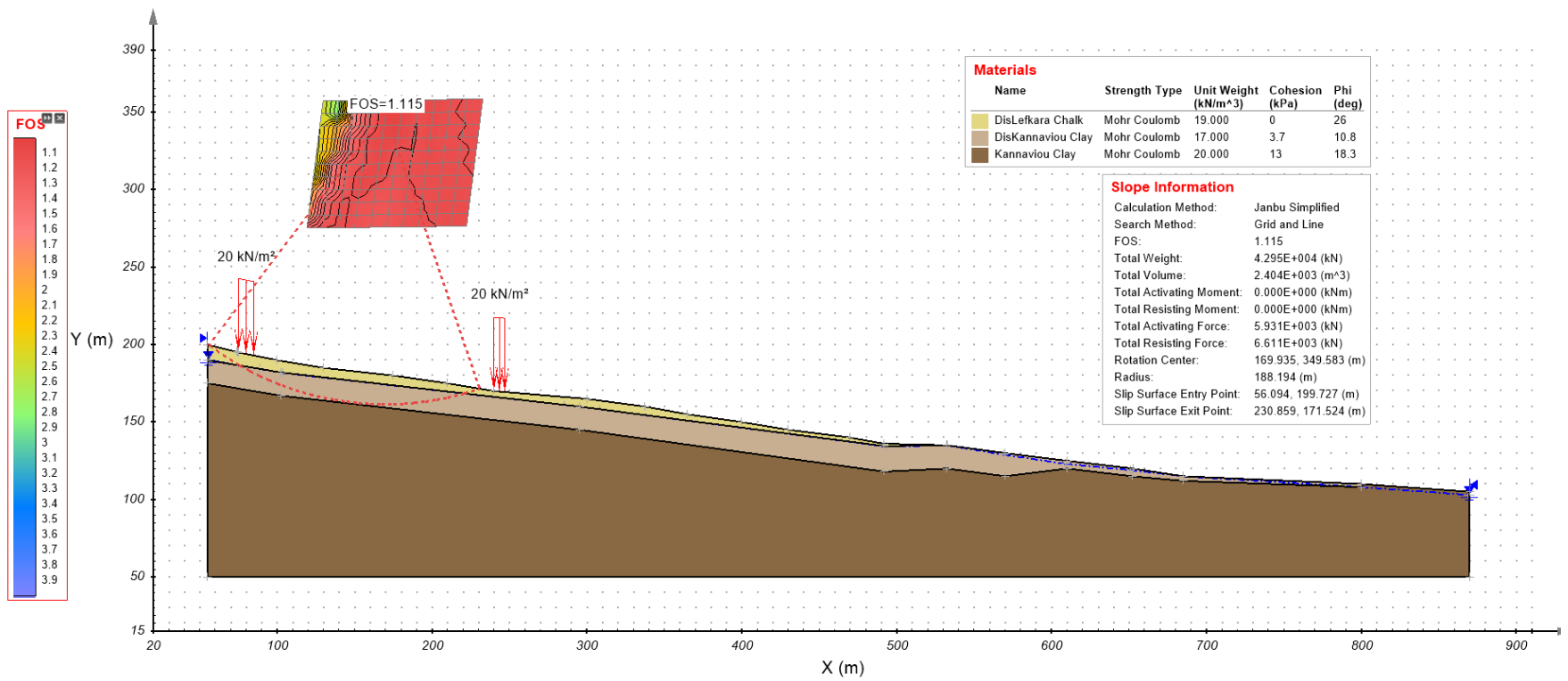
Παράρτημα Δ : Παραμετρική ανάλυση επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για κυκλική αστοχία



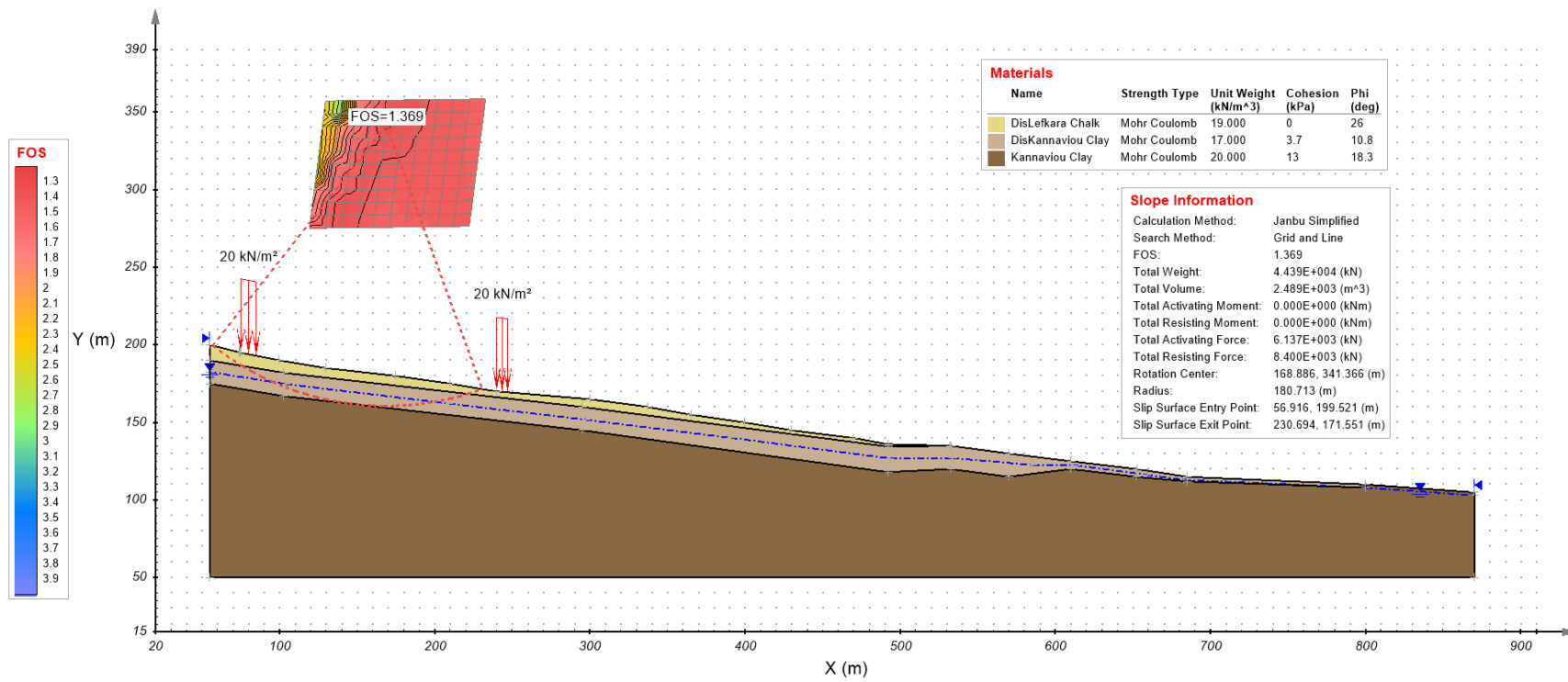
Εικόνα 104. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Α για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια



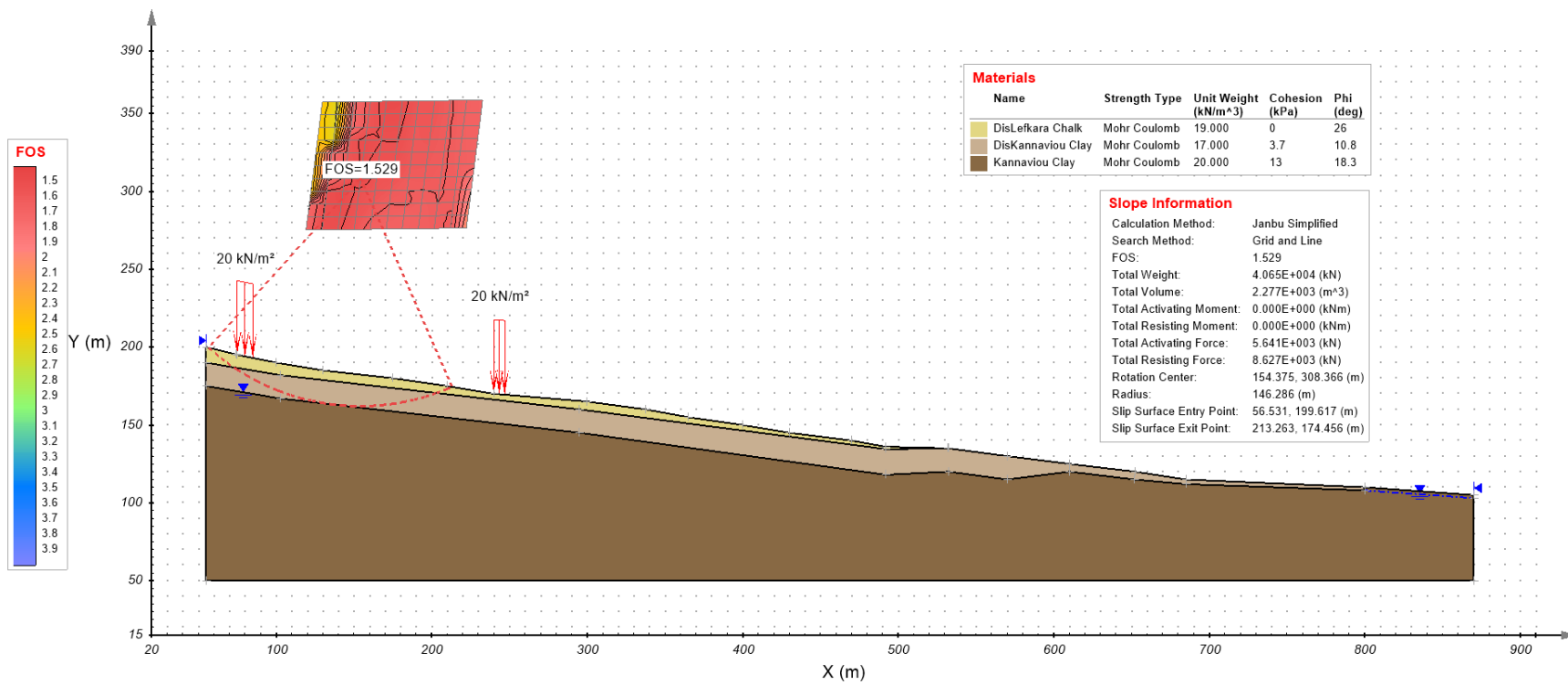
Εικόνα 105. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Α για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια



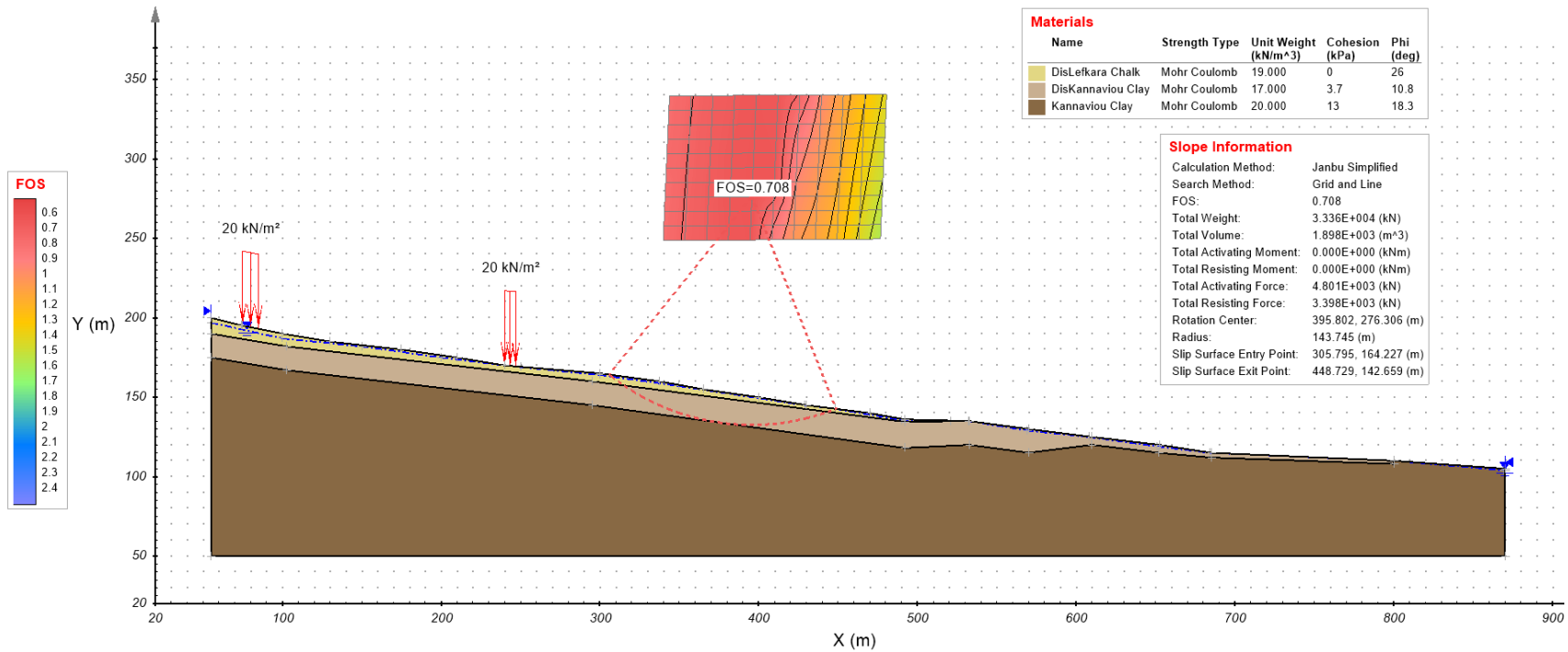
Εικόνα 106. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Α για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια



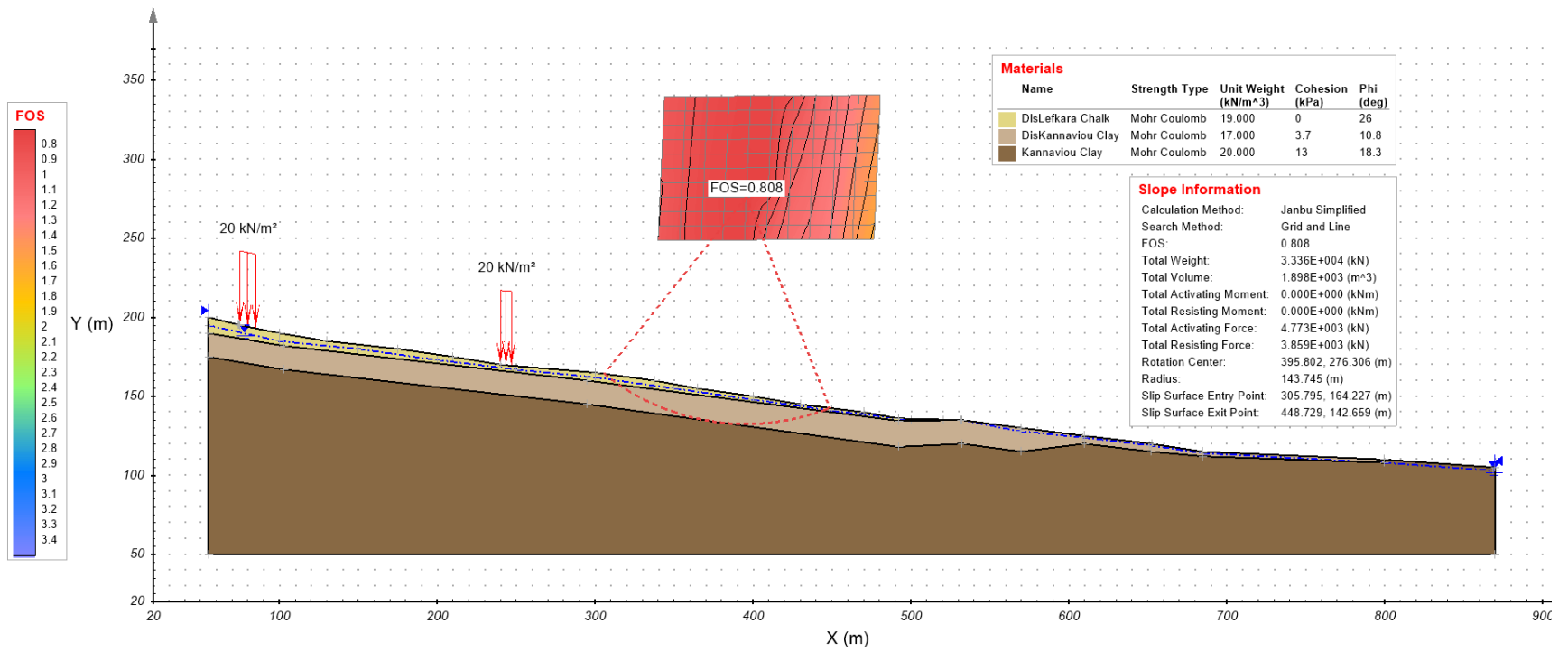
Εικόνα 107. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -15m από την επιφάνεια



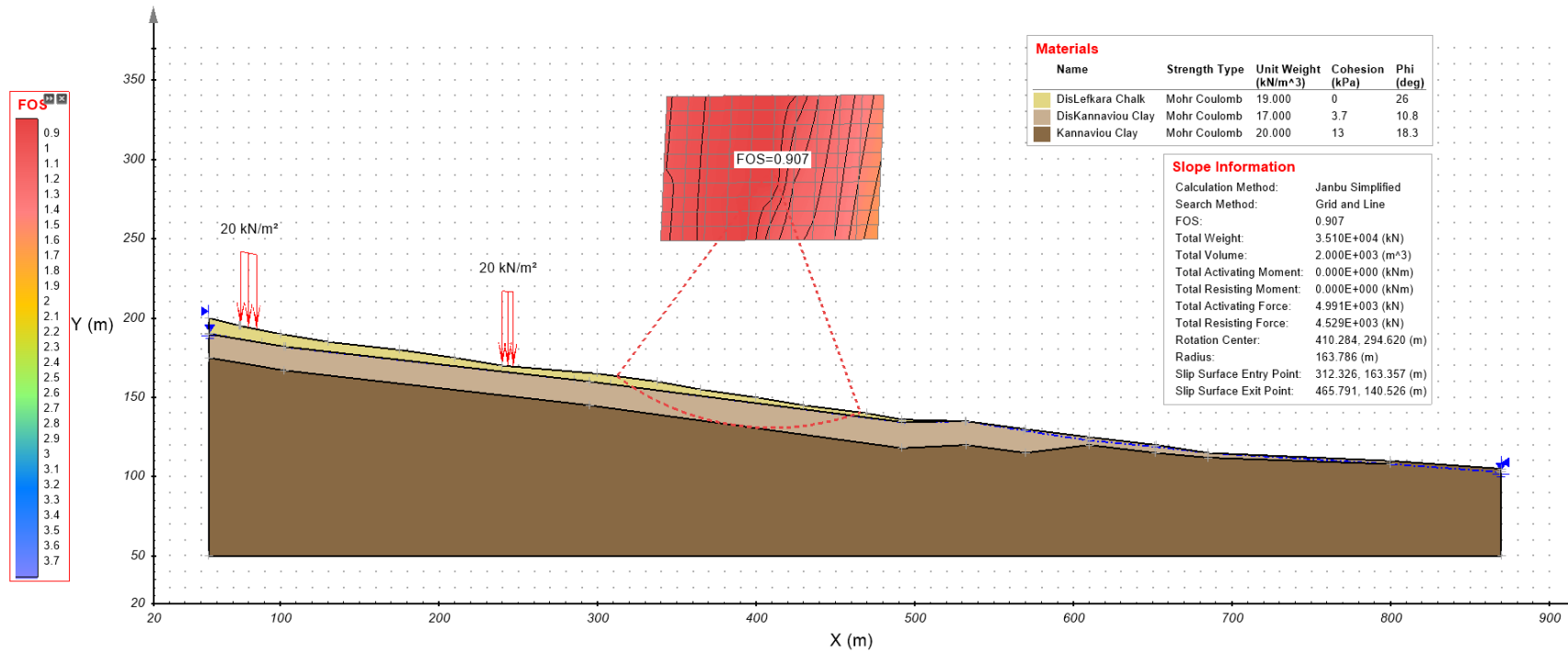
Εικόνα 108. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας A για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια



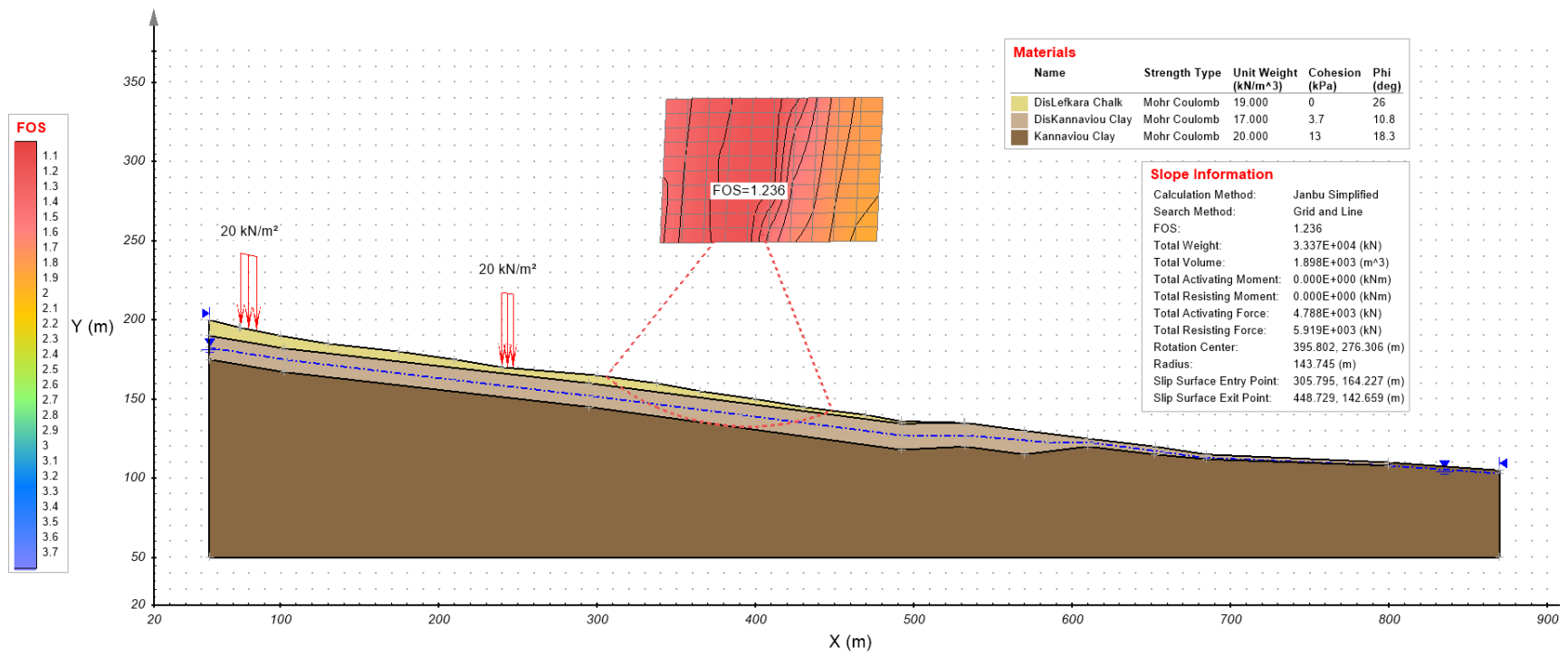
Εικόνα 109. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Β για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια



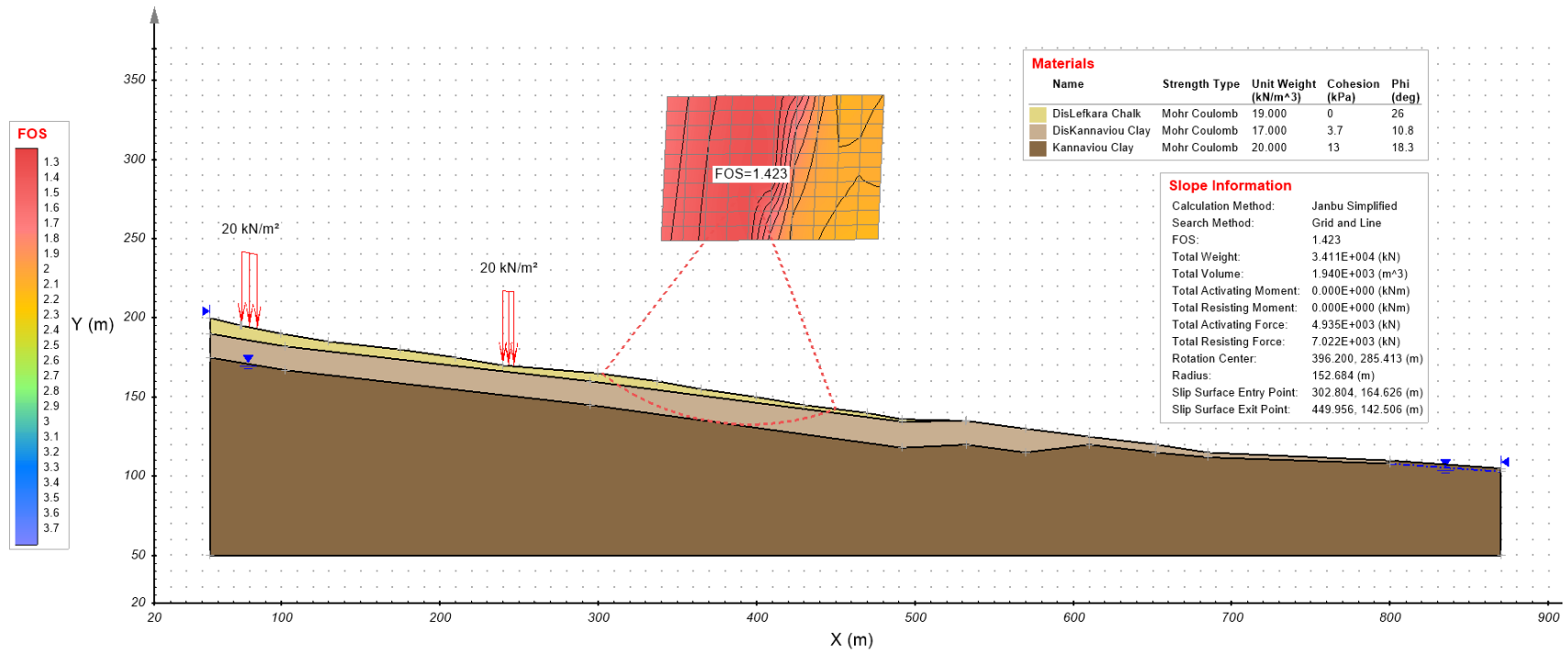
Εικόνα 110. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Β για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια



Εικόνα 111. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Β για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια

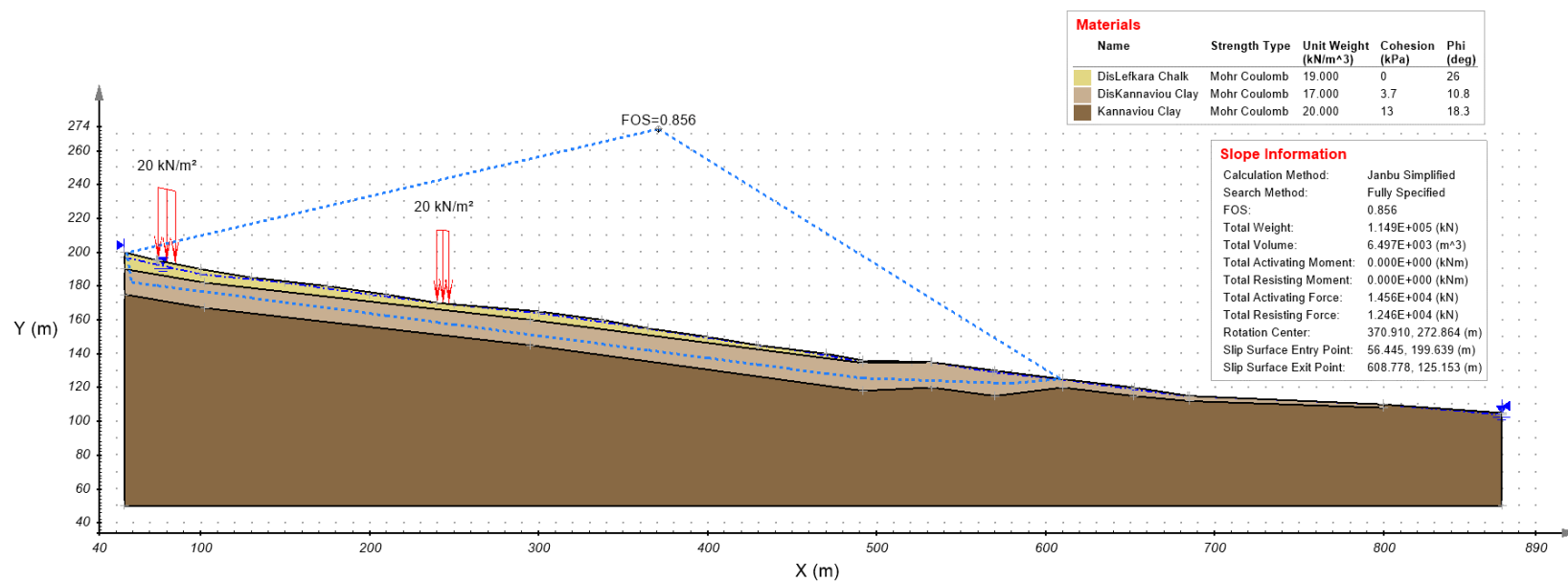


Εικόνα 112. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Β για Υ.Ο. -15m από την επιφάνεια

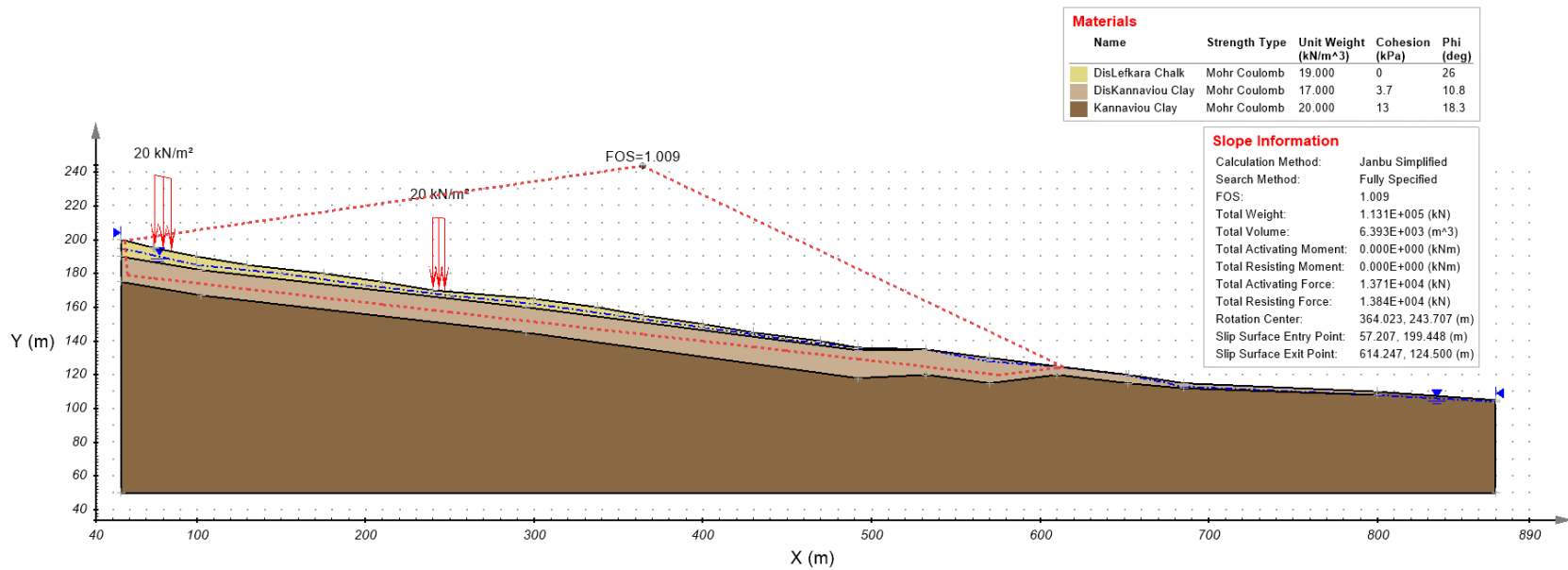


Εικόνα 113. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης Επιφάνειας Β για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια

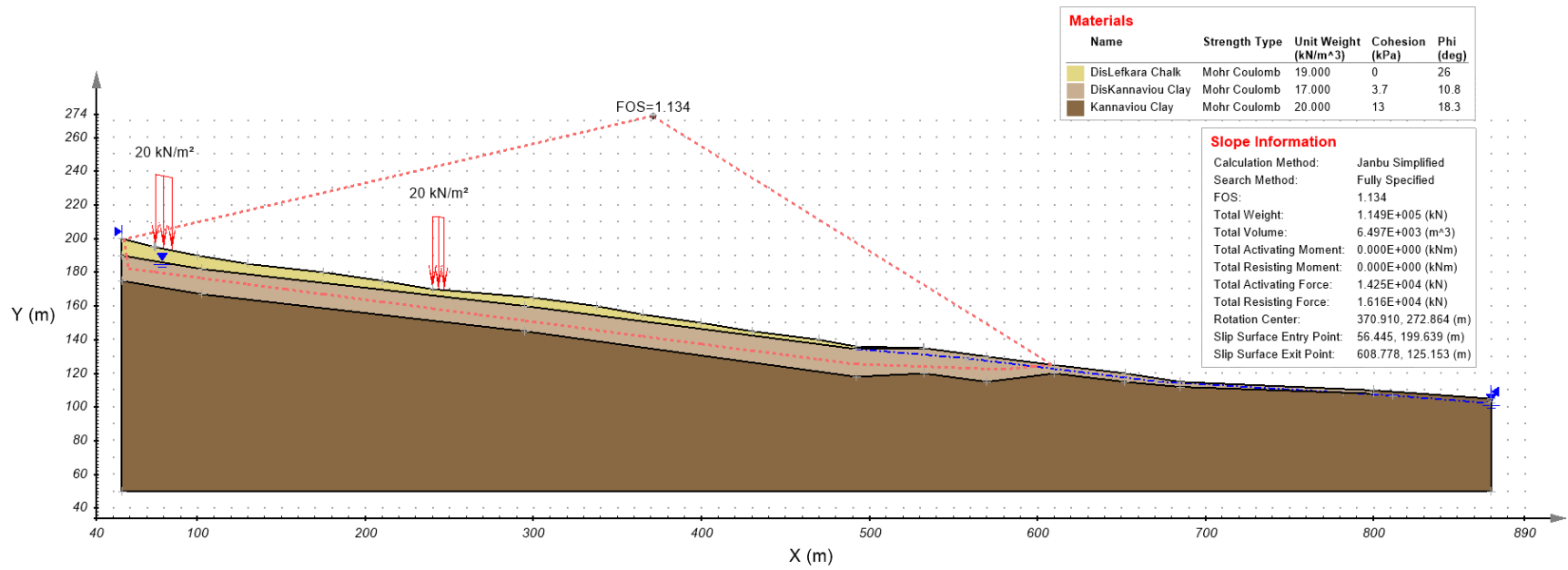
Παράρτημα Ε : Παραμετρική ανάλυση επιπέδου στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για μη κυκλική αστοχία



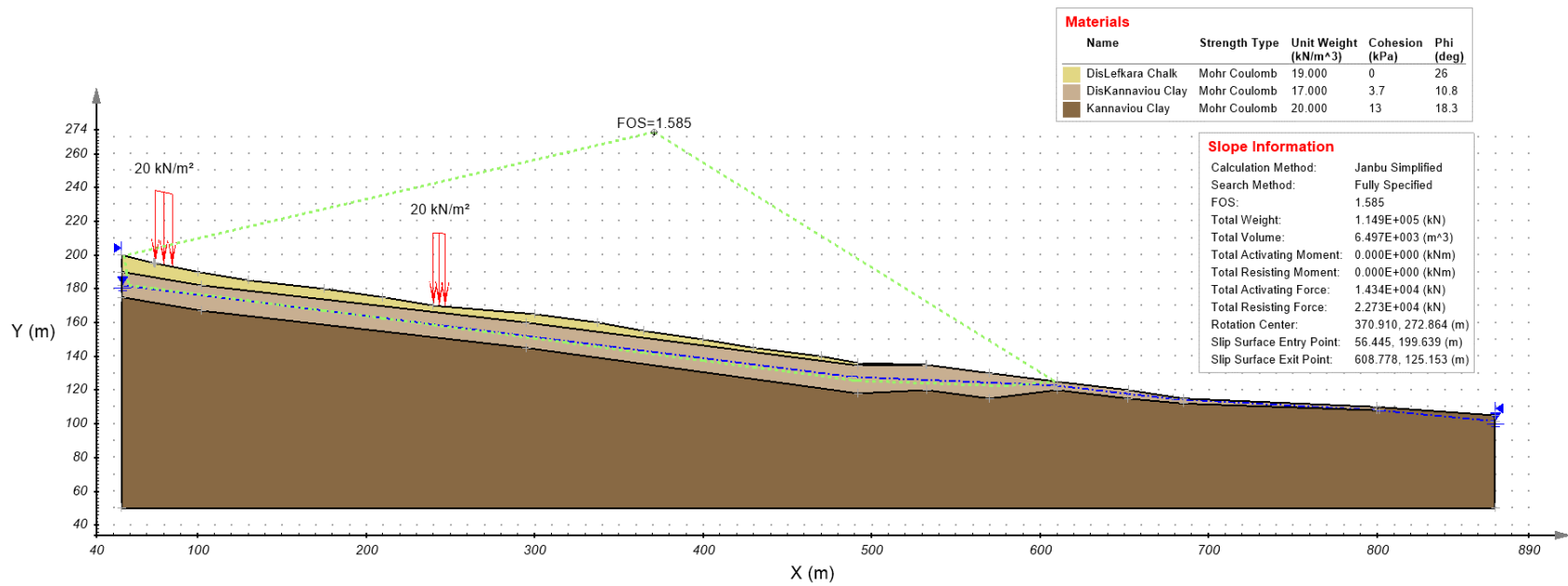
Εικόνα 114. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -2m από την επιφάνεια



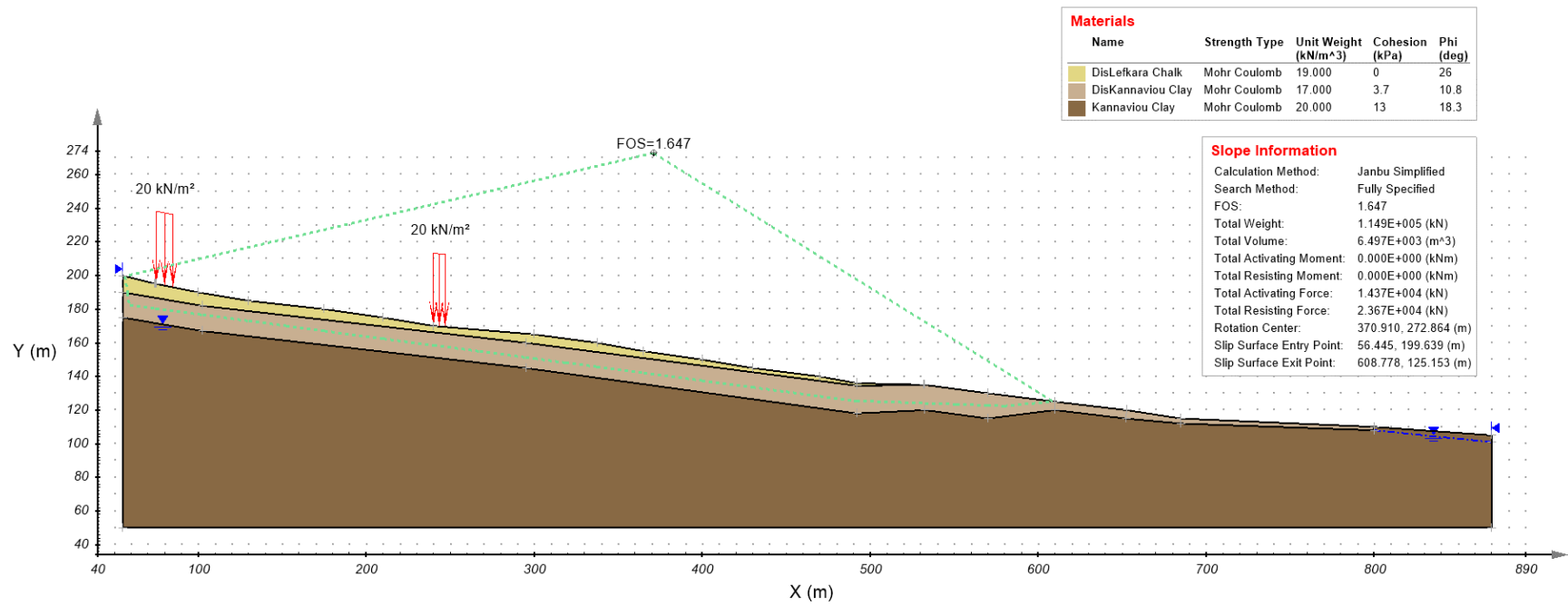
Εικόνα 115. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -5m από την επιφάνεια



Εικόνα 116. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφανείας αστοχίας για Υ.Ο. -8m από την επιφάνεια



Εικόνα 117. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για $Y.O. -15m$ από την επιφάνεια



Εικόνα 118. Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης μη-κυκλικής επιφάνειας αστοχίας για Υ.Ο. -25m από την επιφάνεια