



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΚΥΡΙΑΚΗ Δ. ΔΕΒΛΙΩΤΗ
MSc Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΔΕΛΦΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI
FACULTY OF SCIENCES
SCHOOL OF GEOLOGY

KYRIAKI D. DEVLITI
MSc Geologist

ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT IN THE ARCHAEOLOGICAL
SITE OF DELPHI

DOCTORAL THESIS

THESSALONIKI
2024





ΚΥΡΙΑΚΗ Δ. ΔΕΒΛΙΩΤΗ
MSc Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΔΕΛΦΩΝ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Τμήματος
Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Σεπτέμβριο του 2024

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 02/09/2024

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Νο: 246

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Ομ. Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων
Αν. Καθηγητής Γεώργιος Παπαθανασίου, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής
Καθηγητής Κωνσταντίνος Βουβαλίδης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Ομ. Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων
Αν. Καθηγητής Γεώργιος Παπαθανασίου
Καθηγητής Κωνσταντίνος Βουβαλίδης
Καθηγητής Κωνσταντίνος Βουδούρης
Καθηγήτρια Αναστασία Κυρατζή
Καθηγητής Κωνσταντίνος Λουπασάκης
Καθηγητής Ανδρέας Μπενάρδος



© Κυριακή Δ. Δεβλιώτη, MSc Γεωλόγος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΔΕΛΦΩΝ. – Διδακτορική Διατριβή

Το έργο παρέχεται υπό τους όρους Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

© Kyriaki D. Devlioti, MSc Geologist, 2024

All rights reserved.

ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT IN THE ARCHAEOLOGICAL SITE OF
DELPHI. – *Ph.D. Thesis*

The work is provided under the terms of Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

Citation:

Δεβλιώτη Κ. Δ., 2024. – Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων στον αρχαιολογικό χώρο Δελφών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμ. Γεωλογίας No 246, 239 σελ.

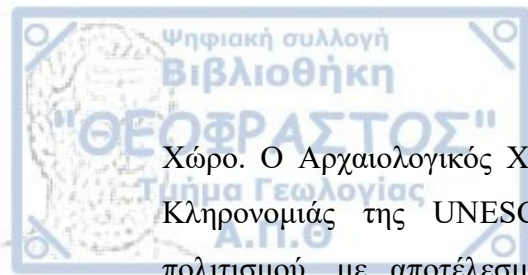
Devlioti K. D., 2024. – Rockfall hazard assessment in the archaeological site of Delphi. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of the School of Geology No 246, 239 pp.

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

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

Οι Μνημειακοί Χώροι, ιδίως κοντά σε μεγάλους ορεινούς όγκους, έρχονται αντιμέτωποι με φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Ανάλογη περίπτωση αποτελεί και η περιοχή έρευνας της παρούσας έρευνας. Συγκεκριμένα, στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύσσεται και εφαρμόζεται μεθοδολογία εκτίμησης και ανάλυσης της επικινδυνότητας (Hazard) στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας (Hazard) έναντι βραχοκαταπτώσεων πραγματοποιήθηκε μέσα από την τρισδιάστατη (3D) τροχομετρική ανάλυση, η οποία βασίστηκε στην τεχνολογία μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (ΣΜηΕΑ) (UAV). Τα στάδια της μεθοδολογίας, τα οποία αναπτύχθηκαν είναι τα ακόλουθα: α) καταγραφή της περιοχής έρευνας, με τη λήψη δεδομένων από την πτήση με UAV, β) επεξεργασία των πρωτογενών τρισδιάστατων (3D) νεφών σημείων, δημιουργία πολύ υψηλής ανάλυσης δεδομένων και τρισδιάστατων μοντέλων (ορθοφωτογραφία, ψηφιακό μοντέλο εδάφους) και εξαγωγή των στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών (γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης) και της απόστασης μεταξύ των επιφανειών των ασυνεχειών των ίδιων οικογενειών (spacing), σε εμμένουσα, και μη, κατάσταση, με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών πακέτων, γ) χαρτογράφηση της συνολικής έκτασης του ασβεστολιθικού πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών και εκτίμηση της επιδεκτικότητας (susceptibility) των βραχοκαταπτώσεων, με τη χρήση του ενιαίου τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud) που δημιουργήθηκε για την περιοχή έρευνας, από τη λήψη πολλαπλών αεροφωτογραφιών με UAV. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση και υπολογισμός του όγκου (m^3) των κενών (scars) των βραχώδων τεμαχών, στην επιφάνεια του βραχώδους πρανούς, από προηγούμενα φαινόμενα αστοχίας. Συνολικά αναγνωρίστηκαν και μετρήθηκαν 119 μπλοκ (scars) επάνω στην επιφάνεια του ασβεστολιθικού πρανούς, με μέση τιμή αποκολλημένου βραχώδους υλικού ίση με $22,2 m^3$. Παράλληλα εντοπίστηκαν και μετρήθηκαν οι όγκοι (m^3) των μπλοκ που έχουν αστοχήσει και βρίσκονται εντός του Χώρου, με μέση τιμή όγκου $7,6m^3$, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του κερματισμού (fragmentation), από τη στιγμή της αποκόλλησής τους από το πρανές, μέχρι την απόθεσή τους στην τελική τους θέση

στο Χώρο, δ) εκτίμηση και ανάλυση της επικινδυνότητας (Hazard) έναντι βραχοκαταπτώσεων, με πραγματοποίηση τρισδιάστατων τροχομετρικών αναλύσεων μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1, με τη χρήση του εναύσματος του σεισμού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της καταστροφικής σεισμικής ακολουθίας του 1870 και υπολογίστηκε η μέγιστη ταχύτητα εδαφικής κίνησής της PGV (m/s) ίση με 0,41 m/sec. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τροχιακές αναλύσεις προσομοίωσης, από τέσσερις θέσεις-ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, οι οποίες καλύπτουν το σύνολο του Αρχαιολογικού Χώρου. Για τις ανάγκες της ανάλυσης δημιουργήθηκαν τα εξής σενάρια: 1) με σεισμικές (PGV=0,41m/sec) και 2) με ασεισμικές (PGV=0 m/sec) συνθήκες και 1) με διάμετρο (d) βραχωδών τεμαχών ίση με 1m και 2) με διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε θέση αντίστοιχα. Προσδιορίστηκε, επομένως, ο αριθμός των τροχιών, η κινητική ενέργεια (kJ) και η ταχύτητα διάδοσης (m/sec) που αναπτύσσουν τα τεμάχια κατά την τροχιακή τους πορεία, η πιθανότητα διάδοσης (Ppropag) των βραχωδών τεμαχών και τα σημεία τερματισμού τους (stop points) στο Χώρο και ο ελάχιστος χρόνος πραγματοποίησης μιας τροχιάς. Παράλληλα, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας αξιολογήθηκαν οι μεταβολές που παρατηρούνται στη χωρική διακύμανση των τιμών της έντασης (kJ), με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1, σε τρισδιάστατο περιβάλλον (3D), καθώς και του λογισμικού Rocfall (Rocscience Inc.), με τη δημιουργία διατομών, σε δισδιάστατο περιβάλλον (2D), και για τις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, παρουσιάζοντας παρόμοια εικόνα διακύμανσης τιμών και στα δύο περιβάλλοντα, ε) ποιοτική εκτίμηση του βαθμού διακινδύνευσης (Risk), με παράλληλη αξιολόγηση της πιθανότητας διάδοσης (Ppropag) και προσέγγισης των βραχωδών τεμαχών στα στοιχεία του Χώρου που βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk) και το σημείο τερματισμού τους μέσα στον Μνημειακό Χώρο (stop points). Η παραπάνω αξιολόγηση του βαθμού διακινδύνευσης (Risk) επιτεύχθηκε με τη δημιουργία πινάκων (Risk matrix) και χαρτών χωρικής κατανομής, με τη χρήση του ArcMap, σε περιβάλλον ArcGIS, τόσο για τις Άμεσες Υλικές, όσο και για τις Άμεσες Άυλες απώλειες. Στόχος, λοιπόν, της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας λεπτομερούς μεθοδολογίας εκτίμησης της επικινδυνότητας (Hazard) και ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (Risk) στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, τα αποτελέσματα της οποίας θα αξιοποιηθούν για την πρόταση ορθών παρεμβάσεων για την αντιμετώπιση των καταπτώσεων βράχων στον Μνημειακό

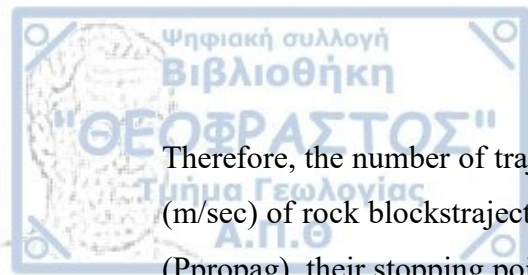


Χώρο. Ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών, Μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της UNESCO, αποτελεί σύμβολο και κέντρο του ελληνικού πολιτισμού, με αποτέλεσμα η βιωσιμότητά του, καθώς και η ασφάλεια του προσωπικού και των χιλιάδων επισκεπτών που συρρέουν σε αυτόν, καθημερινά, να αποτελούν τον βασικό στόχο της παρούσας έρευνας.



ABSTRACT

Monumental sites, especially near steep mountainous areas, are often facing rockfall phenomena. A corresponding case is the research area. In this PhD thesis, a methodology for assessing, evaluating and analyzing Rockfall Hazard were developed and applied in the Archaeological Site of Delphi, in Greece. Specifically, rockfall Hazard assessment was carried out through a three-dimensional (3D) trajectometric analysis based on UAV technology (Unmanned Aerial Vehicles). The developed stages of the methodology are the following: a) recording of the study area, by receiving UAV data b) processing of the raw three-dimensional (3D) point clouds, generation of accurate and high resolution data and three-dimensional models (orthophotograph, digital terrain model) and extraction of discontinuity orientation data (dip angle, dip direction) and the distance between the surfaces of the discontinuities belonging in the same discontinuity sets (spacing), in a persistent and non-persistent state, using specialized software packages, c) mapping of the rocky cliff, upwards the Archaeological Site of Delphi and rockfall susceptibility assessment, using the united 3D point cloud of the study area, created from multiple UAV aerial photographs. At this stage mapping and calculation of the rocky blocks (scars) volume (m^3), originated from previous rockfall phenomena, was carried out. A total of 119 blocks (scars) were identified and measured on the limestone surface, with an average detached rock block value equal to 22.2 m^3 . At the same time, fallen rock blocks volume (m^3) inside the Monumental Area were identified and also measured, with an average volume value equal to 7.6 m^3 , taking into account the fragmentation degree, from the detachment till their final deposition in the Archaeological Site, d) rockfall (Hazard) assessment and analysis through three-dimensional trajectometric analyses within RocPro3D v.6.1 software with earthquake triggering factor. In particular, the data of the catastrophic seismic sequence of 1870 were used and the initial PGV velocity (m/s) was calculated equal to 0.41 m/sec. After that, trajectometric simulation analyses from four likely rockfall positions-zones was carried out, covering the whole Area. On demand of this analysis, the following scenarios were created: 1) with seismic (PGV=0.41 m/sec) and 2) with non-seismic (PGV=0 m/sec) conditions and 1) with a rock block diameter (d) equal to 1m and 2) with a diameter (d) equal to 1.3 m, 1.5 m, 1.3 m and 1.5 m, for each zone respectively.



Therefore, the number of trajectories, the kinetic energy (kJ), the propagation velocity (m/sec) of rock block trajectory, the bouncing height, their probability of propagation (P_{propag}), their stopping points (stop) and their impact in the Archaeological Site and the minimum time for a trajectory to be completed were determined. In order to observe the changes at the intensity (kJ) spatial variation, RocPro3D v.6.1 software, in a three-dimensional environment (3D), as well as Rocfall software (Rocscience Inc.), by creating cross-sections for all four possible rockfall zones, in a two-dimensional (2D) environment were used, with a similar value variation in both environments, e) qualitative Rockfall Risk assessment, considering the probability of propagation (P_{propag}) variation and rock blocks approach at the elements of risk of the Site and their stopping points within the Monumental Area. The above Rockfall Risk assessment was achieved by creating tables (Risk matrix) and spatial distribution maps, using ArcMap, in ArcGIS environment, for both Direct Material and Direct Intangible losses. The aim of this PhD thesis is the development of a detailed rockfall hazard assessment and a rockfall qualitative risk assessment methodology in the Archaeological Site of Delphi, the results of which can be used in proposing the appropriate rockfall interventions in the study Area. The Archaeological Site of Delphi, a UNESCO World Heritage Site, is a symbol and the center of Greek culture. The sustainability of the Site, as well as staff and thousands of visitors safety constitute the main objective of the present work.





Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου σε όλα τα πρόσωπα, τα οποία διαδραμάτισαν πολύ σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Βασίλειο Χρηστάρα για την ανάθεση του θέματος της διδακτορικής μου διατριβής, την εμπιστοσύνη του, τη διαρκή στήριξή του, την καθοδήγησή και τις συμβουλές του σε όλη την πορεία εκπόνησης της διατριβής μου.

Πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ και μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου, Γεώργιο Παπαθανασίου, για την άποψη συνεργασία, την εμπιστοσύνη του στη δουλειά μου και τις πολύτιμες συμβουλές του για την ολοκλήρωση της έρευνας της διατριβής μου. Ο κ. Παπαθανασίου ήταν πάντα διαθέσιμος να με συμβουλέψει και να εργαστούμε και τον ευχαριστώ πολύ.

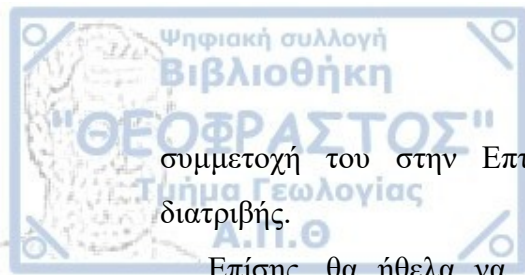
Θερμά ευχαριστώ τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Βουβαλίδη, Πρόεδρο του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ και Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου για την καθοδήγηση, τις εποικοδομητικές του συμβουλές και τη στήριξή του σε όλη την πορεία εκπόνησης της διατριβής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, Αναστασία Κυρατζή, για την άποψη συνεργασία μας και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, Κωνσταντίνο Βουδούρη, με τον οποίο έχω την τύχη να συνεργάζομαι από τα προπτυχιακά μου χρόνια και τον ευχαριστώ για όλη τη στήριξη και τις συμβουλές του στην πορεία των ακαδημαϊκών μου χρόνων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., Κωνσταντίνο Λουπασάκη για τις χρήσιμες συμβουλές του και τη συμμετοχή του στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της διδακτορικής μου διατριβής.

Θερμά ευχαριστώ τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Ανδρέα Μπενάρδο, για τα εποικοδομητικά σχόλια και τη



συμμετοχή του στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της διδακτορικής μου διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, Βασίλειο Μαρίνο, τον οποίο είχα την τύχη να έχω καθηγητή στις Μεταπτυχιακές μου σπουδές. Τον ευχαριστώ για τις συμβουλές και τη βοήθειά του στα πρώτα χρόνια εκπόνησης της διατριβής μου.

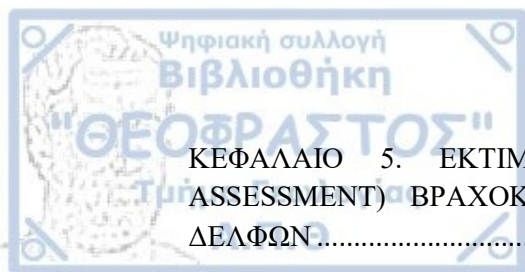
Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στο σύζυγό μου, Νικόλαο Γιαννακόπουλο, MSc Χημικό Μηχανικό και εξάίρετο επιστήμονα, για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθειά του όλα τα χρόνια των σπουδών μου, την τεράστια στήριξη και την απλόχερη αγάπη του καθημερινά.

Φυσικά τίποτε από όλα αυτά δε θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την απεριόριστη και ανιδιοτελή αγάπη και συμπαράσταση της οικογένειάς μου, του μπαμπά μου, της μαμάς μου και της αδερφής μου Τζένης, οι οποίοι με στηρίζουν και με καθοδηγούν όλα τα χρόνια της ζωής μου, με απεριόριστη αγάπη, δίνοντάς μου αξίες, ώστε να προοδεύω με σεβασμό στον εαυτό μου και τους γύρω μου. Τους ευχαριστώ, τους αγαπώ και είμαι πολύ τυχερή που είναι η Οικογένειά μου.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	10
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	17
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ-ΣΤΑΔΙΑ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	21
1.3 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	23
1.3.1 Κατολίσθηση (landslide).....	24
1.3.2 Βραχοκατάπτωση (Rockfall).....	27
1.3.3. Επιδεκτικότητα (Susceptibility)	29
1.3.4 Επικινδυνότητα (Hazard-H)	33
1.3.5 Τρωτότητα (Vulnerability) (V x EaR).....	36
1.3.6 Διακινδύνευση (Risk-R).....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	38
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΥΘΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	38
2.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	43
2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	58
2.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ 1870.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΟΛΗΨΙΑ ΑΠΟ ΠΤΗΣΗ UAV	75
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	75
3.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	78
3.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	80
3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	84
3.3.1 Τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud)	86
3.3.2 Αποτελέσματα του προσανατολισμού (Dip/Dip Direction) των ασυνεχειών	88
3.3.3 Αποτελέσματα της απόστασης (spacing) των ασυνεχειών.....	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (SUSCEPTIBILITY) ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ.....	104
4. 1 ΓΕΝΙΚΑ	104
4.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ (VOLUME) ΤΩΝ ΚΕΝΩΝ (SCARS) ΤΩΝ ΑΠΟΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	106
4.3 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΗΔΗ ΑΣΤΟΧΗΣΕΙ (ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ).....	118



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT) ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΔΕΛΦΩΝ.....	131
5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	131
5.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ROCPRO3D v.6.1	137
5.2.1. Παρουσίαση Χαρτών και Φακέλων (Maps and envelopes) - Εκτίμηση Επικινδυνότητας (Hazard Assessment)	149
5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	154
5.3.1.Αποτελέσματα τροχομετρικής προσομοίωσης με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41m/sec$) και μέση διάμετρο βραχοτεμαχών ($d=1m$ και (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.	154
5.3.2.Αποτελέσματα της τροχομετρικής προσομοίωσης, με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$) και μέση διάμετρο βραχοτεμαχών $d=1m$ και με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.	169
5.3.3 Σύγκριση των δύο περιπτώσεων προσομοιώσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων.....	183
5.3.4 Τροχιακές αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού RocFall και ενεργειακό καθεστώς με τη χρήση των λογισμικών RocFall και ROCPRO3D v.6.1	191
5.3.5. Τρισδιάστατη αποτύπωση της επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία Cadanav.....	201
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ (RISK).....	208
6.1 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	208
6.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ (QUALITATIVE RISK ASSESSMENT)	213
6.2.1 Προσδιορισμός των στοιχείων υπό διακινδύνευση (elements at risk).....	213
6.2.2 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	217
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	225
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	229

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

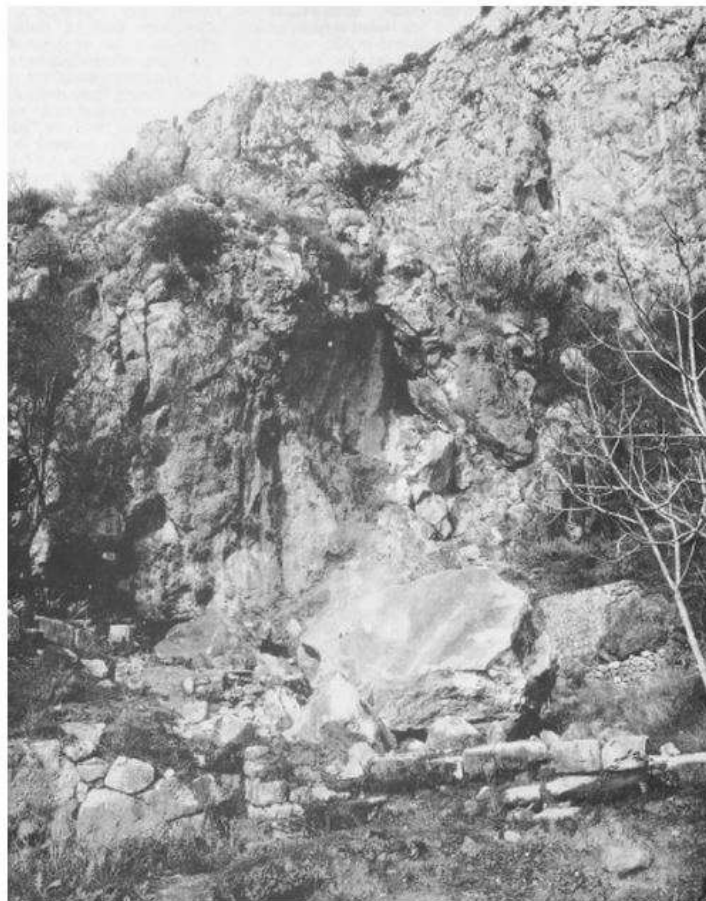
Οι φυσικοί κίνδυνοι αποτελούν μεγάλη και συνεχή απειλή σε πολλές περιοχές, παγκοσμίως, καθώς τις περισσότερες φορές συνοδεύονται από έντονα και ακραία καιρικά και κλιματικά φαινόμενα, με σοβαρές συνέπειες στην κοινωνία, την οικονομία, και τον τουρισμό. Οι κατολισθήσεις αποτελούν έναν από τους πιο καταστροφικούς φυσικούς κινδύνους και συχνά προκαλούν σημαντικές καταστροφές σε υποδομές, στην Πολιτιστική Κληρονομιά, ενώ μπορεί να αποτελέσουν απειλή για την ανθρώπινη ζωή. Η ορθή πρόβλεψη και η έκδοση προειδοποιήσεων, σε συνδυασμό με την προετοιμασία και την εκπαίδευση, σε συλλογικό επίπεδο, αλλά και μεμονωμένα, ώστε να καταφέρουν να προετοιμαστούν οι κοινωνίες αναλόγως, μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη αντιμετώπιση σε ανάλογα φαινόμενα. Οι κατολισθήσεις και οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν φαινόμενα, τα οποία ενεργοποιούνται, συνήθως, από σεισμική δράση ή έντονη βροχόπτωση, έχοντας τοπική, κυρίως, δράση και γι αυτό το λόγο είναι δύσκολο, τις περισσότερες φορές, να προσδιοριστούν ακριβώς οι συνέπειες που προκαλούν (Canuti et al. 2009).

Οι Χώροι Πολιτιστικής Κληρονομιάς, παγκοσμίως, συνήθως, πλήττονται από κατολισθητικά φαινόμενα (Pavlova et al. 2021), με σοβαρές συνέπειες τόσο στους ίδιους του Μνημειακούς Χώρους, όσο και στην ασφάλεια των επισκεπτών και των εργαζομένων. Συγκεκριμένα, οι Χώροι που βρίσκονται πλησίον ή στους πρόποδες απότομων βραχωδών πρανών, συχνά αντιμετωπίζουν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, τα οποία, διαφοροποιούνται, κάθε φορά, ως προς την ένταση, τη σφοδρότητα, την έκτασή τους, καθώς και ως προς τις επιπτώσεις που επιφέρουν (Mavrouli 2023).

Στην Ελλάδα, οι κατολισθήσεις και οι καταπτώσεις βράχων αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις φυσικούς κινδύνους. Ωστόσο, κάποιες περιοχές δέχονται μεγαλύτερη επίδραση, κυρίως λόγω γεωλογικών, μορφολογικών και κλιματικών

συνθηκών. Μία ανάλογη περίπτωση είναι ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών, ο οποίος αποτελεί την περιοχή έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών αποτελεί Μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της UNESCO, προστατεύεται από πολυάριθμες εθνικές και διεθνείς συμβάσεις και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους Μνημειακούς Χώρους του ελληνικού χώρου, με παγκόσμια εμβέλεια και μεγάλη επισκεψιμότητα καθημερινά, η οποία, σύμφωνα με προφορικές πληροφορίες του προσωπικού του Χώρου ανέρχεται σε 2000 άτομα, περίπου, ημερησίως. Οι Christaras and Vouvalidis (2010) αναφέρουν ότι στο πρόσφατο παρελθόν έχουν σημειωθεί καταπτώσεις βράχων εντός του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, απειλώντας την ασφάλεια των ανθρώπων και τη βιωσιμότητα του ίδιου του Χώρου. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών παρατηρούνται φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα (Εικ. 1). Συγκεκριμένα, κατά τον Ηρόδοτο, το 480 π.Χ. βραχώδη τεμάχια συνέτριψαν τους Πέρσες, κατά την περσική εισβολή στην Ελλάδα, χωρίς να προκαλέσουν καταστροφές στα Μνημεία του Χώρου, ενώ, γενικά οι καταπτώσεις βράχων με έναυσμα την έντονη σεισμική δράση σημειώνονται στο Χώρο, ήδη από το 373 π.Χ. προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές στο ναό του Απόλλωνα (Mavrouli, 2023). Το 279 π.Χ. οι βραχοκαταπτώσεις προστάτευαν το Ιερό, από τους Γαλατικούς στρατούς. Το 175-176 μ.Χ. αναφέρονται αντίστοιχα φαινόμενα στα «Φωκικά» του Πausanias. Το 1905, αναφέρονται μεγάλες βραχοκαταπτώσεις στην περιοχή, οι οποίες προκάλεσαν καταστροφές στο κτίσμα της Προναίας Αθηνάς, ενώ είχε προηγηθεί η Ανασκαφή από τη Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή. Αργότερα, οι Christaras (2003) και Λέκκας (2010) σε έρευνες που πραγματοποίησαν αναφέρουν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο.



Εικ. 1. Βραχοκαταπτώσεις εντός του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, από τις οποίες προκλήθηκαν καταστροφές στα μνημεία. Κατάπτωση επί του ναού της Αθηνάς, το 1905 (επάνω), Κατάπτωση βόρεια της περιοχής του Μαντείου, ενώ στο βάθος διαφαίνεται η περιοχή του πρανούς, από όπου αποκολλήθηκε το βραχώδες τέμαχος (1981) (κάτω) (Λέκκας 2010).

Έρευνες, οι οποίες προηγήθηκαν στην περιοχή επισήμαναν πως οι καταπτώσεις βράχων συνδέονται με τη διαδικασία της αποσάθρωσης του ασβεστόλιθου (Constantinidis et al. 1988), με έργα σταθεροποίησης των πρανών στην περιοχή της Κασταλίας (Koroniotis et al. 1988), καθώς και την ύπαρξη έντονων και εκτεταμένων γεωλογικών και γεωτεχνικών κινδύνων (Marinos and Rondoyanni 2005). Στην έρευνα που ακολούθησε από τους Christaras and Vouvalidis (2010), περιγράφηκαν οι ασυνέχειες των γεωλογικών σχηματισμών που οδηγούν σε πιθανές κινηματικές αστοχίες βράχων και υπολογίστηκε η κινητική ενέργεια βραχωδών τεμαχών, όγκου 20 τόνων, κατά μήκος τριών σημαντικών τμημάτων (cross sections). Το συμπέρασμα αυτής της ανάλυσης ήταν ότι τα μπλοκ βράχου θα μπορούσαν να συνεχίσουν την πορεία τους προς τα νοτιότερα τμήματα του Αρχαιολογικού Χώρου και πρότειναν μέτρα αντιμετώπισης, με την τοποθέτηση μεταλλικών πλεγμάτων για την προστασία από τις βραχοκαταπτώσεις. Επίσης, γεωτεχνική έρευνα για την αναγνώριση και την αντιμετώπιση των καταπτώσεων βράχων και των κατολισθητικών φαινομένων πραγματοποιήθηκε στην περιοχή, από τους Marinos and Rondoyanni (2005).

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν μια μορφή κατολίσθησης και ένα από τα συνηθέστερα, πιο αιφνίδια και καταστροφικά φαινόμενα, παγκοσμίως. Η μοντελοποίησή τους σε τρισδιάστατο περιβάλλον και η σωστή αξιολόγησή τους, αποτελούν σημαντικό βήμα, για την αποφυγή απώλειας ανθρώπινων ζωών και υλικών καταστροφών. Για την ορθή προσομοίωσή τους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες, όπως η κατανομή και ο υπολογισμός των βραχωδών μπλοκ, η γεωμετρία και οι μηχανικές παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν, οι μηχανισμοί που οδηγούν σε αστοχία κ.ά. Απαραίτητο στοιχείο αξιολόγησης αποτελεί η εκτίμηση της επιδεκτικότητας (susceptibility) των βραχοκαταπτώσεων, με τον προσδιορισμό των θέσεων πιθανής αστοχίας, καθώς και τον εντοπισμό των βραχωδών μπλοκ, από προηγούμενα φαινόμενα βραχοκατάπτωσης, στην τελική θέση απόθεσής τους (stop points). Επίσης, απαραίτητη κρίνεται η δημιουργία αξιόπιστων χαρτών εκτίμησης της επικινδυνότητας (Hazard) και ποιοτικής αξιολόγησης του βαθμού διακινδύνευσης (Risk) στις περιοχές, οι οποίες είναι επιρρεπείς σε ανάλογα φαινόμενα.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, μας δίνει σήμερα τη δυνατότητα να εργαστούμε σε δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) περιβάλλοντα. Τα συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - (ΣΜηΕΑ) (UAV) αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία για τη λήψη τρισδιάστατων (3D) δεδομένων και αεροφωτογραφιών, καθώς μειώνουν, κατά πολύ, το χρόνο και το κόστος εργασίας, σε σχέση με τον

κλασικό συμβατικό τρόπο εργασίας στο πεδίο, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα έρευνας δυσπρόσιτων περιοχών. Η ανάπτυξη της Τηλεπισκόπησης και των εφαρμογών της παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης δεδομένων εξαγωγής πολύ υψηλής ανάλυσης (ορθοφωτοχάρτες, Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους). Αξιοποιώντας, λοιπόν, τις δυνατότητες των σύγχρονων τεχνολογιών, στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αναπτύσσεται μια μεθοδολογία καταγραφής, αξιολόγησης και εκτίμησης της επικινδυνότητας (Hazard) και της διακινδύνευσης (Risk), μέσω τρισδιάστατων τροχιακών προσομοιώσεων (3D trajectometric analysis), αξιοποιώντας τα πρωτογενή τρισδιάστατα νέφη σημείων (3D point clouds) από την πτήση με UAV, σε συνδυασμό με παρατήρηση στο πεδίο.

Στόχος, επομένως, της παρούσας έρευνας αποτελεί η δημιουργία και η εφαρμογή μιας λεπτομερούς μεθοδολογίας εκτίμησης, ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, μέσα από την πραγματοποίηση τρισδιάστατων τροχομετρικών αναλύσεων, με παράλληλο υπολογισμό της έντασής τους (kJ), καθώς και της πιθανότητας να προσεγγίσουν το Μνημειακό Χώρο, αλλά και ταυτόχρονο προσδιορισμό του σημείου τερματισμού της τροχιάς τους (stop points). Λόγω της πολυδιάστατης σημασίας των Χώρων Πολιτιστικής Κληρονομιάς πραγματοποιείται αξιολόγηση της διακινδύνευσης, τόσο σε Υλικό, όσο και σε Άυλο επίπεδο απωλειών (Risk matrix).

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ-ΣΤΑΔΙΑ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη και την παρουσίαση μιας μεθοδολογίας για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (Hazard) και την ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης (Risk) έναντι βραχοκαταπτώσεων, με αναλυτική καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, ώστε να αποφευχθούν, όσο το δυνατό, ανάλογα φαινόμενα, μελλοντικά. Παράλληλα, η διακύμανση της τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης της επικινδυνότητας (Hazard), μπορεί να συνεισφέρει στον ορθότερο σχεδιασμό και στην πραγματοποίηση παρεμβάσεων στην περιοχή έρευνας. Συγκεκριμένα, η παρούσα έρευνα στοχεύει, αφενός στην ανάλυση και εκτίμηση της τροχιακής πορείας που δύνανται να διαγράψουν τα βραχώδη τεμάχια, διαφορετικής διαμέτρου, από συγκεκριμένες θέσεις εκκίνησης, με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες και πιθανότητα διάδοσής τους στα στοιχεία του Χώρου που βρίσκονται υπό

διακινδύνευση και αφετέρου στην ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης, τόσο σε Άυλο, όσο και σε Υλικό επίπεδο απωλειών.

Ειδικότερα, τα βήματα της μεθοδολογίας, η οποία αναπτύχθηκε και ακολουθήθηκε, στην παρούσα διατριβή, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (Hazard) και την αξιολόγηση της διακινδύνευσης (Risk), στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών χωρίστηκε σε δέκα στάδια, τα οποία λειτουργούν αλυσιδωτά το ένα με το άλλο, και είναι τα εξής:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.
2. Επί τόπου παρατηρήσεις και συλλογή δεδομένων, με τη χρήση των καινοτόμων τεχνολογιών που παρέχουν τα Μη Επανδρωμένα Συστήματα Αεροσκαφών –ΣμηΕΑ (Unmanned Aerial Vehicles –UAVs) και συγκεκριμένα του eBee X (senseFly S.O.D.A. 3D).
3. Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων νέφους σημείων (point clouds), δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), και εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής που ερευνάται (οικογένειες ασυνεχειών - DSets) και των χαρακτηριστικών τους: 1) προσανατολισμός των επιφανειών των ασυνεχειών (γωνία κλίσης/διεύθυνση κλίσης) και 2) απόσταση (spacing) μεταξύ των επιφανειών της ίδιας κύριας οικογένειας.
4. Αξιολόγηση της επιδεκτικότητας (susceptibility) έναντι βραχοκαταπτώσεων. Η ανάλυση αυτή επιτεύχθηκε: 1) με αναγνώριση και υπολογισμό της κατανομής του όγκου (volume-m^3) των βραχωδών τεμαχών - κενών (scars) που έχουν αποκολληθεί από την επιφάνεια του πρανούς σε προηγούμενα φαινόμενα βραχοκατάπτωσης, με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), το οποίο δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο και 2) με χαρτογράφηση και προσδιορισμό της τελικής θέσης απόθεσης (stop point), με τις ακριβείς συντεταγμένες (X, Y, Z) τους και τον όγκο (m^3) των βραχωδών μπλοκ, που έχουν αποκολληθεί σε παλαιότερα φαινόμενα αστοχίας, εντός και εκτός του Αρχαιολογικού Χώρου.
5. Προσδιορισμός των θέσεων-πηγών ενεργοποίησης πιθανών βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή έρευνας.
6. Δημιουργία δύο σεναρίων αστοχίας, με την παρουσία, ή μη, του εναύσματος του σεισμού και συγκεκριμένα της καταστροφικής σεισμικής ακολουθίας του

1870 και υπολογισμός της διαμέτρου (d) των βραχωδών τεμαχών, για κάθε θέση.

7. Υπολογισμός της σεισμικής επιτάχυνσης (PGA m/sec) και της σεισμικής ταχύτητας (PGV m/sec) της σεισμικής ακολουθίας του 1870.
8. Εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Hazard), με πραγματοποίηση τρισδιάστατων τροχομετρικών προσομοιώσεων των βραχωδών τεμαχών (3D trajectometric analysis), διαφορετικής διαμέτρου (d), με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων, με τη δημιουργία θεματικών χαρτών και φακέλων τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης διάφορων παραμέτρων χαρακτηρισμού των τροχιών αυτών, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1.
9. Πραγματοποίηση δισδιάστατων τροχιακών αναλύσεων (2D trajectometric analysis), μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience.
10. Ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης (Risk) στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με τη δημιουργία πινάκων και χαρτών ποιοτικής αξιολόγησης (Risk matrix), τόσο για τις Άυλες, όσο και για τις Υλικές συνέπειες που δύναται να προκληθούν, με βάση την τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών μπλοκ, στα σημεία υπό διακινδύνευση (elements at risk), καθώς και των σημείων όπου οι τροχιές αυτές τερματίζονται (stop points).

1.3 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Οι καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών αποτελούσαν, ανέκαθεν, ένα από τα συνηθέστερα, πιο αιφνίδια και πιο καταστροφικά φαινόμενα μαζικής μετακίνησης υλικού. Αποτελούν ένα είδος κατολίσθησης, από ένα ή περισσότερα μεμονωμένα τεμάχια, προερχόμενα από κατακόρυφα ή σχεδόν κατακόρυφα πρανή, ακολουθούνται από γρήγορη κίνηση προς τα κατάντη και χαρακτηρίζονται από τις φάσεις της ελεύθερης πτώσης, της αναπήδησης, της κύλισης και της ολίσθησης (Varnes 1978). Γενικά αποτελούν εξαιρετικά ακαριαία φυσικά φαινόμενα, ενώ μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις από την θέση αποκόλλησής τους (Cruden and Varnes 1996).

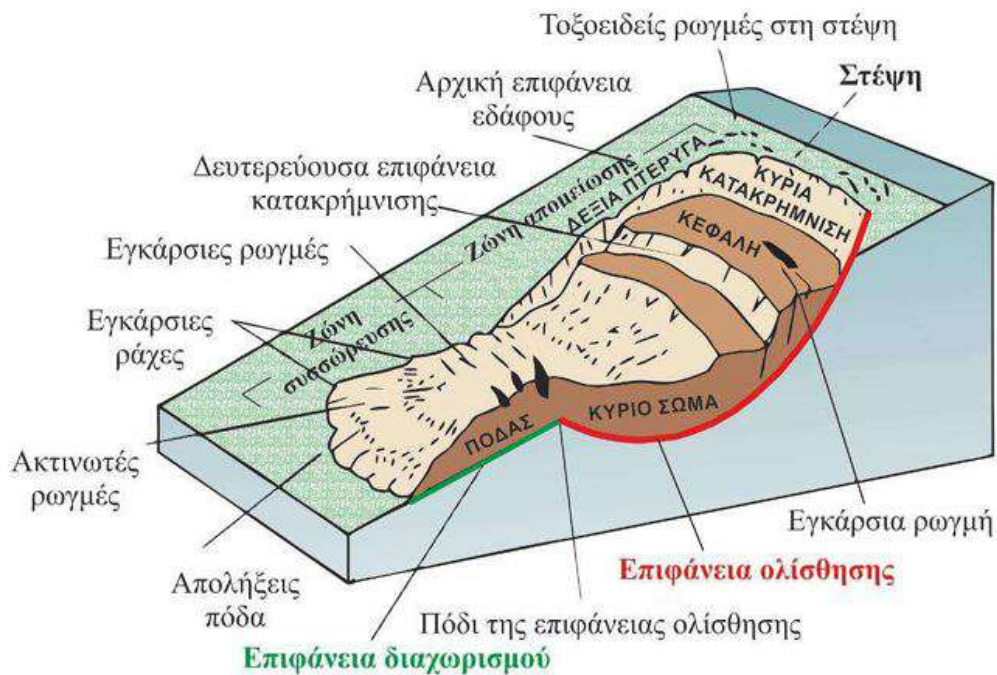
Στις ορεινές περιοχές, ανά τον κόσμο, και δη σε εκείνες με έντονες μορφολογικές συνθήκες, οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν συχνή μορφή κατολίσθησης,

προκαλώντας καταστροφές, ζημιές, ακόμη και θανάτους. Για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση και η εκτίμηση της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων, της επικινδυνότητας, καθώς και της διακινδύνευσης αποτελεί μείζον ζήτημα για τις σύγχρονες κοινωνίες (Frattini et al. 2008). Όπως ήταν φυσικό, πλήθος ερευνητών, παγκοσμίως, ανέπτυξαν και αναπτύσσουν μεθόδους πρόβλεψης μιας πιθανής βραχοκατάπτωσης, καθώς και μετριάσμού των συνεπειών της. Οι καταπτώσεις βράχων συνιστούν πολύ σημαντικό κίνδυνο, τόσο για τις υποδομές και τις κατοικημένες περιοχές, όσο και για τα Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Οι κύριοι παράγοντες-εναύσματα που δύνανται να ενεργοποιήσουν μια βραχοκατάπτωση είναι οι βροχοπτώσεις, η σεισμική δραστηριότητα, καθώς και τα φαινόμενα της διαστολής και της συστολής, που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Για την ακριβή πρόβλεψη εκδήλωσης ανάλογων γεγονότων απαραίτητη είναι η γεωλογική αξιολόγηση, όπου εξηγείται ο μηχανισμός ενεργοποίησης της βραχοκατάπτωσης και μπορεί να συνεισφέρει στον αποτελεσματικό σχεδιασμό των μέτρων προστασίας (Saroglou 2019).

Επομένως, οι έννοιες της «επιδεκτικότητας», της «επικινδυνότητας» και της «διακινδύνευσης» άρχισαν να απασχολούν την επιστημονική, και όχι μόνο, κοινότητα και να χρησιμοποιούνται ευρέως. Πρωταρχικός στόχος, προκειμένου να παρουσιαστεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, ήταν να αποσαφηνιστούν και να δοθούν οι ακριβείς ορισμοί και τα θεωρητικά πλαίσια που αποτέλεσαν τη βάση της μεθοδολογικής ροής εργασιών της παρούσας έρευνας.

1.3.1 Κατολίσθηση (landslide)

Οι κατολίσθήσεις αποτελούν ένα, παγκοσμίως, γνωστό γεωλογικό φαινόμενο, το οποίο επιφέρει μια σειρά από σημαντικές επιπτώσεις σε οικονομικό, κοινωνικό και πολιτιστικό επίπεδο. Μια κατολίσθηση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες όπως σεισμό, βροχοπτώσεις, πλημμύρες και ανθρώπινες παρεμβάσεις, όπως η αποψίλωση των δασών. Πλέον, οι κατολίσθήσεις αποτελούν έναν από τους συνηθέστερους κινδύνους, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, απειλώντας τις ανθρώπινες ζωές (Nadim et al. 2006). Μεταξύ των ετών 1995 έως 2014, καταγράφηκαν άνω των 1500 θανάτων και 1000 τραυματισμών στις ευρωπαϊκές χώρες, που προκλήθηκαν άμεσα από φαινόμενα κατολίσθησης και βραχοκαταπτώσεις (Haque et al. 2016).



Εικ. 2. Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας περιστροφικής κατολίσθησης, όπως προτάθηκαν από Varnes (1978) και τροποποιήθηκαν από Highland and Bobrowsky (2008) (Παπαθανασίου 2022).

Για τον όρο κατολίσθηση έχουν αποδοθεί αρκετοί ορισμοί, αλλά ο πιο αντιπροσωπευτικός είναι αυτός κατά Varnes et al. (1996), ο οποίος ορίζει την κατολίσθηση ως μια μετατόπιση υλικού από θραύσματα, γη ή βραχώδη μπλοκ. Ο τύπος της κίνησης περιγράφει την πραγματική εικόνα μιας κατολίσθησης στη φύση, ωστόσο υπάρχει πιθανότητα να αναπτυχθούν πολύπλοκοι μηχανισμοί, με διάφορους τύπους μηχανισμών αστοχίας (Bobrowsky and Couture 2014).

Γενικά, κάθε φορά που βρισκόμαστε αντιμέτωποι με ένα γεωλογικό φαινόμενο πραγματοποιείται ταξινόμηση και κατηγοριοποίησή του, ώστε να καταστεί δυνατή η έρευνά του. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των κατολισθήσεων υπάρχουν αρκετές προτάσεις κατηγοριοποίησης των κατολισθητικών φαινομένων, με βάση, κυρίως, τη μορφολογική εικόνα του υλικού και τον τύπο της μετακίνησής του. Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν αυτή την ταξινόμηση είναι τα εξής (Κούκης and Σαμπατακάκης, (2007):

- το είδος του σχηματισμού που κατολισθαίνει,
- ο τύπος κίνησης,

- το ποσοστό της υγρασίας που εμπεριέχεται στο υλικό που κατολισθαίνει,
- η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η κατολίσθηση,
- η αιτία εκκίνησης της κίνησης,
- η σχέση επιφάνειας ολίσθησης με την ολίσθηση,
- η ενεργότητα της κατολίσθησης,
- το μέρος όπου λαμβάνει χώρα η ολίσθηση,
- τα χαρακτηριστικά του πρανούς που ολισθαίνει (γεωμετρικά, μορφολογικά),
- οι περιβαλλοντικές συνθήκες,
- το κλίμα,
- ο μηχανισμός της ολίσθησης.

Πολλές ταξινομήσεις έχουν προταθεί, από αρκετούς ερευνητές, (Erskine 1973, Sharpe 1939, Zaruba and Mencl 1969 και 1976, Coates 1977 και Varnes 1958, ενώ αυτή που έχει καθιερωθεί να χρησιμοποιείται από την επιστημονική κοινότητα είναι η κατηγοριοποίηση από Varnes (1978), η οποία επικαιροποιήθηκε, αργότερα, από τους Cruden and Varnes (1996), σύμφωνα με τη δημοσίευση στην ειδική αναφορά του Οργανισμού Έρευνας Μεταφορών των ΗΠΑ και η οποία παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίν. 1).

Σύμφωνα με αυτήν την κατηγοριοποίηση, λαμβάνεται υπόψη ο τύπος της υλικού και η μορφή της κατολίσθησης, με εξαίρεση τις καθιζήσεις. Επομένως, για να περιγραφεί ένα φαινόμενο κατολίσθησης θα πρέπει να διαθέτει δύο ουσιαστικά στο όνομά του. Συνεπώς, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα κατηγοριοποίησης, κάθε κατολισθητικό φαινόμενο λαμβάνει δύο χαρακτηρισμούς, όπου το πρώτο περιγράφει τον τύπο της κίνησης του υλικού (ανατροπή, κατάπτωση, ροή, εξάπλωση, ολίσθηση) και το δεύτερο τον τύπο του μετακινούμενου υλικού (βραχώδες υπόβαθρο/χονδρόκοκκα ή λεπτόκοκκα εδάφη) (Παπαθανασίου, 2022).

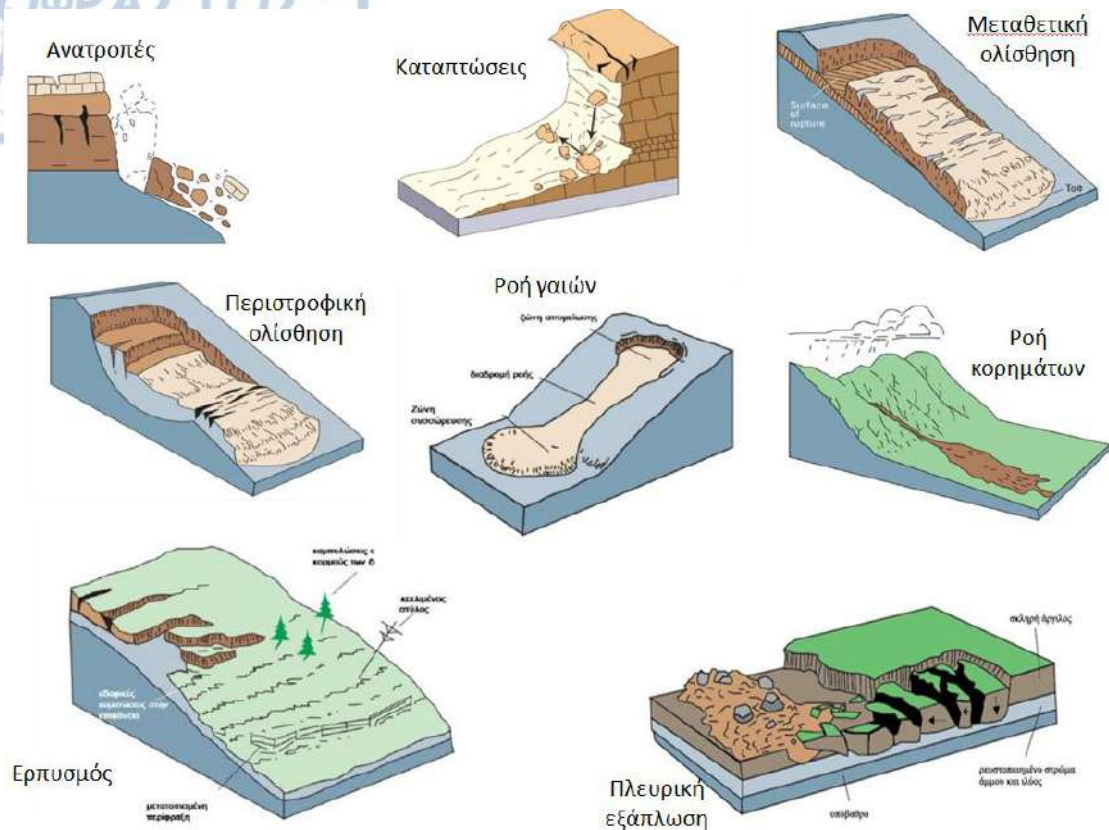
Πίνακας 1. Κατηγοριοποίηση της κίνησης των πρανών, σύμφωνα με Cruden and Varnes (1996).

Τύπος κίνησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού		
		Βραχώδεις υποβάθρου	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
Σύνθετη (Varnes, 1978)				

Στον ελλαδικό χώρο, η έντονη σεισμική δραστηριότητα, αλλά και οι σφοδρές και συχνές βροχοπτώσεις, μεγάλης διάρκειας, συνιστούν συνήθη εναύσματα ενεργοποίησης κατολισθήσεων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τεχνικών μελέτης αυτών των φαινομένων. Ωστόσο, ο ελλαδικός χώρος περιλαμβάνει μεγάλους και μεγάλης κλίσης ορεινούς όγκους, με έντονα καταπονημένους αλπικούς σχηματισμούς, όπου σε συνδυασμό με το έντονο μορφολογικό ανάγλυφο, συνθέτουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη κατολισθητικών φαινομένων και συγκεκριμένα βραχοκαταπτώσεων. Η πληθώρα όμως των μεθοδολογιών αφορούν στη μελέτη των κατολισθήσεων, γενικά, ενώ μικρός αριθμός αυτών εστιάζουν μόνο στις καταπτώσεις βράχων.

1.3.2 Βραχοκατάπτωση (Rockfall)

Μια **Βραχοκατάπτωση(Rockfall)** αποτελεί έναν τύπο κατολίσθησης που συνοδεύεται από την αποκόλληση ενός ή περισσοτέρων μεμονωμένων βραχωδών μπλοκ, από ένα κατακόρυφο ή σχεδόν κατακόρυφο πρανές. Τα φαινόμενα αυτά ακολουθούνται από πολύ γρήγορη κίνηση και χαρακτηρίζονται από τις φάσεις της ελεύθερης πτώσης, της αναπήδησης, της κύλισης και της ολίσθησης (Varnes, 1978).



Εικ. 3. Απεικόνιση των μορφών κατολίσθησης από Highland και Bobrowsky (2008), με βάση την κατηγοριοποίηση των Cruden and Varnes (1996).

Συγκεκριμένα, μια βραχοκατάπτωση περιλαμβάνει την αποκόλληση βραχώδους υλικού, το οποίο αποσπάται από το πρανές με πτώση, ολίσθηση ή ανατροπή, και οδηγείται προς τα κατόντη (αναπήδηση, κύλιση) με τη μορφή θραυσμάτων στη βάση του πρανούς (Varnes, 1978), τα οποία αποτελούν, συνήθως, ενδείξεις βραχοκαταπτώσεων (Dorren, 2003).

Οι διαστάσεις των αποκολλημένων τεμαχών κυμαίνονται από πολύ μικρά τεμάχια βράχου, έως και εκατοντάδες κυβικά μέτρα (m^3) (μεγάλοι ογκόλιθοι), ενώ κινούνται με ταχύτητες που κυμαίνονται από μερικά έως δεκάδες μέτρα (m) ανά δευτερόλεπτο (Guzzetti et al. 2002). Η κίνησή τους χαρακτηρίζεται από υψηλές ταχύτητες διάδοσης (m/sec) και υψηλές τιμές κινητικής ενέργειας (kJ) και αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά θέματα στην έρευνα των γεωλογικών κινδύνων (Cruden D. M. et al. 1996, Dussauge C. et al. 2007). Μικρότερου μεγέθους βραχοκαταπτώσεις επηρεάζουν τα περισσότερα βραχώδη πρανή, ενώ μεγάλου μεγέθους καταπτώσεις βράχων, όπως, για παράδειγμα, οι χιονοστιβάδες, επηρεάζουν κυρίως μεγάλα βραχώδη πρανή, με γεωλογικές συνθήκες που ευνοούν την ενεργοποίηση αστοχίας (Rouiller et al. 1998).

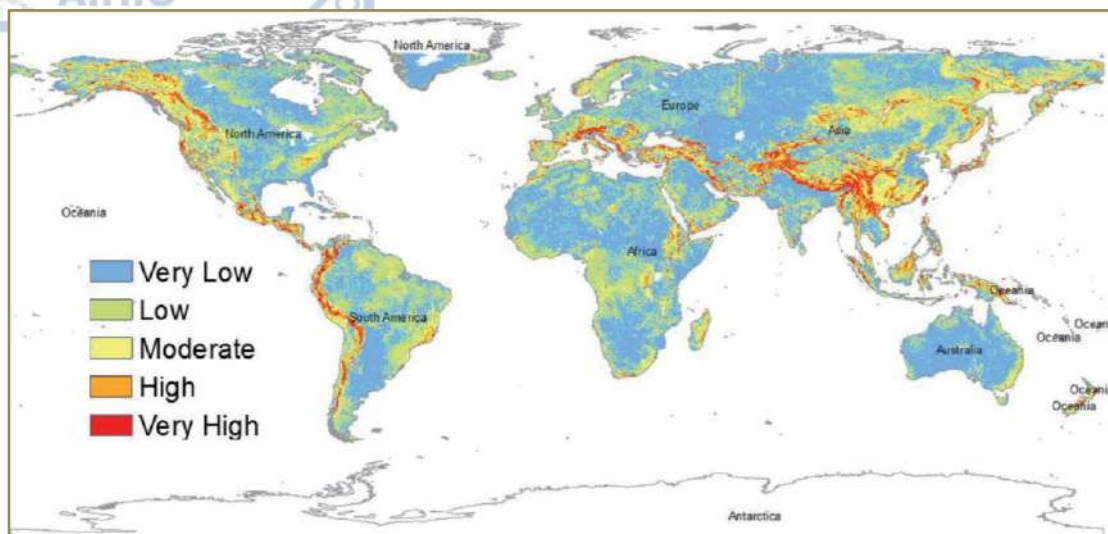
Η αποκόλληση ενός μπλοκ από ένα βραχώδες πρηνές πυροδοτείται από διάφορους παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η σεισμική δραστηριότητα και οι ανθρώπινες δραστηριότητες, ενώ η πτώση ενός βράχου προσδιορίζεται από παράγοντες όπως η μορφολογία του πρηνούς, καθώς και το άμεσο περιβάλλον του πιθανού, προς κατάπτωση τεμάχους (Dorren 2003). Η βραχοκατάπτωση αποτελεί ένα αρκετά γρήγορο και ακαριαίο φαινόμενο και αντιπροσωπεύει ένα συνεχή κίνδυνο, στις ορεινές περιοχές, παγκοσμίως.

Παρόλο που οι πτώσεις βραχωδών τεμαχών έχουν χαμηλότερο επίπεδο οικονομικού κινδύνου, σε σχέση με τις κατολισθήσεις μεγάλης κλίμακας, οι υψηλές ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά την πτώση τους μπορεί να οδηγήσουν σε παρόμοιο αριθμό θανάτων (της ίδιας τάξης μεγέθους) με αυτόν που καταγράφεται από όλους τους άλλους τύπους κατολισθήσεων (Hoek 2000). Σύμφωνα με τους Turner and Jayaprakash (2012) καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών σχετικά μικρού όγκου δύνανται να προκαλέσουν αρκετά προβλήματα, επιφέροντας ζημιές και προβλήματα στην κυκλοφορία, κυρίως, των σιδηροδρομικών γραμμών. Για την προστασία, επομένως, των απειλούμενων κατοικημένων περιοχών και των υποδομών, καθώς και για την αποφυγή πρόκλησης καταστροφών ή/και απώλειας ανθρώπινης ζωής είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί και να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα που ενέχουν οι βραχοκαταπτώσεις (Dorren 2003) (Papathanasiou et al. 2010).

1.3.3. Επιδεκτικότητα (Susceptibility)

Η **Επιδεκτικότητα (Susceptibility) (M)** αποτελεί την πιθανότητα να προκληθεί ένα συμβάν, σε μια συγκεκριμένη περιοχή, σύμφωνα με τις τοπικές μορφολογικές συνθήκες (Brabb1984). Με τον όρο Επιδεκτικότητα ορίζεται η ποσοτική ή ποιοτική αξιολόγηση της ταξινόμησης του μεγέθους (π.χ. όγκος) και της χωρικής κατανομής μιας πιθανής ή παρατηρούμενης κατολίσθησης, σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Το μέγεθος ενός φαινομένου μπορεί να αποδοθεί από τον όγκο, την ταχύτητα και τη συνολική επιφάνεια του συμβάντος. Παρόλο που οι κατολισθήσεις αναμένεται να διαδραματίζονται συχνότερα σε ευάλωτες περιοχές, ο χρόνος δε λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις εκτίμησης της επιδεκτικότητας, αλλά μόνο το χωρικό πλαίσιο (Van Den Eeckhaut et al. 2012). Οι Stanley and Kirschbaum (2017) χρησιμοποίησαν δεδομένα κατακρημνισμάτων, από απομακρυσμένους αισθητήρες (remotely sensed data), σε συνδυασμό με τη γεωλογία, την κλίση, τα οδικά δίκτυα, τις ζώνες ρηγμάτων

και την απώλεια δασών, για τη δημιουργία παγκόσμιου χάρτη επιδεκτικότητας στις κατολισθήσεις (Εικ. 4).



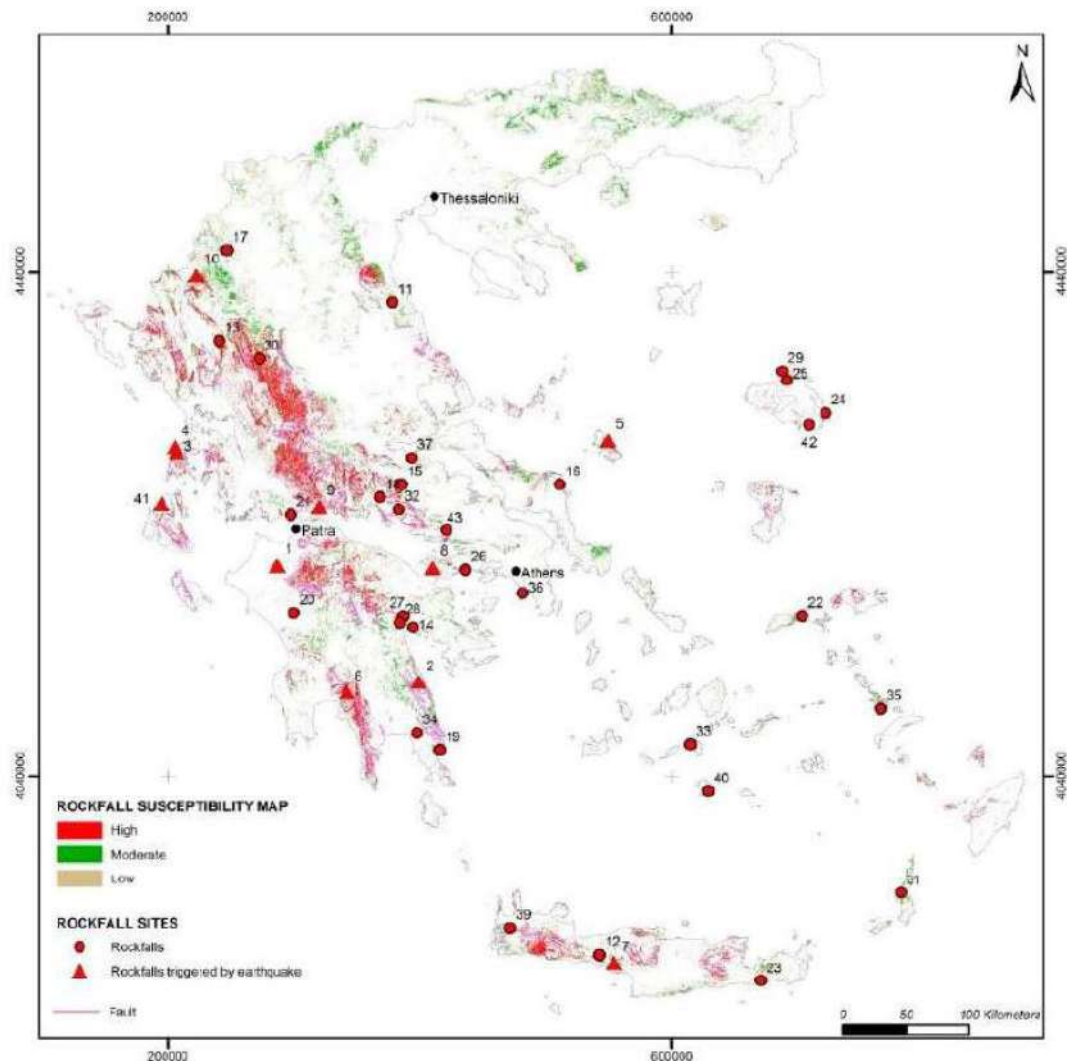
Εικ. 4. Παγκόσμιος χάρτης επιδεκτικότητας κατολισθητικών φαινομένων, όπου με βάση το υπόμνημα, χαρακτηρίζεται ως Πολύ Χαμηλή (μπλε), Χαμηλή (πράσινο), Μέση (κίτρινο), Υψηλή (πορτοκαλί) και Πολύ Υψηλή (κόκκινο) (Stanley and Kirschbaum 2017).

Όσον αφορά στην περίπτωση των βραχοκαταπτώσεων, που αποτελεί και αντικείμενο ανάλυσης της παρούσας διατριβής, η επιδεκτικότητα περιγράφει την προδιάθεση μιας περιοχής να επηρεαστεί από ένα δεδομένο μελλοντικό συμβάν και οδηγεί σε μια εκτίμηση για το πού είναι πιθανό να παρατηρηθούν ανάλογα φαινόμενα (Guzzetti 2006). Η αξιολόγηση της επιδεκτικότητας βραχοκαταπτώσεων, σε μεγάλης κλίμακας περιοχές, μπορεί να επιτευχθεί με στατιστικές αναλύσεις και φαινομενολογικές προσεγγίσεις, ενώ ντετερμινιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τοπικές αναλύσεις (Alvioli et al. 2021). Οι Fell et al. (2008) επισημαίνουν την ύπαρξη ποιοτικών ή ποσοτικών μεθόδων αξιολόγησης της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων, όπου η ποιοτική προσέγγιση βασίζεται, είτε στη γεωμορφολογική ανάλυση, είτε στον συνδυασμό ή την επικάλυψη χαρτών με σταθμισμένους ή μη δείκτες. (Saroglou 2019).

Οι χάρτες επιδεκτικότητας, απεικονίζουν την προδιάθεση αστοχίας που εμφανίζει μια περιοχή ή ένα πρანές. Πολλοί ερευνητές αξιοποίησαν διάφορες τεχνικές για την αξιολόγηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, καθώς και της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων. Συγκεκριμένα, από έρευνες των Chau et al. (2003) και Chau et al. (2004) δημιουργήθηκε ένας χάρτης επιδεκτικότητας βραχοκαταπτώσεων, βασισμένος στην καταγραφή ανάλογων φαινομένων, για την περιοχή του Χονγκ

Κονγκ, χρησιμοποιώντας τεχνικές που βασίζονται στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), σε εθνικό επίπεδο. Αντίστοιχος χάρτης προέκυψε από τους Carman et al. (2011), για τη Σλοβενία. Για την περιοχή της Ευρώπης, οι Günther et al. (2013) πραγματοποίησαν αξιολόγηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας και οι Trigila et al. (2013) πραγματοποίησαν χαρτογράφηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, στην Ιταλία, σε εθνική κλίμακα, χρησιμοποιώντας την ιταλική απογραφή κατολισθήσεων. Για τον ελλαδικό χώρο, οι Koukis et al. (2005) και Sabatakakis et al. (2013) πρότειναν μια ζωνοποίηση του κατολισθητικού κινδύνου, καθώς και της επιδεκτικότητας των κατολισθήσεων χρησιμοποιώντας ιστορικά αρχεία απογραφής κατολισθήσεων, ενώ οι Antoniou and Lekkas (2010), δημιούργησαν χάρτη επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων, για το νησί της Σαντορίνης χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης που παρέχουν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Κάτωθι παρατίθεται ο χάρτης αποτύπωσης της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων, σε εθνική κλίμακα, έχοντας ως έναυσμα φαινόμενα βροχόπτωσης ή σεισμικής δραστηριότητας, τα οποία είναι και τα πλέον συνήθη στην Ελλάδα (Εικ. 5). Σύμφωνα, λοιπόν, με το χάρτη, οι περιοχές της Κεντρικής Ελλάδας, όπου ανήκει και η περιοχή έρευνας της παρούσας διατριβής, καθώς και του δυτικού τμήματος του ελλαδικού χώρου εμφανίζουν υψηλότερη επιδεκτικότητα (Saroglou, 2019).

Στον ελλαδικό χώρο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές εργασίες για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας των διαφορετικών μορφών κατολισθήσεων. Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρατηρείται ότι οι περισσότερες αναφορές αφορούν στην επιδεκτικότητα των κατολισθητικών φαινομένων, συμπεριλαμβάνοντας πολλές φορές και τις βραχοκαταπτώσεις, χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους και μεθόδους συσχέτισης των παραμέτρων των κατολισθήσεων με συμβάντα που έχουν ήδη καταγραφεί, ενώ, οι μελέτες που ασχολούνται, συγκεκριμένα, με την εκτίμηση της επιδεκτικότητας βραχοκαταπτώσεων είναι λιγότερες και πραγματοποιούν, κυρίως, προσομοιώσεις με τη χρήση ειδικών λογισμικών πακέτων, όπως το RocFall της RocScience (Antoniou and Lekkas 2010), παράλληλα με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) (Papathanasiou et al. 2010), ενώ τα τελευταία αξιοποιήθηκαν, επίσης, σε συνδυασμό με συστήματα κατηγοριοποίησης διαφόρων παραμέτρων, για μελέτες μικρής κλίμακας (Saroglou, 2019).



Εικ. 5.Χάρτης επιδεκτικότητας βραχοκαταπτώσεων του Ελλαδικού χώρου, με παράλληλη αποτύπωση πραγματικών αντίστοιχων φαινομένων, για την χρονική περίοδο 1935-2019 (Saroglou 2019).

Γενικά, η επιδεκτικότητα καθορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν και χαρακτηρίζουν την περιοχή έρευνας και αφορούν στην κλίση του εξεταζόμενου, βραχώδους πρανούς και στην ποιότητα της κατάστασης των ασυνεχειών του, τη θέση εκκίνησης μιας πιθανής βραχοκατάπτωσης, το σχήμα και το μέγεθος των επισφαλών βραχωδών τεμαχών, το ύψος εκκίνησης μιας πιθανής βραχοκατάπτωσης και την παρουσία βλάστησης. Τα προαναφερθέντα αποτελούν σταθερά χαρακτηριστικά μιας περιοχής έρευνας, ενώ παράλληλα υπάρχουν και τα στοιχεία που αποτελούν έναυσμα ενεργοποίησης μιας βραχοκατάπτωσης, όπως για παράδειγμα η παρουσία έντονης βροχόπτωσης, ισχυρός σεισμός.

Στη Διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων. Η πλειοψηφία αυτών, χρησιμοποιούν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Σήμερα, όμως, η χρήση νέων τεχνολογιών, οι οποίες χρησιμοποιούν σαρωτές λέιζερ (laser scanners) και Μη Επανδρωμένα Συστήματα Αεροσκαφών (UAVs) και η δημιουργία αναλυτικών, τρισδιάστατων νεφών σημείων (point clouds) αξιοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτίμηση της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων. Η τελευταία αποτελεί τη μέθοδο που ακολουθήθηκε και στην παρούσα διδακτορική διατριβή, για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών και η οποία παρουσιάζεται διεξοδικά.

Όταν η εκτίμηση της επιδεκτικότητας σχετίζεται με βραχοκαταπτώσεις, όπως συμβαίνει στην παρούσα περιοχή έρευνας, τότε εξαρτάται και συνδέεται με το σκοπό της έρευνας. Μπορεί, επομένως να σχετίζεται με τα στοιχεία υπό διακινδύνευση (elements at risk), όπως είναι οι κτιριακές υποδομές, το οδικό δίκτυο, οι Μνημειακοί Χώροι. Σε αυτή την περίπτωση η επιδεκτικότητα συνδέεται με την πιθανότητα που εμφανίζουν τα βραχώδη μπλοκ να φτάσουν έως αυτά (Ayala-Carcedo et al. 2003, Copons and Vilaplana 2008). Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί και διερευνηθεί εκτενέστερα σε σχέση με την επιδεκτικότητα, καθώς εφαρμόζεται σε περιοχές μεγάλης κλίμακας (Michoud et al. 2012).

Παράλληλα, μια άλλη μέθοδος αξιολόγησης της επιδεκτικότητας σε μια βραχώδη περιοχή αποτελεί η καταγραφή και ο υπολογισμός των κενών (scars), τα οποία παρατηρούνται επάνω στην επιφάνεια του εξεταζόμενου πρανούς και έχουν προκύψει από προηγούμενα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων (scars), καθώς επίσης και η χαρτογράφηση και η καταμέτρηση των βραχωδών μπλοκ, από προηγούμενα φαινόμενα βραχοκατάπτωσης, τα οποία έχουν αποτεθεί στην τελική τους θέση (end points), μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές (Fell et al., 2008).

1.3.4 Επικινδυνότητα (Hazard-H)

Με τον όρο «Επικινδυνότητα (Hazard)» (H) ορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης ενός καταστροφικού φαινομένου, συγκεκριμένου μεγέθους, σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (pt-temporal probability) και περιοχή, με ανεπιθύμητα αποτελέσματα (Εικ. 6). Σύμφωνα με τους Jaboyedoff et al. (2005), η επικινδυνότητα $H(E, x)$, σε μια τετμημένη x είναι το γινόμενο της μέσης συχνότητας αστοχίας λ μιας βραχομάζας με

τον αριθμό των μπλοκ N_{blocks} , τα οποία αποσπώνται από το βραχώδες πρηνές, σε ένα μόνο συμβάν και την πιθανότητα διάδοσης $P_p(E, x)$, με δεδομένη ένταση E

$$H(E, x) = \lambda_f \cdot N_{\text{blocks}} \cdot P_p(E, x) \quad (1)$$

Για την περιγραφή της κατολισθητικής επικινδυνότητας θα πρέπει να παρέχονται πληροφορίες για τη χωρική κατανομή και την ταξινόμηση του φαινομένου, τον υπολογισμό του δυνητικού όγκου που συνδέεται με το συγκεκριμένο γεγονός, την ταχύτητα του, καθώς και την πιθανότητά του να εμφανιστεί σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (Ferrari et al. 2016).

Στην περίπτωση των βραχοκαταπτώσεων, σύμφωνα με τους Varnes (1984), Fell (1994), Fell and Hartford (1997), Guzzetti et al. (1999), Crosta et al. (2001), η επικινδυνότητα εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια βραχοκατάπτωση, η οποία έχει συγκεκριμένο μέγεθος (όγκο), ένταση (ενέργεια) και συμβαίνει σε δεδομένο χρόνο και περιοχή. Περιλαμβάνονται, επομένως, πληροφορίες, σχετικά με τη συχνότητα (τη χρονική, δηλαδή πιθανότητα επανεμφάνισης της κατάπτωσης), την ένταση-κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται και τη χωρική πληροφορία, σχετικά με την περιοχή εμφάνισης του φαινομένου. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι η δημιουργία ενός χάρτη εκτίμησης της επικινδυνότητας των βραχοκαταπτώσεων, όπου θα περιγράφεται η πιθανότητα να συμβεί μια βραχοκατάπτωση, με συγκεκριμένο μέγεθος και σε συγκεκριμένη περιοχή (Crosta and Agliardi 2003), ενώ σύμφωνα με τους (Cancelli and Crosta 1993, Crosta and Locatelli 1999) θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και η παράμετρος της διάδοσης (propagation) του αποκολλημένου βραχώδους τεμάχους. Σύμφωνα, με τους Corominas et al. (2014), για την πληρέστερη και πιο αξιόπιστη αξιολόγηση της επικινδυνότητας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος της καταστροφής που μπορεί να προκαλέσει το εκάστοτε φαινόμενο, πέραν του μετρούμενου όγκου και/ή της επιφάνειάς του. Για παράδειγμα, οι απώλειες που μπορεί να προκληθούν από μια βραχοκατάπτωση, μικρού μεγέθους, θα ήταν πολύ μεγαλύτερες, σε σχέση με μια ερπυστική κατολίσθηση, μεγάλου όγκου, καθώς η ταχύτητα κίνησής της πρώτης είναι μεγαλύτερη. Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας λαμβάνονται υπόψη, τόσο το μέγεθος (όγκος, εμβαδόν), όσο και η πιθανότητα να συμβεί το καταστροφικό αυτό φαινόμενο (π.χ. κατολίσθηση, βραχοκατάπτωση) (Fell 1994, VanWesten, vanAsch, and Soeters 2006). Γενικά, σε κάθε μεθοδολογία που ακολουθείται για την εκτίμηση της επικινδυνότητας των βραχοκαταπτώσεων απαραίτητο είναι να συνυπολογίζονται η επιδεκτικότητα, η συχνότητα, η κατανομή της κινητικής ενέργειας (ένταση) που

αναπτύσσεται, κατά την κατάπτωση ενός μπλοκ, σε μια θέση αλλά και κατά την τροχιά που διαγράφει, από τη στιγμή της αποκόλλησής του, μέχρι το τελικό σημείο απόθεσής του. Ωστόσο, λίγες μεθοδολογίες αξιολόγησης επικινδυνότητας κατάπτωσης βράχων ικανοποιούν όλα όσα προαναφέρθηκαν.

Όταν η εκτίμηση της επικινδυνότητας αφορά σε βραχοκαταπτώσεις, τότε λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής (Einstein 1988). Για την ποιοτική αξιολόγηση του κινδύνου, με βάση έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο, ακολουθούνται συστήματα βαθμονόμησης των παραγόντων που επηρεάζουν την εκκίνηση του φαινομένου (Lateltin et al. 2005, Ferrari et al. 2016, 2017) ή στηρίζονται σε προτάσεις μετριασμού τους, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έντασης μιας βραχοκατάπτωσης κατά την τροχιακή της πορεία (kinetic energy), τις θέσεις τερματισμού της τροχιάς των μπλοκ (stop points) και το ύψος αναπήδησής τους (bounce height).

Σύμφωνα με εργασίες των Crosta and Agliardi (2003) και Jaboyedoff et al. (2005) οι παράμετροι που καθορίζουν την επικινδυνότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων σχετίζονται 1) με την πιθανότητα αστοχίας ενός βραχώδους τεμάχους, ορισμένου σχήματος, διαμέτρου και όγκου (m^3), από συγκεκριμένη θέση – ζώνη εκκίνησης στο εξεταζόμενο πρηνές (source), 2) με την πιθανότητα τα βραχώδη τεμάχη, τα οποία έχουν αστοχήσει να φτάσουν στις τελικές θέσεις τερματισμού τους (stop points), και 3) τη συνολική κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την καθοδική τους πορεία από το σημείο ενεργοποίησης της βραχοκατάπτωσης προς τα κατόντη.

Για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των καταπτώσεων βράχων χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης των παραμέτρων που σχετίζονται με αυτήν (κινητική ενέργεια, ύψος αναπήδησης κτλ), καθώς και λογισμικά δισδιάστατης και τρισδιάστατης προσομοίωσης των βραχοκαταπτώσεων, τα οποία παρουσιάζονται και αναλύονται σε επόμενα κεφάλαια.

Με τον όρο «**Στοιχεία υπό διακινδύνευση (elements at risk)» (EaR)** εννοείται κάθε οντότητα, συμπεριλαμβανομένου του πληθυσμού, που μπορεί να επηρεαστεί ή να καταστραφεί από ένα δυνητικά καταστροφικό φαινόμενο, όπως μια πιθανή βραχοκατάπτωση (Corominas et al. 2014). Επίσης στον όρο αυτόν περιλαμβάνονται ο πληθυσμός, τα τεχνικά έργα, οι οικονομικές δραστηριότητες, οι υποδομές, τα περιβαλλοντικά και περιουσιακά στοιχεία, τα στοιχεία δημόσιας και προσωπικής περιουσίας. Παρόλο που τα στοιχεία υπό διακινδύνευση δεν επηρεάζονται από την επιδεκτικότητα και την ανάλυση της επικινδυνότητας, η διακινδύνευση θα μπορούσε

να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τα επιλεγμένα στοιχεία υπό διακινδύνευση (Fell et al. 2008).

1.3.5 Τρωτότητα (Vulnerability) (VxEaR)

Η «Τρωτότητα (Vulnerability)» (V x EaR) είναι ο βαθμός απώλειας των στοιχείων που βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk), εντός της περιοχής που εκτίθεται σε κάποια κατολίσθηση. Η Τρωτότητα κυμαίνεται μεταξύ 0 (χωρίς καμία απώλεια) και 1 (ολική απώλεια) (Ferrari, F. et al. 2016).

1.3.6 Διακινδύνευση (Risk-R)

Η «Διακινδύνευση (Risk)» (R) ορίζεται ως το μέτρο της πιθανότητας εμφάνισης μιας κατολίσθησης και της έντασης μιας σοβαρής επίπτωσης στην υλική περιουσία και το περιβάλλον. Είναι, δηλαδή, το αποτέλεσμα ή η πιθανή έκβαση της εκδήλωσης μιας κατολίσθησης και εκφράζεται ποσοτικά ή ποιοτικά, με τους όρους ζημία, τραυματισμός ή απώλεια ζωής (Ferrari, F. et al. 2016). Σύμφωνα με τους Corominas et al. (2014), η εκτίμηση της διακινδύνευσης (Risk), ενός κατολισθητικού φαινομένου υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$R = P(M_i) \times P(X_j | M_i) \times P(T | X_j) \times V_{ij} \times C \quad (2)$$

Όπου,

- $P(M_i)$ είναι η πιθανότητα εμφάνισης μιας κατολίσθησης, συγκεκριμένου μεγέθους M_i ,
- $P(X_j | M_i)$ είναι η πιθανότητα μια κατολίσθηση, έντασης j , να φτάσει να φτάσει ως ένα ορισμένο σημείο,
- $P(T | X_j)$ είναι η πιθανότητα ένα συγκεκριμένο στοιχείο να εκτεθεί σ αυτή την κατολίσθηση,
- V_{ij} η τρωτότητα του εκτεθειμένου στοιχείου, μεγέθους i και έντασης j και τέλος
- C είναι η τιμή του στοιχείου που βρίσκεται υπό διακινδύνευση.

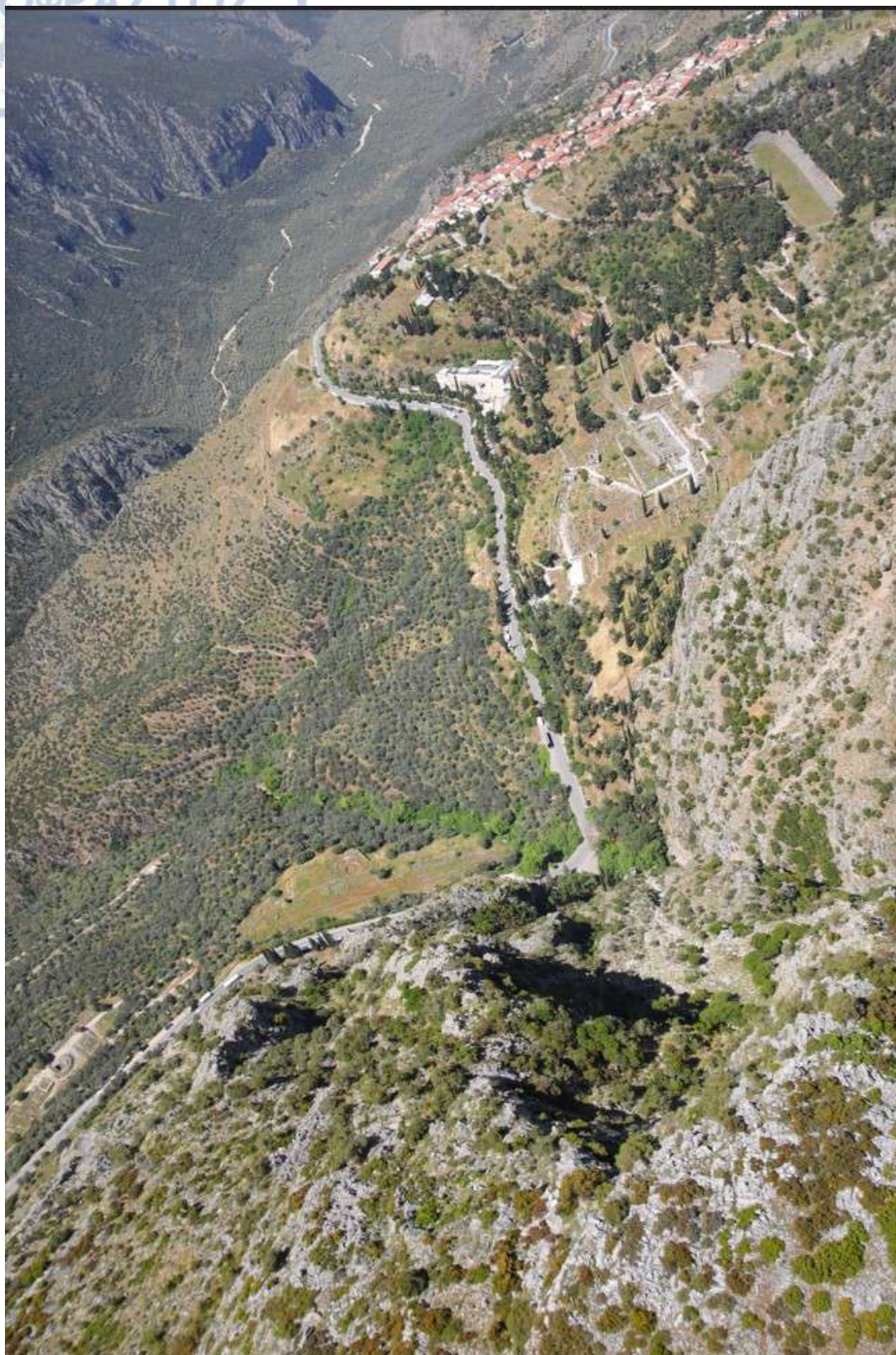


Για την αποτύπωση της ποιοτικής αξιολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Μέσα στο περιβάλλον των GIS δημιουργούνται δύο επίπεδα πληροφορίας, για την έκταση του φαινομένου και για τον προσδιορισμό των στοιχείων υπό διακινδύνευση (elements at risk). Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω επιπέδων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός χάρτη, σχετικά με τον βαθμό της έκθεσης αυτών των στοιχείων σε διακινδύνευση (Παπαθανασίου 2022).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΥΘΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

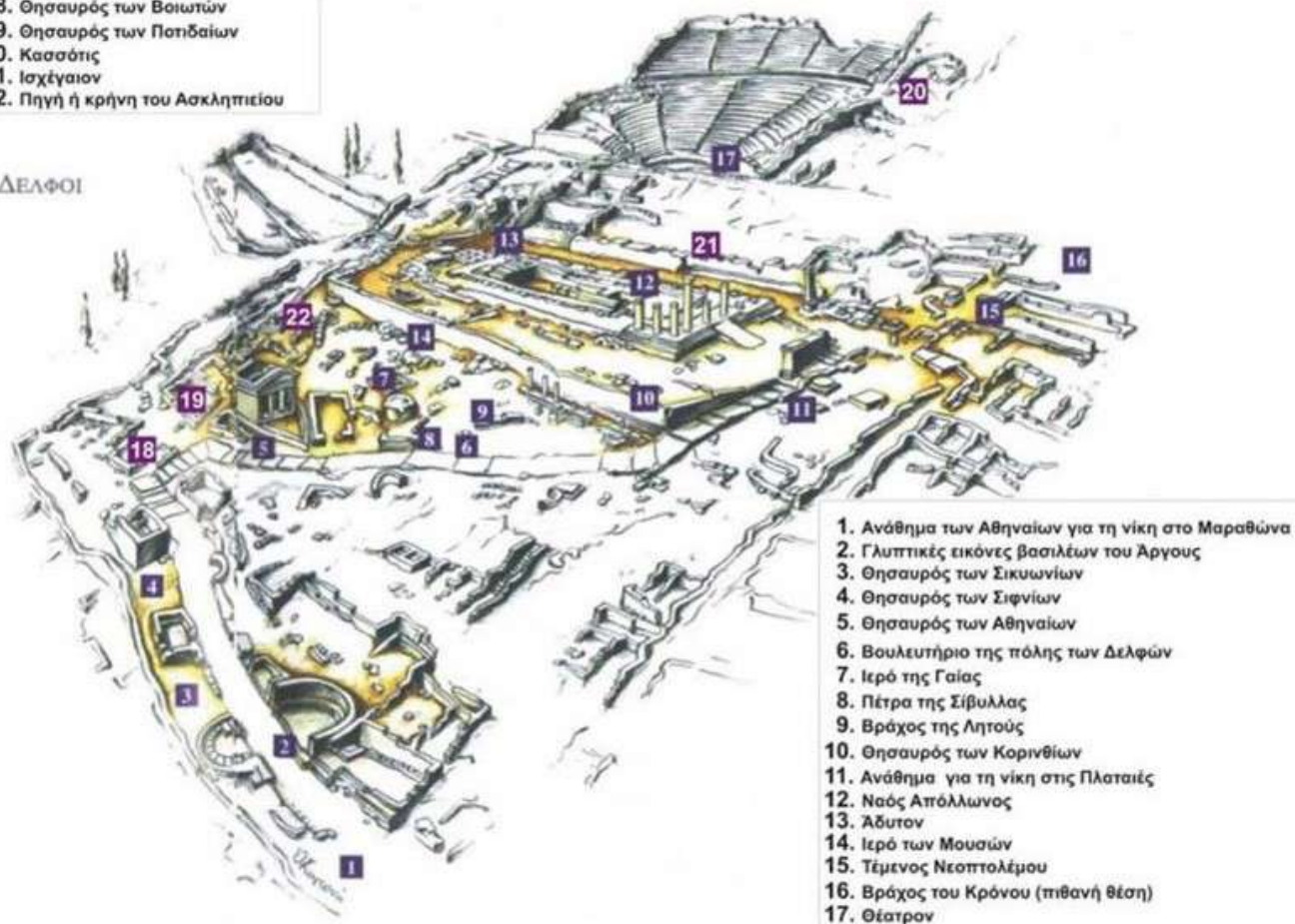
Ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών εκτείνεται στις νότιες πλαγιές του Παρνασσού, στη Φωκίδα και συγκεκριμένα στην κοιλάδα του ποταμού Πλείστου (Εικ. 6), όπου διακρίνονται οι απότομες και πολύ εντυπωσιακές, μορφολογικά, Φαιδριάδες Πέτρες. Στην περιοχή αυτή βρίσκεται το πανελλήνιο ιερό των Δελφών, όπου περιλαμβάνεται το πιο ξακουστό Μαντείο της Αρχαίας Ελλάδας (Εικ 7), καθώς οι Δελφοί αποτελούσαν, ήδη από τον 6^ο αιώνα π. Χ. το πολιτιστικό και θρησκευτικό κέντρο του κόσμου (Christaras and Vouvalidis 2010). Οι Έλληνες θεωρούσαν τους Δελφούς ως τον ομφαλό της Γης. Σύμφωνα με τις «Ευμενίδες» του Αισχύλου ο Χώρος, αρχικά κατοικούνταν από την πρωτομάντη Γαία, ενώ αργότερα από τον Ποσειδώνα, και τις θυγατέρες της Γαίας, Θέμιδα και Φοίβη και τελικά από το Φοίβο Απόλλωνα, τον οποίο, εν συνεχεία, ακολούθησε και ο Διόνυσος.



Εικ. 6. Άποψη της ευρύτερης περιοχής των Δελφών, όπως αποτυπώθηκε με UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Στο κέντρο διακρίνεται ο Μνημειακός Χώρος των Δελφών και το χωριό Δελφοί, στα αριστερά η κοιλάδα του Πλείστου ποταμού και στα δεξιά οι Φαιδριάδες Πέτρες.

- 18. Θησαυρός των Βοιωτών
- 19. Θησαυρός των Ποτιδαίων
- 20. Κασσώτις
- 21. Ισχύγαιον
- 22. Πηγή ή κρήνη του Ασκληπιείου

ΔΕΛΦΟΙ



- 1. Ανάθημα των Αθηναίων για τη νίκη στο Μαραθώνα
- 2. Γλυπτικές εικόνες βασιλέων του Άργους
- 3. Θησαυρός των Σικυωνίων
- 4. Θησαυρός των Σιφνίων
- 5. Θησαυρός των Αθηναίων
- 6. Βουλευτήριο της πόλης των Δελφών
- 7. Ιερό της Γαίας
- 8. Πέτρα της Σίβυλλας
- 9. Βράχος της Λητούς
- 10. Θησαυρός των Κορινθίων
- 11. Ανάθημα για τη νίκη στις Πλαταιές
- 12. Ναός Απόλλωνος
- 13. Άδυτον
- 14. Ιερό των Μουσών
- 15. Τέμενος Νεοπτολέμου
- 16. Βράχος του Κρόνου (πιθανή θέση)
- 17. Θέατρον

Εικ. 7. Το σύνολο των Μνημείων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών (Λέκκας κ.ά. 2010)

Σύμφωνα με τη μυθολογία, οι κόρες της Γαίας κατέλαβαν τη γη, ακολουθούμενες από το Φοίβο Απόλλωνα, ενώ υπήρξε μια περίοδος κοινής κατοχής με τον Διόνυσο. Με την άφιξή του, ο Απόλλωνας κατέλαβε τη γη σκοτώνοντας τη δράκαινα, ζώο ιερό και φύλακα του χώρου. Για τη βεβήλωση που διέπραξε, ο θεός Απόλλωνας αναγκάστηκε από τη θεά Γαία να εξαγνιστεί, και μεταξύ άλλων να ιδρύσει τα Πύθια, έναν πανελλήνιο διαγωνισμό, στη μνήμη του ιερού δράκου, που διαδραματίζονταν κάθε τέσσερα χρόνια. Στον ύμνο του Ομήρου «εις Απόλλωνα», αναφέρεται πως ο Απόλλωνας έφτασε στους Δελφούς από τον Όλυμπο και τα Τέμπη, μέσω του κόλπου της Βόρειας Εύβοιας και της Βοιωτίας και ταυτόχρονα δια θαλάσσης από την Κρήτη (Μαριολάκος Η., Μπαντέκας Ι. 2010).

Ο Διόδωρος ο Σικελός αναφέρει πως το Μαντείο των Δελφών αποκαλύφθηκε από ένα βοσκό και το κοπάδι του, καθώς όταν πλησίαζαν σε μεγάλα ανοίγματα της γης, όπου αναδύονταν αέρια, το κοπάδι εμφάνιζε «σπασμούς» και κραυγές, ενώ ο ίδιος προανήγγειλε γεγονότα, τα οποία εν συνεχεία επαληθεύονταν. Σύμφωνα με τον Ομηρικό ύμνο «εις Απόλλωνα», η λειτουργία του ιερού συνδέεται με την έλευση των Κρητών ευγενών από την Κνωσσό, οι οποίοι οδηγούμενοι από τον θεό Απόλλωνα, υπό τη μορφή δελφινιού, αποτέλεσαν τους πρώτους ιερείς του ιερού Μαντείου. Το τελευταίο γνώρισε μεγάλη αναγνώριση και δόξα, από τον 6^ο έως τον 8^ο προχριστιανικό αιώνα.

Στο στίχο 396, του Ομηρικού ύμνου, αναφέρεται χαρακτηριστικά πως ο Θεός χρησιμοποιούσε για τους χρησμούς του δάφνη, το ιερό φυτό του θεού Απόλλωνα, ο οποίος επικράτησε και κυριάρχησε στους Δελφούς την εποχή του Χαλκού, πριν την αρχή της Αρχαϊκής περιόδου. Οι χρησμοί ξεκίνησαν να δίνονται κάθε χρόνο και μόνο την ημέρα γενεθλίων του θεού Απόλλωνα (το σημερινό Φλεβάρη), ενώ στη συνέχεια δίνονταν μια φορά το μήνα, με εξαίρεση τους τρεις χειμερινούς μήνες, καθώς ο θεός απουσίαζε. Αργότερα, κατά τον 6^ο αιώνα, η αμφικτιονία των Δελφών, η οποία αποτελούνταν από δώδεκα έθνη και συγκεκριμένα από τις περιοχές της Πελοποννήσου, της Κεντρικής Ελλάδας, της Εύβοιας και της Αττικής ανέλαβε την ευθύνη. Έκτοτε, οι Δελφοί απέκτησαν παγκόσμια εμβέλεια, γνωστοί ως πανελλήνιο Ιερό, με αρκετούς αρχηγούς ξένων χωρών, όπως ο Κροίσος της Λυδίας, να αποστέλλουν δώρα μεγάλης αξίας.

Το 397 π.Χ., επί του αυτοκράτορα Αρκαδίου, οι Δελφοί γνώρισαν τεράστια καταστροφή, από τον Αλάρικο.

Ο Αρχαιολογικός χώρος των Δελφών και το Μαντείο υπήρξε σήμα κατατεθέν για ολόκληρο τον αρχαίο Ελληνικό κόσμο και την Ανατολική Μεσόγειο, με μεγάλο αριθμό πιστών να συρρέουν στο χώρο του Μαντείου, συγκεντρώνοντας ανυπολόγιστο πλούτο. Η δύση της τεράστιας φήμης και δόξας που γνώρισε επήλθε με τη λήξη της Ρωμαϊκής περιόδου.

Οι έρευνες στον Αρχαιολογικό Χώρο ξεκίνησαν από τους Γερμανούς το 1860 περίπου, ενώ αργότερα, το 1891, με την ίδρυση του νέου Ελληνικού κράτους, λόγω της μεγάλης σημασίας του Μαντείου και του Ιερού του Απόλλωνα, ξεκίνησε η αρχαιολογική μελέτη και η συστηματική ανασκαφή από τη Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή, η λεγόμενη και ως «Μεγάλη Ανασκαφή». Η συστηματική ανασκαφή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών ξεκίνησε μετά την απομάκρυνση του χωριού Καστρί, το οποίο ήταν χτισμένο στη θέση που βρισκόταν ο Μνημειακός Χώρος, καλυμμένος από υλικά καταπτώσεων βράχων και πλευρικά κορήματα (Εικ. 8).



Εικ. 8. Το χωριό Καστρί πριν ξεκινήσει η Μεγάλη Ανασκαφή (Ι' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων, Υπουργείο Πολιτισμού) (<http://odysseus.culture.gr/h/3/gh30.jsp>) .

2.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών αποτελούσε έναν από τους πιο επιβλητικούς και σημαντικούς χώρους στην Αρχαία Ελλάδα. Ο χώρος αυτός ήταν καλυμμένος, ήδη από το Μεσαίωνα, από το χωριό Καστρί, το οποίο, στη συνέχεια, μετατοπίστηκε δυτικότερα, για τις ανάγκες των ανασκαφικών εργασιών που ξεκίνησαν το 1892. Βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Πλείστου ποταμού, στην Κεντρική Ελλάδα. Γεωγραφικά ανήκει στην περιοχή της Φωκίδας, στην περιφέρεια της Στερεάς Ελλάδας, σε απόσταση 10 χιλιομέτρων από την Αράχωβα και περίπου 150 χιλιομέτρων, βορειοδυτικά της Αθήνας, στις νότιες πλαγιές του όρους Παρνασσού, σε ένα υψόμετρο περίπου 700 μέτρων, πλησίον του βορειότερου τμήματος του Κορινθιακού κόλπου (Εικ 9).



Εικ. 9. Τρισδιάστατος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής Κωπαΐδος-Δελφών (Μαριολάκος, 2010).

Το Δελφικό Τοπίο, όπως συχνά αποκαλείται, περιλαμβάνει μεγάλης κλίσης, σχεδόν κατακόρυφα ασβεστολιθικά πρανή, γνωστά ως Φαιδριάδες πέτρες (Parke and Wormell 1956), τα οποία ανήκουν στη γεωτεκτονική ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας. Συγκεκριμένα, η ζώνη αυτή οικοδομεί τα όρη Παρνασσός, Γκιώνα, Ελικώνας και Οίτη, ενώ βρίσκεται επωθημένη επάνω στις ζώνες της Βοιωτίας και την Πελαγονική.

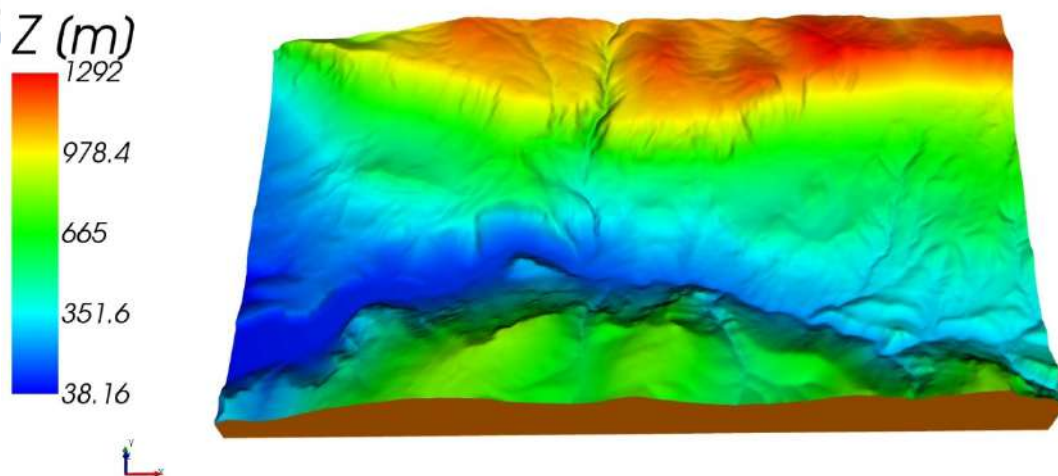
Το πανελλήνιο Ιερό των Δελφών αποτέλεσε το κέντρο του κόσμου, ενώ συνυπάρχει, σε πλήρη αρμονία, με το φυσικό περιβάλλον, όπου εντοπίζεται. Σύμφωνα με τις αναφορές των de Boer and Hale (2000) και Piccardi (2000), το επιβλητικό και μοναδικό γεωμορφολογικό περιβάλλον χαρακτηρίστηκε ως ο Ομφαλός της Γης. Ο Μνημειακός αυτός Χώρος κατείχε ιερό φορτίο και μεγάλη σημασία τον 6ο αιώνα π.Χ. και αδιαμφισβήτητα, αποτελούσε πολύ σημαντικό κέντρο λατρείας και σύμβολο ενότητας για τον Αρχαίο Ελληνικό κόσμο (Unesco – World Heritage Convention, Archaeological site of Delphi).

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Παρνασσού, σε έναν από τους χαρακτηριστικότερους και υψηλότερους ορεινούς όγκους της Ελλάδος. Στα βορειοδυτικά συναντά το όρος Γκιώνα, ενώ στα νότια το όρος Κίρφη. Τα Όρη Παρνασσός και Γκιώνα συγκαταλέγονται στους μεγαλύτερους ορεινούς όγκους, με έντονες μορφολογικές εξάρσεις και μεγάλα παρατηρούμενα υψόμετρα. Επομένως, ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών βρίσκεται σε μια πολύ ιδιαίτερη, μορφολογικά, θέση, την οποία συνθέτουν οι μεγάλες και απότομες κλίσεις, καθώς και τα πολύ μεγάλης κλίσης και σχεδόν κατακόρυφα, ασβεστολιθικά πρηνή, τα οποία υψώνονται ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου, όπου περιλαμβάνεται το σύνολο, σχεδόν, των Μνημείων του (Εικ. 10).

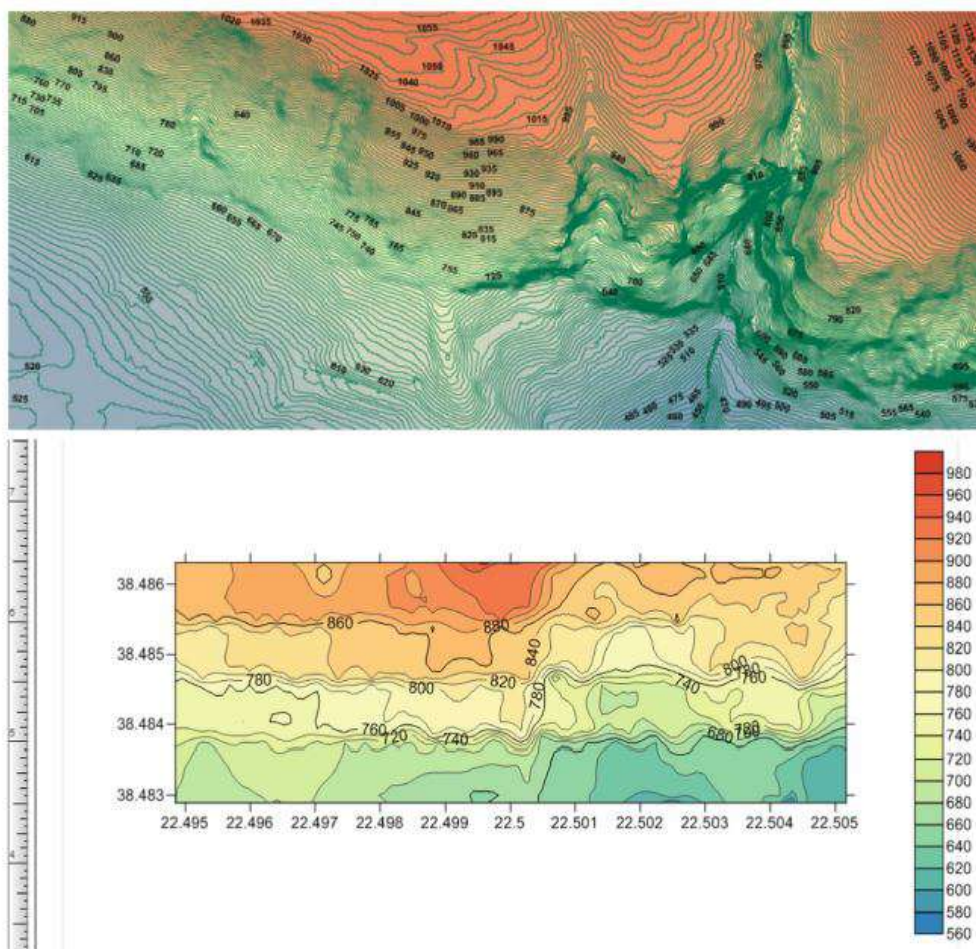


Εικ. 10. Τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Pix4Dmapper, από λήψη με UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Παρατηρούνται τα πολύ μεγάλης κλίσης, ασβεστολιθικά πρανή, ανάντη του Χώρου, όπου περιλαμβάνεται το σύνολο των μνημείων.

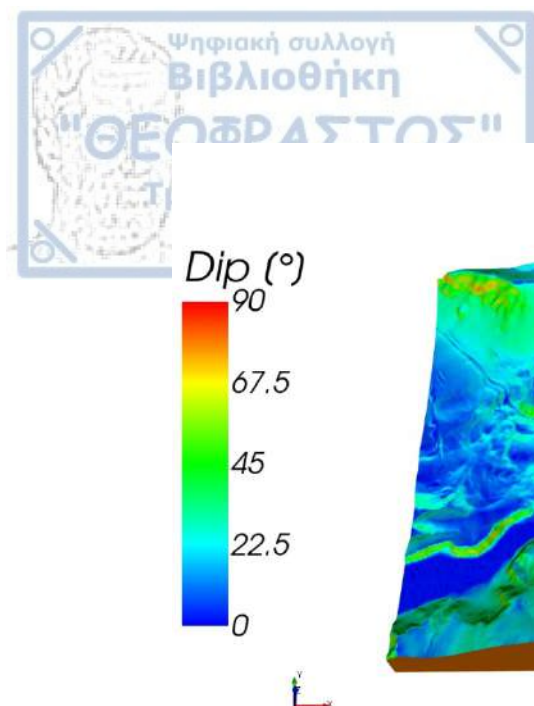
Για την καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση των υψηλών κλίσεων του Χώρου δημιουργήθηκαν τρισδιάστατοι χάρτες χωρικής αποτύπωσης των διευθύνσεων κλίσεων, των γωνιών κλίσεων των κλιτύων και της υψομετρικής διακύμανσης, για την περιοχή έρευνας, σε τρισδιάστατη (3D) μορφή. Συγκεκριμένα, για τη δημιουργία τους αξιοποιήθηκε το περιβάλλον του λογισμικού Rocpro3D v.6.1, όπου εισήχθη το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DEM) του Εθνικού Κτηματολογίου, της ευρύτερης περιοχής έρευνας, με χωρική ανάλυση 5 x 5 μέτρα (m). Παράλληλα, η υψομετρική διακύμανση της περιοχής αποτυπώθηκε, σε χάρτες υψομετρικής διακύμανσης, οι οποίοι δημιουργήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού SURFER, καθώς και μέσα στο περιβάλλον των ArcGIS v. 10.8.1 (Devlioti et al. 2019).



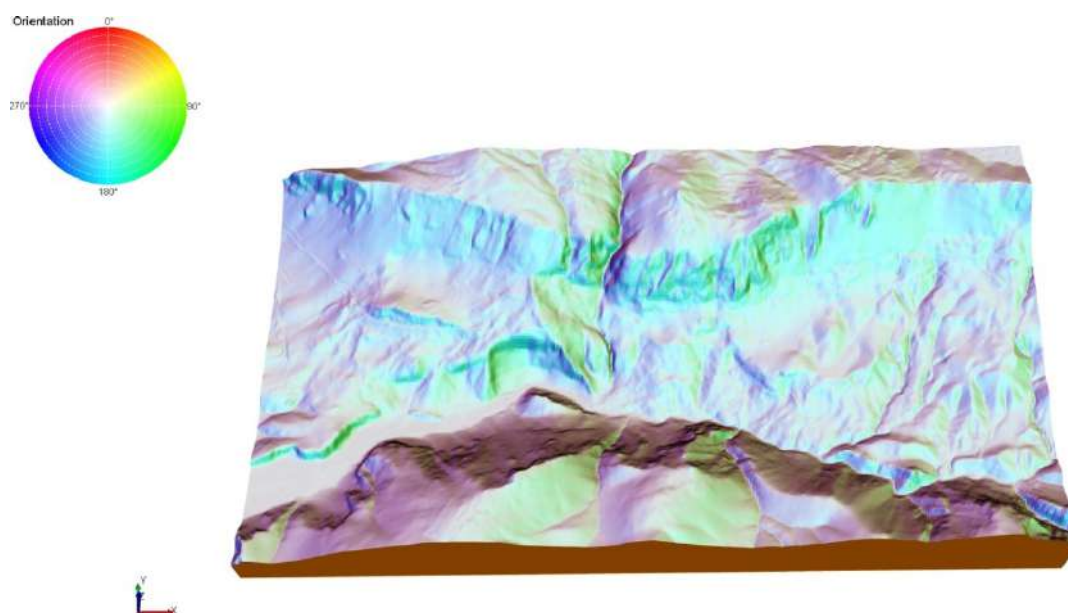
Εικ. 11. Τρισδιάστατος χάρτης χωρικής απεικόνισης της υψομετρικής διακύμανσης στην ευρύτερη περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 .



Εικ. 12.(1) Χωρική κατανομή της υψομετρικής διακύμανσης, με τη χρήση του λογισμικού Surfer και (2) μέσα σε περιβάλλον ArcGIS, με τη χρήση του ArcMap (Devlioti et al. 2019).



Εικ. 13. Τρισδιάστατος χάρτης χωρικής απεικόνισης της διακύμανσης των γωνιών κλίσεων των κλιτύων στην ευρύτερη περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 .



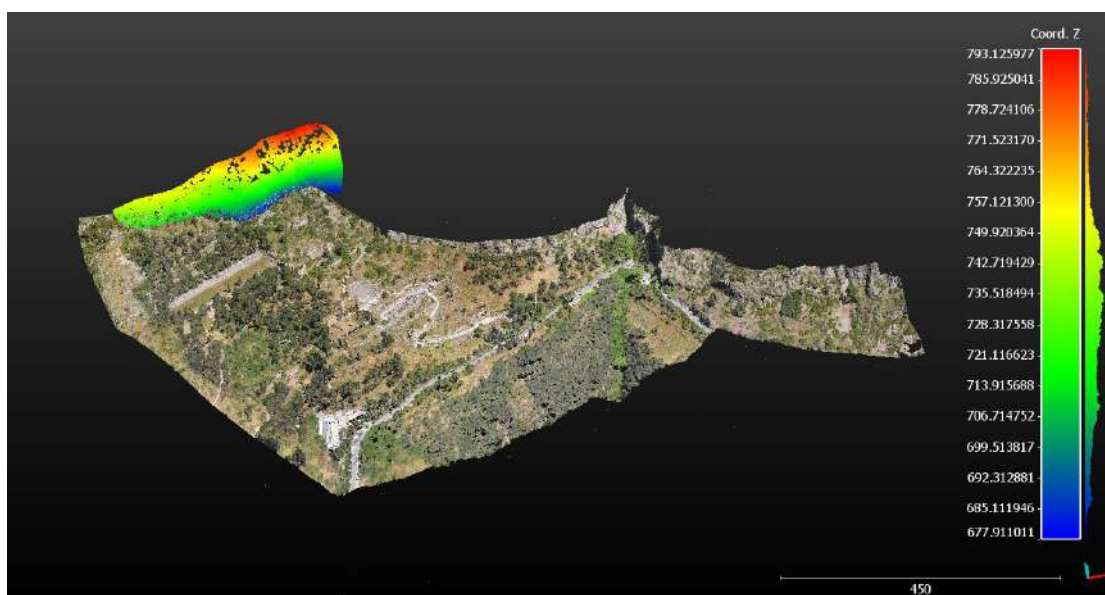
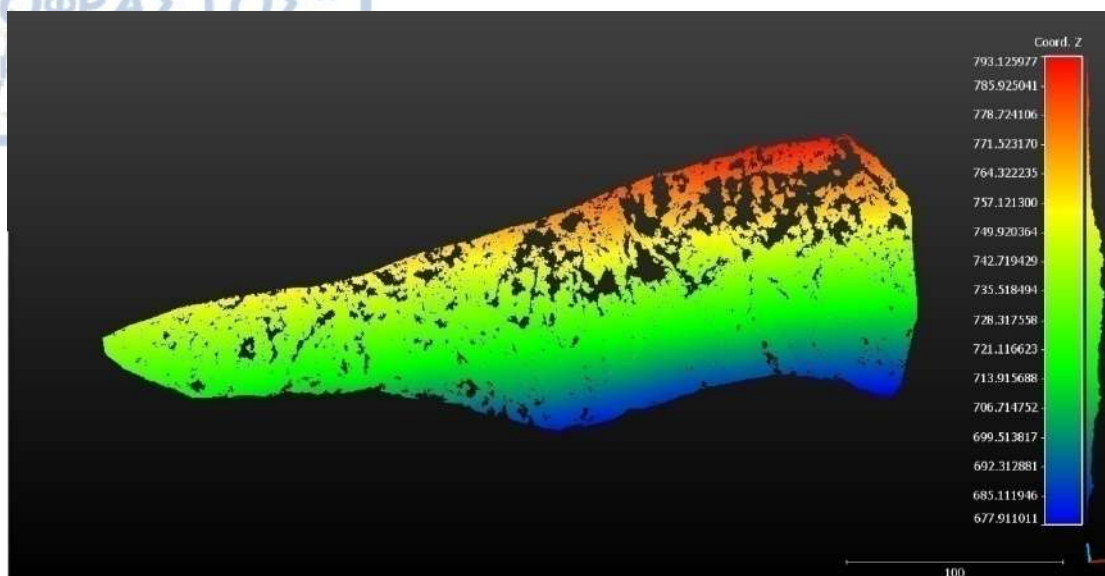
Εικ. 14. Τρισδιάστατος χάρτης χωρικής απεικόνισης της διακύμανσης των διευθύνσεων κλίσεων των κλιτύων, στην ευρύτερη περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 .

Σύμφωνα, επομένως, με τη χρωματική διαβάθμιση του υπομνήματος που περιλαμβάνεται στους χάρτες που δημιουργήθηκαν, αποδίδεται η υψομετρική διακύμανση, η οποία κυμαίνεται από 500 μέτρα (m), περίπου, στον Μνημειακό Χώρο, έως 900 μέτρα (m), περίπου, στην κορυφή του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Χώρου.

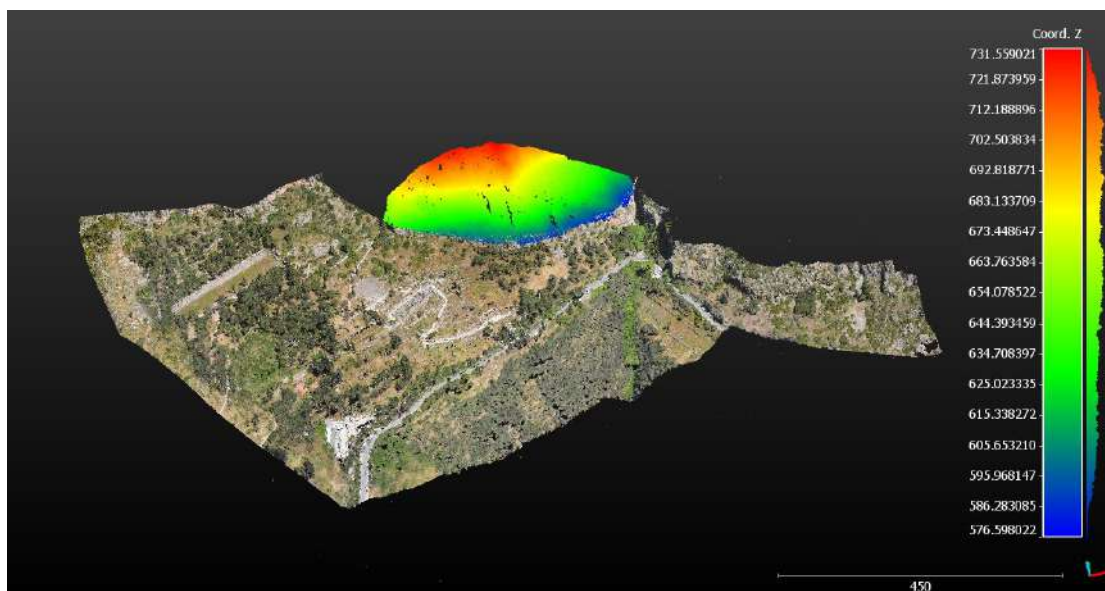
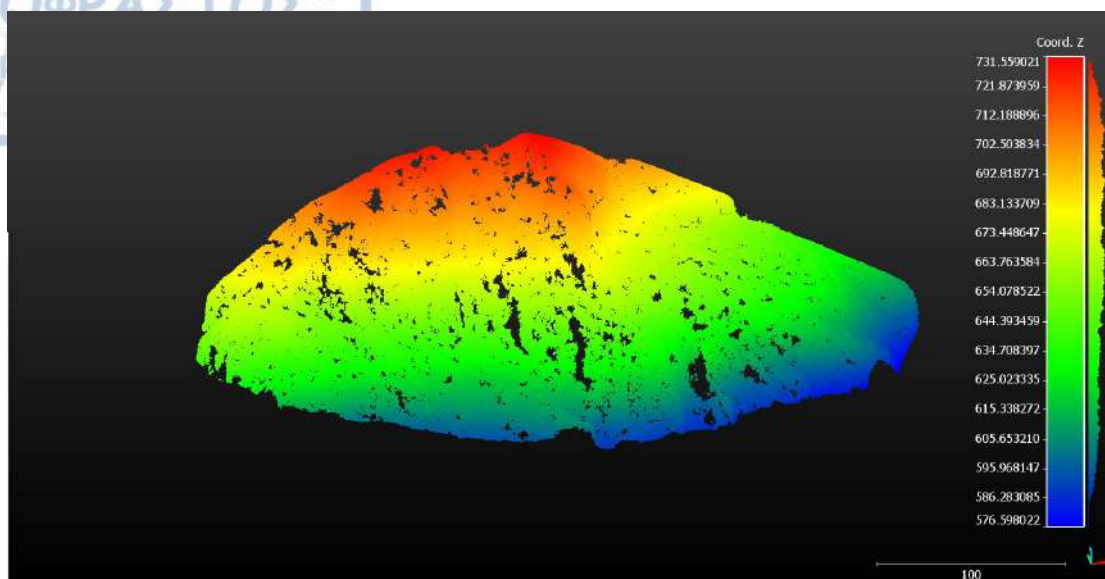
Τα υψόμετρα που καταγράφονται στην περιοχή έρευνας, σύμφωνα με τον τρισδιάστατο χάρτη χωρικής απεικόνισης της υψομετρικής διακύμανσης της ευρύτερης περιοχής του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 κυμαίνονται από 38,16 m, στον ποταμό Πλείστο, έως και 1292 m, περίπου, στις υψηλότερες θέσεις (Εικ. 11 & 12).

Τα εξεταζόμενα βραχώδη πρανή, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών χαρακτηρίζονται από μεγάλες κλίσεις ($\geq 70^\circ$ περίπου), στα ανώτερα κυρίως σημεία τους, όπως αποτυπώθηκαν στους τρισδιάστατους χάρτες χωρικής απεικόνισης της διακύμανσης των γωνιών κλίσεων, στην ευρύτερη περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 (Εικ. 13).

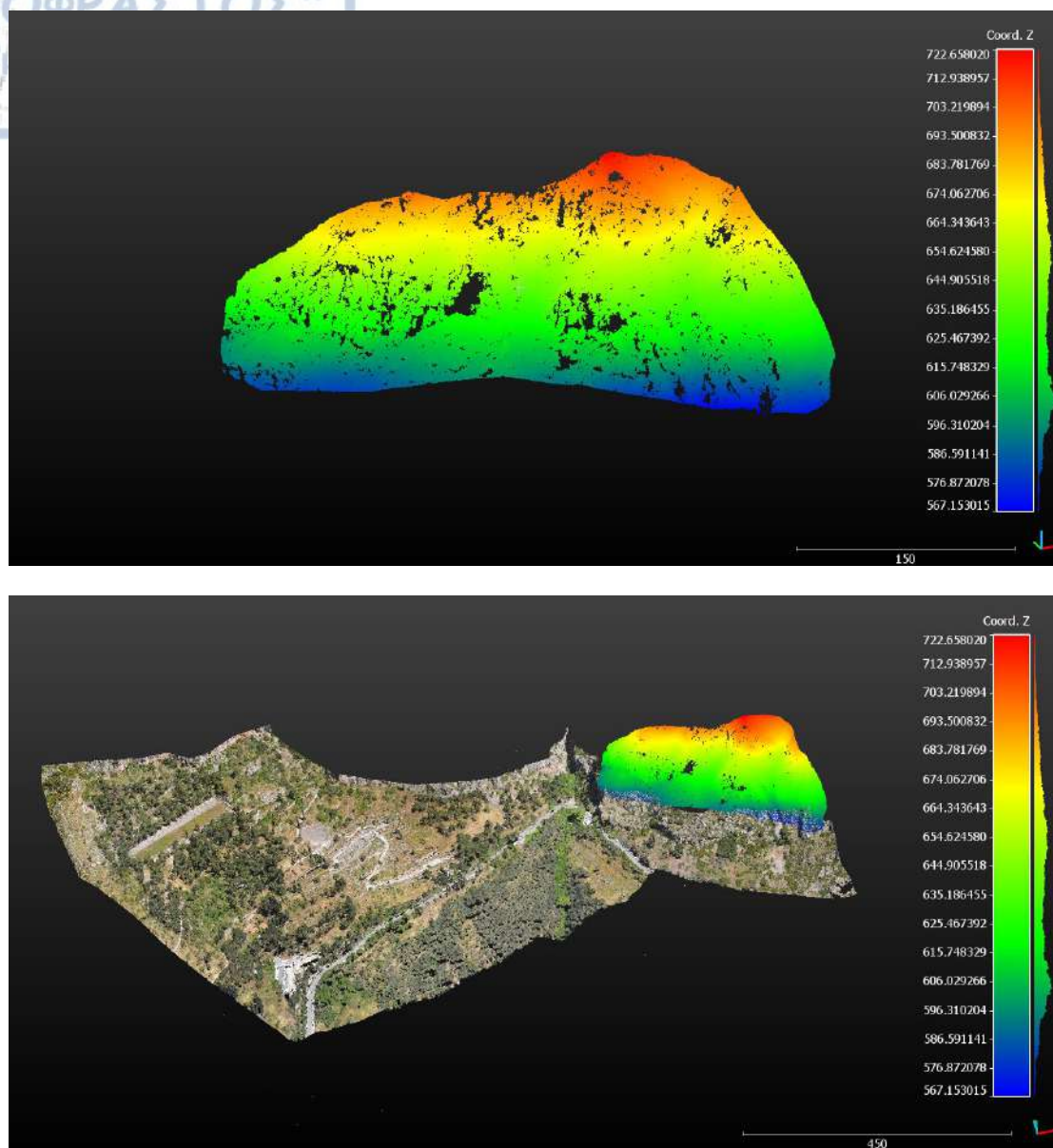
Για την αποτύπωση της γεωμορφολογικής εικόνας στη στενή περιοχή έρευνας, αξιοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), το οποίο δημιουργήθηκε από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την πτήση με UAV και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Στα σχήματα που ακολουθούν, τα οποία δημιουργήθηκαν με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού CloudCompareTM, αποτυπώνεται η κατανομή των υψομέτρων, των κλίσεων των επιφανειών των κλιτύων και οι διευθύνσεις κλίσης τους. Συγκεκριμένα, οι τιμές των υψομέτρων στην περιοχή έρευνας κυμαίνονται από 680 έως 790 μέτρα (m), περίπου, στο δυτικό τμήμα του Αρχαιολογικού Χώρου, από 580 έως 730 μέτρα (m), περίπου, στο κεντρικό τμήμα και από 570 έως 720 μέτρα (m), περίπου, στο ανατολικό τμήμα. Γενικά, η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται, μορφολογικά, από πολύ υψηλά και απόκρημνα βραχώδη πρανή ($\geq 70^\circ$).



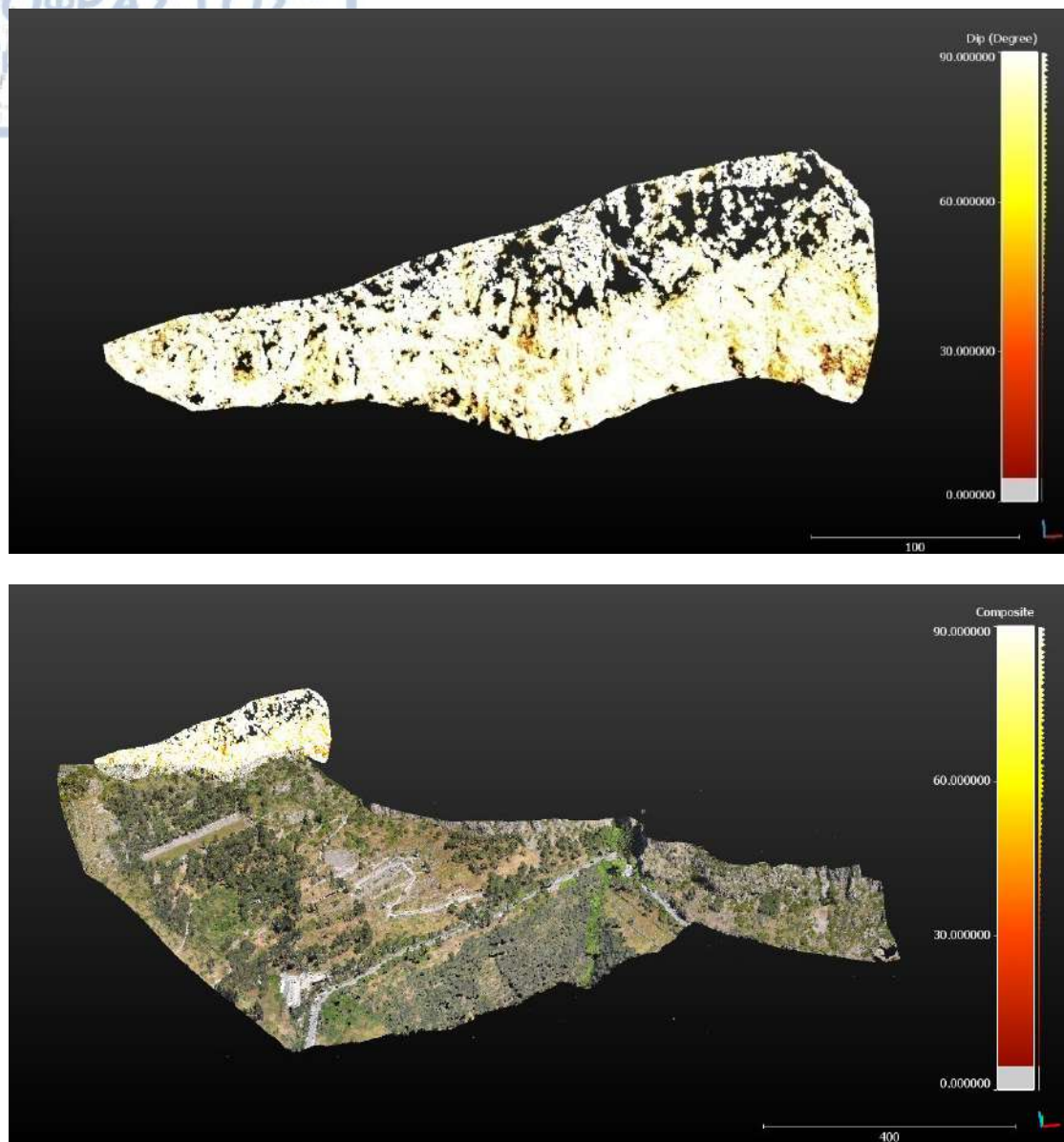
Εικ. 15. Υψομετρική διακύμανση στο δυτικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



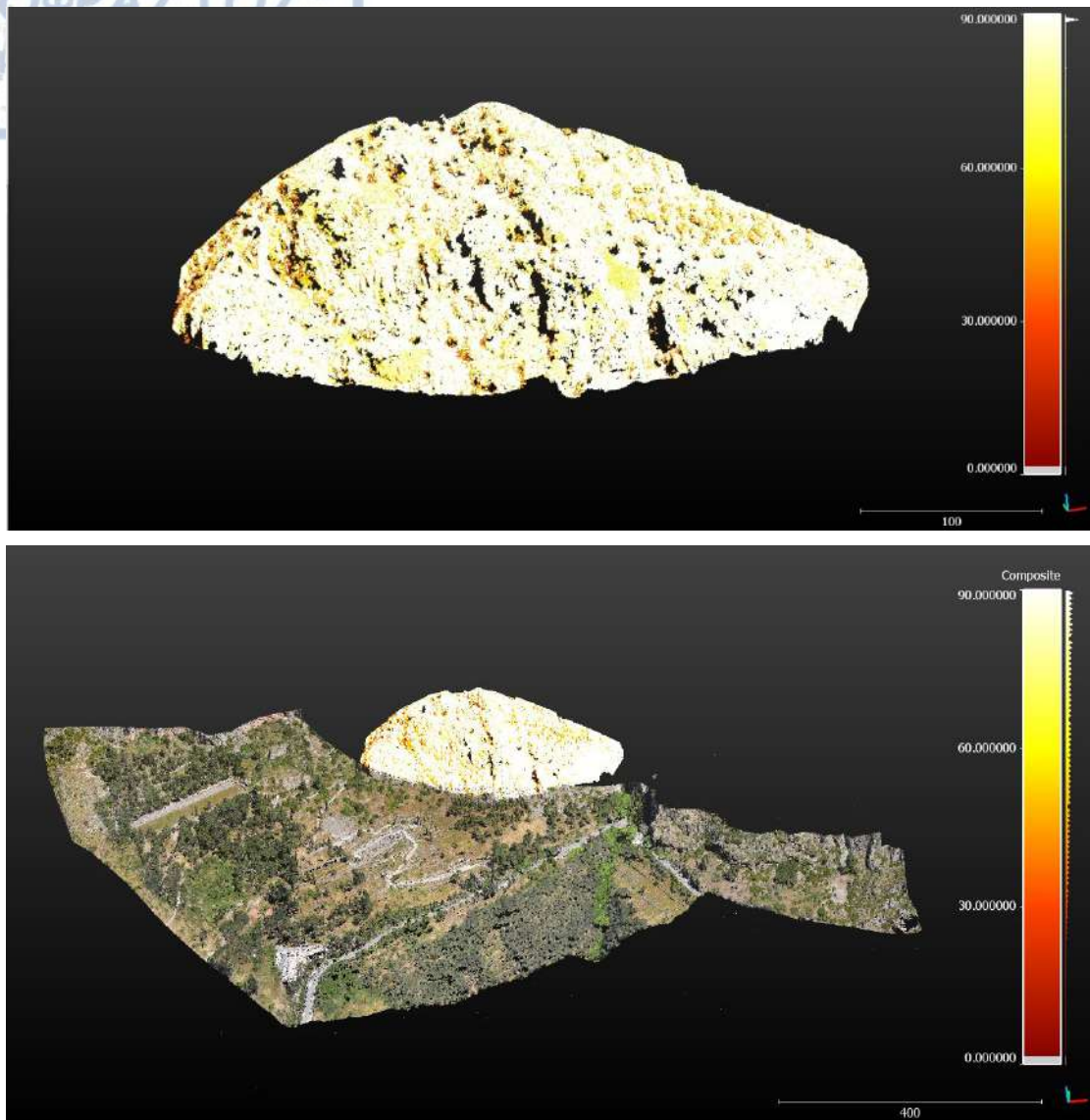
Εικ. 16. Υψομετρική διακύμανση στο κεντρικό τμήμα του βραχώδους πρσανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



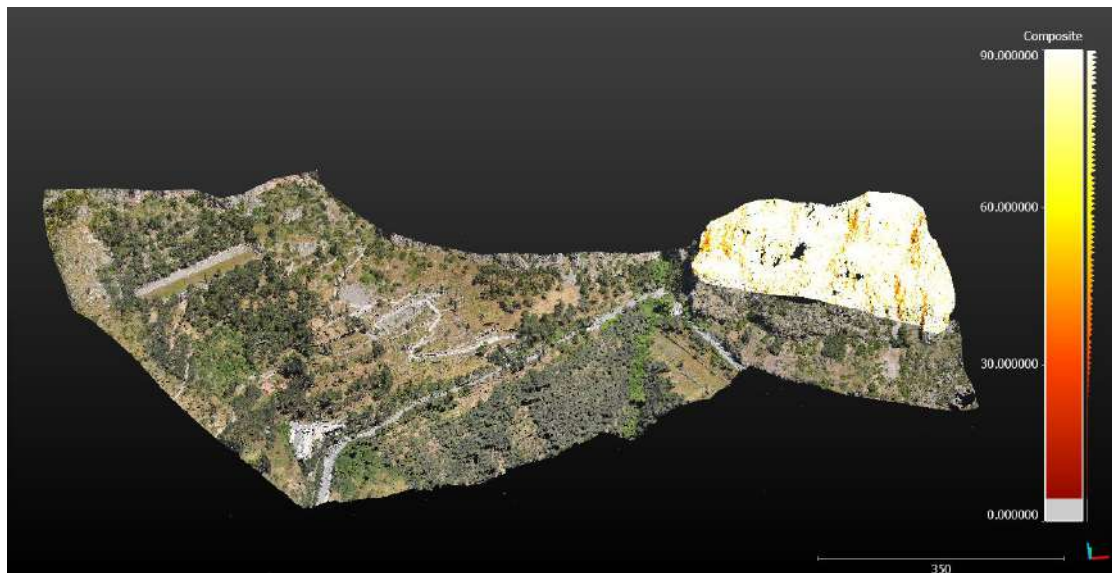
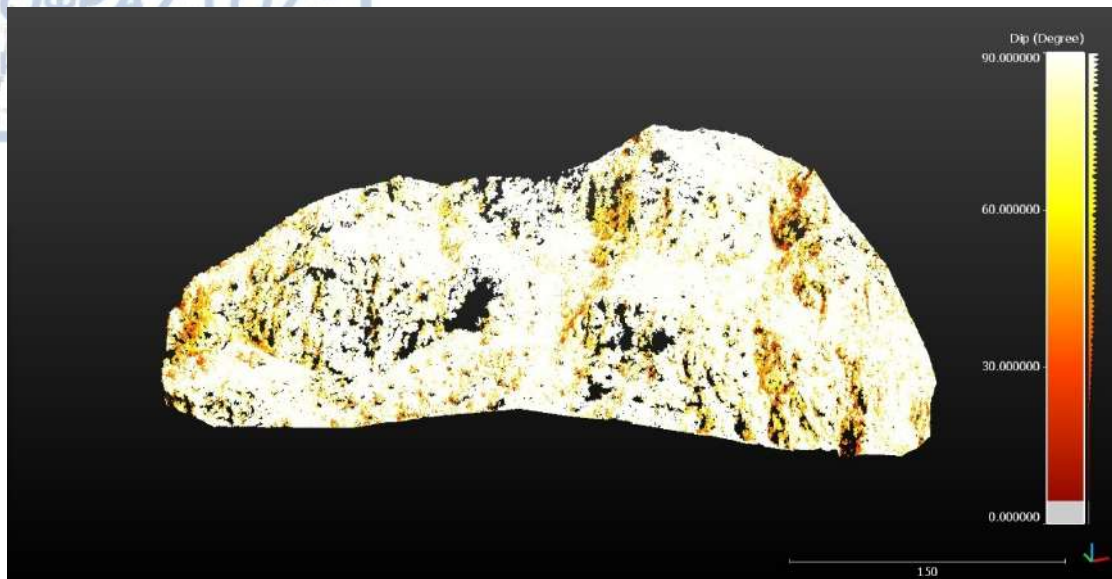
Εικ. 17. Υψομετρική διακύμανση στο ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



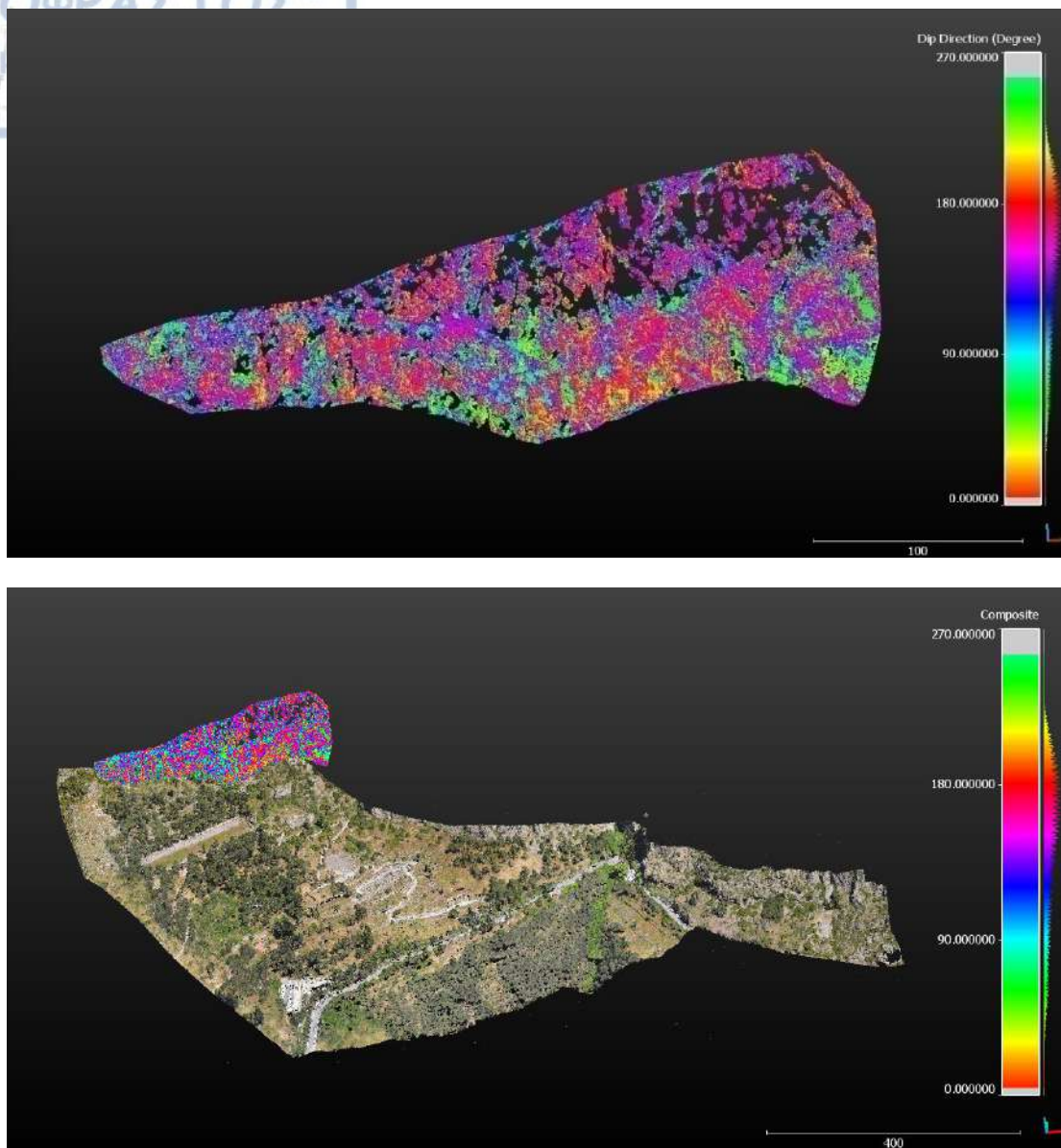
Εικ. 18. Κατανομή των κλίσεων των κλιτύων στο δυτικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompareTM.



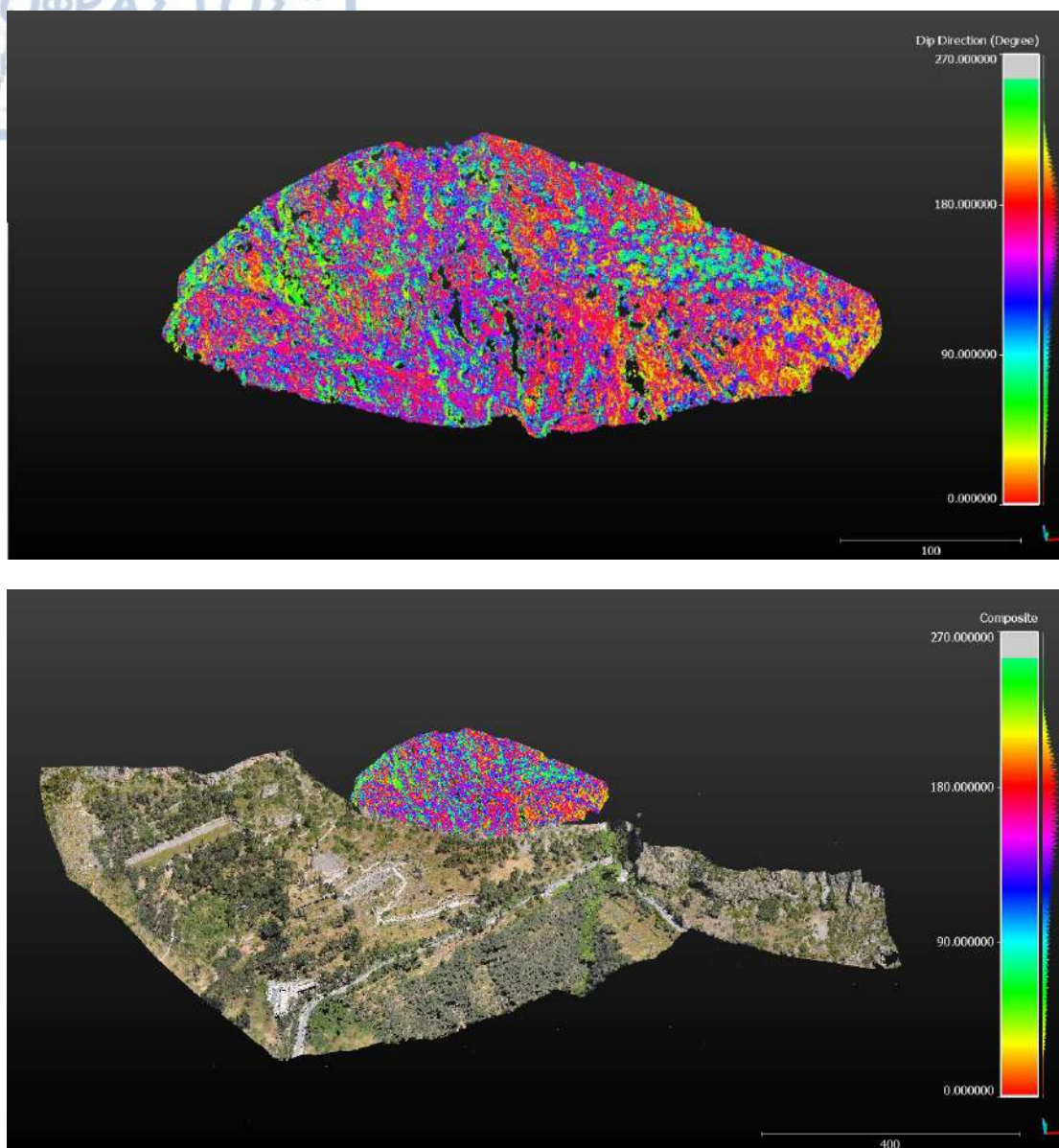
Εικ. 19. Κατανομή των κλίσεων των κλιτύων στο κεντρικό τμήμα του βραχώδους πρανού, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



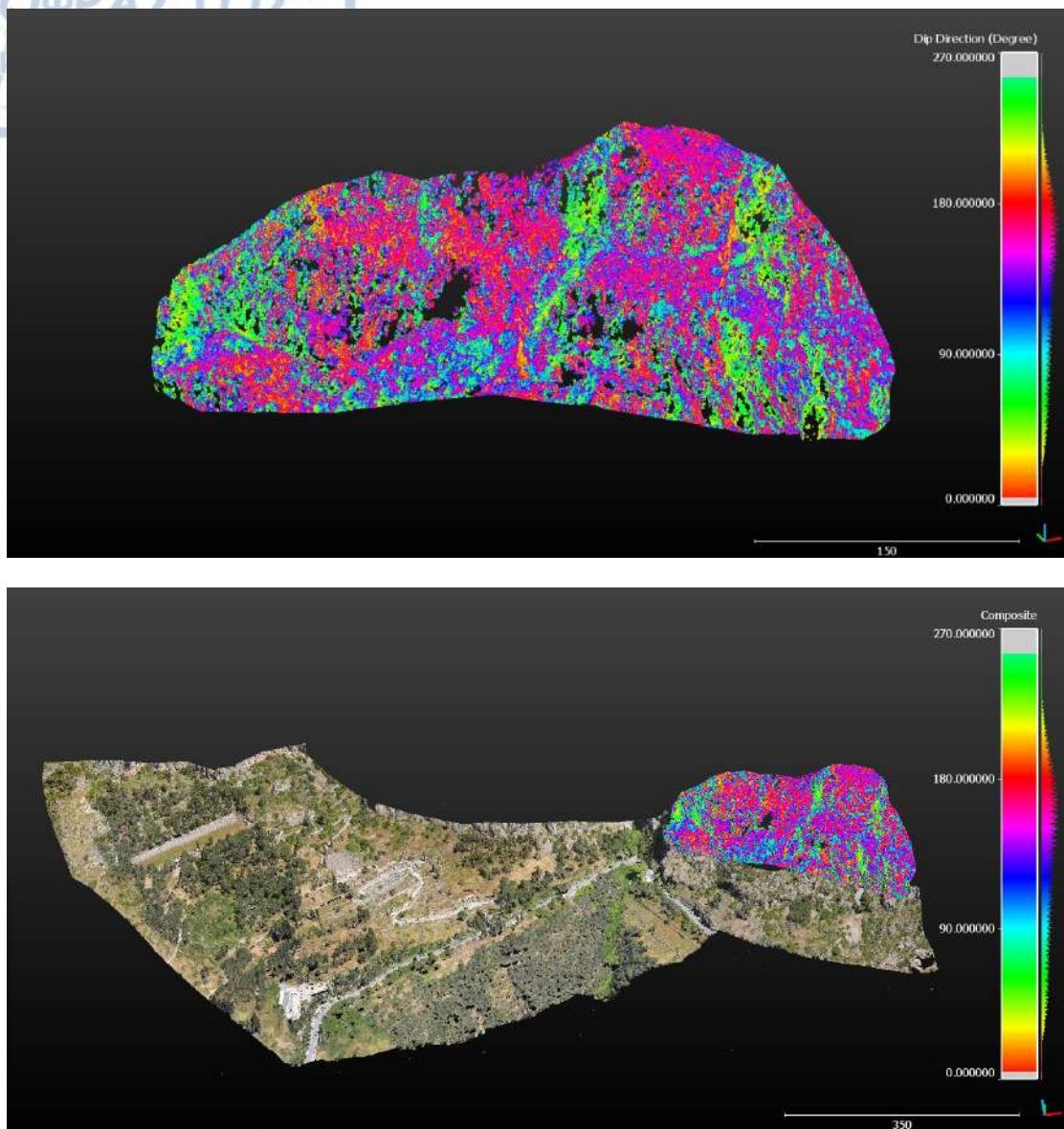
Εικ. 20. Κατανομή των κλίσεων των κλιτύων στο ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανού, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



Εικ. 21. Κατανομή της διεύθυνσης κλίσης των κλιτύων στο δυτικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



Εικ. 22. Κατανομή της διεύθυνσης κλίσης των κλιτύων στο κεντρικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.



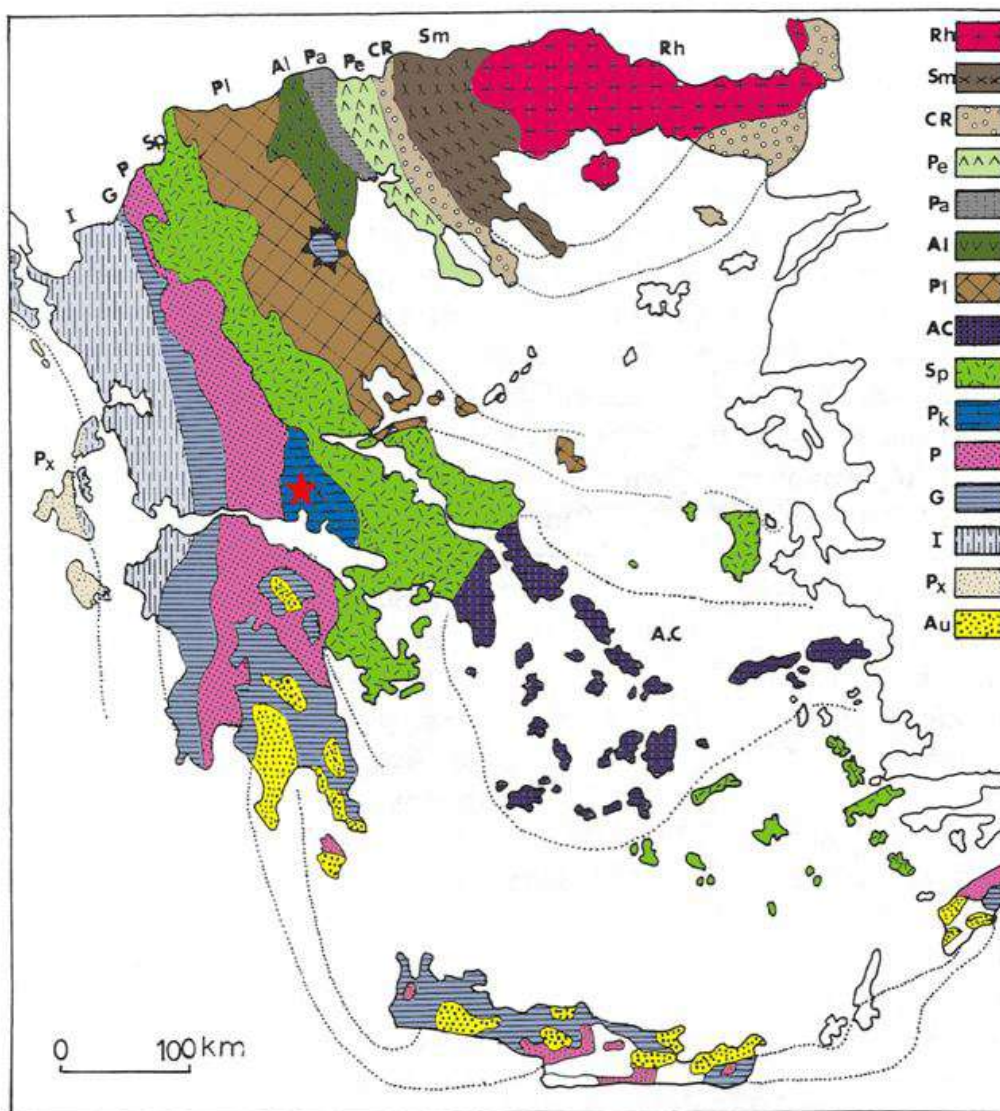
Εικ. 23. Κατανομή της διεύθυνσης κλίσης των κλιτύων στο ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως δημιουργήθηκε από την επεξεργασία του 3D point cloud, μέσα στο ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.

2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

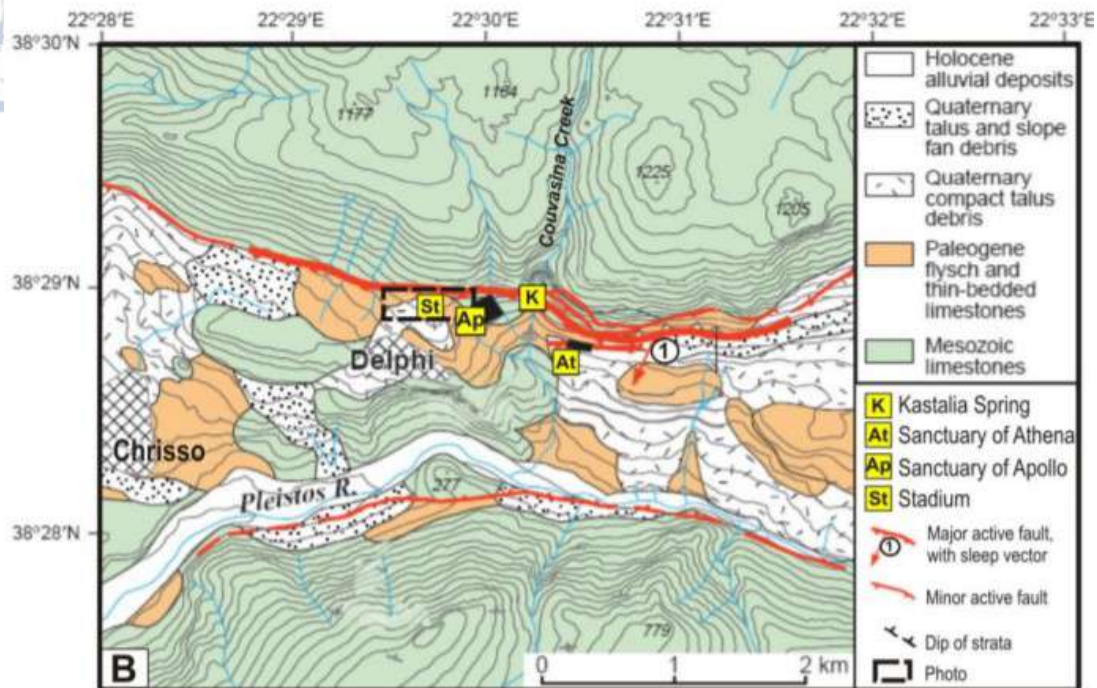
Η περιοχή έρευνας εντάσσεται στην γεωτεκτονική ενότητα Παρνασσού-Γκιώνας (Εικ. 9). Σύμφωνα με τους Μουντράκης (2010) και Παπανικολάου (2015), η προαναφερθείσα Ζώνη περικλείει τους ορεινούς όγκους του Παρνασσού και της Γκιώνας και στα βόρεια ένα τμήμα της Οίτης. Σ αυτήν την ζώνη εντοπίζονται οι βωξιτικοί σχηματισμοί, οι οποίοι καλύπτουν μεγάλη έκταση, καθώς και υφαλογόνα και νηριτική ιζηματογένεση, με ιδιαίτερους ιζηματολογικούς υφάλους (κοράλια, στρωματολίθοι κ.ά) (Εικ. 10). Στρωματογραφικά, η ζώνη Παρνασσού Γκιώνας αναπτύσσεται ως εξής:

- **Ανώτερο Τριαδικό:** δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι.
- **Κατώτερο-Μέσο Ιουρασικό:** βιτουμενιούχοι ασβεστόλιθοι.
- **Ανώτερο Ιουρασικό:** νηριτικοί ασβεστόλιθοι
- **Κάτω Κρητιδικό:** μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι,
- **Ανώτερο Κρητιδικό:** ασβεστόλιθοι με ρουδιστές που αποτέθηκαν κατά το Τουρώνιο-Κατώτερο Καμπάνιο και ασβεστόλιθοι πελαγικοί του Ανώτερου Καμπανίου-Μαιστριχτίου
- **Παλαιόκαινο:** πηλίτες, μάργες και παρεμβολές ασβεστολιθικών λατυποπαγών
- **Σχηματισμός Φλύσχη:** εναλλαγές ψαμμιτών, πηλιτών, αργίλων και κροκαλοπαγών (Παλαιόκαινο – Άνω Ηώκαινο) (Βαλκανιώτης 2009).

Η ευρύτερη περιοχή των Δελφών αποτελείται κυρίως από τους αλπικούς σχηματισμούς της γεωτεκτονικής ζώνης του Παρνασσού, οι οποίοι καλύπτονται κατά τόπους από τεταρτογενείς χερσαίες χαλαρές αποθέσεις. Σε μια περιορισμένη περιοχή, κοντά στην παράκτια ζώνη εντοπίζονται οι Σχηματισμοί της Ζώνης της Πίνδου (Εικ. 24).

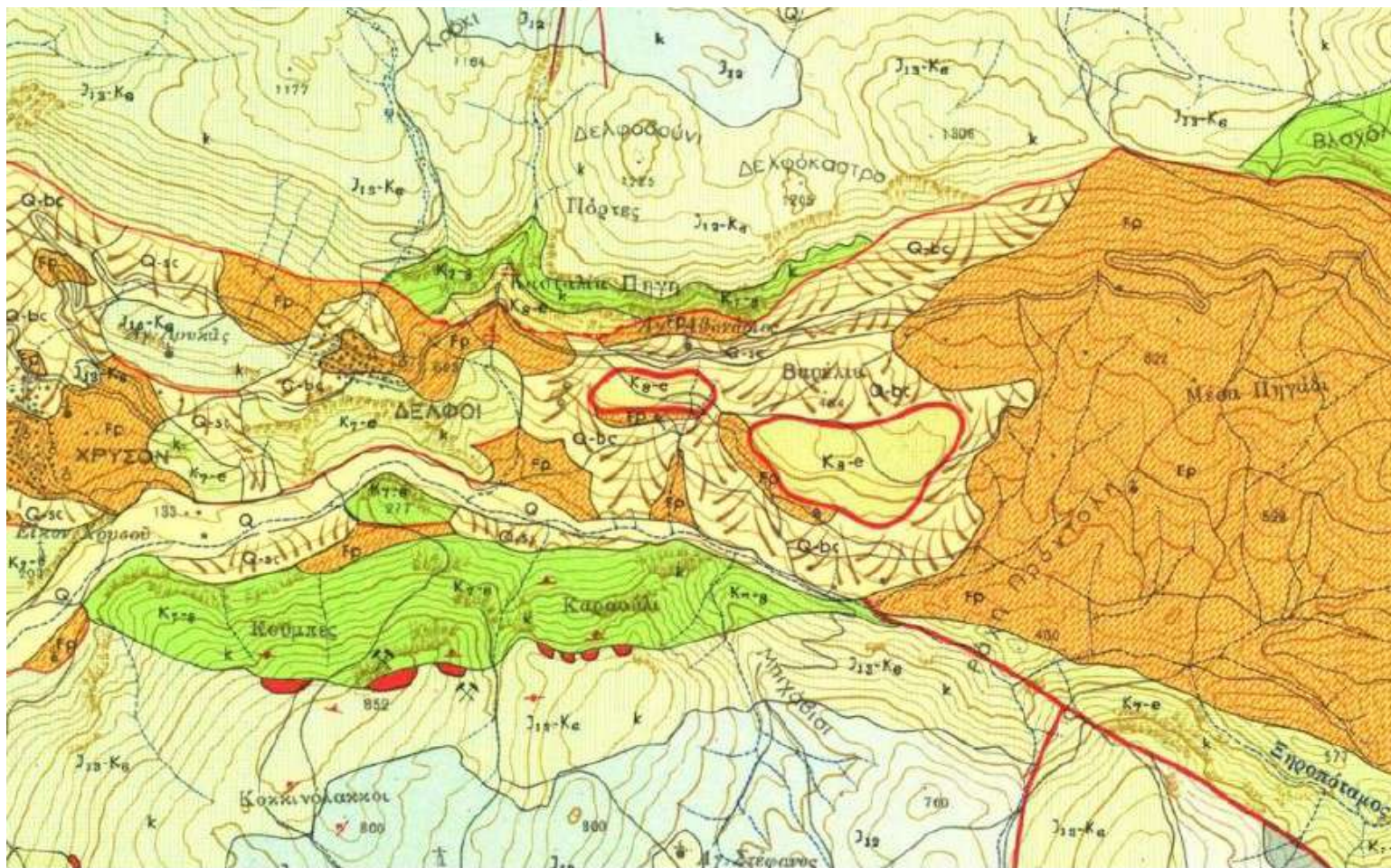


Εικ. 24. "Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξιού, PI: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα «πλακώδεις ασβεστόλιθοι-Ταλέα όρη» πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (Κατά Mountrakis et al. 1983)". Με κόκκινο αστερίσκο συμβολίζεται η περιοχή έρευνας (Μουντράκης 2010).

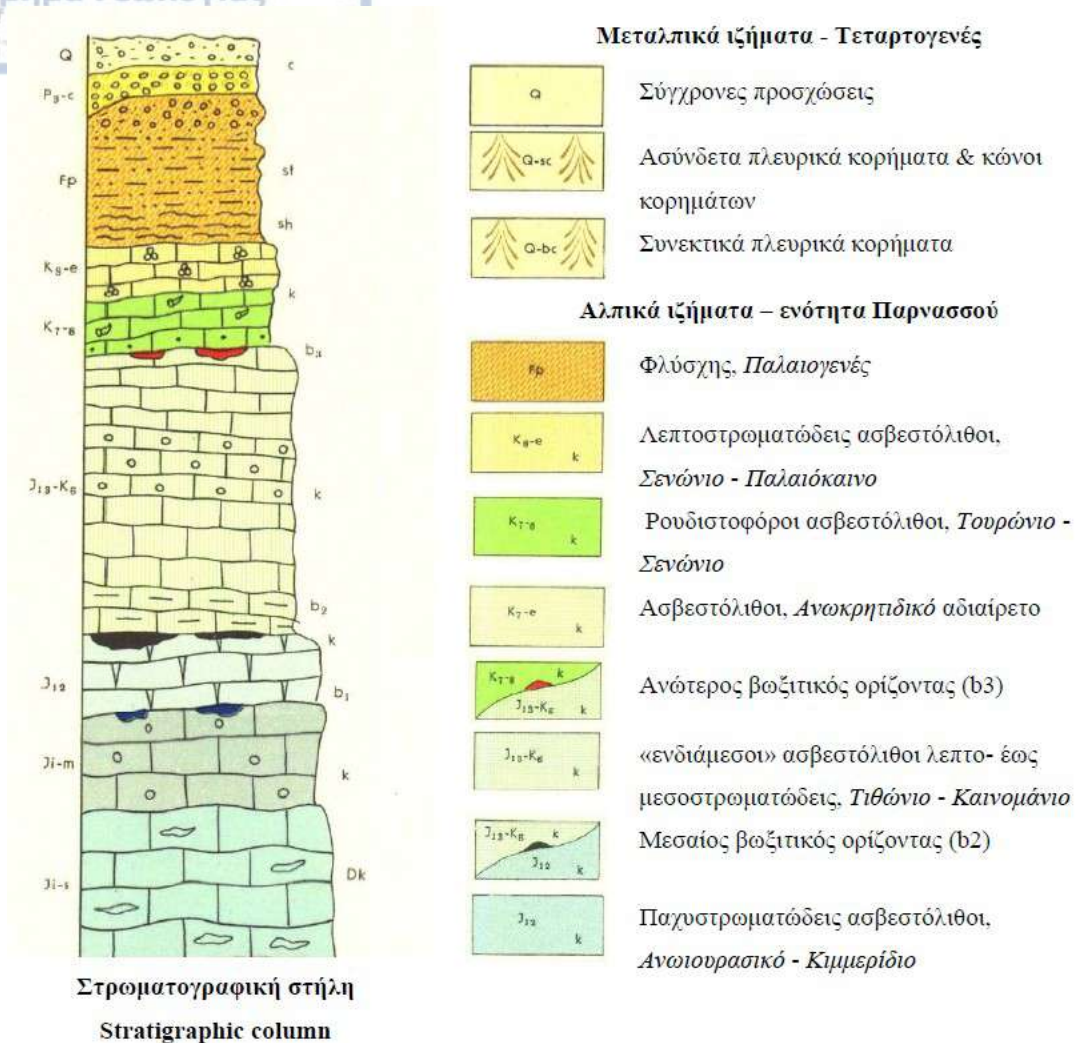


Εικ. 25. Τροποποιημένος γεωλογικός χάρτης της θέσης των Δελφών όπου K: Κασταλία πηγή, At:Ναός της Αθηνάς, Ap:Ναός του Απόλλωνα και St:Στάδιο. Με κόκκινο βελάκι σημειώνεται το κύριο ενεργό ρήγμα (1), ενώ με κόκκινη γραμμή το δευτερεύον ενεργό ρήγμα. Στο υπόμνημα του χάρτη αναφέρονται οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή έρευνας, οι οποίοι από πάνω προς τα κάτω είναι οι εξής: Ολοκαινικές αλλούβιες αποθέσεις, Τεταρτογενή θραύσματα βραχώδους υλικού, Τεταρτογενή συμπαγή θραύσματα βραχώδους υλικού, Φλύσχη του Παλαιογενούς και λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, Μεσοζωϊκοί ασβεστόλιθοι (Piccardi L. 2000).

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής έρευνας συνιστούν οι αλπικοί σχηματισμοί και συγκεκριμένα οι νηριτικοί ασβεστόλιθοι, μεσαίοι έως παχυστρωματώδεις, Τριαδικής έως Κρητιδικής ηλικίας, ακολουθούμενοι από μια ακολουθία σχηματισμών φλύσχη (Εικ. 25 & 26). Η τελευταία αφορά σε εναλλαγές καφέ-κόκκινων αργιλολίθων, ιλυολίθων και ψαμμιτών, με σημαντική ποσότητα ασβεστόλιθου, όπως αποτυπώνεται χαρακτηριστικά και στη στρωματογραφική στήλη της Εικόνας 27. Λόγω της αλπικής συμπίεστικής τεκτονικής που υπέστησαν, οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται πολύ έντονα διαρρηγμένοι και αποδιοργανωμένοι, έχοντας ως αποτέλεσμα το σχηματισμό πτυχών και επωθήσεων της ανώτερης Ηωκαινικής ηλικίας.



Εικ. 26. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Δελφών. Τμήμα του Φύλλου «Δελφοί». Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος του ΕΑΓΜΕ, κλίμακας 1:50.000.



Εικ. 27. Στρωματογραφική στήλη και υπόμνημα των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή των Δελφών. Τμήμα του φύλλου ΔΕΛΦΟΙ. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος του ΕΑΓΜΕ, κλίμακας 1:50.000.

Αυτή η τεκτονική έχει αντιστρέψει την κανονική ακολουθία των γεωλογικών σχηματισμών με μια τεράστια ανάστροφη πτυχή, η οποία οδήγησε στην επώθηση των παλαιότερων ασβεστόλιθων επάνω στους νεότερους σχηματισμούς του φλύσχη, όπως άλλωστε παρατηρείται στο βόρειο ανάντη τμήμα του Χώρου, δηλαδή την περιοχή έρευνας. Ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών αναπτύσσεται επάνω στο σχηματισμό του φλύσχη, ενώ ο ασβεστόλιθος είναι επωθημένος στο ανάντη βόρειο τμήμα του. Το μέτωπο του ασβεστολιθικού αυτού πρηνούς, στην περιοχή του Μνημειακού Χώρου έχει διεύθυνση Ανατολής-Δύσης και βυθίζεται προς το Βορρά, υπό γωνία 40–60°. Αυτοί οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται ιδιαίτερα καρστικοποιημένοι, με αποτέλεσμα να

παρατηρούνται πολυάριθμες πηγές στην ευρύτερη περιοχή, με πιο γνωστές την περίφημη Κασταλία Πηγή και την πηγή της Κέρνας. Η Κασταλία Πηγή αποτελεί μια μικρή, σχετικά πηγή, από έναν επικρεμάμενο τοπικό υδροφόρο ορίζοντα, που βρίσκεται στην επαφή των ασβεστόλιθων με το φλύσχη. Ιστορικά, ο ρόλος της Κασταλίας πηγής ήταν καθοριστικός για τη λειτουργία του Μαντείου των Δελφών, καθώς το νερό της πηγής χρησιμοποιούνταν για τη λειτουργία του, την καθαριότητα της Πυθίας, του προσωπικού και του ναού του Απόλλωνα. Η Κασταλία Πηγή εντοπίζεται στη χαράδρα των Φαιδριάδων και το νερό της αναβλύζει και οδηγείται, με τη μορφή χειμάρρου, στην κοιλάδα του Πλείστου. Το νερό της, ανάβλυζε στην κρήνη της, μεταξύ του ναού του Απόλλωνα και του Αρχαίου Γυμνασίου των Δελφών.

Στο Αρχαιολογικό Χώρο διακρίνονται οι πρόσφατοι, μεταλλικοί γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται από κώνους κορημάτων και βραχώδη τεμάχια, τα οποία, με τη σειρά τους έχουν προκύψει από προηγούμενα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων και καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα του Αρχαιολογικού Χώρου, με πάχος που κυμαίνεται από 2 μέτρα (m) στο βόρειο ανάντη τμήμα, έως 12-15 μέτρα (m) στο νότιο κατόντη τμήμα του Χώρου. Η εναπόθεση και το πάχος αυτού του υλικού συνδέεται με την πολύ έντονη μορφολογία του βραχώδους πρσανούς και με την έντονη ρηγμάτωσή του, που οδηγούν σε βραχοκαταπτώσεις και ανατροπές, φαινόμενα που ενεργοποιούνται από την ύπαρξη κάποιου εναύσματος και κυρίως από την ύπαρξη σεισμού.

Όσον αφορά στις τεκτονικές συνθήκες, η πλειο-τεταρτογενής επέκταση προκάλεσε την προοδευτική ρήξη της περιοχής και την καθίζηση στον Κορινθιακό Κόλπο, ενώ γενικά αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές ενεργές τεκτονικές δομές του ελληνικού χώρου (Marinos, P. et al. 2010).

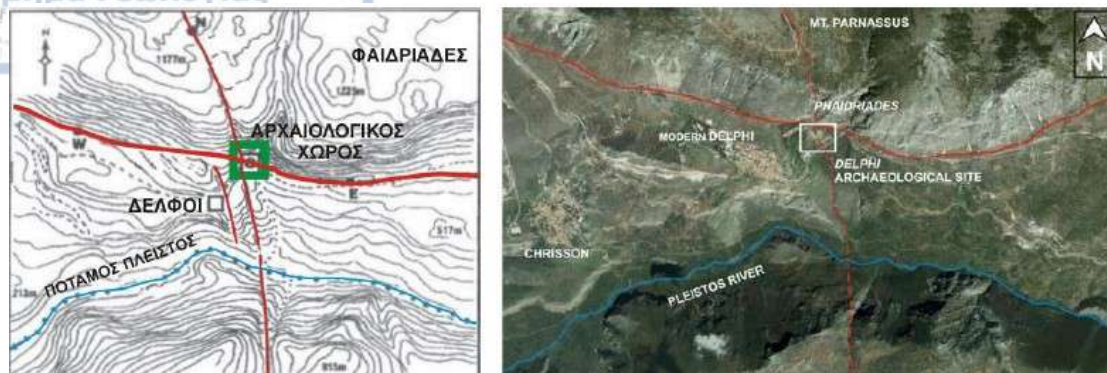
Η περιοχή έρευνας παρουσιάζει μεγάλο σεισμικό ενδιαφέρον, γεγονός που οδήγησε στη μελέτη του ρήγματος των Δελφών (Εικ. 28). Με τη συστηματική διερεύνηση του ρήγματος των Δελφών ασχολήθηκε η Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή, με πρώτο ερευνητή το Γάλλο γεωλόγο Pécoux (Pécoux 1977, Bousquet and Pécoux 1977, Bousquet et al. 1977), ενώ παράλληλα οι Sebrier (1977), de Boer (1992), Piccardi (2000), de Boer & Hale (2000), de Boer et al. (2001) και Etiope et al. (2006), οι οποίοι, με εξαίρεση τον Sebrier, ασχολήθηκαν κυρίως με τον Χώρο του Μαντείου.



Εικ. 28. Χωριό Καστρί, στη θέση που βρίσκεται σήμερα ο Αρχαιολογικός χώρος των Δελφών, πριν αρχίσει η Μεγάλη Ανασκαφή (La Grande Fouille), το 1891. Πίσω από τον οικισμό φαίνεται η ρηξιγενής ζώνη του ρήγματος των Δελφών (Γ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων, Υπουργείο Πολιτισμού).

Στην περιοχή έρευνας εντοπίζεται μία από τις σημαντικότερες τεκτονικές δομές του ελληνικού χώρου, η ρηξιγενής ζώνη Άμφισσας – Δελφών – Αράχοβας (ΡΖΑΔΑ) και ειδικότερα το ρήγμα Δελφών-Αράχοβας, νότια του όρους Παρνασσού.

Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει στο κεντρικό της τμήμα ένα πλαγιοκανονικό ρήγμα, το ρήγμα των Δελφών, το οποίο κλίνει προς τα Νότια. Στη βάση του αποτελείται από Κρητιδικούς και Ιουρασικούς ασβεστόλιθους της Ζώνης Παρνασσού-Γκιώνας, ενώ στην κοιλάδα του Πλείστου εμφανίζεται επιφανειακά ο φλύσχος του Παλαιογενούς.



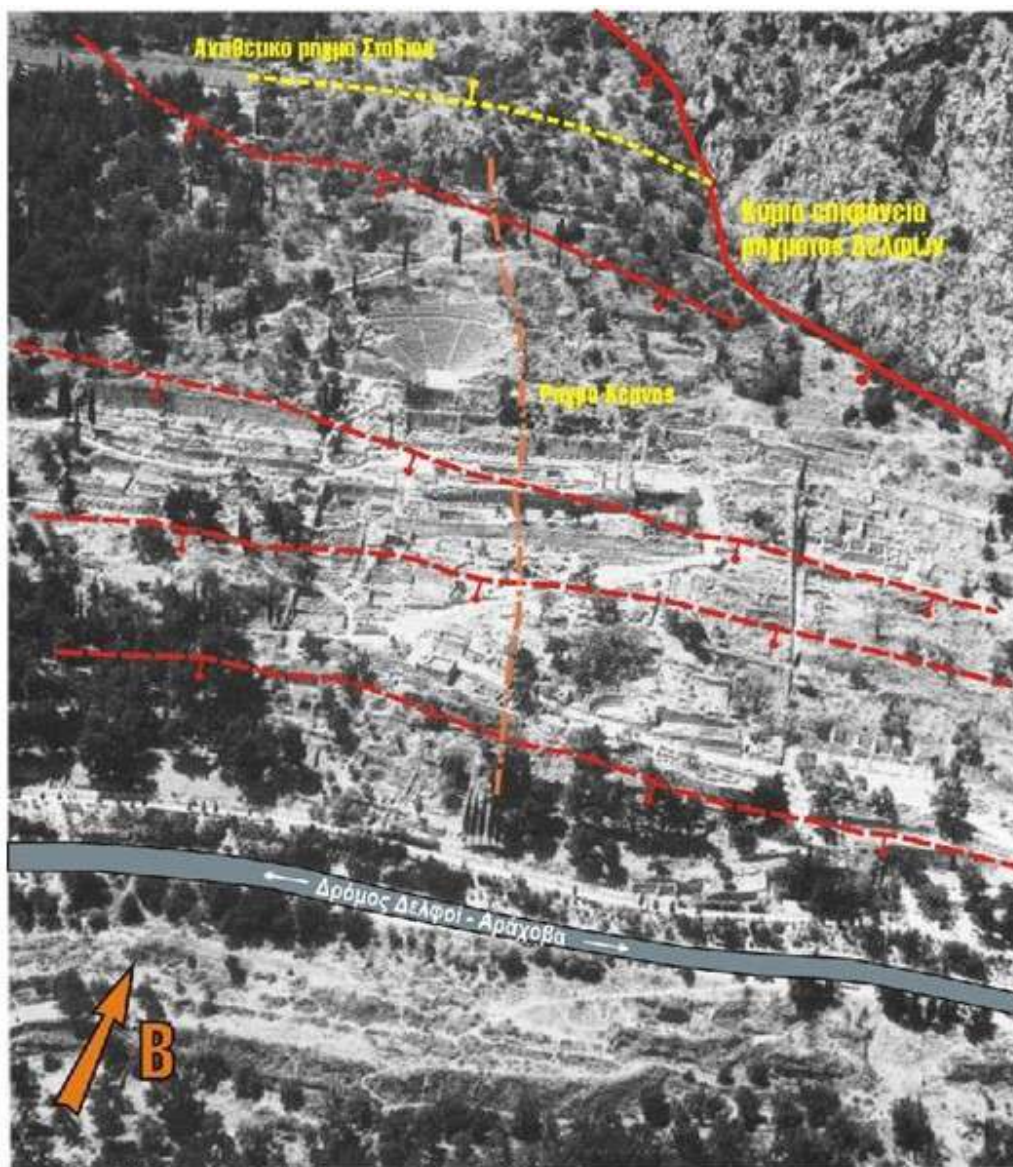
Εικ. 29. Με πλαίσιο διακρίνεται ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών, καθώς και η κοιλάδα του Πλείστου ποταμού. Παράλληλα, με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η ρηξιγενής ζώνη των Φαιδριάδων, καθώς και το εγκάρσιο, σ αυτήν, ρήγμα της Κέρνας (από De Boer & Hale 2001, τροποποιημένο) (Μαριολάκος et al. 2010).

Επί των σχηματισμών Αλπικής ηλικίας, παράλληλα με τη ρηξιγενή αυτή ζώνη παρατηρούνται Αλπικής ηλικίας επωθήσεις, δημιουργώντας λεπιώσεις των Αλπικών σχηματισμών, οι οποίες αποτελούν ανάστροφα ρήγματα που επαναλαμβάνονται στη στρωματογραφική στήλη και διακόπτονται από το νεότερο ρήγμα των Δελφών. Επίσης εντοπίζονται ιζήματα Πλειστοκαινικής ηλικίας, τα οποία αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή και πλευρικά κορήματα, αποτελώντας τα αρχαιότερα ιζήματα της κοιλάδας του Πλείστου, τα οποία εμφανίζονται μαζί με την δραστηριότητα του ρήματος των Δελφών. Με βάση τους Celet (1962) η ηλικία τους ορίζεται περίπου σε Μέσο-Ανώτερο Πλειστόκαινο (Mindel-Riss) και ο σχηματισμός τους συμπίπτει με την περίοδο της δραστηριότητας του ρήματος των Δελφών (Βαλκανιώτης, 2009).

Γενικά, η ρηξιγενής ζώνη Άμφισσας-Δελφών-Αράχωβας (ΡΖΑΔΑ) παρουσιάζει διάταξη Δύσης-Ανατολής και περιλαμβάνει τα ρήγματα που οριοθετούν τη λεκάνη της Άμφισσας, καθώς και το βόρειο μέρος της Ιτέας, ενώ στα ανατολικά, τις κοιλάδες Δελφών-Αράχωβας. Ταυτόχρονα οριοθετεί, στα νότια, το όρος τους Παρνασσού, με υψόμετρο 2455 μέτρα (m), από το όρος της Κίρφης, με υψόμετρο 1560 μέτρα (m), ενώ στην πορεία της προς τα δυτικά διέρχεται από την πεδιάδα της Άμφισσας-Ιτέας έως τη Γκιώνα.

Παράλληλα, στο κεντρικό του τμήμα, το ρήγμα διέρχεται από τον Μνημειακό Χώρο, δημιουργώντας το επιβλητικό, κατακόρυφο ασβεστολιθικό πρανές, μπροστά

από την κύρια επιφάνεια του οποίου αναπτύσσεται ο Αρχαιολογικός Χώρος, καθώς και το σύνολο των μνημείων, που περιλαμβάνονται σε αυτόν (Εικ. 29 & 30).



Εικ. 30. Οι ρηξιγενείς επιφάνειες στην περιοχή του Ιερού του Απόλλωνα. Με κόκκινη γραμμή επισημαίνεται η κύρια επιφάνεια του ρήγματος Δελφών, με κόκκινη διακεκομμένη εμφανίζονται οι δευτερεύουσες ρηξιγενείς επιφάνειες και με κίτρινο και πορτοκαλί χρώμα το αντιθετικό ρήγμα του Σταδίου και το ρήγμα της Κέρνας αντίστοιχα. Πρόκειται για πλάγια αεροφωτογραφία, από ελικόπτερο χρονολογίας 1978 (Picard, 1992) (Βαλκανιώτης 2009).

2.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ 1870

Η περιοχή έρευνας ανήκει σε μία από τις πιο ενεργές τεκτονικά περιοχές, με την ύπαρξη ισχυρών, ιστορικά, σεισμών όπως για παράδειγμα ο σεισμός του 373 π.Χ. Ένας από τους πιο αξιοσημείωτους, όμως, ισχυρούς ιστορικούς σεισμούς, στην περιοχή έρευνας είναι αυτός που έλαβε χώρα την 1^η Αυγούστου 1870, στη Φωκίδα, (38.48° N, 22.55° E), στις 00:41, με μέγεθος $M=6.8$ και μέγιστη μακροσεισμική ένταση IX. Σύμφωνα με τους Schmidt (1879) και Ambraseys and Pantelopoulos (1989) του κύριου σεισμού προηγήθηκε ένας ισχυρός προσεισμός, την 31η Ιουλίου, με επίκεντρο ανατολικά της ρηξιγενούς ζώνης Δελφών-Αράχωβας, ο οποίος έγινε αντιληπτός σε περιοχές της Αττικής, της Εύβοιας και της Πελοποννήσου, επιφέροντας σοβαρές επιπτώσεις στα χωριά Γρανίτσα, Προσήλιο (Βελή), στο Ρωμαϊκό, καθώς και στον Έξαρχο, ενώ μικρότερες ζημιές σημειώθηκαν στον Άγιο Κωνσταντίνο, την Κάτω Πέλλη, το Καλοπόδι και τη Λιβαδειά. Ο κύριος σεισμός προκάλεσε σοβαρές καταστροφές στην περιοχή της Αράχωβας, καθώς καταγράφηκαν ανθρώπινες απώλειες και αρκετοί τραυματισμοί. Δυτικότερα σημειώθηκε δόνηση, μεγέθους $M=6.0$, στη 01:00, ενώ αργότερα στις 11:33 σημειώθηκε ισχυρή δόνηση στην περιοχή των Δελφών, μεγέθους $M=6.3$, αφήνοντας πίσω τους καταστροφές στις περιοχές Άμφισσα, Σερνικάκι, Αγ. Γεώργιο και Αγία Ευθυμία. Ο αριθμός των θυμάτων ανήλθε σε 117, ενώ 2000 οικίες και κατασκευές υπέστησαν σοβαρές ζημιές.

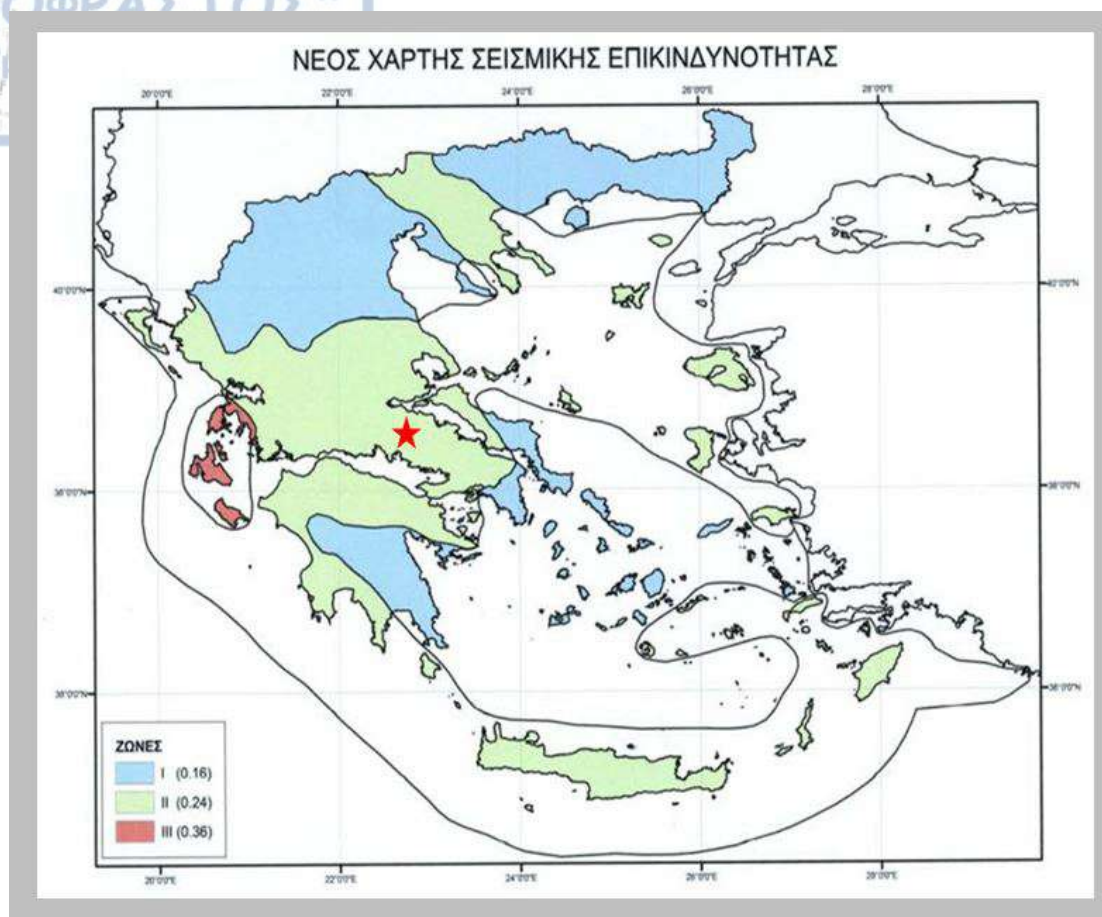
Συνολικά σημειώθηκαν πέντε ισχυροί μετασεισμοί, προκαλώντας μικρότερες ζημιές, οι δύο από τους οποίους συνέβησαν την ημέρα εκδήλωσης του κύριου σεισμού, ενώ οι υπόλοιποι καταγράφηκαν στις 6 Αυγούστου, στις 25 Οκτωβρίου και στις 30 Νοεμβρίου. Από την σεισμική ακολουθία προκλήθηκαν ρευστοποιήσεις, βραχοκαταπτώσεις, φαινόμενα αρτεσιανισμού, υποχώρηση-βύθιση τμημάτων της ακτής και εδαφικές διαρρήξεις, με σπουδαιότερη αυτή μεταξύ των χωριών Λαριάκη και Σερνικάκι, στον κόλπο της Ιτέας, βόρειας διεύθυνσεως, μήκους 5 έως 6 χιλιομέτρων, στο όριο των αλλουβιακών αποθέσεων με το βραχώδες υπόβαθρο (Ambraseys and Pantelopoulos 1989).

Ο σεισμός έγινε ιδιαίτερα αισθητός στην πόλη της Πάτρας και στα νησιά του Ιονίου και οι μετασεισμοί διήρκεσαν 3,5 χρόνια. Από αυτούς οι 300 υπήρξαν αρκετά ισχυροί, ώστε να οδηγήσουν σε κατάρρευση αρκετών κατοικιών που δεν είχαν καταστραφεί στον κύριο σεισμό στην Άμφισσα (Schmidt 1879a, Τριανταφύλλου 1959, Ambraseys and Pantelopoulos 1989).

Στο χάρτη της Εικ. 1 περιγράφεται η ενεργοποίηση της ρηξιγενούς ζώνης της Αγίας Ευθυμίας – Δελφών – Αράχωβας κατά τη σεισμική αυτή ακολουθία. Ειδικότερα, ο πρώτος σεισμός σημειώθηκε με επίκεντρο την Αράχωβα, ενώ ακολούθησε η δεύτερη σεισμική δόνηση, η οποία κινητοποίησε το ρήγμα των Δελφών και η τρίτη το ρήγμα της Αγίας Ευθυμίας. Πιο συγκεκριμένα, η τελευταία έλαβε χώρα, πιθανόν, δυτικά του ρήγματος των Δελφών.

Στην παρούσα διατριβή, η σεισμική ακολουθία του 1870 επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως σενάριο-έναυσμα ενεργοποίησης βραχοκαταπτώσεων, με βάση το οποίο δημιουργήθηκε η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια, με στόχο την εκτίμηση και αξιολόγηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Hazard) στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με τη χρήση τρισδιάστατων τροχιακών προσομοιώσεων (trajectometric analysis), καθώς και την ποιοτική αξιολόγηση του βαθμού διακινδύνευσης (Risk).

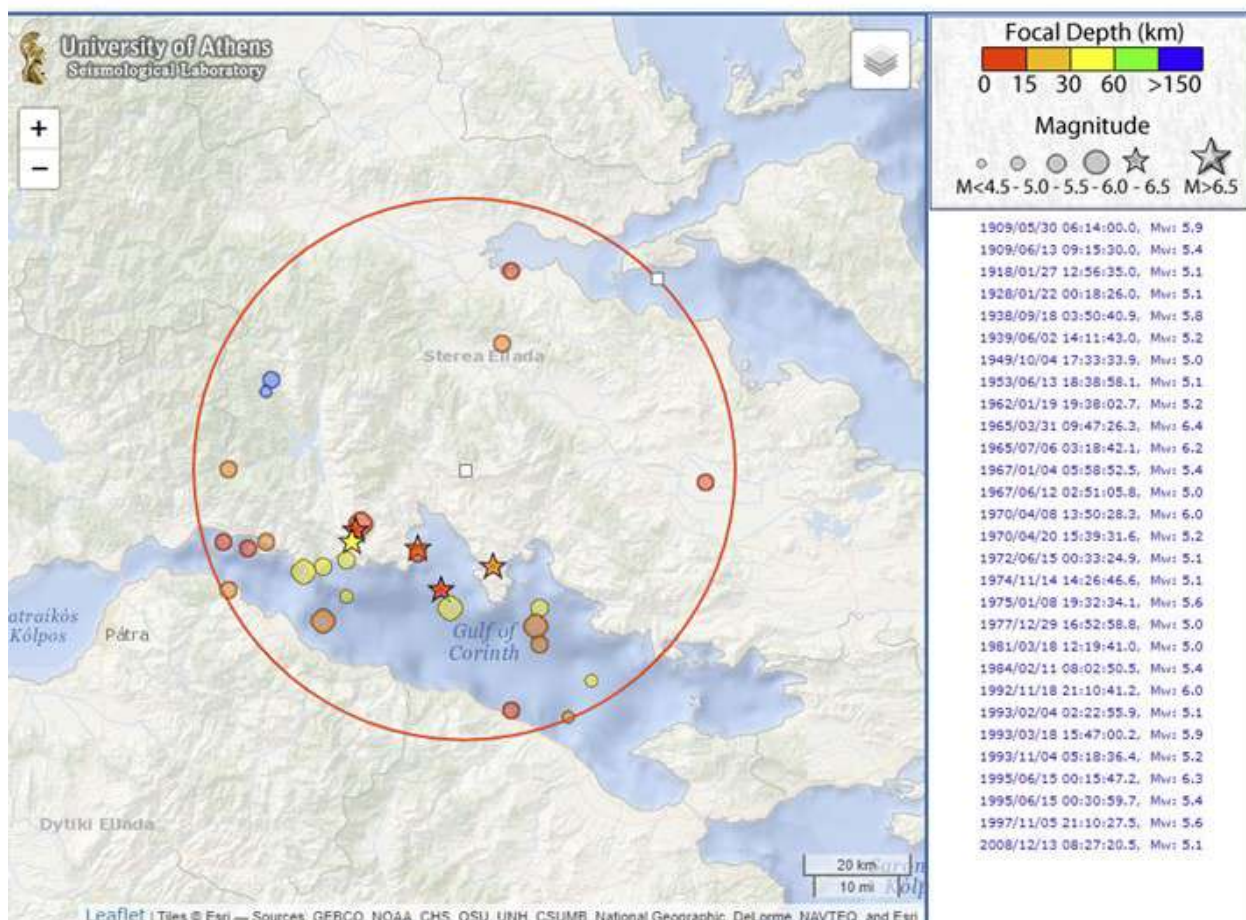
Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός κάποιων αναγκαίων παραμέτρων εισαγωγής. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι τιμές της μέσης σεισμικής επιτάχυνσης ($PGA \text{ m/sec}^2$) και της ταχύτητας της σεισμικής αυτής ακολουθίας ($PGV \text{ m/sec}^2$). Με βάση το νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (Εικ. 31), ο Ελλαδικός χώρος υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, με τιμές ενεργών εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού, 0,16g για την πρώτη Ζώνη, 0,24g για τη δεύτερη Ζώνη και 0,36g για την τρίτη Ζώνη (Ο.Α.Σ.Π., 2003). Με βάση το νέο αυτό χάρτη, ο αρχαιολογικός χώρος των Δελφών ανήκει στη δεύτερη Ζώνη, με σεισμική επικινδυνότητα ίση με 0,24g.



Εικ. 31. Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας, του ελλαδικού χώρου (από Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π. 2003).

Στο χάρτη της Εικόνας 32 περιέχονται πληροφορίες, σχετικά με τη σεισμικότητα στην ευρύτερη περιοχή της περιοχής έρευνας. Τα δεδομένα αυτά ανακτήθηκαν από το Τμήμα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, της Σχολής Γεωλογίας, του Πανεπιστημίου Αθηνών (http://www.geophysics.geol.uoa.gr/stations/gmapv3_db/index.php).

Start Date: 1000/06/01 00:00:00	[Centre of Circle] Lat: 38.5000 Lon: 22.5000	Depth: 0 to 200
End Date: 2022/09/27 15:24:26	Circle Radius (km): 50	Magnitude: 5 to 8



Εικ. 32. Χάρτης της σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή έρευνας (λευκό τετράγωνο), όπου σημειώνονται τα κύρια σεισμικά συμβάντα των τελευταίων 50 ετών. Όλα τα δεδομένα ανακτήθηκαν από http://www.geophysics.geol.uoa.gr/stations/gmapv3_db/index.php, από το Τμήμα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, της Σχολής Γεωλογίας, του Πανεπιστημίου Αθηνών.

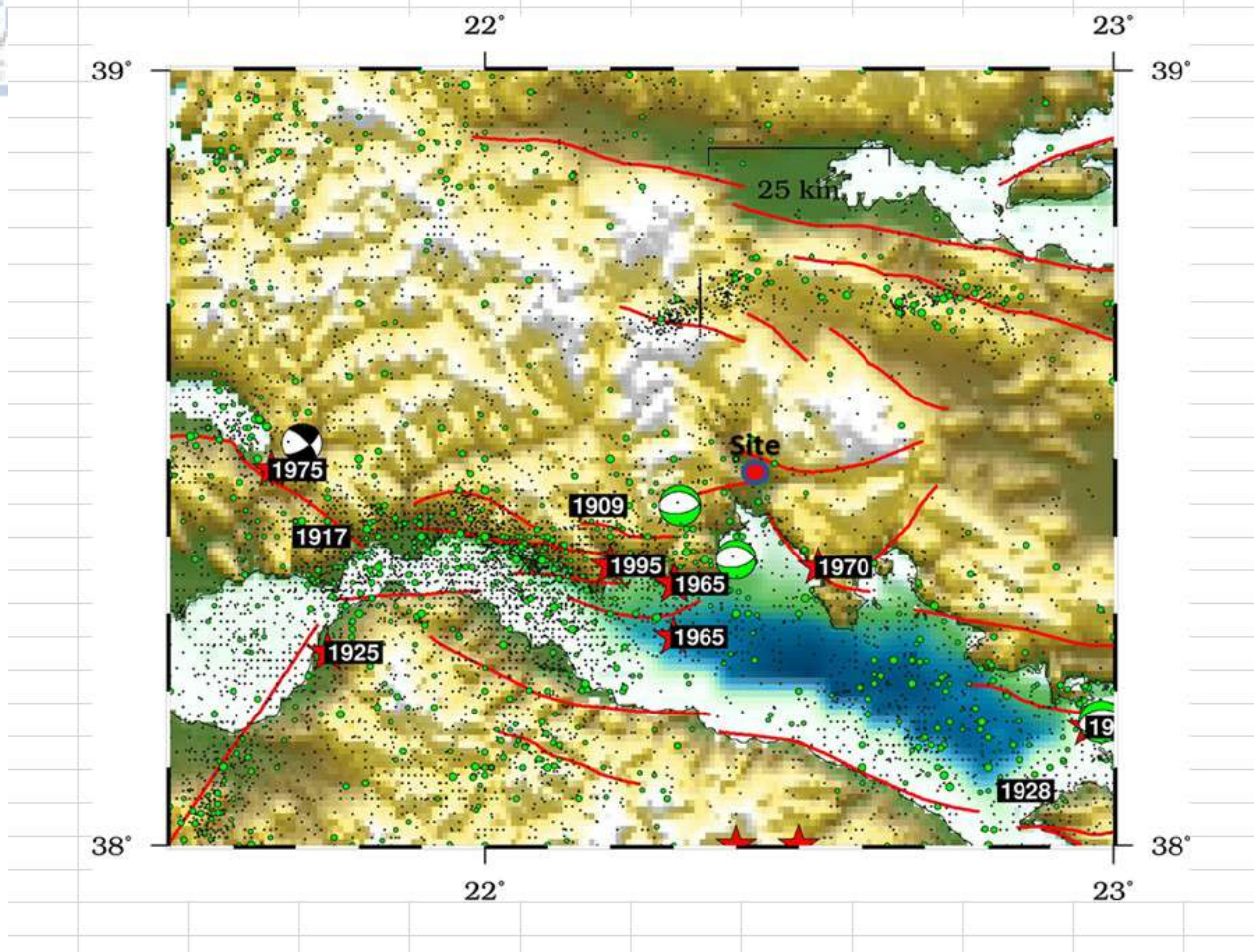
Στον Πίνακα 2 και στο χάρτη της Εικόνας 32 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα πιο αξιοσημείωτα σεισμικά συμβάντα που σημειώθηκαν στην ευρύτερη περιοχή έρευνας, με μεγέθη μεγαλύτερα/ίσα με 5 ($M \geq 5$) και συγκεκριμένα με μεγέθη από $M=5$ έως $M=8$, διαγράφοντας μια ακτίνα παρατήρησης 20 km από τον Αρχαιολογικό χώρο των Δελφών. Συγκεκριμένα, τα σεισμικά αυτά γεγονότα βρίσκονται σε απόσταση έως 20 km από τον Μνημειακό Χώρο, καλύπτοντας το χρονικό διάστημα από το έτος 1900 έως το έτος 2022, ενώ δύνανται να προκαλέσουν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Γενικά, η εξεταζόμενη περιοχή στο Δυτικό Κορινθιακό Κόλπο επηρεάζεται από μεγάλα μεγέθη σεισμικών γεγονότων, ενώ συμβάντα σε κοντινότερη

απόσταση με την περιοχή έρευνας και με μεγαλύτερο μέγεθος δύνανται να σημειώσουν σημαντικές επιταχύνσεις.

Πίνακας 2. Τα κύρια στοιχεία των σεισμικών γεγονότων της Εικόνας 32.

1	<u>1909/05/30 06:14:00.0</u>	10.3 km E of Aegion	38.25	22.20	20.0	5.9
2	<u>1909/06/13 09:15:30.0</u>	9.2 km NW of Aegion	38.30	22.00	24.0	5.4
3	<u>1918/01/27 12:56:35.0</u>	28.9 km NNW of Aegion	38.50	22.00	24.0	5.1
4	<u>1928/01/22 00:18:26.0</u>	16.4 km ESE of Lamia	38.83	22.60	12.0	5.1
5	<u>1938/09/18 03:50:40.9</u>	29.6 km SSE of Amfissa	38.27	22.47	53.0	5.8
6	<u>1939/06/02 14:11:43.0</u>	28.3 km WNW of Amfissa	38.65	22.09	148.0	5.2
7	<u>1949/10/04 17:33:33.9</u>	28.0 km WNW of Amfissa	38.63	22.08	111.0	5.0
8	<u>1953/06/13 18:38:58.1</u>	34.2 km WNW of Korinthos	38.10	22.60	4.0	5.1
9	<u>1962/01/19 19:38:02.7</u>	18.5 km NE of Aegion	38.35	22.25	35.0	5.2
10	<u>1965/03/31 09:47:26.3</u>	18.9 km SSW of Amfissa	38.38	22.26	45.0	6.4
11	<u>1965/07/06 03:18:42.1</u>	17.4 km S of Amfissa	38.37	22.40	18.0	6.2
12	<u>1967/01/04 05:58:52.5</u>	14.0 km NNW of Aegion	38.37	22.04	1.0	5.4
13	<u>1967/06/12 02:51:05.8</u>	27.5 km NNW of Korinthos	38.15	22.77	35.0	5.0
14	<u>1970/04/08 13:50:28.3</u>	26.2 km SE of Amfissa	38.34	22.56	23.0	6.0
15	<u>1970/04/20 15:39:31.6</u>	26.2 km SW of Levadhia	38.27	22.66	38.0	5.2
16	<u>1972/06/15 00:33:24.9</u>	14.5 km NE of Aegion	38.34	22.20	33.0	5.1
17	<u>1974/11/14 14:26:46.6</u>	12.9 km ENE of Levadhia	38.48	23.01	6.0	5.1
18	<u>1975/01/08 19:32:34.1</u>	29.2 km SW of Levadhia	38.24	22.65	26.0	5.6
19	<u>1977/12/29 16:52:58.8</u>	15.4 km ENE of Aegion	38.29	22.25	37.0	5.0
20	<u>1981/03/18 12:19:41.0</u>	25.1 km NW of Korinthos	38.09	22.72	17.0	5.0
21	<u>1984/02/11 08:02:50.5</u>	14.6 km N of Aegion	38.38	22.08	23.0	5.4
22	<u>1992/11/18 21:10:41.2</u>	25.9 km SSE of Amfissa	38.30	22.45	12.0	6.0
23	<u>1993/02/04 02:22:55.9</u>	31.2 km SW of Levadhia	38.21	22.66	20.0	5.1
24	<u>1993/03/18 15:47:00.2</u>	11.3 km NE of Aegion	38.33	22.16	56.0	5.9
25	<u>1993/11/04 05:18:36.4</u>	16.7 km NNW of Aegion	38.38	21.99	9.0	5.2
26	<u>1995/06/15 00:15:47.2</u>	16.5 km SSW of Amfissa	38.40	22.27	3.0	6.3
27	<u>1995/06/15 00:30:59.7</u>	18.5 km S of Amfissa	38.36	22.40	5.0	5.4
28	<u>1997/11/05 21:10:27.5</u>	15.1 km SSW of Amfissa	38.41	22.28	13.0	5.6
29	<u>2008/12/13 08:27:20.5</u>	24.7 km SSE of Lamia	38.71	22.58	15.0	5.1

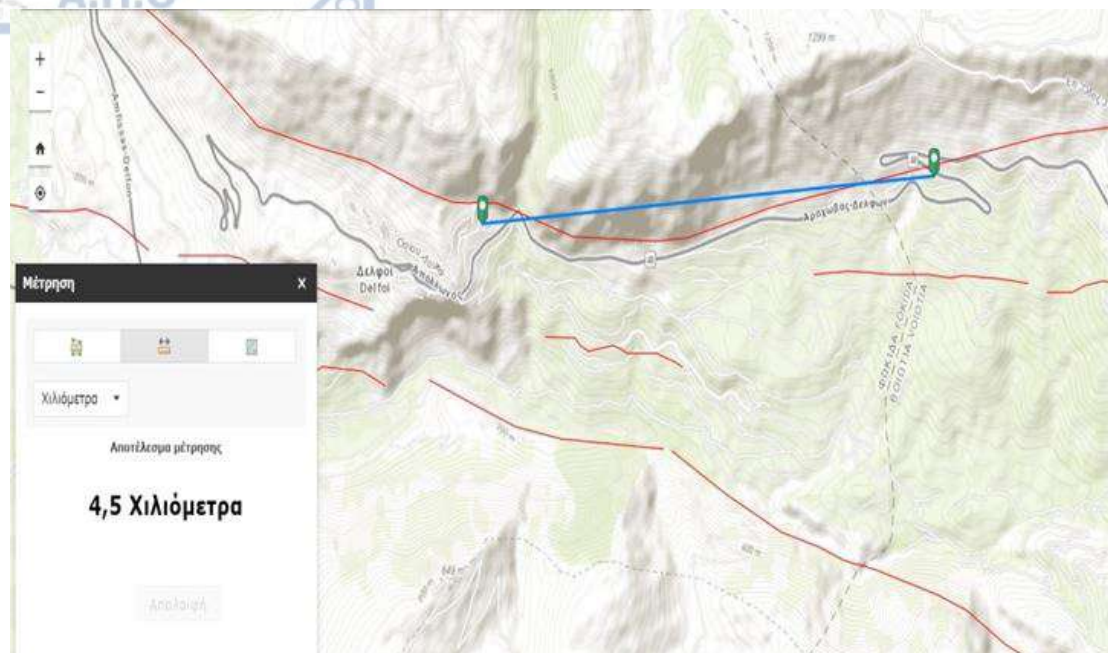
Στο χάρτη της Εικόνας 33 παρουσιάζονται τα επίκεντρα, οι χρονολογίες, καθώς και οι μηχανισμοί γένεσης μερικών από τους μεγαλύτερους σεισμούς που καταγράφηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου.



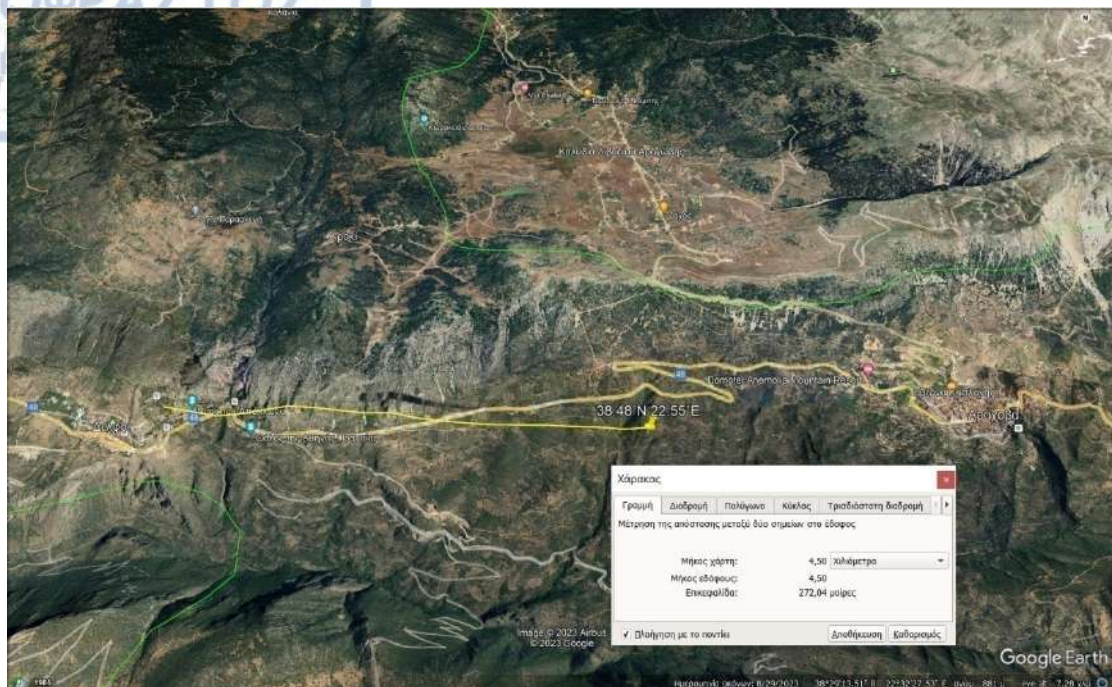
Εικ. 33. Επίκεντρα (αστερίσκοι) και μηχανισμοί γένεσης μερικών, μεγάλων, καταγεγραμμένων σεισμών, στην ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου. Με κόκκινο (site) σημειώνεται ο Αρχαιολογικός Χώρος των Δελφών (Κυρατζή Α. 2023).

Στη συνέχεια, για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής κρίθηκε αναγκαίος ο ακριβής προσδιορισμός και υπολογισμός της ταχύτητας της σεισμικής ακολουθίας του έτους 1870 (PGV m/sec), καθώς αποτελεί απαραίτητη παράμετρο για την εκτίμηση της επικινδυνότητας στην περιοχή έρευνας. Πρωτίστως συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα της σεισμικής ακολουθίας του 1870, μεγέθους $M=6.8$. Στη συνέχεια εντοπίστηκε το επίκεντρο του σεισμού, στην περιοχή της Αράχωβας $\phi=38.48^{\circ}\text{N}$, το ανατολικό γεωγραφικό μήκος $\lambda=22.55^{\circ}\text{E}$ του και σχεδιάστηκε η χιλιομετρική απόσταση, του epicέντρου της σεισμικής ακολουθίας που σημειώθηκε το 1870 (31/7 – 01/8) και του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών και μετρήθηκε ίση με 4,5 χιλιόμετρα, με παράλληλη απεικόνιση των ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής

έρευνας, μέσα από το λογισμικό NOAFaults v5.01 (Database of active faults in Greece, Institute of Geodynamics)(Εικ. 34 & 35).



Εικ. 34. Χιλιομετρική απόσταση (με μπλε χρώμα), του επικέντρου της σεισμικής ακολουθίας που σημειώθηκε το 1870 (31/7 – 01/8) και του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, ίση με 4,5 km, με παράλληλη απεικόνιση των ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής έρευνας, μέσα από το λογισμικό NOAFaults v5.01 (Database of active faults in Greece, Institute of Geodynamics).



Εικ. 35. Χιλιομετρική απόσταση (με κίτρινο χρώμα), του επικέντρου της σεισμικής ακολουθίας που σημειώθηκε το 1870 (31/7 – 01/8) και του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, ίση με 4,5 km, μέσα από το Google Earth.

Προκειμένου να υπολογιστεί μια ενδεικτική τιμή της ταχύτητας της εδαφικής κίνησης στη θέση έρευνας, με βάση τα στοιχεία του σεισμού του 1870, μεγέθους $M=6.8$ χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα Μοντέλα Απόσβεσης της Εδαφικής Κίνησης (2008 Next generation attenuation Models) (NGA-West2 - Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes (<https://ngawest2.berkeley.edu/>)). Επομένως, για μέγεθος $M=6.8$, μια απόσταση από το ρήγμα, η οποία υπολογίστηκε, ίση με 4,5 km και για ένα τυφλό κανονικό ρήγμα, με κλίση ίση με 50° , βρέθηκε ότι η ταχύτητα της εδαφικής κίνησης είναι περίπου ίση με 41 cm/s. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση για την εκτίμηση της επικινδυνότητας στην περιοχή έρευνας.

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η προσέγγιση των φαινομένων κατολίσθησης αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, κυρίως λόγω της ελλιπούς κατανόησης των διαδικασιών κατά την ενεργοποίησή τους (Glenn et al., 2006). Οι βραχοκαταπτώσεις ταξινομούνται ως ένα είδος κατολίσθησης και αποτελούν ένα από τα πιο επιζήμια γεωλογικά φαινόμενα, για το ανθρωπογενές περιβάλλον, καθώς πρόκειται για αιφνίδια φαινόμενα και συνεχή απειλή, κυρίως στις ορεινές περιοχές, παγκοσμίως, απειλώντας την ασφαλή λειτουργία των υποδομών των μεταφορών, είτε προκαλώντας καταστροφές στο οδικό δίκτυο και τους σιδηρόδρομους, είτε απειλώντας ανθρώπινες ζωές.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στη συνεχή αναζήτηση μεθόδων καλύτερης κατανόησης, προσέγγισης και διαχείρισής αυτών των φαινομένων. Τα τελευταία χρόνια γίνεται χρήση των σύγχρονων μεθόδων Τηλεπισκόπησης, για την αποτύπωση των γεωλογικών στοιχείων και την αξιολόγηση της εξεταζόμενης βραχομάζας. Ειδικότερα, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των επίγειων-LiDAR (Light Detection And Ranging), ή των αερομεταφερομένων (Airbone Laser Scanner) σαρωτών, καθώς και με τη χρήση Μη Επανδρωμένων Συστημάτων Αεροσκαφών (UAV), συνδυαστικά με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας και οι έρευνες μπορεί να αφορούν σε μικρής (νομός/ περιφέρεια), ή σε μεγάλης-τοπικής κλίμακας έρευνα (συγκεκριμένες θέσεις- αποτύπωση ενός πρανούς) (Papathanasiou et al. 2020).

Η χρήση αυτών των μεθόδων είναι ευρέως διαδεδομένη στην επιστημονική κοινότητα. Ειδικότερα, οι έρευνες, οι οποίες πραγματοποιούνται, παγκοσμίως, με τη χρήση επίγειων σαρωτών λέιζερ (laser scanners), με την επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών, καθώς και με τη χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων (UAV-Unmanned Aerial Vehicles) είναι αρκετές και αξιόπιστες. Οι μέθοδοι αυτές αξιοποιούν ημι-αυτόνομες τεχνικές ή χειροκίνητες

μεθόδους, για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εξεταζόμενου βραχώδους πρηνούς.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της φωτογραμμετρίας των UAV αυξάνεται ολοένα και περισσότερο στον τομέα των γεωεπιστημών, παρέχοντας πιο οικονομικές λύσεις και νέες εφαρμογές στον τομέα της εναέριας αποτύπωσης μικρής εμβέλειας (Colomina et al. 2008, Eisenbeiss 2009). Με την τεχνική της φωτογραμμετρίας (UAV) λαμβάνονται τρισδιάστατα δεδομένα, από τη λήψη πολλαπλών φωτογραφιών ενός αντικειμένου ενδιαφέροντος, από διαφορετικές γωνίες (Vasuki et al. 2014). Το αντικείμενο αυτό, στη συνέχεια ανακατασκευάζεται με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού (Pix4D, Agisoft Metashape, Microsoft Photosynth, MicMac), εφαρμόζοντας μια ροή εργασιών, γνωστή ως «Structure From Motion (SFM)», όπου και γίνεται ανασύνθεση της γεωμετρικής του πληροφορίας. Ειδικότερα, εντοπίζονται κοινά σημεία και πραγματοποιείται σύνδεση και αλληλοεπικάλυψη αυτών των φωτογραφιών, σε δισδιάστατη μορφή (2D) (Karantanellis E. 2021). Αποτέλεσμα της ανωτέρω διαδικασίας είναι η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων νέφους σημείων (3D point clouds), το οποίο παρέχει πληροφορίες για την περιοχή (γεωμετρία και θέση) και αποτελεί το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής έρευνας, από το οποίο θα προκύψει το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DSM), το αντίστοιχο φωτομωσαϊκό, καθώς και η υφή της επιφάνειας της περιοχής έρευνας (Vasuki et al. 2014).

Στη συνέχεια, μέσω ημι-αυτόνομων ή χειροκίνητων τεχνικών, το παραγόμενο νέφος σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και την εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οικογενειών των ασυνεχειών (DSets) (Γωνία κλίσης/Διεύθυνση κλίσης, απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών-spacing / εμμονή των ασυνεχειών-persistence) (Riquelme A et al. 2014, Riquelme 2015).

Οι φωτογραμμετρικές τεχνικές αξιοποιούν τηλεκατευθυνόμενα συστήματα αεροσκαφών (RPAS), στα οποία περιλαμβάνονται τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles-UAVs), τα οποία διαθέτουν, ενσωματωμένες ψηφιακές κάμερες και διάφορους άλλους αισθητήρες και χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη μορφολογική αποτύπωση, ευστάθεια πρηνών, εκτίμηση επικινδυνότητας (Hazard) και αξιολόγηση διακινδύνευσης (Risk). Πολλές φορές, όμως, η χρήση των νέων τεχνολογιών αποτελεί μονόδρομο, ειδικά σε μελέτες, που αφορούν σε περιοχές δυσπρόσιτες και επικίνδυνες για την πραγματοποίηση επί τόπου (in situ) μετρήσεων. Ειδικά, σε περιπτώσεις έρευνας βραχοκαταπτώσεων, η πτήση UAV αποτελεί ιδανική επιλογή, καθώς πρόκειται για μια εύχρηστη και χαμηλού κόστους πλατφόρμα, αν

συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι οι εικόνες υψηλής ανάλυσης μπορούν να αποκτηθούν σε λίγο χρόνο, ακόμη και σε δυσπρόσιτες περιοχές. Τα UAVs διαθέτουν ένα αδρανειακό σύστημα κίνησης, για να διατηρείται η ευθυγράμμιση τα συσκευής, GPS και κάμερα υψηλής ανάλυσης, για τη λήψη εναέριων φωτογραφιών, σε πραγματικό χρόνο, και την συλλογή των γεωαναφερμένων τρισδιάστατων (3D) δεδομένων, καθώς και του προσανατολισμού της κάμερας σε κάθε λήψη (Salvini et al. 2016) (Παπαθανασίου 2022).

Οι κατολισθήσεις και οι βραχοκαταπτώσεις απαιτούν επισταμένη διαχείριση, ώστε να αποφευχθούν τυχόν καταστροφικές επιπτώσεις που μπορούν να επιφέρουν στο ανθρώπινο περιβάλλον. Σήμερα, με την τεχνολογική πρόοδο και την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών είναι δυνατή η καταγραφή των φαινομένων αυτών σε δισδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη (3D) μορφή. Ειδικότερα, η λήψη μεγάλου αριθμού αεροφωτογραφιών με τη χρήση των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - ΣΜηΕΑ (UAV) και η παραγωγή δεδομένων σε τρισδιάστατο χώρο (3D) αποτελούν μεγάλη καινοτομία στο χώρο των γεωεπιστημών, καθώς πρόκειται για μια γρήγορη μέθοδο, σε σχέση με τις συμβατικές, ενώ τα παραγόμενα αποτελέσματά τους (ορθοφωτοχάρτες, ψηφιακό μοντέλο εδάφους κτλ.) είναι πολύ υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας. Οι δορυφορικές εικόνες, πολύ υψηλής ανάλυσης, και οι προηγμένες τεχνικές χωρικής ανάλυσης επιτρέπουν την ανάπτυξη χαρτών απογραφής κατολισθήσεων, ενώ, παράλληλα, οι έρευνες πεδίου μπορούν να χρησιμεύσουν στην επικύρωση της χαρτογράφησης που προηγήθηκε. Επομένως, οι κλασικές μέθοδοι έρευνας, σε συνδυασμό με τις νέες τεχνικές τηλεανίχνευσης (remote sensing), στις οποίες ανήκουν οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ (LiDAR) και η χρήση της φωτογραμμετρίας (UAV), παρέχουν τη δυνατότητα μετρήσεων, με ιδιαίτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια, ώστε να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής έρευνας, όπου θα φαίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα η περιοχή μιας κατολίσθησης ή μιας βραχοκατάπτωσης (Konstantinidis 2021).

Ειδικότερα, όσον αφορά στην περίπτωση των καταπτώσεων βράχων η χρήση των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - ΣΜηΕΑ (UAV), συνήθως αποτελεί μονόδρομο, καθώς, στις περισσότερες βραχώδεις περιοχές του ελληνικού χώρου, όπου παρατηρούνται έντονα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, η πρόσβαση καθίσταται σχεδόν αδύνατη.

3.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η εικονοληψία από πτήση με UAV κρίνεται αναγκαία, ιδιαίτερα σε περιοχές, όπου περιλαμβάνονται πρανή μεγάλου ύψους και κλίσης, με δυσκολία πρόσβασης, όπου η πραγματοποίηση συμβατικών μετρήσεων είναι σχεδόν αδύνατη και ενδέχεται να ενέχει κινδύνους για την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού. Ειδικότερα, η λήψη δεδομένων με UAV παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας υψηλής ανάλυσης δεδομένων και παρακολούθησης απομακρυσμένων δύσβατων περιοχών, που παλαιότερα ήταν σχεδόν αδύνατο να μελετηθούν. Επομένως, θα λέγαμε ότι, σε κάποιες περιπτώσεις, τα συστήματα αυτά μπορούν να αναβαθμίσουν ή και να βελτιώσουν τις κλασικές μεθόδους της γεωτεχνικής έρευνας.

Η λειτουργία των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - UAV (Unmanned Aerial Vehicles) στηρίζεται στις αρχές της φωτογραμμετρίας, όπου πραγματοποιείται λήψη τρισδιάστατων δεδομένων, με συνδυασμό πολλαπλών, δισδιάστατης μορφής (2D), γεωαναφερμένων φωτογραφιών αλληλοεπικάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα γωνιών λήψης (Vasuki et al. 2014), με τελικό προϊόν τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου (3D), στο οποίο αποδίδεται με τον καλύτερο, δυνατό, τρόπο η περιοχή όπου εντοπίζεται η αστοχία.

Αυτά τα μοντέλα αποτελούνται από νέφη εκατοντάδων χιλιάδων ή εκατομμυρίων σημείων (point clouds), τα οποία, στη συνέχεια, επεξεργάζονται με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας, με στόχο τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), του τρισδιάστατου Ψηφιακού Μοντέλου Επιφάνειας - DSM (Digital Surface Model) και του Ορθομωσαϊκού. Αυτά τα μοντέλα παρέχουν χωρικές πληροφορίες (X, Y, Z), σχετικά με την ακριβή τοποθεσία της περιοχής έρευνας, την αναλυτική καταγραφή της γεωμετρίας των επιφανειών της και τα στοιχεία προσανατολισμού τους.

Στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων συνεχίζει να υφίσταται μέχρι σήμερα. Λόγω των ιδιαίτερα μεγάλων κλίσεων, του έντονου μορφολογικού αναγλύφου της περιοχής έρευνας, της δυσκολίας προσβασιμότητας για την πραγματοποίηση μετρήσεων και την αποφυγή τραυματισμών, αλλά και λόγω της ίδιας της λιθολογίας του πρανούς (ασβεστόλιθος), η επιφάνεια του οποίου, όπως φαίνεται στις εικόνες της παρούσας διατριβής, διαθέτει ελάχιστη βλάστηση, επιλέχθηκε να ακολουθηθεί η φωτογραμμετρική μέθοδος, με συλλογή εικόνων, μέσω της πτήσης UAV. Συγκεκριμένα, το UAV, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της περιοχής έρευνας είναι το eBee X (Εικ. 36), ένα

drone σταθερής πτέρυγας, με ενσωματωμένη κεραία RTK (Real Time Kinematic), για πολύ υψηλή ακρίβεια δεδομένων.



Εικ. 36. EBeeX. Το UAV, το οποίο επιλέχθηκε για τις ανάγκες της περιοχής έρευνας, της παρούσας διατριβής. Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η ενσωματωμένη, υψηλής ανάλυσης, RTK κεραία (αριστερή εικόνα).

Ο τύπος κάμερας που διαθέτει το eBee X (senseFly S.O.D.A. 3D) αποτελεί καινοτόμα, επαγγελματική φωτογραφική μηχανή φωτογραμμετρίας, η οποία μεταβάλλει και προσαρμόζει τον προσανατολισμό, κατά τη διάρκεια της πτήσης, ώστε να καταγράφει τρεις εικόνες κάθε φορά, αντί για μόνο μία και συγκεκριμένα δύο πλάγια και μία κάθετη, παρέχοντας ένα πολύ ευρύτερο οπτικό πεδίο. Επίσης, παρέχει αναβαθμισμένη και πιο γρήγορη επεξεργασία εικόνας, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας. Η συσκευή είναι εξοπλισμένη με 1-ίντσας 20-

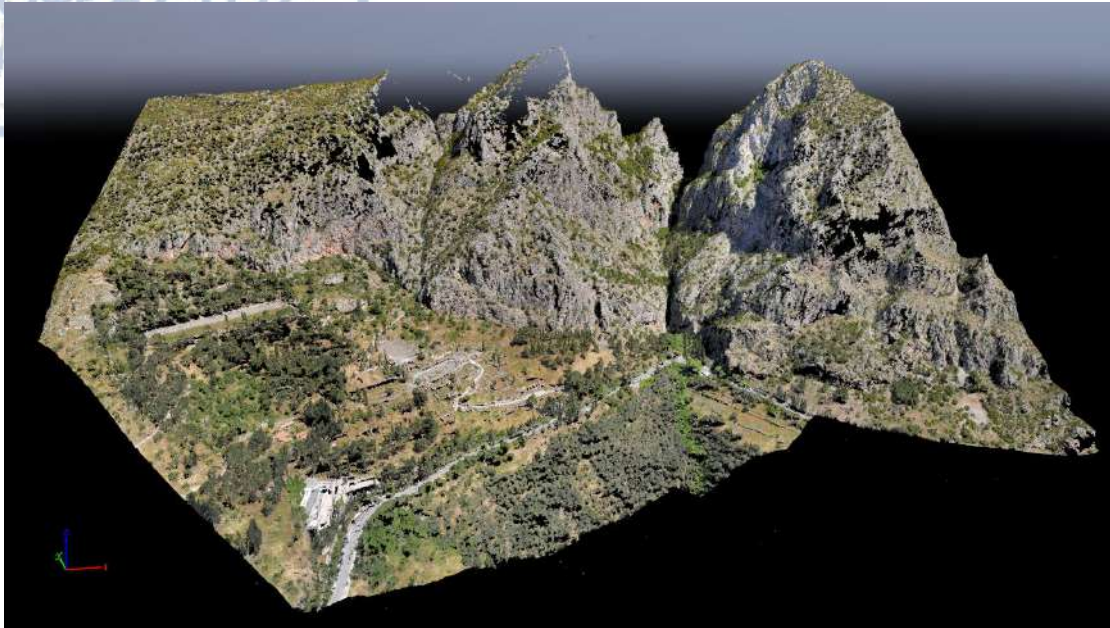
megapixel αισθητήρα, πλάτους 13,13 mm (sensor width) και ύψους 8,76 mm (sensor height) και εστιακή απόσταση κάμερας 10,6 mm.

3.2.1 Επεξεργασία των δεδομένων

Η χρήση των σύγχρονων τεχνολογιών και των μεθόδων Τηλεπισκόπησης αυξάνεται συνεχώς, σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα, έναντι της κλασικής, επί τόπου, παρατήρησης. Ειδικότερα, οι τεχνικές αυτές δίνουν τη δυνατότητα λεπτομερούς καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης βραχομάζας, δηλαδή των ασυνεχειών της, των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων που σχετίζονται με τον προσανατολισμό των επιφανειών των ασυνεχειών της βραχομάζας, την απόσταση (spacing) και την εμμονή (persistence) τους με μη αυτοματοποιημένες ή με ημιαυτοματοποιημένες μεθόδους των τρισδιάστατων νεφών σημείων που προήλθαν από τη χρήση των νέων τεχνολογιών. Τα παραπάνω στοιχεία είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των βραχωδών τεμαχών που ενδέχεται να αποκολληθούν από το πρανές.

Στην παρούσα έρευνα, από την πτήση που πραγματοποιήθηκε, με το eBeeX, συνολικά λήφθηκαν 640 γεωαναφερμένες φωτογραφίες, της περιοχής που ερευνάται, με ανάλυση 5472x3648 (RGB), οι οποίες στη συνέχεια επεξεργάστηκαν, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland), ώστε να δημιουργηθεί, αρχικά, ένα πυκνό \τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), και σε επόμενα στάδια επεξεργασίας, μέσα στο ίδιο λογισμικό, το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM) και το Ορθομωσαϊκό της περιοχής (Devlioti et al.2021).

Οι εικόνες αυτές, στη συνέχεια επεξεργάστηκαν μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν η δημιουργία ενός πολύ πυκνού ενιαίου τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud) (Εικ. 37), το οποίο διαθέτει συνολικά 147.685.905 σημεία (points), με μέσο σφάλμα επαναπροβολής στα 0,096 pixels (Mean Reprojection Error).



Εικ. 37. Ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), της περιοχής έρευνας, το οποίο δημιουργήθηκε μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland).

Στη συνέχεια αξιοποιήθηκαν εξειδικευμένα λογισμικά, ανοιχτής πρόσβασης, τα οποία, υπό την καθοδήγηση του εκάστοτε χρήστη, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον ποσοτικό προσδιορισμό του προσανατολισμού (κλίση, διεύθυνση κλίσης) των επιφανειών των ασυνεχειών. Οι επιφάνειες, αυτές, στη συνέχεια, είτε ομαδοποιούνται σε οικογένειες ασυνεχειών, σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των πόλων τους, είτε, με ημιαυτοματοποιημένες μεθόδους, πραγματοποιείται εξαγωγή των χαρακτηριστικών των κύριων οικογενειών της περιοχής που ερευνάται.

Τα λογισμικά αυτά είναι τα εξής: 1) το CloudCompareTM, μέσω του οποίου γίνεται αξιολόγηση του προσανατολισμού των ασυνεχειών του πρανούς και 2) το DSE, όπου μέσω μιας ημιαυτοματοποιημένης διαδικασίας και, υπό την επίβλεψη του χρήστη, μπορεί να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά των κύριων οικογενειών (κλίση, διεύθυνση κλίσης). Τα τελευταία προβάλλονται σε στερεοδιαγράμματα, όπου με βάση τη συγκέντρωση των πόλων τους, πραγματοποιείται ομαδοποίηση των ασυνεχειών σε οικογένειες και αξιολογείται ο προσανατολισμός των κύριων οικογενειών. Τα προαναφερθέντα λογισμικά αξιοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, για την επεξεργασία του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud) και την εξαγωγή των οικογενειών των ασυνεχειών και των παραμέτρων τους.

Ειδικότερα, μέσα από το περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor), πραγματοποιείται επεξεργασία των δεδομένων, μέσω του ημι-αυτοματοποιημένου **προσδιορισμού των ασυνεχειών**, την αναγνώριση των κύριων οικογενειών και των στοιχείων προσανατολισμού τους. Αφού ανιχνευθούν οι ασυνέχειες του μετώπου του πρανούς που ερευνάται, από τον εκάστοτε χρήστη, στη συνέχεια είναι δυνατός ο υπολογισμός τόσο της απόστασης (spacing), όσο και της εμμονής (persistence) τους στο χώρο, με το εργαλείο προσδιορισμού της απόστασης δύο σημείων, που παρέχεται. Συγκεκριμένα, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού DSE εισάγεται, σε μορφή .txt αρχείο, το νέφος σημείων, ώστε να μπορέσουν να προσδιοριστούν τα k γειτονικά και πιο κοντινά σημεία του κάθε σημείου του νέφους (knn nearest neighbours). Στη συνέχεια, ελέγχονται τα γειτονικά σύνολα σημείων, ως προς ένα αρχικό σημείο προέλευσης, ως προς τη συνεπιπεδότητα τους (coplanarity test), σύμφωνα με τον αλγόριθμο PCA (Principal Component Analysis), υπολογίζεται το κανονικό διάνυσμα (normal vector) κάθε πιθανού επιπέδου, από κάθε σύνολο σημείων και προσδιορίζονται τα στοιχεία προσανατολισμού τους των συνόλων που προέκυψαν από τη διαδικασία ελέγχου (Παπαθανασίου, 2022). Το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας είναι η δημιουργία ενός καινούργιου νέφους σημείων, όπου η κάθε οικογένεια ασυνεχειών που προσδιορίστηκε προηγουμένως, αποδίδεται, πλέον, με διαφορετικό χρωματισμό. Επίσης, είναι δυνατή η δημιουργία στερεοδιαγραμμάτων, καθώς και η προβολή της πυκνότητας - συγκέντρωσης των πόλων των επιπέδων, σύμφωνα με τη μέθοδο KDE (Kernel Density Estimation), σύμφωνα με τους Botev et al. (2010), καθώς και του προσδιορισμού των κύριων οικογενειών των ασυνεχειών. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται μια αντίστοιχη εργασία λήψης μετρήσεων στο πεδίο με τη γεωλογική πυξίδα, διαφορετικής όμως τάξης μεγέθους.

Τέλος δημιουργείται ένα νέο νέφος σημείων, όπου, σε κάθε σημείο, περιέχεται ο δείκτης της οικογένειας των ασυνεχειών (J_s), στην οποία εντάσσεται, λαμβάνοντας, πλέον, τη μορφή, XYZRGBJ_s.

Σε συνέχεια της επεξεργασίας στο ίδιο λογισμικό (DSE-Discontinuity Set Extractor), το οποίο αναπτύχθηκε από τον Riquelme (2014) υπολογίζεται η **απόσταση (spacing)** ανάμεσα στις ασυνέχειες της ίδιας οικογένειας. Πραγματοποιείται, επομένως, ανάλυση σε συστάδες (cluster analysis), με χρήση του αλγόριθμου DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Riquelme et al. (2015). Η απόσταση

(spacing) υπολογίζεται από την κάθετη απόσταση μεταξύ των επιφανειών των ασυνεχειών, που ανήκουν στην ίδια οικογένεια, θεωρώντας παράλληλα τα επίπεδα των ασυνεχειών, μέσα από τη σχέση:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

Για τους συντελεστές A, B και C της σχέσης (3) οι τιμές είναι ίδιες, ενώ διαφοροποιείται μόνο η τιμή του συντελεστή D, η οποία αντιπροσωπεύει την κάθετη απόσταση μεταξύ των επιφανειών της κάθε οικογένειας.

Σε όλα τα σημεία, καθώς εντάσσονται σε μια συστάδα προστίθεται ο δείκτης J_c και προκύπτει ένα καινούριο νέφος σημείων, με τα σημεία μιας συστάδας, με τη μορφή $XYZRGBJ_cJ_c$.

Επομένως, όλες οι επιφάνειες, κάθε κύριας οικογένειας ασυνεχειών, είναι παράλληλες και διαθέτουν διαφορετική τιμή D, συμβολίζοντας την απόσταση από την αρχή των αξόνων. Οι διαφορετικοί συντελεστές D, που ανήκουν στην ίδια οικογένεια εμφανίζονται με αύξοντα τρόπο και δίνουν την απόλυτη διαφορά διαδοχικών σημείων. Οι τιμές αυτές συνιστούν την κανονική κατανομή της απόστασης των ασυνεχειών που ανήκουν στην ίδια οικογένεια.

Για την εξαγωγή, όμως, των δεδομένων από ένα τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud) πρέπει να προηγηθεί η επεξεργασία του, με τη χρήση των κατάλληλων λογισμικών. Πρωταρχικό στάδιο αποτελεί ο καθαρισμός (filtering) από κάθε είδος «θόρυβο», που μπορεί να περιλαμβάνεται στο μοντέλο από τη διαδικασία της σάρωσης με το UAV. Στους θορύβους ανήκει οποιαδήποτε επιπλέον πληροφορία περιλαμβάνεται στο νέφος σημείων, πέραν της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως, για παράδειγμα, οι κτιριακές υποδομές, η βλάστηση, η υγρασία, η ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι κλπ.

Στην εξεταζόμενη περιοχή πραγματοποιήθηκε καθαρισμός, με τη χρήση των ειδικών εργαλείων που παρέχει το ανοιχτό λογισμικό CloudCompareTM, χειροκίνητα, με ιδιαίτερη προσοχή, για να μην αφαιρεθεί σημαντική πληροφορία, και να είναι, όσο το δυνατόν, περισσότερο απαλλαγμένη από τη βλάστηση και πιο ξεκάθαρη η εικόνα της επιφάνειας του υπό έρευνα ασβεστολιθικού πρανούς.

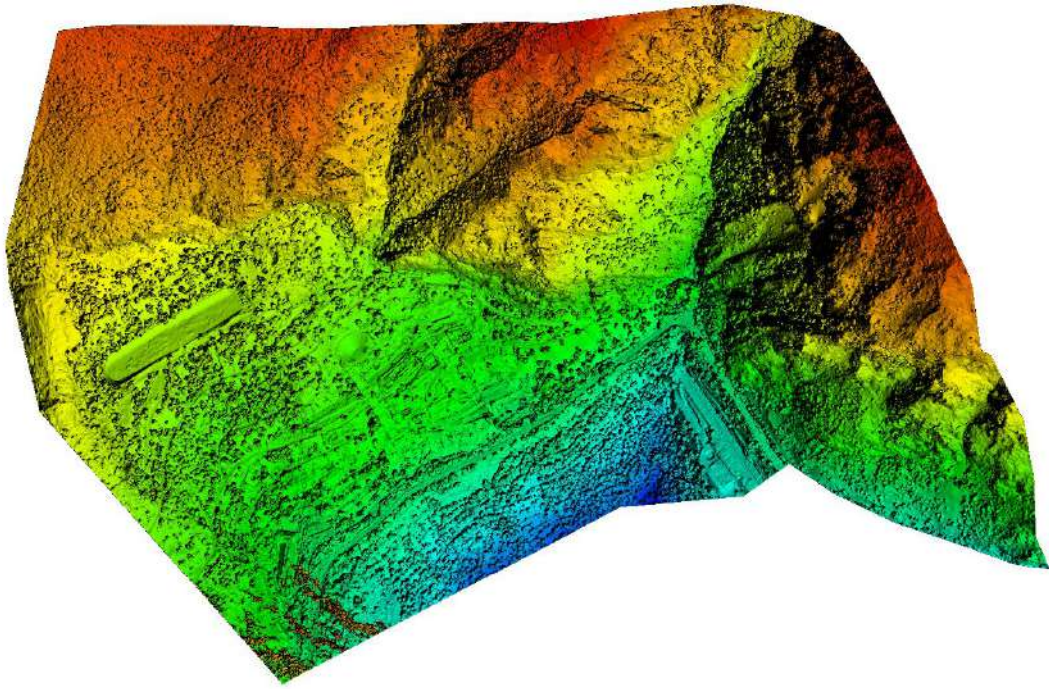
3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.1, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων, από τη λήψη με UAV (Unmanned Aerial Vehicles), μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland) και δημιουργήθηκαν: 1) το τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud) και το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων – DEM (Digital Elevation Model).

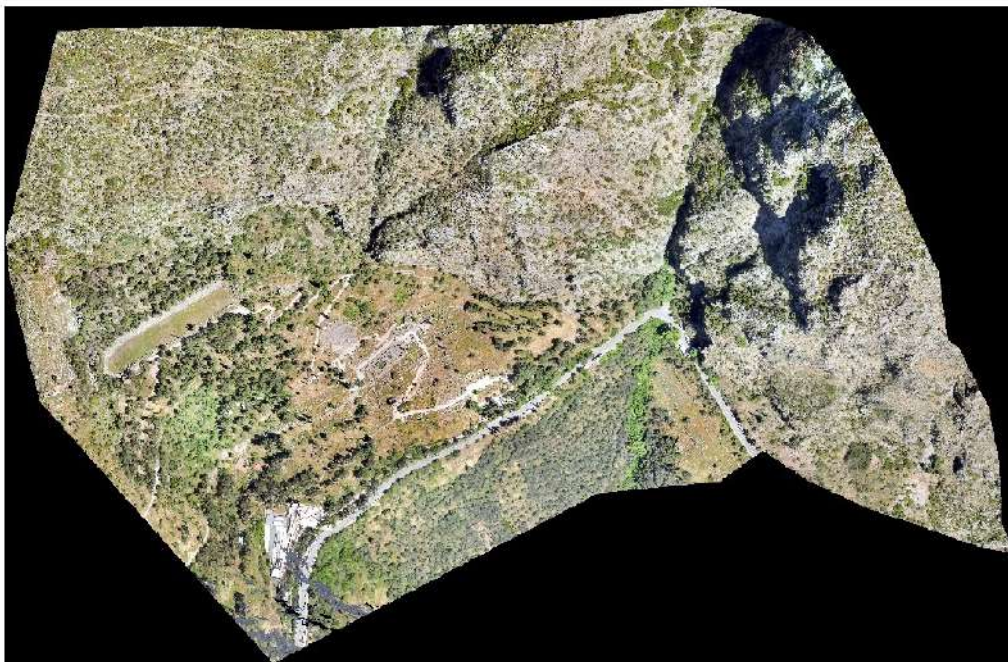
Από την αρχική επεξεργασία του νέφους σημείων, στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland) δημιουργήθηκε το Ορθομωσαϊκό και το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας - DSM (Digital Surface Model), τα οποία παρέχουν πληροφορίες για την τοποθεσία της περιοχής έρευνας και φαίνονται στους ακόλουθους χάρτες (Εικ. 38 & 39).

Συγκεκριμένα, για τη δημιουργία τους ακολουθήθηκαν τα εξής τρία βήματα επεξεργασίας, όπως αυτά ορίζονται μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού, για να προκύψουν τα ανωτέρω λογισμικά:

- 1) Αρχική επεξεργασία (initial processing)
- 2) Δημιουργία νέφους σημείων και πλέγματος (cloud and mesh)
- 3) Δημιουργία Ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας και Ορθομωσαϊκού (DSM Orthomosaic).



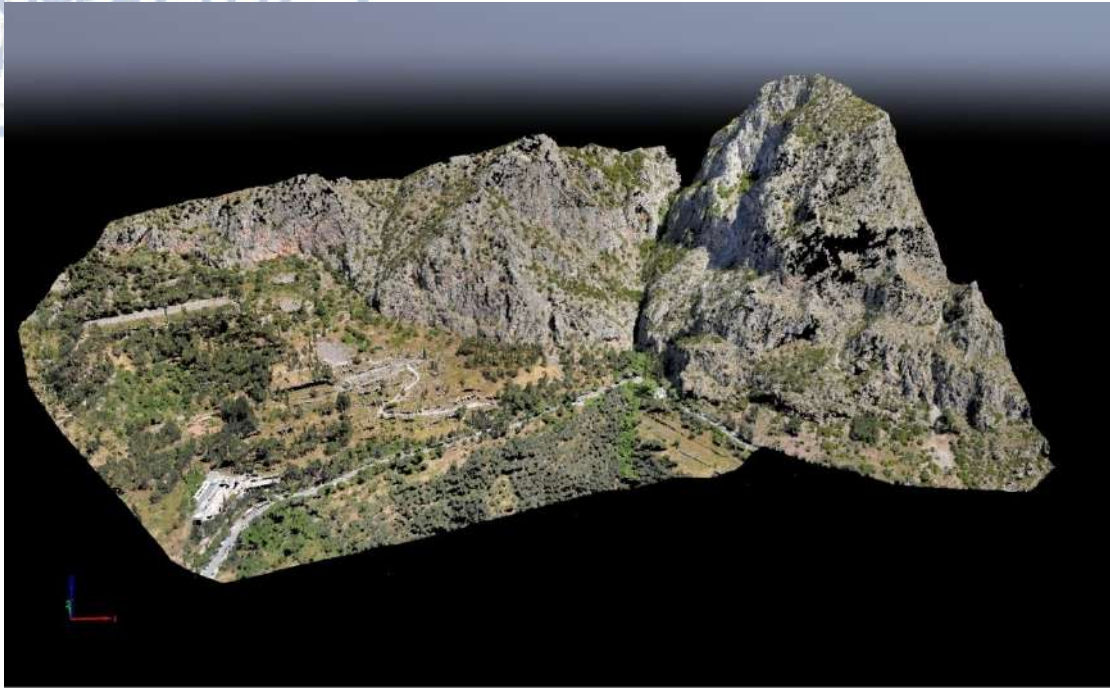
Εικ. 38. DSM (Digital Surface Model) (Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας) της περιοχής έρευνας, το οποίο δημιουργήθηκαν μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland).



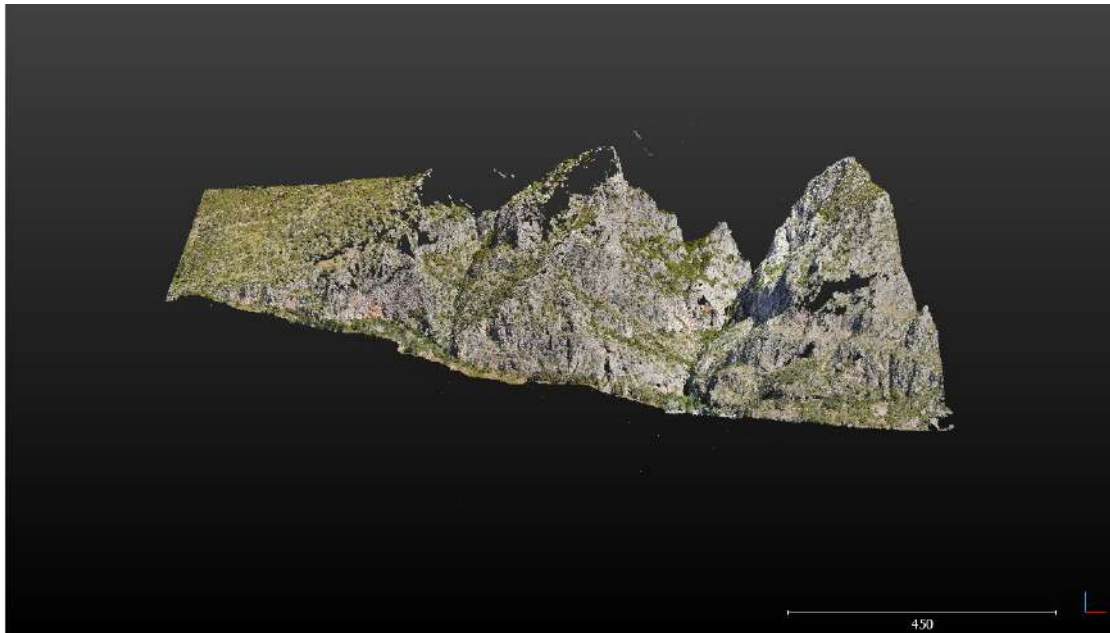
Εικ. 39. Ορθομωσαϊκό (Ορθοφωτοχάρτης), της περιοχής έρευνας, που δημιουργήθηκε μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland).

3.3.1 Τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud)

Μετά τη δημιουργία του αρχικού τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων ακολούθησε περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να προκύψει το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο (3D point cloud). Η διαδικασία αυτή περιελάμβανε τον καθαρισμό (filtering) του νέφους από κάθε «θόρυβο», που μπορεί να αποτυπώνεται κατά τη διαδικασία της σάρωσης με το UAV, όπως κτίρια, υποδομές, ατμοσφαιρικοί ρύποι, υγρασία, ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα, βλάστηση κ.ά., ώστε τελικά το παραγόμενο τρισδιάστατο μοντέλο να περιλαμβάνει ευκρινέστερη εικόνα της εξεταζόμενης περιοχής. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompareTM, με ιδιαίτερη προσοχή και λεπτομερείς χειρισμούς, ώστε να μην αφαιρεθεί οποιαδήποτε σημαντική πληροφορία από την περιοχή έρευνας. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), με παράλληλη χωρική απεικόνιση των Μνημείων και των επιμέρους χώρων του Αρχαιολογικού Χώρου (Εικ. 40), στοιχεία που θα αξιολογηθούν στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την εκτίμηση της επικινδυνότητας η οποία παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, ακολουθώντας την ίδια μέθοδο επεξεργασίας, στο ίδιο λογισμικό δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του βραχώδους, ασβεστολιθικού πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπου δεν περιλαμβάνονται τα Μνημεία και οι επιμέρους χώροι (Εικ. 41).



Εικ. 40. Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud) του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland). Το μοντέλο επεξεργάστηκε με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare.



Εικ. 41. Ενιαίο εξεταζόμενο βραχώδες πρανές, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper v.4.5.6. (Pix4D, Switzerland). Το μοντέλο επεξεργάστηκε με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού CloudCompareTM.

μέθοδο ανάλυσης KDE, ενώ η ελάχιστη γωνία (ϕ) μεταξύ των κανονικών διανυσμάτων, μιας οικογένειας ασυνεχειών ορίστηκε ίση με 20° . Αφού αναγνωριστούν τα επίπεδα (planes) και τοποθετηθούν επάνω στην επιφάνεια του εξεταζόμενου πρανούς, στη συνέχεια υπολογίζεται, αυτόματα, η κανονική τους απόστασή (normal spacing).

Με βάση, λοιπόν, τη μεθοδολογία των Riquelme et al. (2014) προσδιορίστηκαν οι κύριες οικογένειες των ασυνεχειών (Dsets) της βραχομάζας, για κάθε υπό-περιοχή χωριστά, καθώς και τα στοιχεία προσανατολισμού τους (Dip/Dip Direction). Παράλληλα, με τη χρήση του εργαλείου Compass Plugin, που παρέχεται από το ανοιχτής πρόσβασης λογισμικό CloudCompareTM, μετρήθηκε ο προσανατολισμός αυτών των ασυνεχειών, απευθείας στο νέφος σημείων (point cloud), για επαλήθευση των στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών, από τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με το λογισμικό DSE. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις με το εργαλείο Compass πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα και όχι αυτοματοποιημένα.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, για την κάθε υπό-περιοχή και τα αντιπροσωπευτικά τους τμήματα περιέχονται στον ακόλουθο Πίνακα (Πίν.3) και ταυτόχρονα παρουσιάζονται στους χάρτες που ακολουθούν.

Πίνακας 3. Κύρια χαρακτηριστικά των τριών υπό-περιοχών, στα οποία χωρίστηκε το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), του βραχώδους πρανού, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor) και του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare καθώς και τα στοιχεία προσανατολισμού από τις μετρήσεις που λήφθηκαν με τη χρήση του ειδικού εργαλείου, Compass Plugin, το οποίο παρέχεται από το ανοιχτό λογισμικό CloudCompare™.

	DSE			CloudCompare™ μετοεργαλείοCompass Plugin
	Οικογένεια ασυνεχειών	Γωνία κλ./ Διεύθ. κλίσης	Πυκνότητα	Γων. Κλ.-Διεύθ. Κλ.
Κεντρικό τμήμα-Ναός Απόλλωνα	J1	73/186	3.8	71/193
	J2	86/358	0.9	80/354
Δυτικό τμήμα- Μουσείο- Στάδιο	J1	86/359	3.5	81/357
Ανατολικό τμήμα- Κασταλία πηγή	J1	77/185	4,9	77/184
	J2	4/046	0.3	15/066

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση παρατηρούμε ότι: στο Κεντρικό και στο Ανατολικό τμήμα προσδιορίστηκαν δύο οικογένειες ασυνεχειών (DSets), ενώ στο Δυτικό μία, τα κύρια στοιχεία των οποίων, όπως εξήχθησαν, από το λογισμικό DSE βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 3, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή τους στο χώρο, για κάθε τμήμα χωριστά.

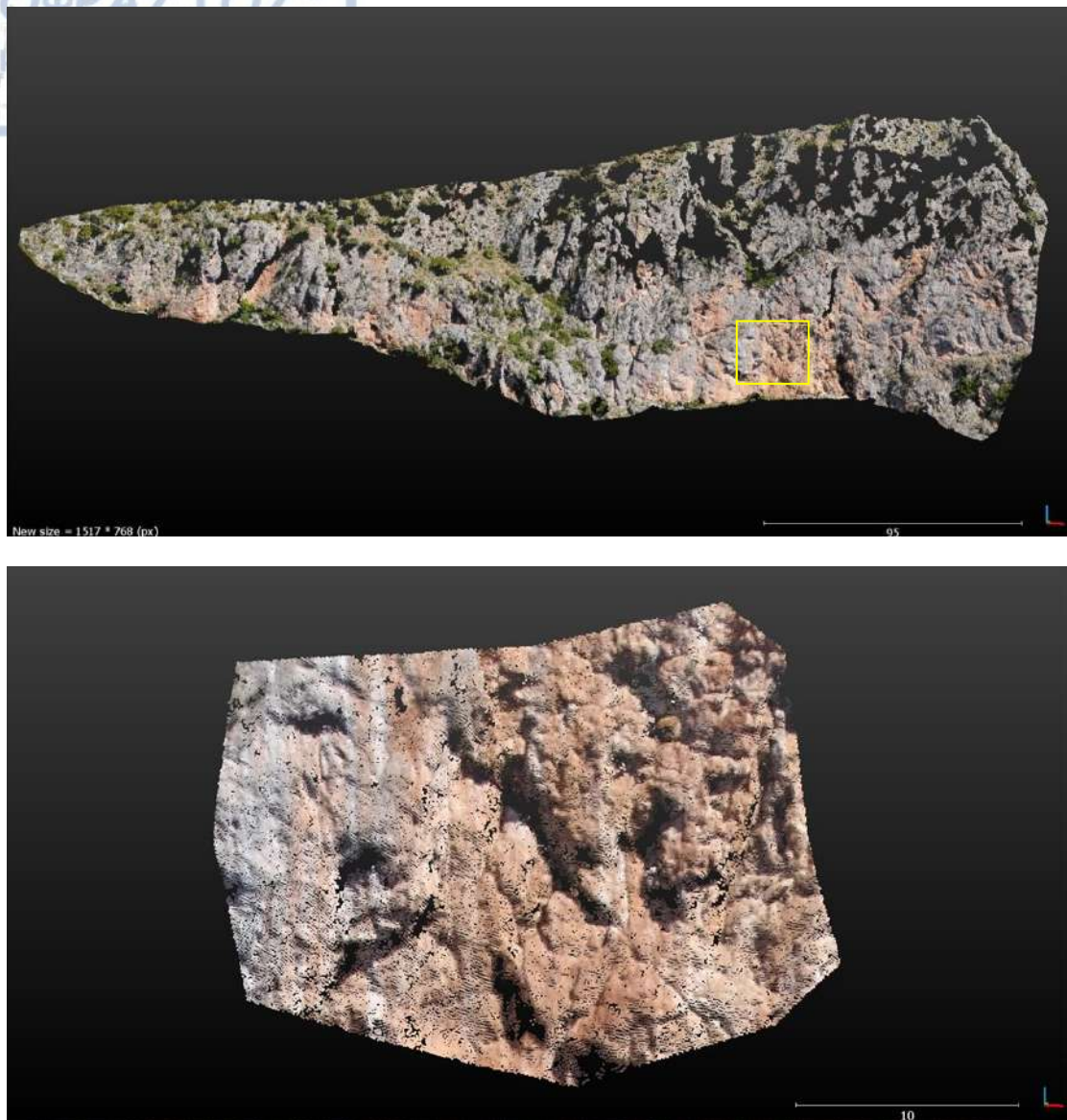
1^η Περιοχή (Δυτικό Τμήμα)

Με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε ανωτέρω, το εξεταζόμενο βραχώδες πρανές χωρίστηκε σε τρεις υπό-περιοχές. Η πρώτη αφορά στο Δυτικό τμήμα, όπου στα κατάντη, εντοπίζονται το Αρχαιολογικό Μουσείο, το Αρχαίο Στάδιο, το Αρχαίο θέατρο, το εθνικό οδικό δίκτυο και το parking. (Εικ. 42), με μήκος, περίπου, 380 μέτρα (m) και μέσο όρο ύψους, περίπου 90 μέτρα (m) (το ύψος κυμαίνεται από 40 έως 130 μέτρα (m), περίπου), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου, 35.000 τετραγωνικών μέτρων (m^2).

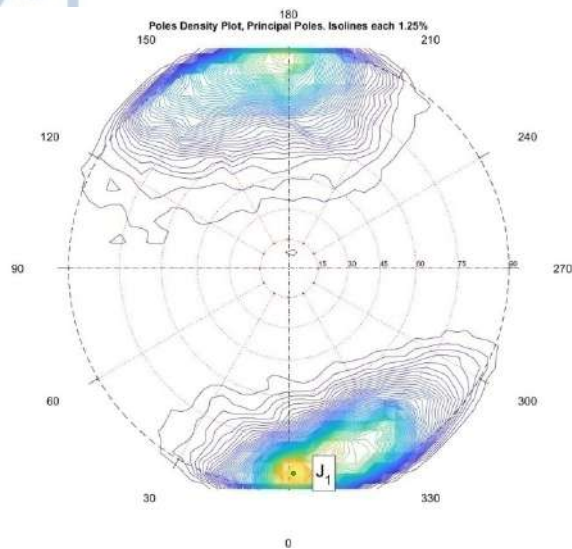


Εικ. 42. Δυτικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.

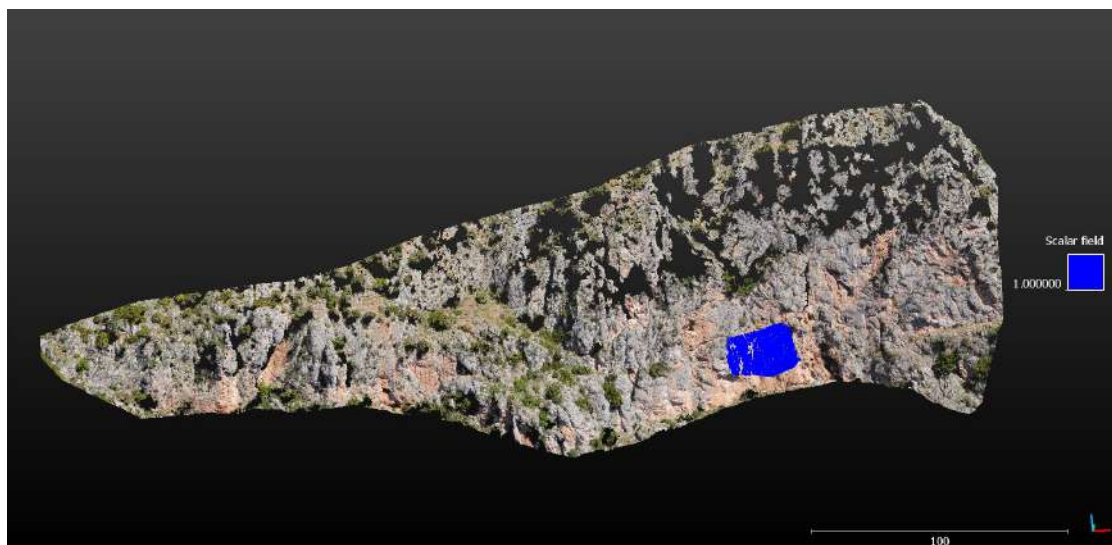
Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένα μικρότερο τμήμα του Δυτικού τμήματος του βραχώδους πρανούς, με μήκος, περίπου, 25 μέτρα (m) και μέσο όρο ύψους, περίπου 19 μέτρα (m), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου, 480 τετραγωνικών μέτρων (m^2). Η οικογένεια ασυνεχειών, η οποία εξήχθη ημι-αυτόνομα, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού DSE, μαζί με το στερεοδιάγραμμα της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων, καθώς και των αντίστοιχων επιπέδων της παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.

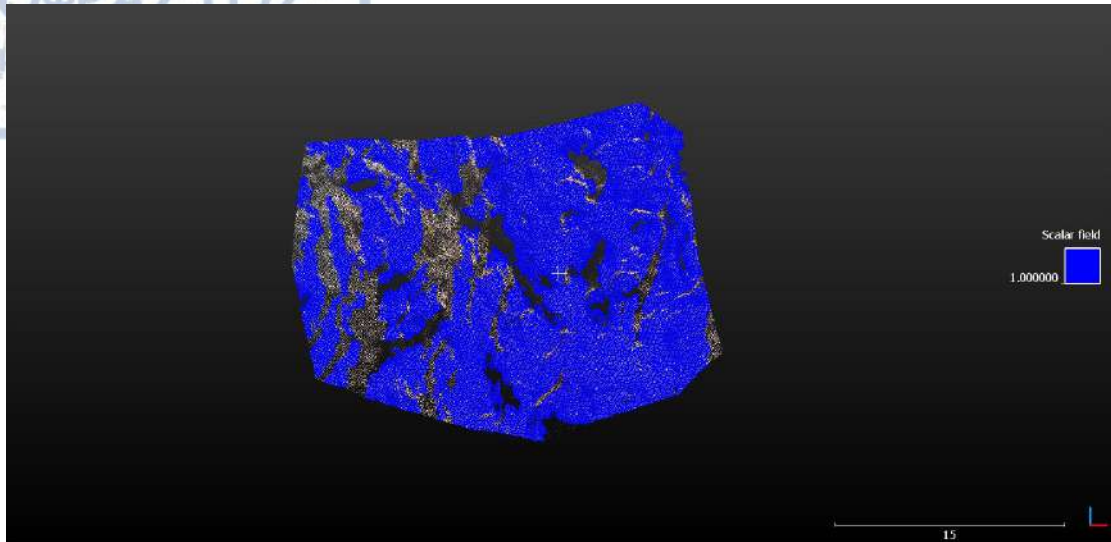


Εικ. 43. Δυτικό τμήμα του πρανούς και το αντιπροσωπευτικό, μικρότερο, τμήμα του (κάτω αριστερά, με κίτρινο πλαίσιο), που επιλέχθηκε για την ανάλυση του προσανατολισμού των ασυνεχειών (κάτω εικόνα), ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.



Εικ. 44. Στερεοδιάγραμμα προβολής της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων και των αντίστοιχων επιπέδων του, με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor). στο δυτικό τμήμα του πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών.

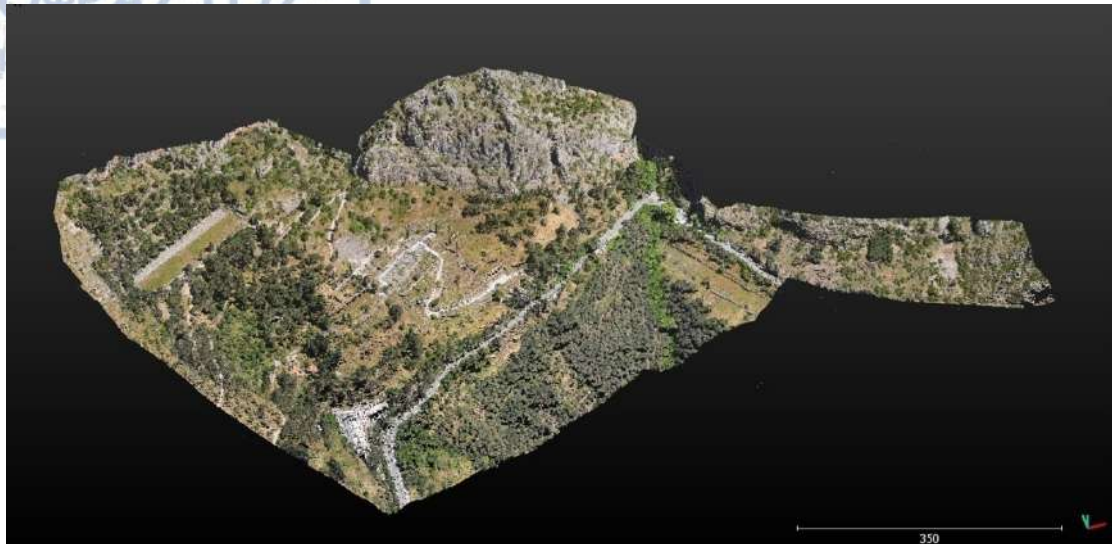




Εικ. 45. Παρουσίαση του τρισδιάστατου νέφους σημείων, με αποτύπωση της οικογένειας των ασυνεχειών – Dsets (κάτω εικόνα), στην επιφάνεια του δυτικού τμήματος του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών (επάνω εικόνα), μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™, όπου αποτυπώνεται με μπλε χρώμα, J1 (μπλε χρώμα).

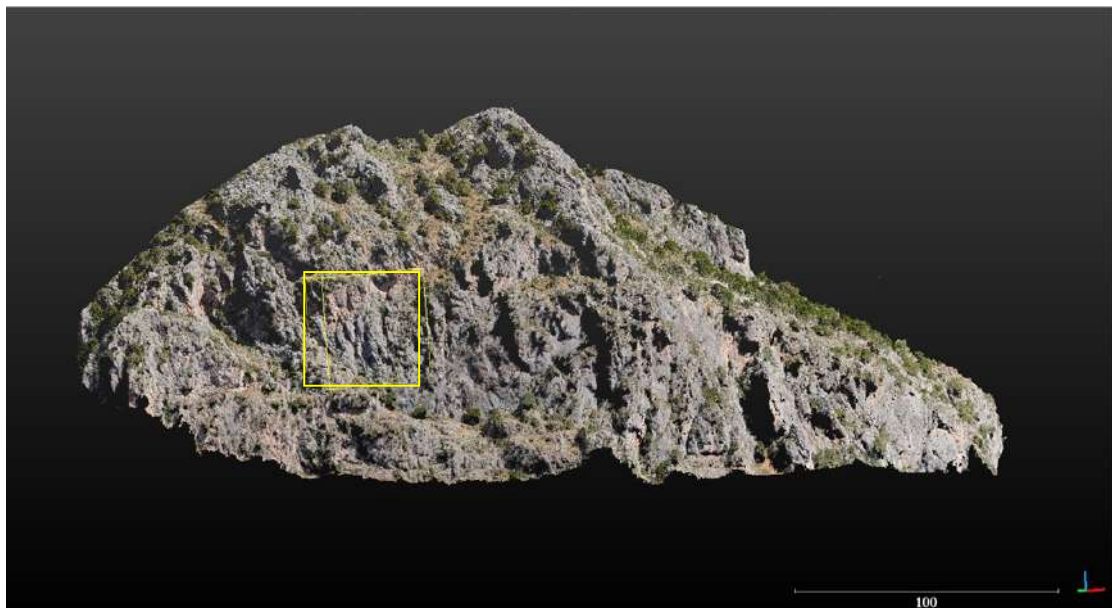
2^η Περιοχή (Κεντρικό Τμήμα)

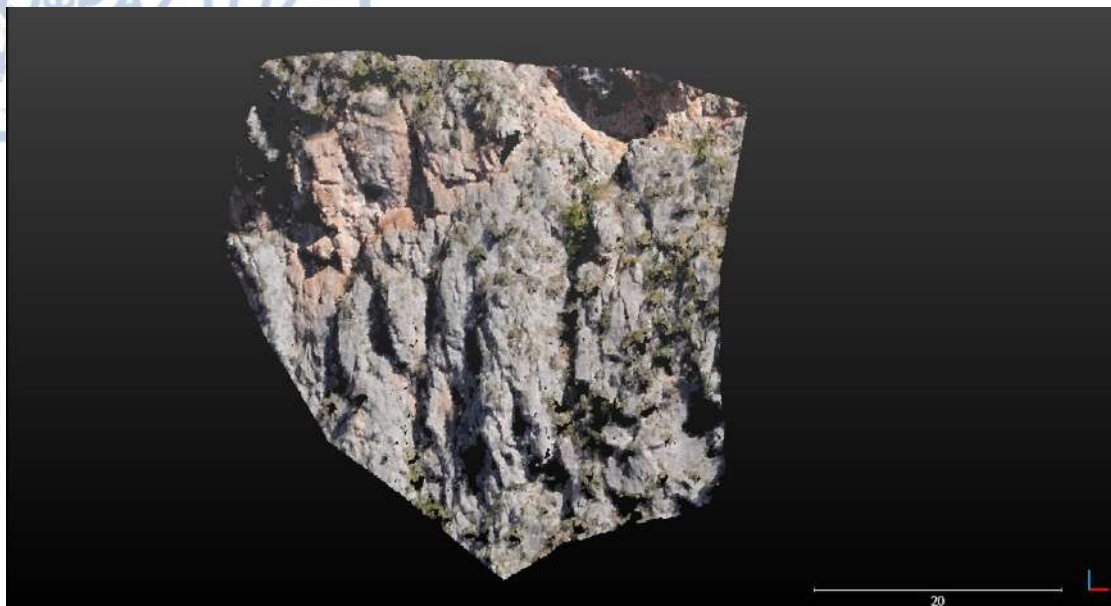
Το δεύτερο τμήμα, στο οποίο χωρίστηκε το εξεταζόμενο πρανές είναι το Κεντρικό τμήμα, όπου στα κατάντη, εντοπίζονται ο ναός του Απόλλωνα, το Αρχαίο θέατρο, η είσοδος στον Αρχαιολογικό Χώρο, ο διάδρομος κίνησης στο Χώρο, η Κασταλία πηγή και το εθνικό οδικό δίκτυο. (Εικ. 46), με μήκος, περίπου, 240 μέτρα (m) και μέσο όρο ύψους, περίπου 90 μέτρα (m) (το ύψος κυμαίνεται από 45 έως 140 μέτρα (m), περίπου), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου, 22.000 τετραγωνικών μέτρων (m²).



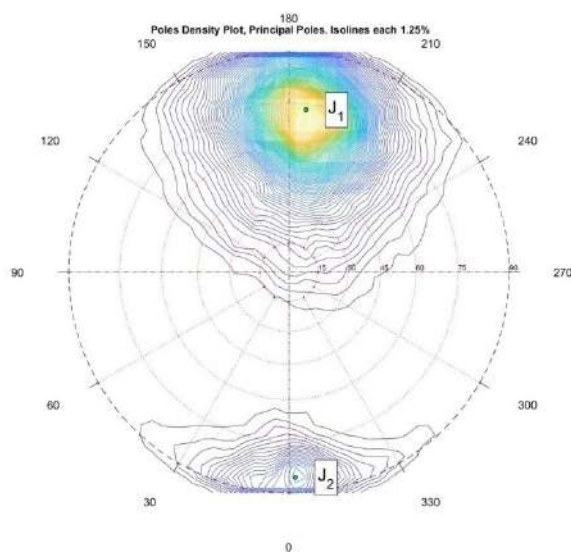
Εικ. 46. Κεντρικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.

Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία επιλέχθηκε ένα μικρότερο τμήμα στο Κεντρικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, με μήκος, περίπου, 40 μέτρα (m) και ύψος, περίπου, 38 μέτρα (m), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου 1.500 τετραγωνικών μέτρων (m^2). Οι 2 οικογένειες ασυνεχειών, οι οποίες εξήχθησαν ημι-αυτόνομα, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού DSE, μαζί με το στερεοδιάγραμμα της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων, καθώς και των αντίστοιχων επιπέδων τους παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.

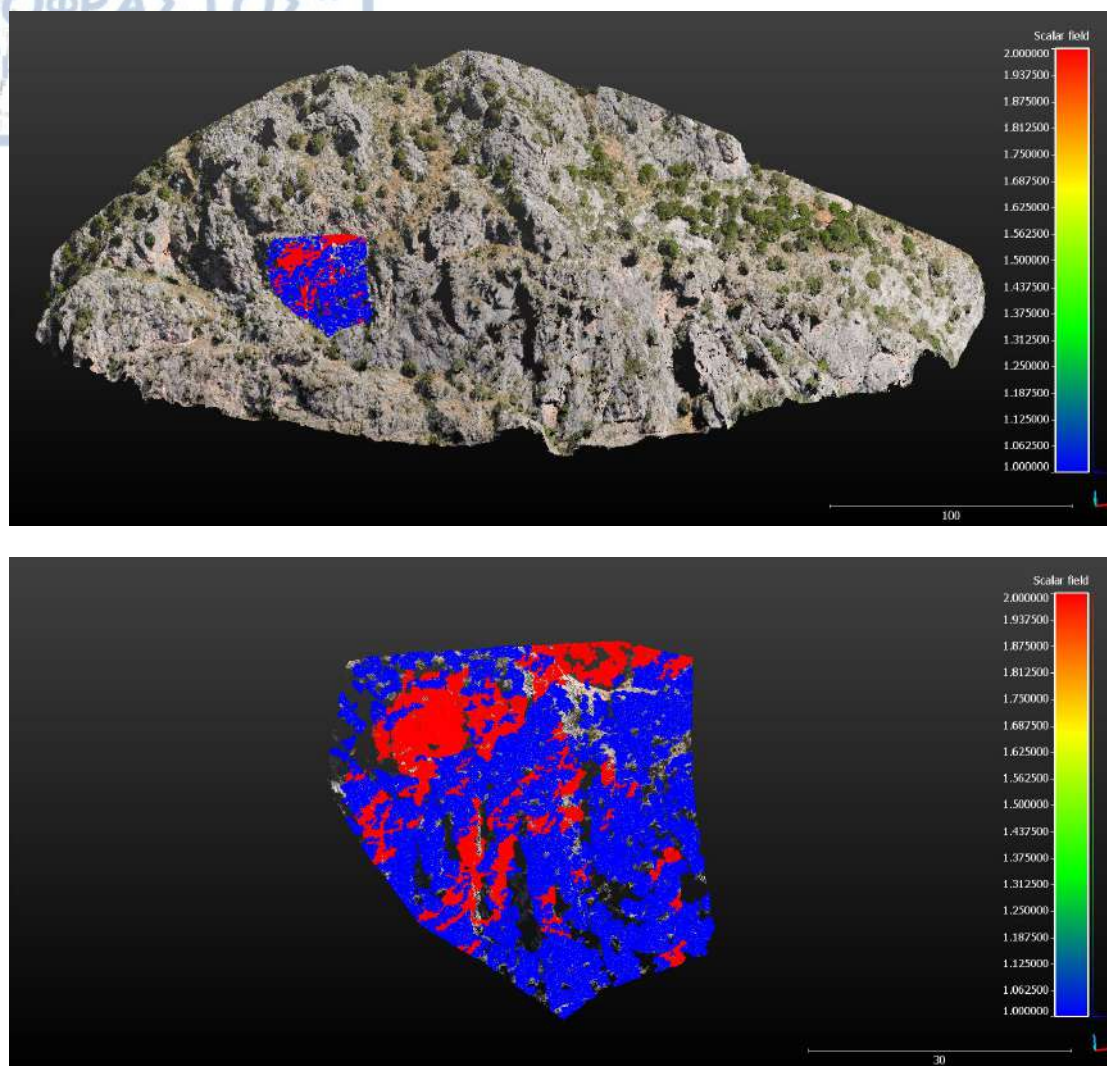




Εικ. 47.Κεντρικό τμήμα του πρανούς και το αντιπροσωπευτικό, μικρότερο, τμήμα του (κάτω αριστερά, με κίτρινο πλαίσιο), το οποίο επιλέχθηκε για την ανάλυση του προσανατολισμού των ασυνεχειών (κάτω εικόνα), ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.



Εικ. 48. Στερεοδιάγραμμα προβολής της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων και των αντίστοιχων επιπέδων του, με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor). στο κεντρικό τμήμα του πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών.



Εικ. 49. Παρουσίαση του τρισδιάστατου νέφους σημείων, με αποτύπωση των 2 οικογενειών ασυνεχειών – Dsets (κάτω εικόνα), στην επιφάνεια του κεντρικού τμήματος του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών (επάνω εικόνα), μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompareTM, όπου η οικογένεια ασυνεχειών J1, αποτυπώνεται με μπλε χρώμα και η J2 με κόκκινο χρώμα.

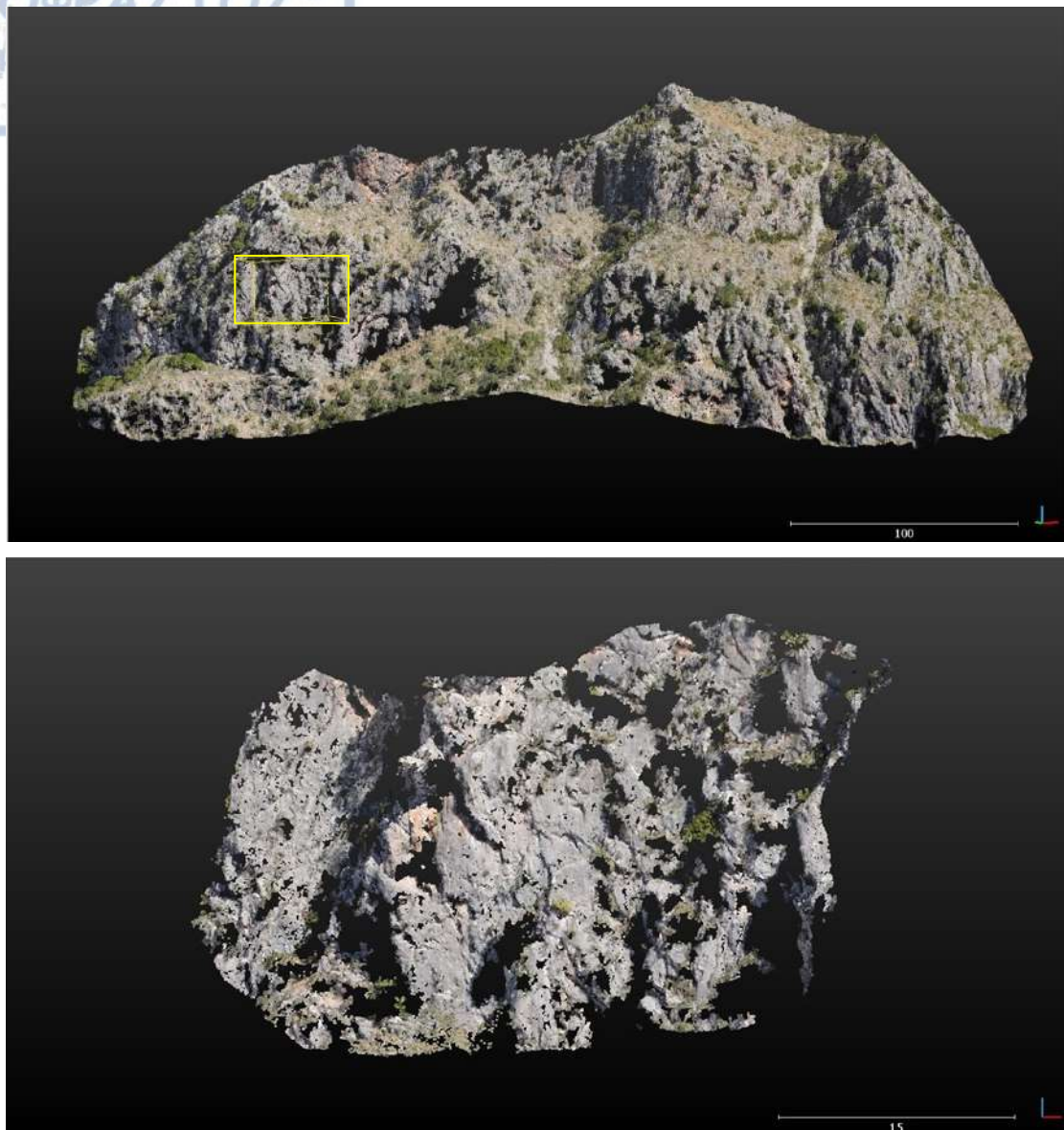
3^η Περιοχή (Ανατολικό Τμήμα)

Το τρίτο τμήμα του εξεταζόμενου πρανούς αποτελεί το Ανατολικό τμήμα, όπου στα κατάντη εντοπίζονται η Κασταλία πηγή, το Αρχαίο Σχολείο, ο ναός της Αθηνάς και το εθνικό οδικό δίκτυο. (Εικ. 50), με μήκος, περίπου, 375 μέτρα (m) και μέσο όρο ύψους, περίπου 110 μέτρα (m) (το ύψος κυμαίνεται από 78 έως 140 μέτρα (m), περίπου), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου, 41.500 τετραγωνικών μέτρων (m²).

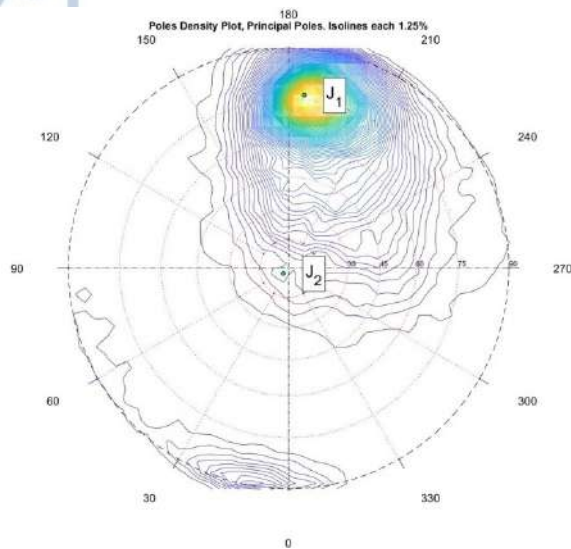


Εικ. 50. Ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα από το περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.

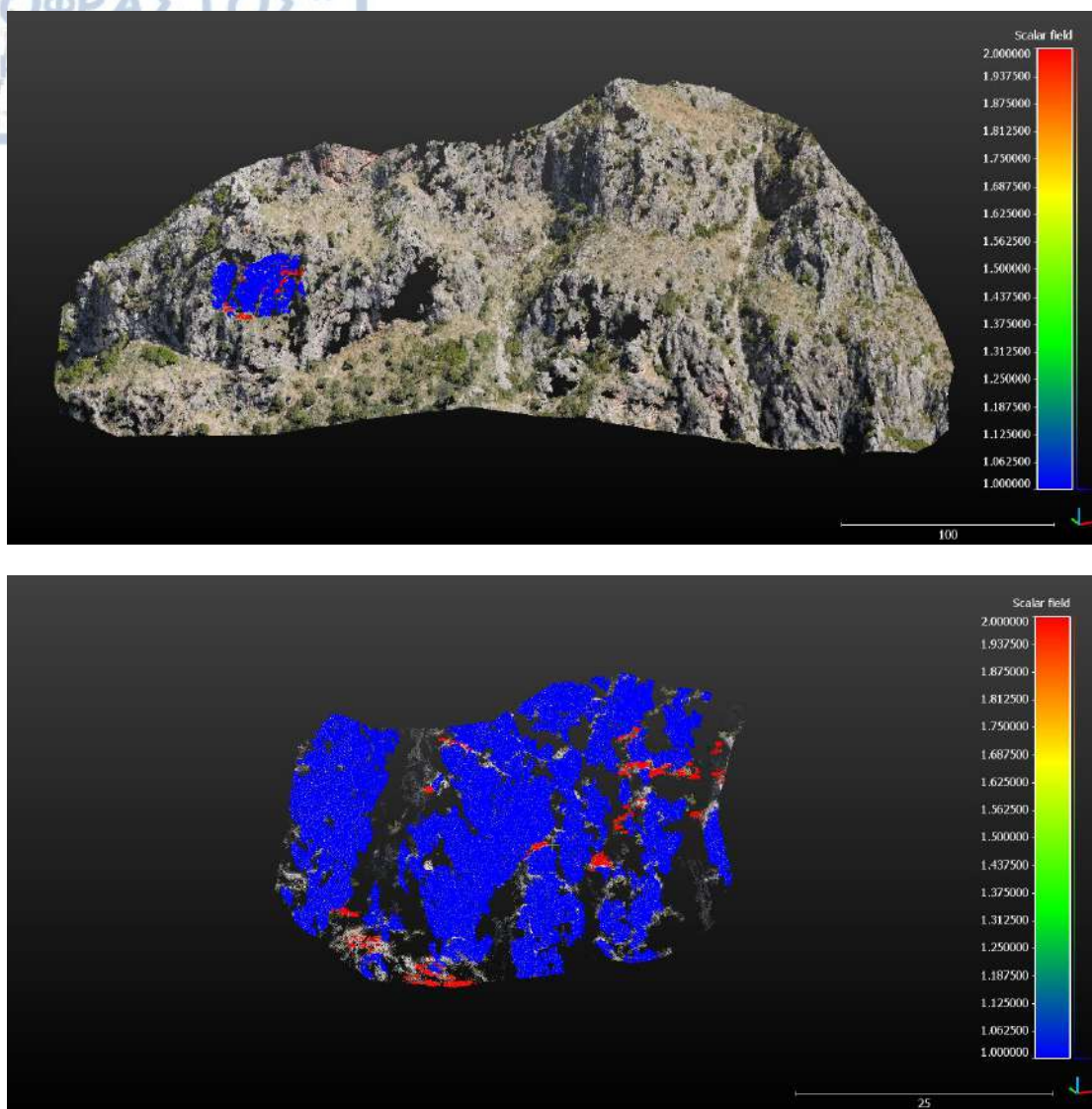
Ομοίως, με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις επιλέχθηκε ένα μικρότερο τμήμα στο Ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανούς, με 38 μέτρα (m) μήκος, περίπου, και ύψος, περίπου, 24 μέτρα (m), καλύπτοντας μια περιοχή, περίπου 900 τετραγωνικών μέτρων (m^2). Οι οικογένειες ασυνεχειών, οι οποίες εξήχθησαν ημι-αυτόνομα, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού DSE, μαζί με το στερεοδιάγραμμα της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων, καθώς και των αντίστοιχων επιπέδων τους παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικ. 51. Ανατολικό τμήμα του πρανούς και το αντιπροσωπευτικό, μικρότερο, τμήμα του (κάτω αριστερά, με κίτρινο πλαίσιο). Το ανατολικό τμήμα του εξεταζόμενου πρανούς και το τμήμα της (επάνω εικόνα, με κίτρινο πλαίσιο), που επιλέχθηκε για την ανάλυση του προσανατολισμού των ασυνεχειών, (κάτω εικόνα), ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.



Εικ. 52. Στερεοδιάγραμμα προβολής της πυκνότητας των πόλων των κανονικών διανυσμάτων και των αντίστοιχων επιπέδων τους, με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού DSE (Discontinuity Set Extractor). στο ανατολικό τμήμα του πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών.



Εικ. 53. Παρουσίαση του τρισδιάστατου νέφους σημείων, με αποτύπωση των 2 οικογενειών των ασυνεχειών – Dsets(κάτω εικόνα), στην επιφάνεια του κεντρικού τμήματος του βραχώδους πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών (επάνω εικόνα), μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™, όπου κάθε οικογένεια ασυνεχειών αποτυπώνεται με διαφορετικό χρώμα, σύμφωνα με το χρωματικό υπόμνημα του χάρτη. J1 (μπλε χρώμα), J2 (κόκκινο χρώμα).

3.3.3 Αποτελέσματα της απόστασης (spacing) των ασυνεχειών

Σε συνέχεια της ανάλυσης που προηγήθηκε και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.1, με βάση τη μεθοδολογία των Riquelme et al. (2014), σχετικά με τον προσδιορισμό των κύριων οικογενειών των ασυνεχειών, για τις 3 υπό-περιοχές, υπολογίστηκε η απόσταση (spacing) μεταξύ των ασυνεχειών που ανήκουν στην ίδια κύρια οικογένεια, τόσο με εμμονή (Persistent), όσο και χωρίς

Πίνακας 4. Αποτελέσματα της μέσης απόστασης των ασυνεχειών της ίδιας κύριας οικογένειας (J), των τριών τμημάτων, του βραχώδους πρσανούς, στα οποία χωρίστηκε το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων (3D point cloud), ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία, μέσα από το ανοιχτό λογισμικό DSE (Discontinuity Set Extractor).

	Οικογένεια ασυνεχειών	Γωνία κλ./ Διεύθ. Κλίσης (DSE)	Μέση απόσταση ασυνεχειών χωρίς εμμόνη (m)	Μέση απόσταση ασυνεχειών με εμμόνη (m)
Κεντρικό τμήμα-Ναός Απόλλωνα	J1	73/186	1.3	1.2
	J2	86/358	2.3	1.7
Δυτικό τμήμα- Μουσείο- Στάδιο	J1	86/359	3.1	3.1
Ανατολικό τμήμα- Κασταλία πηγή	J1	77/185	2.4	1.7
	J2	4/046	4.1	2.5

Τα αποτελέσματα αφορούν στις αποστάσεις των ασυνεχειών, με εμμόνη και χωρίς εμμόνη, για κάθε τμήμα χωριστά.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4 παρατηρούμε ότι συνολικά όλες οι τιμές της μέσης απόστασης, χωρίς εμμόνη εμφανίζονται ελαφρώς μεγαλύτερες, σε σχέση με τις αντίστοιχες, με εμμένουσες συνθήκες. Η εικόνα αυτή παρατηρείται, εξίσου, σε όλες τις οικογένειες ασυνεχειών και στα τρία τμήματα (Κεντρικό, Δυτικό, Ανατολικό) του εξεταζόμενου πρσανούς. Οι μετρούμενες αποστάσεις, στην πλειοψηφία τους, κυμαίνονται από 1 έως 3 μέτρα (m), με εξαίρεση την οικογένεια ασυνεχειών J2 (Ανατολικό τμήμα), όπου η μέση απόσταση των ασυνεχειών υπολογίστηκε ίση με 4 μέτρα (m), περίπου, χωρίς εμμόνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (SUSCEPTIBILITY) ENANTI ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν φαινόμενα ιδιαίτερα καταστροφικά, λόγω των υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά την κίνησή τους. Επομένως, η πρόβλεψη και ο ακριβής εντοπισμός των πιθανών θέσεων εκκίνησης μιας βραχοκατάπτωσης, η τάξη μεγέθους, καθώς και ο αντίκτυπός της, αποτελούν πολύ σημαντικό βήμα. Γενικά, με τον όρο επιδεκτικότητα προσδιορίζεται η φυσική ροπή μιας περιοχής να επηρεαστεί από ένα μελλοντικό επικίνδυνο φαινόμενο, ανάλογα πάντα με τις ιδιαίτερες μορφολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής (Brabb 1985), έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι ακριβείς θέσεις πιθανής βραχοκατάπτωσης (Guzzetti et al. 2005, Guzzetti 2006, Rossi et al. 2010). Είναι δυνατό, επομένως, να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων και, εν συνεχεία, ανάλυση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης (Risk) και δημιουργία προτάσεων μέτρων προστασίας για την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών (Lukovic et al. 2021). Στις περιπτώσεις περιοχών, όπου παρατηρούνται φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, συνήθως, διακρίνονται κενά (scars), επάνω στην επιφάνεια του πρανούς, ενώ στη βάση του διακρίνονται θραύσματα βραχωδών τεμαχών, ποικίλου μεγέθους και όγκου (Corominas et al. 2017). Η εκτίμηση του πόσο μπορεί να επηρεαστεί μια περιοχή από βραχοκαταπτώσεις, καθώς και το που είναι πιθανό να συμβούν πραγματοποιείται με την αξιολόγηση της επιδεκτικότητάς της σε ανάλογα φαινόμενα. Μέσα στα χρόνια, αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν διάφορες μεθόδους για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας έναντι καταπτώσεων βράχων. Συγκεκριμένα, οι Guenther et al. (2004), Jaboyedoff et al. (2004) και Derron et al. (2005) χρησιμοποίησαν ντετερμινιστικές μεθόδους και οι Frattini et al. (2008), Marquinez et al. (2003) στατιστικές αναλύσεις, ενώ πλήθος ερευνητών (Fernandez-Hernandez et

al. 2012, Cancelli and Crosta 1993, Crosta and Locatelli 1999, Pierson et al. 1990, Mazzoccola and Sciesa 2000, Budetta 2004, Rouiller and Marro 1997) αξιοποίησε συστήματα βαθμονόμησης στηριζόμενα σε εμπειρικές και ημι-εμπειρικές τεχνικές. Τέλος, οι Reichenbach et al. (2005) χρησιμοποίησαν ποιοτικές μεθόδους αξιολόγησης και πραγματοποίησαν γεωμορφολογική χαρτογράφηση. Αποτέλεσμα των ανωτέρω μεθόδων, σύμφωνα με τους Van Westen et al. (1997), Varnes (1984) και Guzzetti (2005) είναι η δημιουργία των χαρτών επιδεκτικότητας, με βάση τους οποίους μπορούν να προσδιοριστούν οι θέσεις πιθανής αστοχίας.

Στον ελλαδικό χώρο, αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μεθοδολογίες αξιολόγησης της επιδεκτικότητας, για διάφορες περιοχές της χώρας, για κατολισθητικά φαινόμενα, καθώς και για καταπτώσεις βράχων, οι οποίες, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι, εμφανώς, λιγότερες σε αριθμό. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων στην περιοχή της Εύβοιας (Ilia et al. 2010, Tsangaratos and Benardos 2014, Ilia and Tsangaratos 2016), στην Αττική (Tavoularis et al. 2021), στην περιοχή της Ηπείρου (Tsangaratos and Ilia, 2016), στην Κρήτη (Kouli et al. 2014), στα Τρίκαλα (Bathrellos et al. 2009), αλλά και για το σύνολο του ελλαδικού χώρου (Ferentinou and Chalkias 2013, Sabatakakis et al. 2013). Αντίστοιχα πραγματοποιήθηκαν έρευνες, σχετικά με την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων για την περιοχή των Γρεβενών (Papathanasiou et al. 2010), για τη Σαντορίνη (Antonioni and Lekkas 2010) και, συνολικά, για την Ελλάδα, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Saroglou et al. 2019). Σε περιπτώσεις, όπως η περιοχή έρευνας της παρούσας διατριβής, όπου δεν υπάρχει αρχείο καταγεγραμμένων φαινομένων βραχοκατάπτωσης και η χρονική πιθανότητα είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, ακολουθείται μεθοδολογία προσδιορισμού θέσεων πιθανής αστοχίας, γνωστή ως ανάλυση επιδεκτικότητας (Ferrari et al. 2016).

Η αξιοπιστία μιας λεπτομερούς ανάλυσης βραχοκαταπτώσεων βασίζεται στα εξής: 1) στον προσδιορισμό της θέσης εκκίνησης μιας πιθανής βραχοκατάπτωσης, 2) στην τρισδιάστατη προσομοίωση της τροχιάς και του ύψους αναπήδησης που διαγράφουν τα τεμάχια από την αποκόλλησή τους από το πρανές 3) στην τρισδιάστατη (3D) μοντελοποίηση της τοπογραφίας και 4) στη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου (Crosta et al. 2014). Στις μέρες μας, η τεχνολογική πρόοδος και οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των τεχνικογεωλογικών μελετών, για πολύ υψηλής ακρίβειας τοπογραφικά δεδομένα, οδήγησε στη χρήση τεχνολογιών,

Ο προσδιορισμός της περιοχής προέλευσης μιας πιθανής αστοχίας αποτελεί το πρώτο βήμα για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων και τον καθορισμό των κατάλληλων μέτρων μετριασμού και ελέγχου για αντίστοιχα φαινόμενα (Wang, X. L. et al. 2021, Alvioli, M. et al. 2021, Salvini, R. et al. 2013, Cignetti, M. et al. 2021). Η δημιουργία αρχείων με μακροχρόνιες καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών αποτελεί μεγάλη πρόκληση, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως, για παράδειγμα, σε αυτές που αφορούν σε οδικά δίκτυα, τα τεμάχια απομακρύνονται μετά την πτώση τους, ώστε να επανέλθουν οι συνθήκες κυκλοφορίας.

Το μέτωπο του πρανούς, από όπου ενεργοποιήθηκαν οι καταπτώσεις βράχων μπορεί να θεωρηθεί ως «αρχείο» της δραστηριότητας των τελευταίων εκατοντάδων ή χιλιάδων χρόνων με τη μορφή κενών (scars) από τις αποκολλήσεις παλαιότερων βραχοτεμαχών. Τα κενά (scars) αποτελούν περιοχές διάρρηξης του πρανούς, που δημιουργούνται από την αποκόλληση τμήματος μιας βραχώδους μάζας, σε ένα ή πολλαπλά γεγονότα βραχοκατάπτωσης και τα οποία είναι δυνατό να αναγνωριστούν, τόσο τεχνικογεωλογικά, όσο και γεωμετρικά. Επίσης, τα «κενά» αυτά οριοθετούν τον όγκο που αποσπάστηκε από το μέτωπο του πρανούς, σε ένα ή περισσότερα γεγονότα. Το εύρος των όγκων που έχουν αποκολληθεί από το πρανές ποικίλει και μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο από 1 m^3 to έως περισσότερα από 10^5 m^3 (Hung et al. 1999, Hung and Evans 1988, Rochet 1987, Ruiz-Carulla and Corominas 2020). Σήμερα, η δυνατότητα συλλογής των δεδομένων, με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών διευκολύνει την ανάλυση αυτών των «κενών», από καταπτώσεις βράχων που συνέβησαν στο παρελθόν και επιτρέπει τον εντοπισμό και τη μέτρηση των όγκων που έχουν αποκολληθεί από το πρανές (Rosser et al. 2007). Συγκεκριμένα, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), έχουν προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, τα τελευταία χρόνια, στη χαρτογράφηση, η οποία πραγματοποιείται, πλέον, σε μικρό χρονικό διάστημα (Boccardo et al. 2015, Yusoff et al. 2018).

Ο εντοπισμός και ο υπολογισμός της κατανομής του όγκου ή της πυκνότητας αυτών των κενών (scars), αποτελεί ένδειξη εμφάνισης βραχοκαταπτώσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας έμμεσος τρόπος μέτρησης της συχνότητας των γεγονότων, μέθοδος που ακολουθήθηκε και στην παρούσα διατριβή (Corominas et al. 2017).

Έτσι, έχοντας δημιουργήσει το ενιαίο τρισδιάστατο (3D) μοντέλο του βραχώδους πρανούς, το οποίο καλύπτει όλη την περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, πραγματοποιήθηκε έλεγχος, ώστε να αναγνωρισθούν εκείνες οι θέσεις πιθανής αστοχίας, ή αλλιώς οι ζώνες εκκίνησης βραχοκατάπτωσης, αξιολογώντας τις γεωμετρικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας (Εικ. 54). Έτσι, με βάση αυτή τη μέθοδο προσδιορισμού, αναγνωρίστηκαν οι θέσεις αυτές, με τη χρήση του Pix4DMapper και υπολογίστηκαν χειροκίνητα οι όγκοι των αποκολλημένων τεμαχών.



Εικ. 54. Τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο (3D Mesh model) της υπό έρευνα περιοχής, από την εναέρια αποτύπωση με UAV (Unmanned Aerial Vehicles), σε περιβάλλον Pix4Dmapper.

Με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας (Corominas et al. 2017), αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος του βραχώδους πρανούς ώστε να εντοπιστούν οι θέσεις αστοχίας. Για το λόγο αυτό συνδυάστηκαν το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο που δημιουργήθηκε σε προηγούμενα στάδια επεξεργασίας, όσο και οι υπαίθριες παρατηρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ένα διάστημα τριών ετών.

Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η μεθοδολογία χαρτογράφησης και υπολογισμού της κατανομής του όγκου των κενών (scars) που δημιουργήθηκαν από προγενέστερες καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών, στα μεγάλης κλίσης και πολύ έντονα διαρρηγμένα

ασβεστολιθικά πρανή, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών. Η αναγνώρισή τους πραγματοποιήθηκε από τη συσχέτισή τους με τις θέσεις στο πρανές όπου το χρώμα εμφανίζεται πιο «πρόσφατο», δηλαδή πιο ανοιχτόχρωμο σε σχέση με τα γειτονικά τους (Εικ. 55).



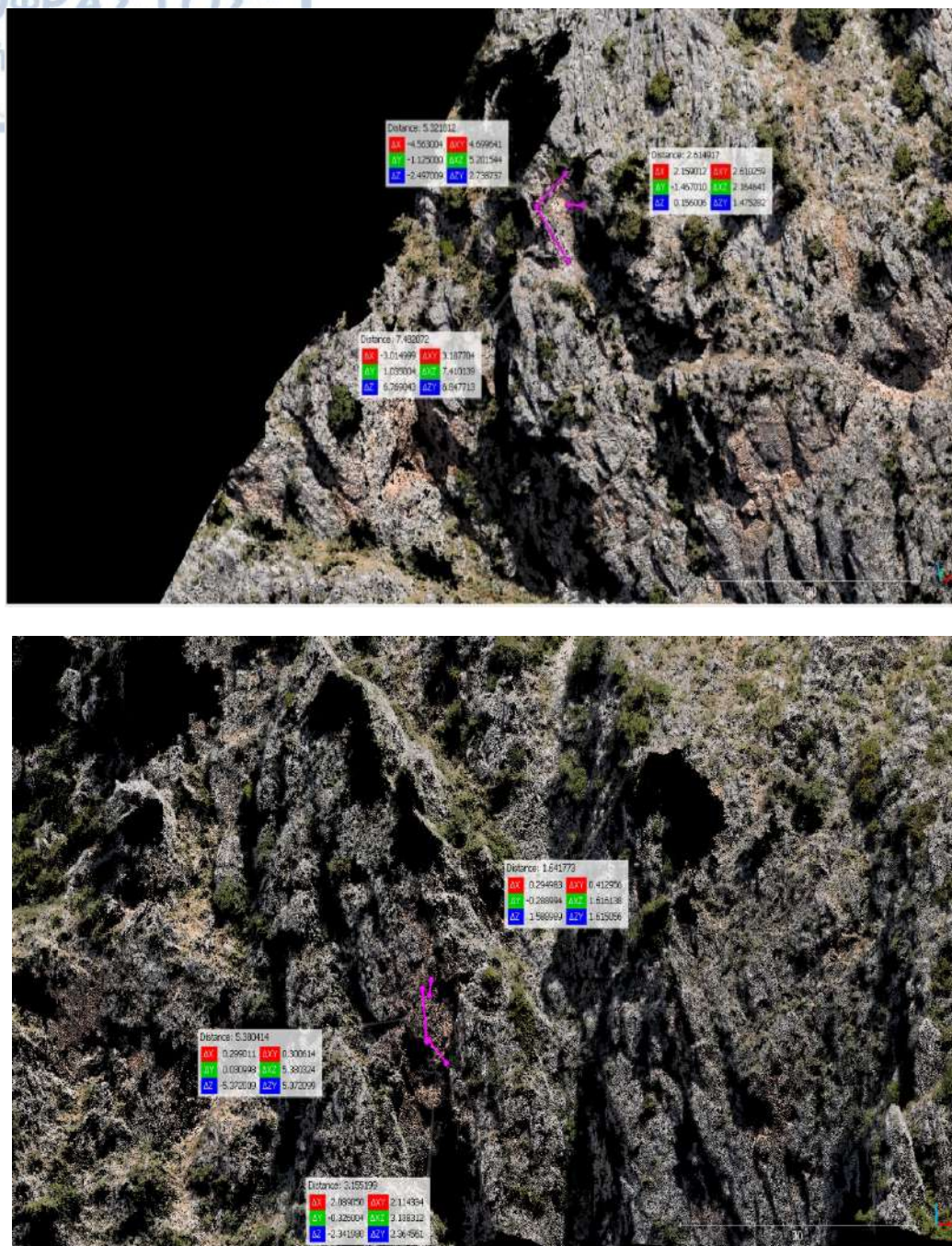
Εικ. 55. Αναγνώριση παλαιότερης αποκόλλησης-κενού βραχώδους τεμάχους, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών.





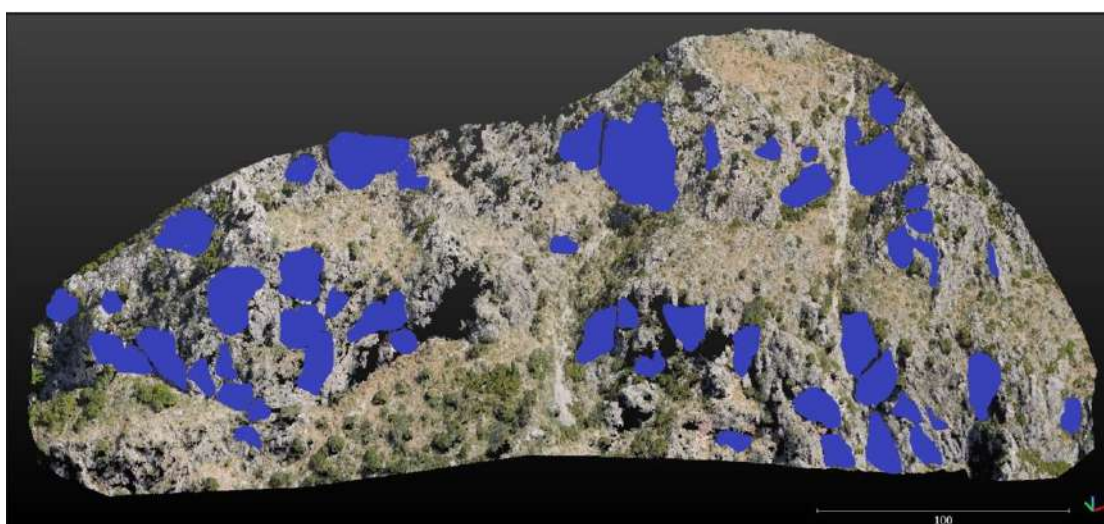
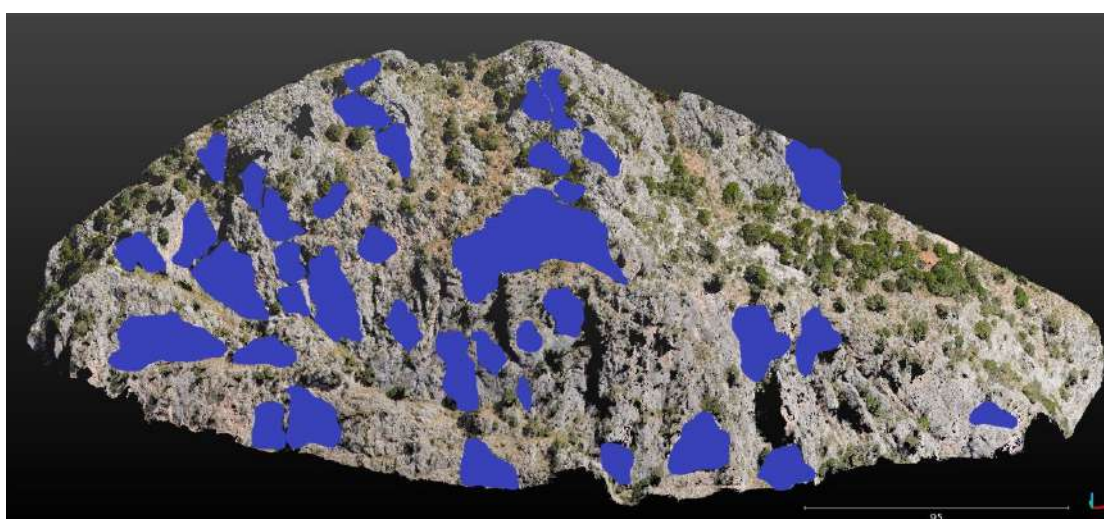
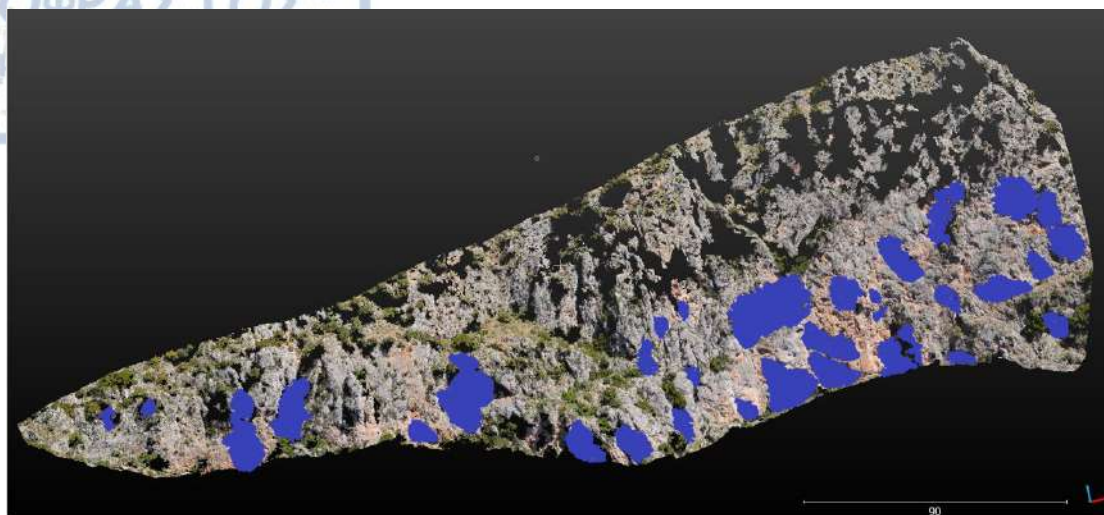
Εικ. 56. Παραδείγματα παρατηρούμενων κενών (scars), στο πεδίο, κατά μήκος του ασβεστολιθικού πρανούς, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, τα οποία προέκυψαν από την αποκόλληση βραχωδών τεμαχών από προηγούμενες αστοχίες.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αναγνώριση των κενών (scars) στο τρισδιάστατο μοντέλο νέφους σημείων, που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3). Συγκεκριμένα, με τη χρήση του λογισμικού CloudCompareTM (v2.11.1), αρχικά αναγνωρίστηκαν οι θέσεις από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων (Εικ. 56). Στη συνέχεια μετρήθηκαν, με τα ειδικά εργαλεία που παρέχονται από το περιβάλλον του λογισμικού, χειροκίνητα, στις τρεις τους διαστάσεις (X, Y, Z) και υπολογίστηκαν οι όγκοι τους, καλύπτοντας όλο το εξεταζόμενο πρανές, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου και του εθνικού οδικού δικτύου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις εικόνες που ακολουθούν (Εικ. 57).



Εικ. 57. Παραδείγματα της μεθόδου που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των όγκων των βραχωδών τεμαχών, από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, με τη χρήση του τρισδιάστατου (3D) μοντέλου που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο της έρευνας (Κεφάλαιο 3), μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.

Συνολικά αναγνωρίστηκαν και μετρήθηκαν 119 μπλοκ (scars), στην επιφάνεια του ασβεστολιθικού πρανούς και συγκεκριμένα στο Δυτικό, Κεντρικό και Ανατολικό τμήμα (Εικ. 58) και υπολογίστηκε ο όγκος τους (m^3) με βάση την μέθοδο που περιγράφηκε (Πίν. 5).

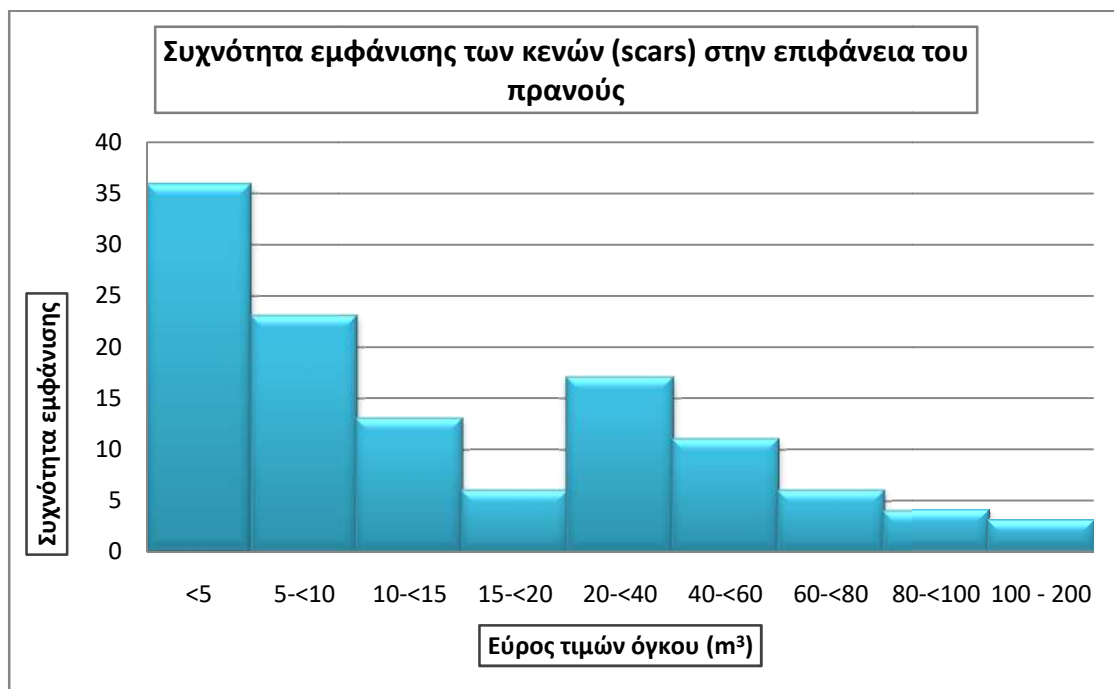


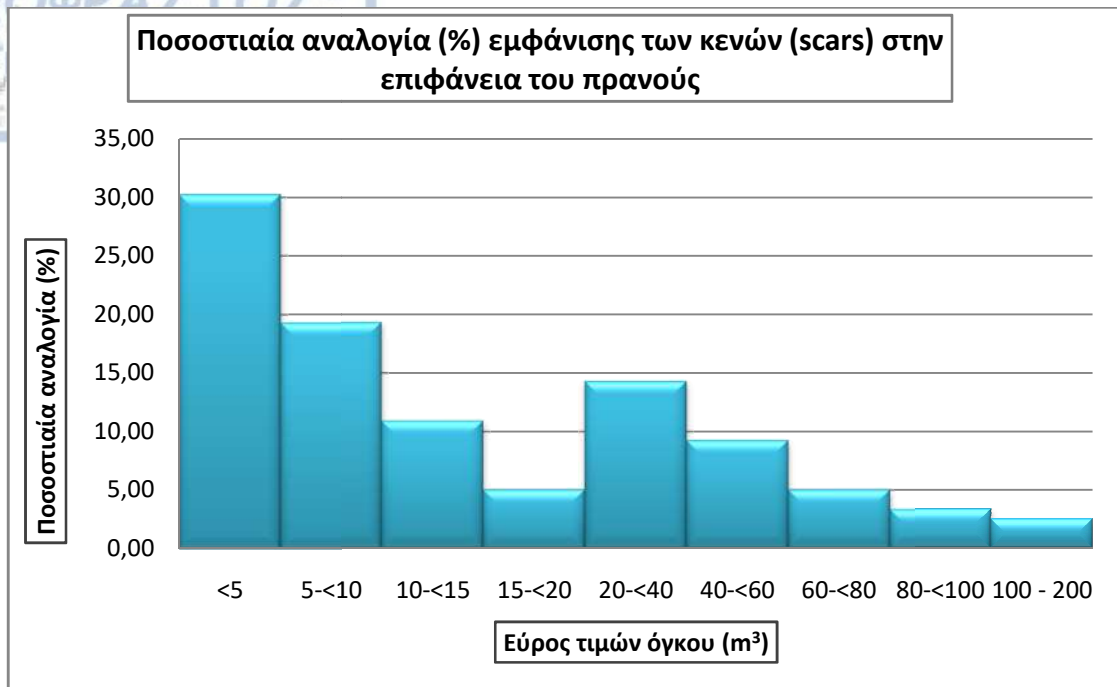
Εικ. 58. Καταγραφή αποκολλημένων βραχοτεμαχών (scars) (μπλε πολύγωνα), στο Δυτικό, Κεντρικό και Ανατολικό τμήμα του βραχώδους πρανούς (με σειρά εμφάνισης από πάνω προς τα κάτω), ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα στο περιβάλλον του ανοιχτού λογισμικού CloudCompare™.

Πίνακας 5. Πίνακας καταγραφής των 119 τιμών των όγκων (m³) των κενών (scars) των βραχωδών τεμαχίων, από τη συνολική επιφάνεια του ασβεστολιθικού πρανού, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών.

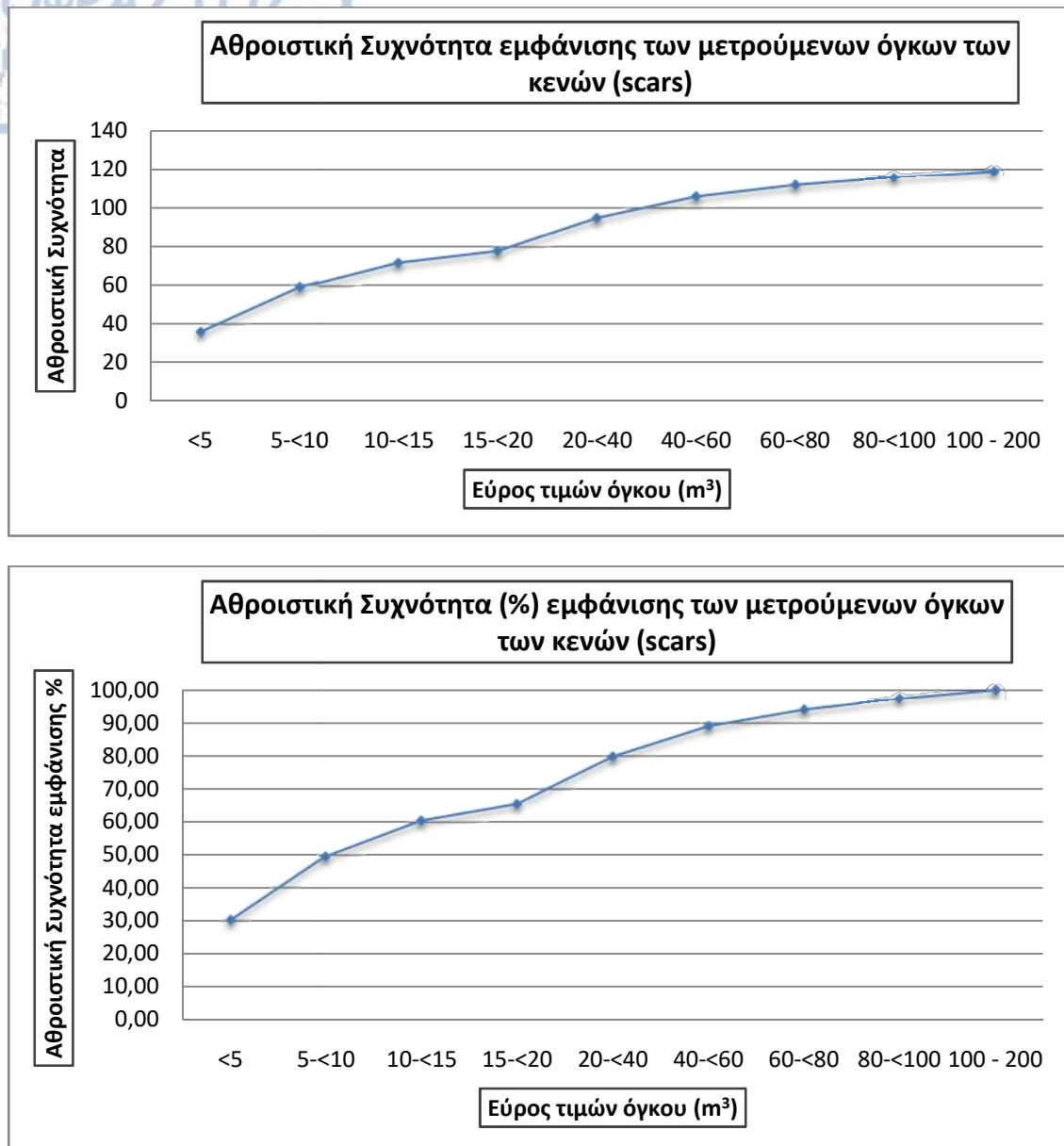
Όγκοι (m ³) «κενών» (scars) στην επιφάνεια του πρανού					
A/A	Όγκος (m ³)	A/A	Όγκος (m ³)	A/A	Όγκος (m ³)
1	1	41	0,5	81	5,5
2	6	42	5,6	82	51
3	4,4	43	3,3	83	18
4	1,4	44	3,1	84	9,2
5	26,9	45	32,1	85	12
6	0,9	46	38	86	47
7	0,3	47	49	87	10
8	3,7	48	7,8	88	11
9	4,4	49	8	89	34,5
10	3,6	50	44	90	5
11	2,2	51	6,8	91	1,3
12	2,2	52	14	92	17
13	0,2	53	0,2	93	36
14	52,2	54	4	94	117
15	30,6	55	0,5	95	16
16	2,5	56	1,8	96	32
17	22	57	99	97	4,6
18	12,6	58	49	98	6,6
19	54	59	103	99	5,8
20	14,9	60	94	100	0,9
21	8	61	4	101	1,8
22	61,4	62	22	102	25
23	68	63	8,8	103	22,5
24	24	64	15,7	104	50,4
25	10,6	65	3	105	62
26	6	66	9,4	106	92
27	91,5	67	0,8	107	3,2
28	131	68	4,3	108	60
29	17,8	69	11,7	109	27,6
30	24	70	66	110	25
31	61	71	12,8	111	8
32	9,6	72	3	112	55
33	5,6	73	0,6	113	14
34	14	74	2,5	114	9
35	9	75	1	115	8,2
36	14	76	23	116	16
37	2	77	27	117	8
38	51	78	6,3	118	51
39	0,4	79	9	119	2
40	0,4	80	10		

Αφού προηγήθηκε ο διαχωρισμός των μετρούμενων όγκων σε κλάσεις δημιουργήθηκαν, σε περιβάλλον Microsoft Excel, τα ιστογράμματα συχνότητας-διακύμανσής τους, τόσο σε απόλυτες τιμές εμφάνισής τους, όσο και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%) (Εικ. 58). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι όγκοι τους και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα αθροιστικής συχνότητας (%) - όγκου (m^3) και αθροιστικής συχνότητας (σε απόλυτες τιμές)-όγκου (m^3) (Εικ. 59). Η μέση τιμή αποκολλημένου βραχώδους υλικού μετρήθηκε ίση με $22,2 m^3$.





Εικ. 59. Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης-διακύμανσης των μετρούμενων όγκων των κενών (scars), από προηγούμενα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, σε απόλυτη τιμή εμφάνισής τους (επάνω εικόνα) και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%) (κάτω εικόνα).



Εικ.60. Διαγράμματα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης- όγκου (m^3) των μετρούμενων όγκων των «κενών» των βραχωδών τεμαχών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, σε απόλυτη τιμή εμφάνισής τους (επάνω εικόνα) και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%).

Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Το 80 % περίπου των μετρήσεων αντιστοιχεί σε μετρούμενους όγκους έως $40 m^3$. Παρόλο που παρατηρείται μεγάλη διασπορά όγκου, μέχρι και $200 m^3$, τα βραχώδη τεμάχια με όγκους από 40 έως $200 m^3$ αντιστοιχούν μόνο στο 20% των συνολικών μετρήσεων. Επίσης, το εύρος τιμών με τη μεγαλύτερη συχνότητα είναι αυτό που περιλαμβάνει μετρήσεις τιμών μικρότερων από $5 m^3$, ενώ περίπου οι μισές από τις συνολικές μετρήσεις αντιστοιχούν σε ένα εύρος τιμών από 0 έως $10 m^3$.

4.3 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΗΔΗ ΑΣΤΟΧΗΣΕΙ (ΕΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ)

Μία από τις πιο σημαντικές, ίσως, παραμέτρους της συμπεριφοράς μιας βραχομάζας είναι ο όγκος του βραχώδους μπλοκ (Rock Block Volume), το οποίο αποσπάται από την επιφάνεια ενός πρανούς (Barton 1978) και εξαρτάται από την απόσταση και τις ασυνεχειές του. Διάφορες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί, ώστε να προσδιοριστεί και να υπολογιστεί το μέγεθος των βραχοτεμαχών, με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους, όμως οι τρεις πιο συνηθισμένες είναι οι εξής: η πιθανολογική, με τη χρήση στατιστικών μοντέλων, οι αναλυτικοί τρόποι, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων και εξισώσεων και η χαρτογράφησή τους στο πεδίο (In Situ Block Size Distribution), η οποία ακολουθήθηκε και στην παρούσα έρευνα. Η ένταση των καταπτώσεων βράχων σε μια δεδομένη περιοχή, επηρεάζεται από τη χωρική κατανομή των βραχοτεμαχών που έχουν αστοχήσει, καθώς και από τη μεταβλητότητα των μεγεθών τους, παράμετροι που σχετίζονται με την ταχύτητα και τον όγκο των μπλοκ που αστοχούν (Mavrouli and Corominas 2020). Η καταγραφή και η κατανομή του μεγέθους των βραχοτεμαχών στο πεδίο (in situ), παρέχει πληροφορίες για τους αναμενόμενους όγκους βράχων και θεωρείται πολύ σημαντική για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη μελλοντικών φαινομένων βραχοκαταπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, αντιπροσωπεύει την αθροιστική καμπύλη των όγκων των βραχωδών τεμαχών, τα οποία δύνανται να αποκολληθούν από το εξεταζόμενο πρανές και εκφράζεται από την κατανομή των συχνοτήτων της απόστασης των ασυνεχειών.

Στόχος, λοιπόν αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας (Susceptibility) των βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών. Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής χαρτογράφιση των μπλοκ που έχουν ήδη αστοχήσει και εμφανίζονται εντός και εκτός του αρχαιολογικού χώρου. Το συγκεκριμένο στάδιο επιλέχθηκε, καθώς τα αποτελέσματα αυτά αποτέλεσαν ένα είδος επαλήθευσης της χαρτογράφισης των τεμαχών που έχουν, ήδη, αστοχήσει στο χώρο, μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές, καθώς δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί ποια μπλοκ ανήκουν στα παλαιότερα γεγονότα βραχοκατάπτωσης που οδήγησαν στις συγκεκριμένες αποθέσεις.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε χαρτογράφιση-ογκομέτρηση των βραχωδών τεμαχών, που εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή, κατάντη των θέσεων αστοχίας

του πρανούς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο που δημιουργήθηκε από την εναέρια αποτύπωση της περιοχής έρευνας με UAV (Unmanned Aerial Vehicles), μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper (Pix4D, Switzerland), όπου εντοπίστηκαν και μετρήθηκαν 46 βραχώδη μπλοκ, στον Μνημειακό Χώρο και προσδιορίστηκε η ακριβής τους θέση στο Χώρο (X, Y, Z) (Εικ. 61), προσδιορίζοντας τις ακριβείς συντεταγμένες των σημείων τελικής απόθεσης (stop points) των βραχοτεμαχών που έχουν αστοχήσει στο παρελθόν (Πίν. 6).

Πίνακας 6. Πίνακας καταγραφής των συντεταγμένων (X, Y, Z) των αποκολλημένων βραχοτεμαχών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

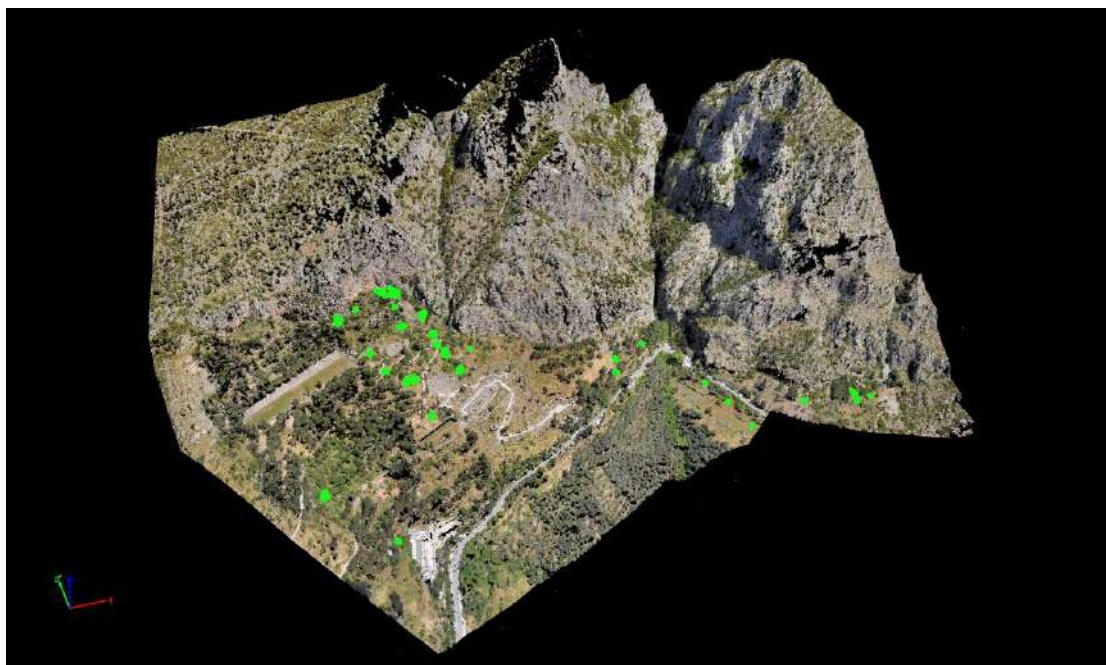
Συντεταγμένες (X, Y, Z) αποκολλημένων βραχοτεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών			
A/A	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	368970.82	4260162.32	641.56
2	369061.36	4260228.44	636.96
3	369052.83	4260263.57	657.08
4	369048.81	4260263.95	654.39
5	368851.84	4259970.76	609.36
6	369050.06	4260258.81	650.42
7	369007.79	4260280.63	669.51
8	368989.64	4260304.60	688.56
9	369007.04	4260312.41	683.80
10	368942.90	4260279.16	681.87
11	368973.83	4260162.79	640.60
12	369014.63	4260147.92	627.81
13	369074.69	4260192.36	619.49
14	369369.25	4260129.48	548.59
15	369673.39	4259982.80	538.47
16	368942.58	4259890.45	563.31
17	369764.01	4259959.93	537.12
18	368789.46	4259959.75	539.94
19	369377.87	4260154.19	554.86
20	369012.59	4260242.74	656.94
21	369075.84	4260199.54	623.25
22	369064.24	4260211.71	629.10
23	368952.61	4260196.94	654.85
24	369013.30	4260300.14	676.85
25	369096.75	4260165.64	603.16
26	369030.62	4260083.95	600.76
27	369030.82	4260080.33	598.82
28	369002.50	4260140.11	629.83
29	369120.06	4260206.30	605.65
30	368909.80	4260262.02	676.67
31	368907.69	4260265.71	677.56
32	368908.61	4260272.40	678.81
33	369014.32	4260308.36	680.20
34	369016.66	4260304.72	679.49

35	369012.86	4260302.43	678.55
36	369013.41	4260306.02	679.09
37	369004.50	4260302.22	678.98
38	368994.67	4260301.65	682.65
39	368982.64	4260307.89	689.24
40	368848.11	4259965.92	610.69
41	369574.86	4259973.26	509.89
42	369551.29	4260029.93	518.26
43	369526.41	4260079.67	522.79
44	369761.54	4259962.85	546.11
45	369752.22	4259948.96	529.19
46	369760.48	4259975.04	544.39

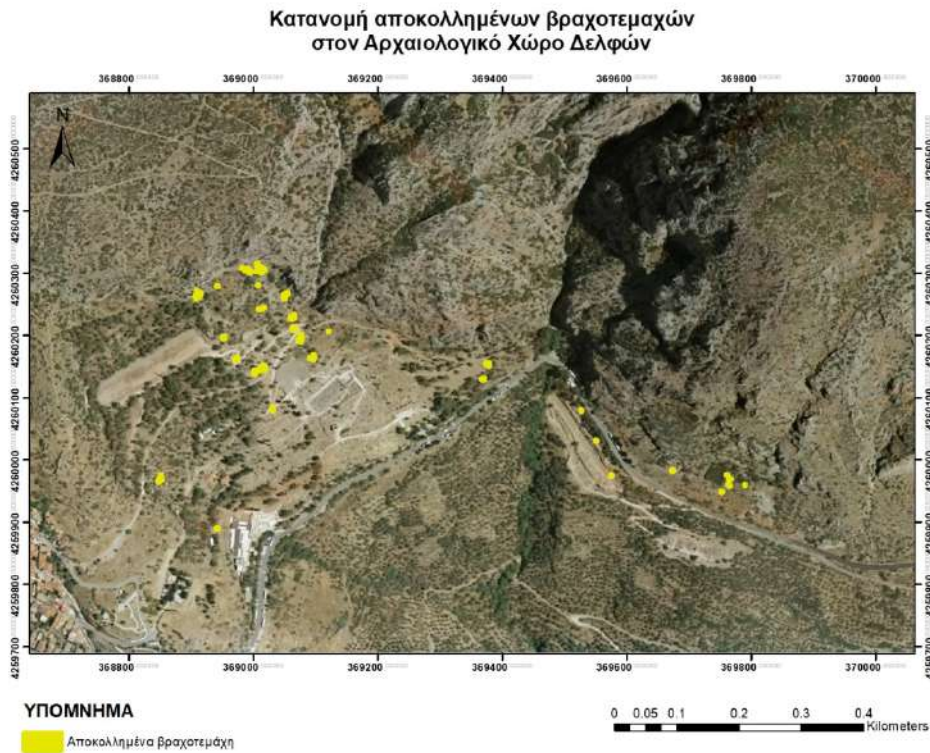
Παράλληλα υπολογίστηκε χειροκίνητα το μέγεθός τους, δηλαδή ο όγκος (m^3) τους, αξιοποιώντας τις δυνατότητες και τα εργαλεία που παρέχει το λογισμικό πακέτο Pix4Dmapper (Pix4D, Switzerland) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και δημιουργήθηκε ο χάρτης χωρικής κατανομής τους, σε συνδυασμό με επαλήθευση με υπαίθρια παρατήρηση, με τη χρήση του ArcMap, μέσα σε περιβάλλον ArcGIS (Εικ. 62).

Πίνακας 7. Πίνακας καταγραφής των 46 μετρούμενων τιμών όγκων (m^3) των αποκολλημένων βραχωδών τεμαχών, τα οποία χαρτογραφήθηκαν και μετρήθηκαν στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

Όγκοι (m^3) αποκολλημένων μπλοκ βράχου στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών					
A/A	Όγκος (m^3)	A/A	Όγκος (m^3)	A/A	Όγκος (m^3)
1	1,19	17	1,8	33	1,37
2	10,38	18	10,3	34	17,97
3	10,37	19	17,31	35	4,14
4	0,41	20	22,75	36	0,25
5	50,34	21	10,64	37	0,66
6	0,81	22	1,23	38	6,71
7	0,98	23	2,43	39	0,93
8	28,85	24	27,96	40	6,27
9	12,06	25	6,84	41	0,36
10	3,01	26	3,35	42	0,01
11	2,2	27	32,25	43	0,49
12	3,46	28	0,01	44	1,63
13	20,45	29	17,11	45	1,24
14	1,6	30	1,59	46	0,57
15	0,51	31	0,07		
16	2,79	32	0,17		



Εικ. 61. Τρισδιάστατη χωρική κατανομή των 46 μετρούμενων όγκων (m^3) των αποκολλημένων μπλοκ (πράσινο χρώμα), εντός κι εκτός του Αρχαιολογικού Χώρου, με τη χρήση του τρισδιάστατου (3D) μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper (Pix4D, Switzerland).

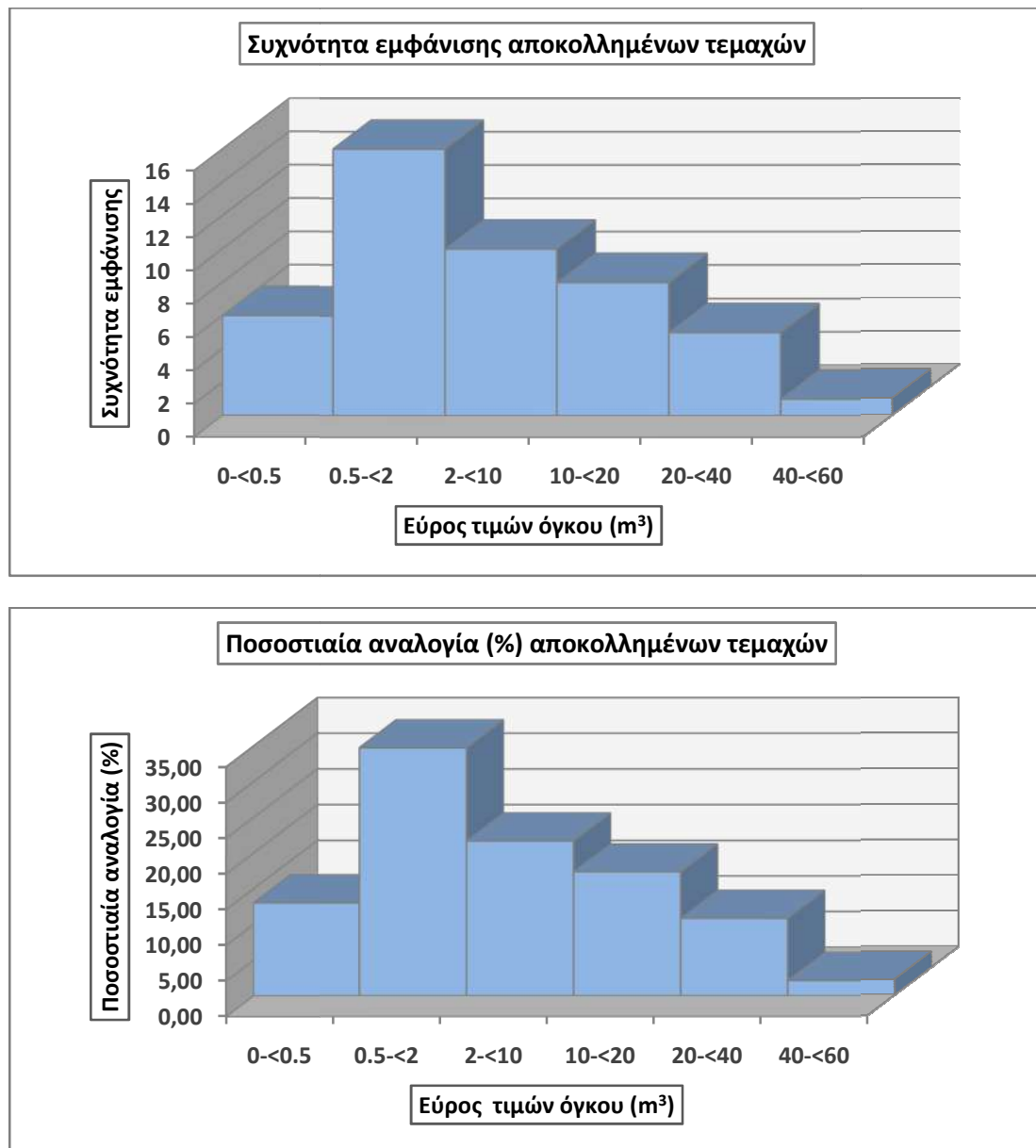


Εικ.62. Τρισδιάστατη χωρική κατανομή των 46 μετρούμενων όγκων (m^3) των αποκολλημένων μπλοκ (πράσινο χρώμα), εντός και εκτός του Αρχαιολογικού Χώρου, μέσα στο περιβάλλον του ArcMap , των ArcGIS.

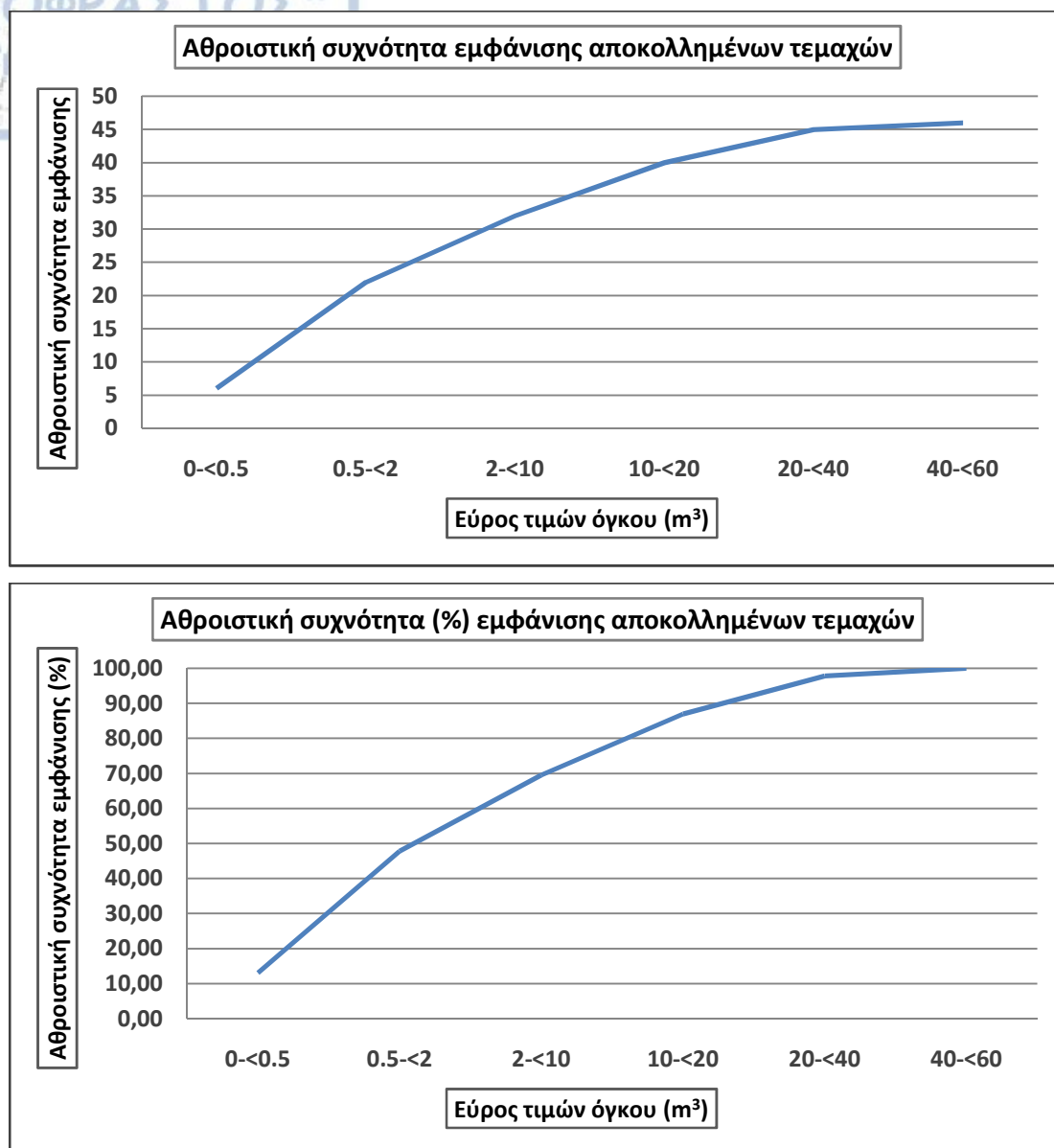
Τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν σε ιστόγραμμα συχνότητας-κλάσεων όγκου (m^3), όπου δημιουργήθηκαν 6 κλάσεις διακύμανσης του μετρούμενου όγκου. Οι κλάσεις διαχωρίστηκαν σε: 1) πολύ μικρές τιμές όγκου ($0-0.5 \text{ m}^3$), 2) μικρές τιμές όγκου ($0.5-2 \text{ m}^3$), 3) τιμές από 2 m^3 έως 10 m^3 , 4) τιμές από 10 m^3 έως 20 m^3 , 5) τιμές από 20 m^3 έως 40 m^3 και 6) τιμές από 40 m^3 έως 60 m^3 . Η επιλογή των κλάσεων έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχεται, όσο το δυνατόν περισσότερη πληροφορία για τους μετρούμενους όγκους, καθώς οι τιμές όγκου των βραχωδών τεμαχίων που καταγράφηκαν στο Χώρο ανήκουν σε διαφορετικές τάξεις μεγέθους, με μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση, αν επιλέγονταν 3 ίσες κλάσεις ($0-20$, $20-40$ και $40-60 \text{ m}^3$) θα χανόταν η πληροφορία για τη συχνότητα εμφάνισης των πολύ μικρών όγκων ($0-0.5 \text{ m}^3$, $0.5-2 \text{ m}^3$).

Οι τιμές όγκου αποτυπώθηκαν σε απόλυτη τιμή εμφάνισής τους (επάνω εικόνα) και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%). (Εικ. 63). Ταυτόχρονα υπολογίστηκαν οι όγκοι τους και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα αθροιστικής συχνότητας (%) - όγκου (m^3) και αθροιστικής

συχνότητας (σε απόλυτες τιμές)-όγκου (m^3) (Εικ. 64). Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα, οι μεγάλες τιμές όγκου των μπλοκ που μετρήθηκαν συνάδουν με αυτές που παρατηρήθηκαν κατά την εργασία στο πεδίο, ενώ αντίστοιχες τιμές έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές στο παρελθόν (Λέκκας et al. 2010).

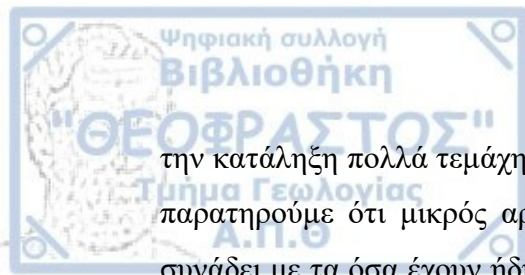


Εικ.63. Ιστογράμματα συχνότητας-διακύμανσης των μετρούμενων βραχοτεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, σε απόλυτη τιμή εμφάνισής τους (επάνω σχήμα) και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%).

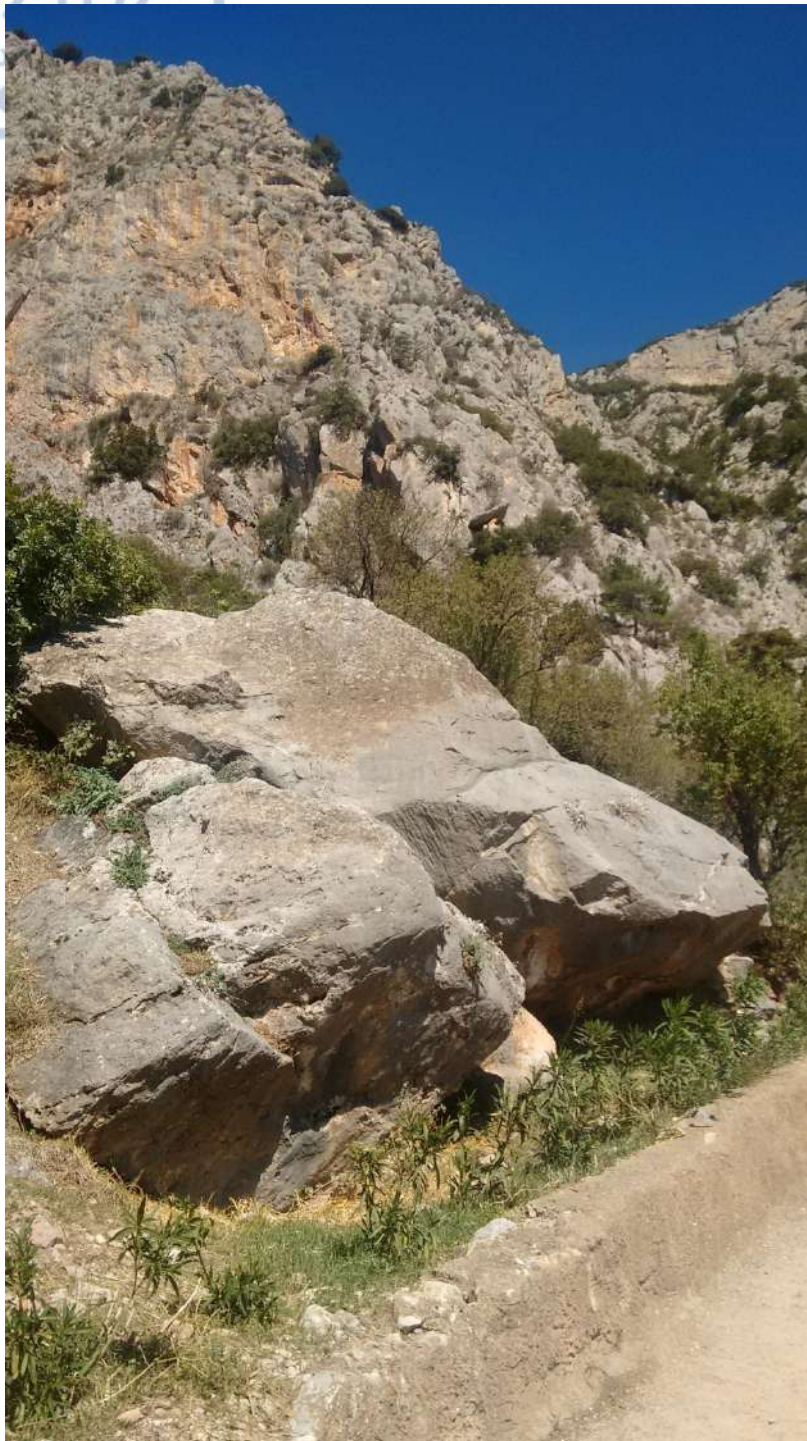


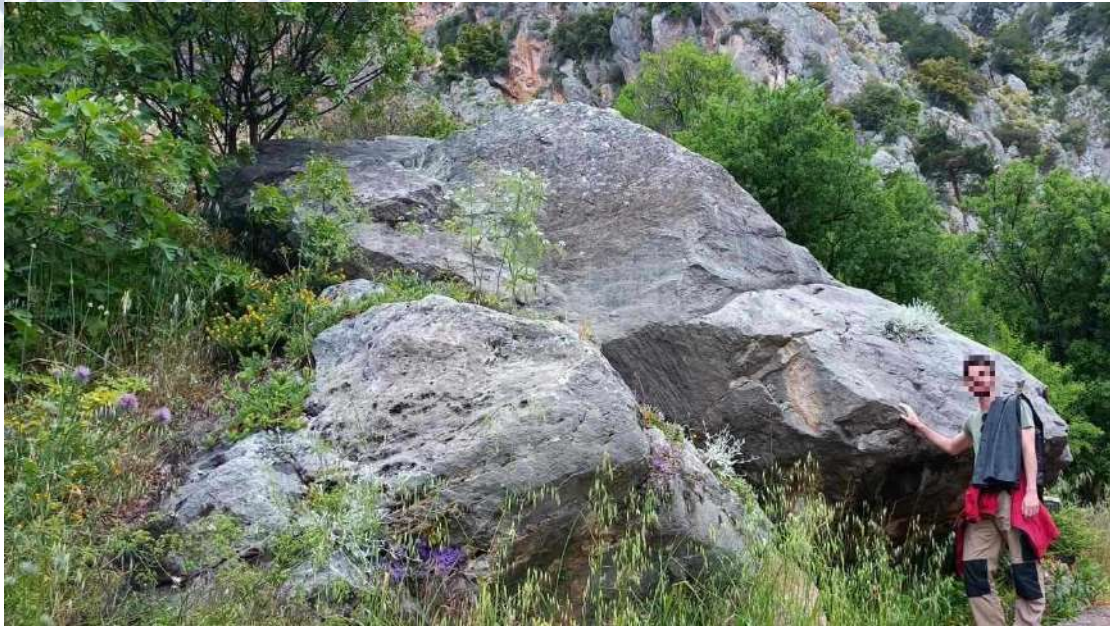
Εικ.64. Διαγράμματα αθροιστικής συχνότητας - όγκου (m^3) των μετρούμενων βραχοτεμαχίων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, σε απόλυτη τιμή εμφάνισής τους (επάνω) και στην αντίστοιχη ποσοστιαία αναλογία κάθε μετρούμενου εύρους τιμών όγκου (%).

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι: τα εύρη τιμών με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι αυτά που περιλαμβάνουν μετρήσεις τιμών από 0,5 έως 2 m^3 και από 2 έως 10 m^3 . Το 70% περίπου των μετρήσεων αντιστοιχεί σε μετρούμενους όγκους από 0 έως 10 m^3 . Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι το ποσοστό αυτό είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ποσοστό (περίπου 50%) των μετρούμενων αποκολλημένων όγκων-κενών που μετρήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Το αποτέλεσμα αυτό έχει φυσική εξήγηση, καθώς από την αποκόλληση μέχρι



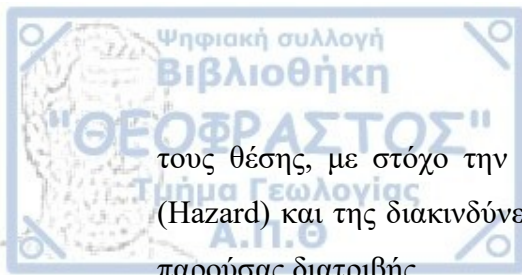
την κατάληξη πολλά τεμάχια κατακερματίζονται σε μικρότερα. Από έρευνα στο πεδίο παρατηρούμε ότι μικρός αριθμός τεμαχίων είναι μεγαλύτερος από 20m^3 , το οποίο συνάδει με τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί. Συγκεκριμένα εντοπίστηκε και μετρήθηκε ο όγκος αποκολλημένου μπλοκ βράχου, εντός του Αρχαιολογικού Χώρου, από παλαιότερη αστοχία, του οποίου εκτιμάται περίπου ίσος με 25m^3 (Εικ. 65).





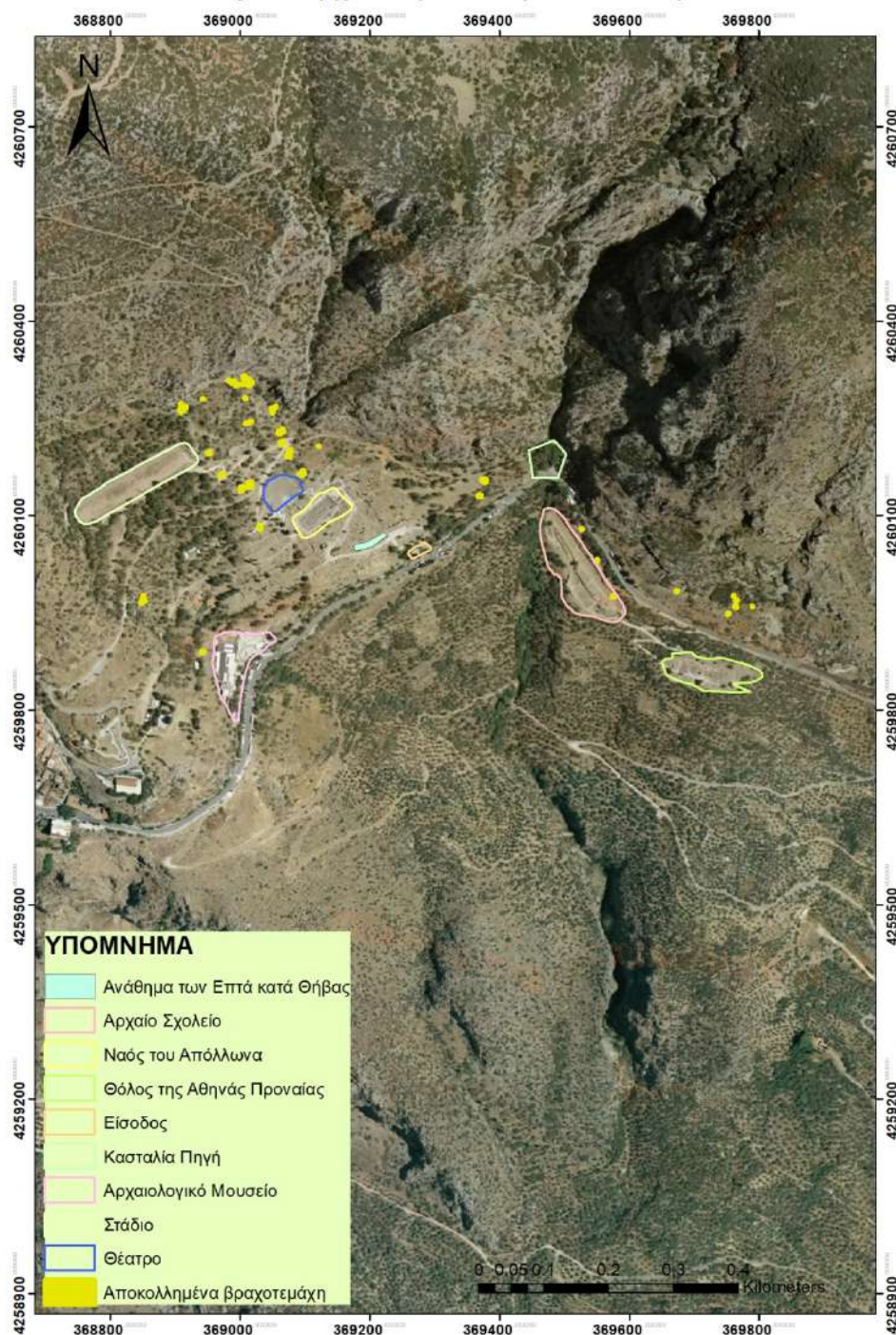
Εικ. 65. Αποκολλημένο τέμαχος, όγκου $25 \text{ (m}^3\text{)}$ περίπου, εντός του Αρχαιολογικού Χώρου, από παλαιότερο/α φαινόμενο/α βραχοκατάπτωσης. Οι λήψεις των δύο εικόνων έγιναν σε διαφορετικές χρονολογίες και απεικονίζουν το ίδιο τέμαχος.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή τους, ίση με $7,6 \text{ m}^3$, μια λογική τιμή, εάν συνυπολογίσουμε το φαινόμενο του κατακερματισμού των μπλοκ από τη στιγμή της αποκόλλησής τους, μέχρι την τελική τους απόθεση στο χώρο, σε χαμηλότερα υψόμετρα, κατάντη της θέσης αστοχίας. Ο κατακερματισμός ενός βράχου είναι η διαδικασία κατά την οποία η αποκολλημένη μάζα χάνει την ακεραιότητά της, κατά την πτώση της, από ένα μεγάλης κλίσης πρανές και διασπάται σε μικρότερα κομμάτια (Corominas et al. 2017). Σύμφωνα με τους ερευνητές Cruden and Varnes (1996) και Hungr et al. (2014), η αποκολλημένη μάζα μπορεί να διασπαστεί σε μικρότερα κομμάτια, κατά την πρόσκρουση, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους της [μικρότερος όγκος (m^3)]. Η σημασία του κατακερματισμού των βραχωδών μπλοκ παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση του κινδύνου (Risk Analysis), η οποία αναλύεται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια και έχει συζητηθεί από τους Corominas et al. (2012). Για τις ανάγκες, λοιπόν, της έρευνας και την πληρέστερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων αυτού του σταδίου δημιουργήθηκε ένας χάρτης χωρικής κατανομής του όγκου των αποκολλημένων βραχωδών τεμαχών, τα οποία προέρχονται από προηγούμενα γεγονότα βραχοκαταπτώσεων, όπως αυτά υπολογίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός χάρτη χωρικής αποτύπωσης των μετρούμενων όγκων των πεσμένων τεμαχών, όπως και της ακριβής



τους θέσης, με στόχο την αξιοποίησή του, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (Hazard) και της διακινδύνευσης (Risk), που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής.

Χωρική κατανομή αποκολλημένων βραχοτεμαχών
εντός του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών



Εικ. 66. Χωρική κατανομή των 46 αποκολλημένων μπλοκ βράχου (με κίτρινο χρώμα), εντός του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπως αυτά χαρτογραφήθηκαν και μετρήθηκαν, σε περιβάλλον ArcGIS, με ενσωματωμένη χωρική πληροφορία των στοιχείων υπό διακινδύνευση (elements at risk).



Για τη δημιουργία του χάρτη της Εικόνας 66,σε περιβάλλον ArcGIS, αρχικά ψηφιοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία υπό διακινδύνευση στο χώρο έρευνας (elements at risk), ενώ επιλέχθηκε η παράλληλη εμφάνιση της χωρικής κατανομής των αποκολλημένων βραχωδών τεμαχών, εντός κι εκτός του Αρχαιολογικού Χώρου. Ο ορισμός του αρχικού όγκου των αποκολλημένων τεμαχών είναι βασική παράμετρος εισόδου, κυρίως, στις αναλύσεις τροχομετρικής ανάλυσης, καθώς το «σπάσιμο» του τεμάχους μειώνει την κινητική ενέργεια των μεμονωμένων σωματιδίων (Corominas et al. 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT) ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΔΕΛΦΩΝ

5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν αιφνίδια και καταστροφικά φαινόμενα, καθώς και έναν από τους πιο σημαντικούς κινδύνους στον ελλαδικό χώρο, κυρίως σε ορεινές, βραχώδεις περιοχές, όπως είναι η περιοχή έρευνας, καθώς δύνανται να προκαλέσουν σοβαρές καταστροφές σε υποδομές και κτίρια, καθώς και σοβαρούς τραυματισμούς και θανάτους.

Οι χώροι Πολιτιστικής Κληρονομιάς, που εντοπίζονται στους πρόποδες ορεινών περιοχών, με πολύ μεγάλη κλίση, πλήττονται σε μεγάλο βαθμό από καταπτώσεις βράχων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διάφορα μεγέθη, σχήματα και ένταση (kJ), με πολιτιστικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, τόσο σε υλικό, όσο και σε άυλο επίπεδο. Οι κατολισθήσεις αποτελούν, παγκοσμίως, έναν πολύ σημαντικό φυσικό κίνδυνο, για την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των Μνημειακών Χώρων (Pavlova et al. 2021). Επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις στα Μνημεία και τους Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια των επισκεπτών και του προσωπικού, την οικονομία και τον τουρισμό. Η δράση τους παρατηρείται περισσότερο σε τοπικό επίπεδο, σε σύγκριση με άλλους κινδύνους (Canuti et al. 2009) και με συνηθέστερα εναύσματα πρόκλησης το σεισμό και τις βροχοπτώσεις. Στην παρούσα Διατριβή επιλέχθηκε να διερευνηθεί, να αξιολογηθεί και να εκτιμηθεί η Επικινδυνότητα (Hazard), από τα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

Στον Αρχαιολογικό χώρο των Δελφών και την ευρύτερη περιοχή παρατηρείται ενεργό πεδίο βραχοκαταπτώσεων, ήδη από την αρχαιότητα, η οποία συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Επομένως, η ανάγκη ανάπτυξης και εφαρμογής μιας μεθοδολογίας εκτίμησης της επικινδυνότητας και ποιοτικής αξιολόγησης του βαθμού διακινδύνευσης είναι σημαντική, τόσο για την ασφάλεια των επισκεπτών και των εργαζομένων, όσο και για τη βιωσιμότητα του χώρου, καθώς αποτελεί Παγκόσμιο

Μνημείο Πολιτιστικής Κληρονομιάς της UNESCO και ένα από σημαντικότερα και με πολύ μεγάλη επισκεψιμότητα Μνημεία στον ελληνικό χώρο.

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου, σε μια δεδομένη χρονική περίοδο και περιοχή, με συγκεκριμένο μέγεθος (όγκο) και ένταση (ενέργεια) (Varnes 1984, Fell 1994, Fell and Hartford 1997, Guzzetti et al. 1999, Crosta et al. 2001) και αποτελεί το κύριο αντικείμενο έρευνας της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν προταθεί αρκετές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση του κινδύνου από βραχοκαταπτώσεις, την έρευνα και τον εντοπισμό δυνητικά επικίνδυνων περιοχών και τμημάτων βραχωδών πρανών, επιρρεπή σε αστοχίες, και την παροχή οδηγιών, για την επιλογή και την εγκατάσταση των καταλληλότερων μέτρων μετριασμού τους (Ferrari et al. 2016).

Για την ορθή και ολοκληρωμένη προσέγγιση και διαχείριση ενός φυσικού φαινομένου, τελικό στάδιο αποτελεί η εκτίμηση της επικινδυνότητας, για την αξιολόγηση της οποίας θα πρέπει να συνεκτιμώνται οι εξής παράγοντες: 1) η χρονική πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου, 2) η ένταση ή το μέγεθός του και 3) η χωρική του πιθανότητα, για την αξιολόγηση της οποίας λαμβάνεται υπόψη η επιδεκτικότητα (susceptibility), η οποία και συνδέεται με την αξιολόγηση της χωρικής πιθανότητας να εκδηλωθεί, σε μια συγκεκριμένη περιοχή ένας φυσικός κίνδυνος, επηρεαζόμενος από τις εκάστοτε γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής αυτής. Παράλληλα, για την αξιόπιστη εκτίμηση της χωρικής πιθανότητας σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο ακριβής προσδιορισμός των αστοχιών, σύμφωνα με τους χάρτες απογραφής.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν προταθεί αρκετές μεθοδολογίες σχετικά με την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των βραχοκαταπτώσεων, τόσο κατά μήκος των δρόμων μεταφοράς, όπως για παράδειγμα των αυτοκινητόδρομων, όσο και κατά μήκος πρανών σε ορεινές περιοχές και αλπικές κατοικημένες περιοχές (Ferrari 2017). Όπως είναι, άλλωστε, γνωστό, οι διαδικασίες προσδιορισμού της επικινδυνότητας συνιστούν ιδιαίτερα σημαντικό ερευνητικό κομμάτι των γεωεπιστημών (Budetta, 2004).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επικινδυνότητα των βραχοκαταπτώσεων έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα αξιολόγησης. Μερικά από αυτά συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1) Οι Pierson et al. (1990) ανέπτυξαν το Σύστημα Βαθμολόγησης Επικινδυνότητας Rockfall (RHRF), το οποίο είναι ευρέως αποδεκτό.

2) Παρόμοιο σύστημα είναι αυτό που προτείνεται από τους Pritchard et al. (2005), ο οποίος ανέπτυξε μια μεθοδολογία αξιολόγησης που εφαρμόζεται για την πρόβλεψη βραχοκαταπτώσεων, κατά μήκος των σιδηροδρόμων.

3) Οι Mc Millan and Matheson (1997) ανέπτυξαν το σύστημα Rock Slope Hazard Index (RSHI) για την επίβλεψη των βραχωδών πρανών του αυτοκινητόδρομου στη Σκωτία.

4) Οι Santi et al. (2009) πρότειναν μια τροποποίηση στο σύστημα αξιολόγησης έναντι βραχοκαταπτώσεων του Κολοράντο, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά από τον Andrew (1994), για τα πρανή των αυτοκινητοδρόμων στο Κολοράντο.

5) Οι Hungr and Evans (1999) εφάρμοσαν μια ποσοτική ανάλυση της επικινδυνότητας για τον προσδιορισμό της συνολικής επικινδυνότητας των αυτοκινητοδρόμων και των σιδηροδρόμων στη Βρετανία, η οποία βασίζεται σε δεδομένα σχετικά με το μέγεθος και τη συχνότητα της κατανομής των βραχοκαταπτώσεων.

6) Οι Hungr et al. (2003) πρότειναν ένα νέο σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας πτώσης βραχωδών τεμαχών, για να χρησιμοποιηθεί κατά μήκος μιας σιδηροδρομικής γραμμής, επίσης με ποσοτική αξιολόγηση του κινδύνου (QRA).

7) Οι Van de water et al. (2005) έχουν προτείνει ένα σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, για αυτοκινητόδρομους, δίνοντας έμφαση στη συμβολή των γεωλογικών παραγόντων.

Υπάρχουν συστήματα που αφορούν σε φυσικά πρανή, αλλά τα περισσότερα είναι ειδικά προσανατολισμένα. Οι Bolin et al. (2009) πρότειναν ένα σύστημα αξιολόγησης για την επικινδυνότητα πτώσης βραχωδών τεμαχών (ASRFR) στην περιοχή Wu Gorge, στην Κίνα, το οποίο περιλαμβάνει επτά παραμέτρους για την επικινδυνότητα και οκτώ παραμέτρους για τις συνέπειες. Μια άλλη προσέγγιση παρουσιάζεται από τους Corominas et al. (2005), ενώ οι Guzzetti και Reichenbach (2004) χρησιμοποίησαν μια μεθοδολογία, η οποία βασίζεται σε χάρτες εκτίμησης της επικινδυνότητας, που προκύπτουν από τις τρισδιάστατες τροχομετρικές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων, για τον προσδιορισμό κατά μήκος του δικτύου μεταφορών της Κεντρικής Ιταλίας. Τέλος, η Αυστριακή Υπηρεσία για τον Έλεγχο Χειμάρρων και Χιονοστιβάδων (Tartarotti 2011) πρότεινε ένα απλό σύστημα ταξινόμησης της επικινδυνότητας, το οποίο στηρίζεται σε τέσσερις παραμέτρους και οι οποίες είναι οι

εξής: (α) η πιθανότητα παρουσίας ενός γεγονότος, (β) η επιδεκτικότητα των υποδομών, (γ) η πιθανότητα εμφάνισης και (δ) η διαδικασία και η ενεργειακή τάξη μιας βραχοκατάπτωσης (Saroglou et al. 2012).

Το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων ορίζεται από την αποκόλληση, την πτώση, την κύλιση και την αναπήδηση ενός μεμονωμένου βραχώδους τμήματος ή από πολλαπλά θραύσματα βραχώδους υλικού, τα οποία αλληλεπιδρούν κυρίως με το υπόβαθρο και αποτελούν εξαιρετικά γρήγορες διαδικασίες που μπορούν να διανύουν μεγάλες αποστάσεις. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά την κίνησή τους, οι πτώσεις βραχωδών μπλοκ, αν και περιλαμβάνουν περιορισμένους όγκους, δύνανται να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές ή και να οδηγήσουν σε θάνατο. Έτσι, ο κίνδυνος τραυματισμού και απώλειας ζωής είναι εξαιρετικά υψηλός (Ferrari et al. 2016). Επομένως, η αξιολόγησή της επικινδυνότητας προϋποθέτει τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου τροχογραφικού μοντέλου, ικανού να προβλέψει τις μικρές αποστάσεις, τα υψόμετρα που διαγράφονται κατά την τροχιακή πορεία και τις τιμές της ενέργειας των μπλοκ που αναπτύσσονται κατά την πτώση τους. Το μέγεθος (δηλαδή ο όγκος) και το σχήμα (π.χ. ορθογώνιο, ελλειψοειδές, σφαιρικό κ.ά.) των μπλοκ μπορούν να ληφθούν ξεκινώντας από μια κλασική τεχνικογεωλογική έρευνα του εξεταζόμενου πρανούς. Παράλληλα πρέπει να ανιχνεύονται στον υπό έρευνα χώρο και να χαρτογραφούνται προϋπάρχουσες βραχοκαταπτώσεις, στη θέση όπου εντοπίζονται σήμερα, καθώς αποτελούν έμμεσο τρόπο εύρεσης της μέγιστης απόστασής τους, διαδικασία που ακολουθήθηκε και περιγράφηκε λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με αυτόν τον τρόπο είναι διαθέσιμες όλες οι απαραίτητες παράμετροι εισόδου για την εκτίμηση των επιπτώσεων των στοιχείων υπό διακινδύνευση (Claudio Scavia et al. 2020). Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αποτυπώνονται σε διδιάστατους (2D) και τρισδιάστατους (3D) χάρτες ανάλυσης της επικινδυνότητας, οι οποίοι θα πρέπει να περιλαμβάνουν πληροφορίες, σχετικές με τη θέση και τη σφοδρότητα-ένταση (kJ) του φαινομένου (Crosta and Agliardi 2003). Σύμφωνα με τους Jaboyedoff et al. 2001; Crosta and Agliardi 2003, Jaboyedoff et al. 2005, Volkwein et al. 2011, έχει καθιερωθεί ότι η επικινδυνότητα των βραχοκαταπτώσεων σχετίζεται με τις εξής τρεις παραμέτρους:

1. Την πιθανότητα αποκόλλησης ενός βραχώδους τμήματος από μια περιοχή, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, συγκεκριμένου σχήματος και μεγέθους, δηλαδή τη χωρική πιθανότητά του.
2. Την κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την τροχιά της πτώσης του κάθε βραχώδους τεμάχους (ένταση) και
3. Από την πορεία-τροχιά που διαγράφει το κάθε μπλοκ, κατά την κάθοδό του, καθώς και τον μέγιστο αριθμό αυτών, που δύνανται να αποκολληθούν από το εξεταζόμενο πρανές.

Οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι η συχνότητα αποκόλλησης των βραχωδών τεμαχίων, από τα δυνητικά ασταθή πρανή, η πιθανότητα αυτά να φτάνουν σε ένα δεδομένο σημείο και η κινητική ενέργεια, η οποία αναπτύσσεται, κατά μήκος των τροχιών τους.

Αρκετές εξειδικευμένες μέθοδοι, όπου πραγματοποιείται τροχομετρική ανάλυση και προσομοίωση των βραχοκαταπτώσεων, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την κινητική ενέργεια (kJ) που αναπτύσσεται κατά την τροχιά των τεμαχίων, βασίζονται στον αριθμό των μπλοκ που φτάνουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο, με μια σχετική συχνότητα αστοχίας (Jaboyedoff M. et al. 2005).

Η ζωνοποίηση της επικινδυνότητας των βραχοκαταπτώσεων αποτελεί αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, λόγω των διάφορων παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτήν, όπως: η ενέργεια, η συχνότητα, η γεωμετρία των μπλοκ, τα τοπογραφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά, οι γεωλογικές συνθήκες, η αβεβαιότητα όλων των παραμέτρων κ.λπ.

Όσον αφορά στα κατολισθητικά φαινόμενα, δεν έχει οριστεί, ακόμη, κάποια κοινή μέθοδος αξιολόγησης του μεγέθους μιας αστοχίας, ενώ, αντίθετα, όσον αφορά στα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων, η κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την τροχιά ενός βραχώδους τεμάχους αποτελεί, συνήθως, τη μονάδα μέτρησης της έντασης του φαινομένου. Επομένως, η επικινδυνότητα θα πρέπει να εκφράζεται ως η πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής έντασης/μεγέθους ενός φαινομένου, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, η χαρτογράφηση και η ζωνοποίησή της αποτελούν απαραίτητες διαδικασίες για τη διαχείριση του τελευταίου, κυρίως σε περιοχές επιρρεπείς σε ανάλογα φαινόμενα. Για τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας είναι απαραίτητη η χωρική και χρονική

πιθανότητα εκδήλωσης της αστοχίας, καθώς και η ένταση ή το μέγεθός της. Επομένως, η εκτίμηση της αποτελεί το τελευταίο στάδιο για την αξιολόγηση ενός φυσικού φαινομένου (Παπαθανασίου 2022).

Οι καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών αποτελούν σύνηθες φαινόμενο και μόνιμη απειλή, κυρίως στις ορεινές περιοχές, σε παγκόσμιο επίπεδο. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί αρκετές μεθοδολογίες για την ανάλυση και την εκτίμηση της επικινδυνότητας, λόγω της μεγάλης συχνότητας αντίστοιχων φαινομένων, ώστε να καταστεί δυνατό να σχεδιαστούν και να προταθούν τα κατάλληλα μέτρα ανάσχεσης και να μειωθεί, όσο το δυνατόν περισσότερο η έκθεση σε αυτά τα φαινόμενα, το οποίο κατ' επέκταση θα σημαίνει ταυτόχρονη μείωση της απώλειας, τόσο της ανθρώπινης ζωής, όσο και της υλικής περιουσίας και των υποδομών (Abbruzzese, 2009).

Όπως είναι γνωστό, όσον αφορά στη διερεύνηση και τη μελέτη μιας αστοχίας, ιδιαίτερα σε περιβάλλον με βραχώδεις σχηματισμούς, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον εντοπισμό του σημείου εκκίνησης, ή αλλιώς στη ζώνη (source) εκκίνησης της αστοχίας, καθώς και στον εντοπισμό της τροχιάς των βραχωδών τεμαχών που αποσπάστηκαν από το εξεταζόμενο πρηνές και του σημείου όπου η τροχιά τους τερματίζεται (stop points).

Επομένως, στο παρόν κεφάλαιο, αντικείμενο της ανάλυσης εκτίμησης της επικινδυνότητας αποτελεί η πρόβλεψη της τροχιάς που διαγράφει ένα τέμαχος, μετά την αποκόλλησή του από το εξεταζόμενο ασβεστολιθικό πρηνές, δηλαδή η κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται και το ύψος αναπήδησής του, σε διαφορετικά σημεία της πορείας του, καθώς και η μέγιστη απόσταση που διανύει μέχρι τη στιγμή που θα τερματιστεί η τροχιά του (stop points). Απαραίτητα στοιχεία για την αξιοπιστία της εκκίνησης και της ανάλυσης μιας τροχιάς αποτελούν ο καθορισμός του μεγέθους και της σχήματος του μπλοκ που δύναται να αποσπαστεί από το πρηνές, δηλαδή η γεωμετρία του, ο προσδιορισμός της τριβής και των συντελεστών αντίστασης, ιδιότητες, οι οποίες χαρακτηρίζουν τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εντοπίζονται στην υπό έρευνα περιοχή και θα συναντήσει το τέμαχος κατά την τροχιακή του πορεία, κατάντη του πρηνούς. Τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν και προσδιορίστηκαν με τη χρήση των τρισδιάστατων νεφών σημείων (3D point clouds), όπως αυτά προέκυψαν από τη χρήση νέων εργαλείων Τηλεπισκόπησης και φωτογραμμετρίας και συγκεκριμένα με τη χρήση των UAV (Unmanned Aerial Vehicles), τα οποία περιγράφονται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη

συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επικινδυνότητας, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

5.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ROCPRO3D v.6.1

Συνήθως η εκτίμηση της επικινδυνότητας πραγματοποιείται με τη χρήση λογισμικών, σε δισδιάστατη μορφή. Στην παρούσα, όμως, διατριβή και συγκεκριμένα στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την τρισδιάστατη εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, όπως επίσης και των λογισμικών πακέτων και μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση και αξιολόγηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος, με τη βοήθεια του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), που δημιουργήθηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, από την εναέρια αποτύπωση με eBeeX (Unmanned Aerial Vehicle) (Εικ. 67), σε συνδυασμό με επί τόπου εξέταση του εξεταζόμενου πρανούς.



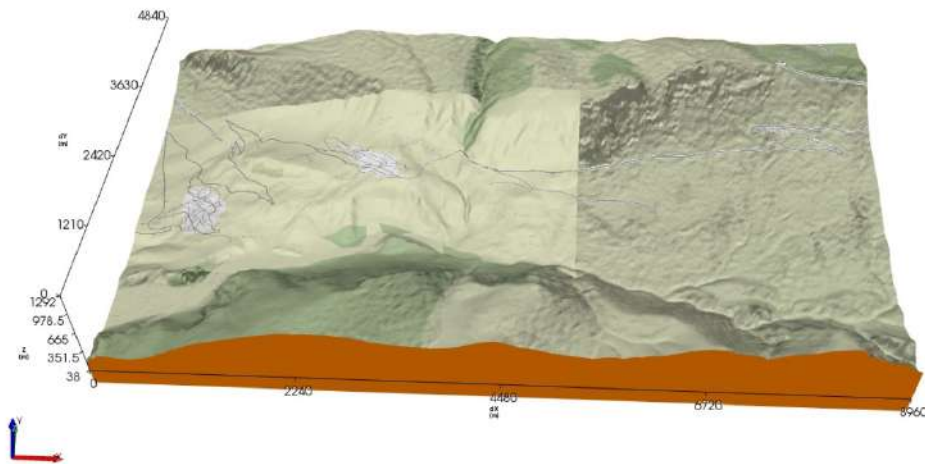
Εικ. 67. Τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο (3D Mesh model) της περιοχής έρευνας από την εναέρια αποτύπωση με UAV (Unmanned Aerial Vehicles), σε περιβάλλον Pix4Dmapper.

Για τις ανάγκες, επομένως, αυτού του σταδίου της έρευνας αξιοποιήθηκαν το λογισμικό RocPro3D v.6.1, καθώς και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ArcGIS, v.10.8.1. Συγκεκριμένα, το πρώτο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση, ανάλυση, αξιολόγηση και εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων, με τη δημιουργία τρισδιάστατων, στοχαστικών, τροχομετρικών προσομοιώσεων-τροχιών του φαινομένου, ενώ μέσα από το περιβάλλον των ArcGIS, v.10.8.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της τροχομετρικής ανάλυσης, με ταυτόχρονη χωρική αναφορά των στοιχείων υπό διακινδύνευση (elements at risk).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, επομένως για την προσομοίωση των τροχιών των πιθανών βραχοκαταπτώσεων περιλαμβάνει αναλυτικά τα εξής βήματα:

1. Προσδιορισμός της τοπογραφίας της περιοχής έρευνας και δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM).

Πρωταρχικό στάδιο της μεθοδολογίας αποτέλεσε η δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) της περιοχής έρευνας (Εικ. 68). Ως βάση του μοντέλου αξιοποιήθηκε το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM), από την Εθνική Υπηρεσία Κτηματολογίου Ελλάδος, το οποίο είναι γεωαναφερμένο στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, διαθέτει ανάλυση 5x5 [m/pixel] και καλύπτει ένα ευρύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η περιοχή έρευνας, του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών. Παράλληλα αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από την εναέρια αποτύπωση με Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), όπως αυτά περιγράφηκαν εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς και το αντίστοιχο πλέγμα (mesh) που δημιουργήθηκε.

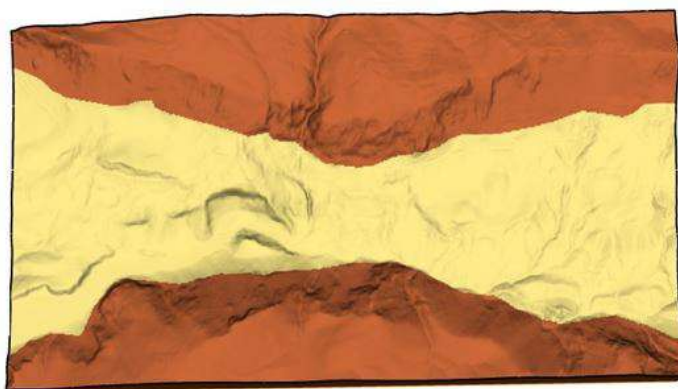


Εικ. 68. Τρισδιάστατη απεικόνιση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) του Αρχαιολογικού χώρου Δελφών, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1.

2. Προσδιορισμός, σχεδιασμός και οριοθέτηση των γεωλογικών σχηματισμών στο τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους, καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων και των ειδικών παραμέτρων τους.

Σύμφωνα με επιτόπου υπαίθριες παρατηρήσεις, αλλά και τη γεωλογία της περιοχής έρευνας, δημιουργήθηκαν δύο τύποι σχηματισμών, ανάλογα με τον τύπο των πετρωμάτων (κορήματα/ασβεστόλιθοι) που διακρίνονται. Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM), στη συνέχεια δημιουργήθηκαν και οριοθετήθηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας. Συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν δύο τύποι σχηματισμών που συναντώνται στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, όπως φαίνεται και στο χάρτη της εικόνας (Εικ. 69), οι οποίοι είναι οι εξής,

- 1) Ασβεστόλιθος, ο οποίος εμφανίζεται και καλύπτει την ανάντη βραχώδη ζώνη του αρχαιολογικού χώρου και
- 2) Κορήματα, με ένα πάχος περίπου 12-15 μέτρων, προς τα νοτιότερα τμήματα του μνημειακού χώρου (Marinos et al. 2005), μαζί με θραύσματα βραχώδους υλικού, μικρού μεγέθους, προερχόμενα κυρίως από παλαιότερα φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων.



Εικ. 69. Τρισδιάστατη απεικόνιση και οριοθέτηση των σχηματισμών στην περιοχή του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, μέσα στο περιβάλλον του RocPro3D v. 6.1.

Στη συνέχεια αυτοί οι σχηματισμοί αντιστοιχίστηκαν με τα αντίστοιχα τμήματα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) και προσδιορίστηκαν οι παράμετροί τους και συγκεκριμένα, οι συντελεστές αποκατάστασης (coefficients of restitution), δηλαδή η εφαπτομενική (R_T) και η τυπική (R_N) τιμή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής που μελετάται, καθώς επίσης και οι υπόλοιπες παράμετροι εισαγωγής, με βάση τις προδιαγραφές του λογισμικού RocPro3D v.6.1. Μέσα στα χρόνια, πολλοί ερευνητές πρότειναν διάφορες τιμές R_N και R_T , οι οποίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8 που ακολουθεί (RocscienceInc.).

Πίνακας 8. Κατακόρυφοι και εφαπτομενικοί συντελεστές απομείωσης ενέργειας (R_N & R_T) που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές, για διαφορετικά υλικά και τοποθεσίες, καθώς και με εξακρίβωση της αξιοπιστίας τους (RocscienceInc.).

RN (Normal)				RT (Tangential)				Type	Verification	Location	Reference	
Min	Max	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Mean	Standard Deviation					
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving	Tested using simulated rockfalls of similar size and shape of a previous rockfall.	Glenwood Canyon, Colorado, USA	Pfeiffer, T.J., and Bowen, T.D., "Computer Simulation of Rockfalls." Bulletin of Association of Engineering Geologists. Vol. 26 No. 1, 1989. pp135-146	
0.330	0.370			0.830	0.870			Bedrock or boulders with little soil or vegetation				
0.300	0.330			0.830	0.870			Talus with little vegetation				
0.300	0.330			0.800	0.830			Talus with some vegetation				
0.280	0.320			0.800	0.830			Soft soil slope with little vegetation				
0.280	0.320			0.780	0.820			Vegetated soil slope				
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face	Tested on restoration-blasting slopes made of four types of materials; blast-generated rock fragments, partially vegetated scree on berms, uncovered blast piles, and vegetated quarry waste.	Limestone quarry in England	Robotham, M.E., and Wang, H., and Walton, G., "Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes." Institution of mining and Metallurgy, Section A. 1995.104(Jan-April), pp A25-A33	
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree				
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile				
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile				
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face		Chalk quarry in England		
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree				
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.	Tested as control parameters	Western North Carolina for Interstate 40.	Wu, Shie-Shin "Rockfall evaluation by computer simulation" Transportation Research Records. Vol. 1031 pp 1-5, 1985.	
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desposits	Consisted of hand made throws and free fall tests by fragmentation	Atrani, Campania, Southern Italy	Budetta, P., and Santo, A. "Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in	

RN (Normal)			RT (Tangential)			Type	Verification	Location	Reference
	0.100			0.200		Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff	of rock using explosives, of dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus deposit of the landslide fans. Also used back-analysis, and information from Urciuoli.		Campania(southern Italy). "Engineering Geology, Vol.36 pp197-210.
	0.000			0.240		Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff			
	0.393			0.567		Soil			
	0.453			0.737		Shotcrete	Tested by dropping 3 to 5 cm cuboid and angular granite rock fragments onto slopes	Hong Kong	Chau, K.T. and Wong, R.H.C., and Lee, C.F. "Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution" International Journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics Vol. 35, Section 4-5. 1996, pp662-663.
	0.487			0.910		Rock slope			
	0.500			0.950		Bedrock			
	0.350			0.850		Bedrock covered by large blocks	Referenced from tests carried out by Barbieri et al.	Italcementi works at Castellammare di Stabia(northern slope of the Sorrentine Peninsula), and the area of Atrani.	Giani, G.P. "Rock Slope Stability Analysis" Rotterdam, Balkema 1992.
	0.300			0.700		Debris formed by uniform distributed elements			
	0.250			0.550		Soil covered by vegetation			
	0.530			0.990		Clean hard bedrock			Hoek, Evert. "Unpublished notes" NSERC Industrial Research Professor of Rock Engineering, Department of Civ Engineering, University of Toronto, St George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4
	0.400			0.900		Asphalt roadway			
	0.350			0.850		Bedrock outcrops with hard surface, large boulders			
	0.320			0.820		Talus cover			
	0.320			0.800		Talus cover with vegetation			
	0.300			0.800		Soft soil, some vegetation			

RN (Normal)				RT (Tangential)				Type	Verification	Location	Reference
0.370	0.420							Smooth hard surfaces and paving	Developed by observation and literature review	Colordado, USA	Pfeiffer, T.J., and Higgins, J.D., "Rockfall Hazard Analysis Using the Colorado Rockfall Simulation." Transportation Research Record 1288, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp 117-126.
0.330	0.370							Most bedrock and boulder fields			
0.300	0.330							Talus and firm soil slopes			
0.280	0.300							Soft soil slopes			
				0.870	0.920			Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces			
				0.830	0.870			Most bedrock surfaces and talus with no vegetation			
				0.820	0.850			Most talus slopes with some low vegetation			
				0.800	0.830			Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation			
				0.780	0.820			Brush covered soil slope			
	0.530	0.040			0.990	0.040		Clean Hard Bedrock	a) rolled many rocks down the slope to verify used values b) comparison to historical rockfall events at site	Mountain road, near Bolzano, Sothtyrol, Italy	feedback from use of RocFall version 3
	0.350	0.040			0.850	0.040		Bedrock outcrop			
	0.320	0.040			0.820	0.040		Talus cover			
	0.320	0.040			0.800	0.040		Talus with vegetation			
	0.400	0.040			0.900	0.040		Asphalt paving			
	0.530	0.040			0.990	0.040		Clean Hard Bedrock	default program values used	170m deep open pit, Tasmania, Australia (overall pit angle between 55 and 65 degrees)	feedback from use of RocFall version 3
	0.350	0.040			0.850	0.040		Bedrock outcrop			
	0.480	0.190			0.530	0.170		Concrete	inverse calculation of paths - standard deviations	Takamatsu, Japan	feedback from use of RocFall version 3
	0.470	0.300			0.550	0.230		Weathered Rock			

RN (Normal)				RT (Tangential)				Type	Verification	Location	Reference
		0.490	0.000			0.530	0.000	Concrete	seemed to largest calculation of paths, roughness of 7.9 degrees for concrete, 9.3 for rock		
		0.470	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock			
		0.850	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths		
		1.000	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock			
		0.530	0.040			0.990	0.040	Bedrock	Estimation, block diameters 10 to 30 cm	Fjord valley, State of Sogn og Fjordane, Norway	feedback from use of RocFall version :
		0.500	0.060			0.700	0.060	Blockfield			
		0.500	0.060			0.650	0.060	Blockfield with bushes and small trees			
		0.500	0.060			0.500	0.060	Blockfield with forest			
		0.300	0.060			0.800	0.060	Top-soil with vegetation			
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving			
		0.350	0.040			0.850	0.040	Gravel road			
		0.500				0.800		Sparsely forested slope is covered by a vener of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.	Calculated from historic rockfall	Sunnybrae, (interior of) British Colombia, Canada	Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lusanne. July 1988, Vol. 1, pp. 685-690.
		0.500				0.800		Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.	Calculated from historic rockfall	Hedley, (southern interior of) British Colombia, Canada	
		0.700				0.900		rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.	Calculated from historic rockfall	Squamish Highway, north of Vancouver British Colombia, Canada	

Για τις ανάγκες της περιοχής έρευνας και σύμφωνα με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τιμές των συντελεστών απομείωσης ενέργειας (coefficients of restitution), δηλαδή οι τιμές για τον εφαπτομενικό (R_T) και τον κατακόρυφο (R_N) συντελεστή, σύμφωνα με τους Robotham et al. (1995) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Συντελεστές απομείωσης ενέργειας (Coefficients of restitution) των γεωλογικών σχηματισμών της παρούσας έρευνας.

Coefficientsofrestitution	
Ασβεστόλιθος	Κορήματα & θραύσματα βραχώδους υλικού
$R_N=0,312/R_T= 0,712$	$R_N=0,32/R_T=0,82$

3. Ορισμός των ζωνών – θέσεων εκκίνησης πιθανής αστοχίας με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες εναύσματος πιθανής βραχοκατάπτωσης.

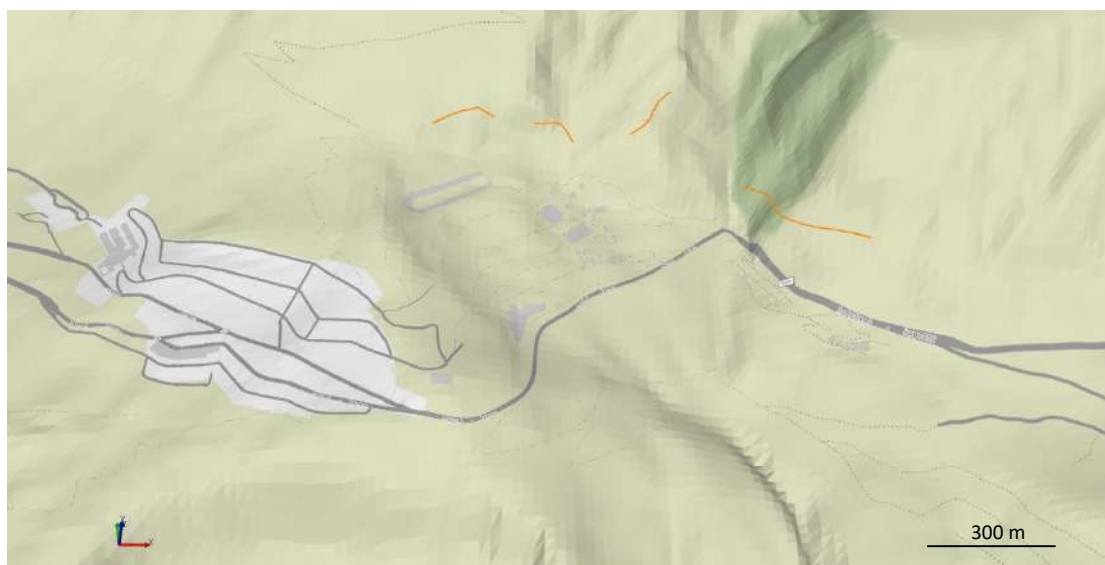
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, της υπό έρευνα περιοχής προσδιορίστηκαν και οριοθετήθηκαν στο τρισδιάστατο μοντέλο, που δημιουργήθηκε και στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι ακριβείς θέσεις, δηλαδή οι θέσεις-ζώνες εκκίνησης μιας πιθανής αστοχίας ή αλλιώς οι ζώνες τροφοδοσίας, σε συνθήκες δισδιάστατης μορφής (X, Y). Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες (X, Y) των τεσσάρων θέσεων-πηγών εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, σε μέτρα (m).

Πίνακας 10. Συντεταγμένες (X,Y) (m) των τεσσάρων θέσεων-πηγών ενεργοποίησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, όπως εισήχθηκαν στο λογισμικό RocPro3D v. 6.1, για την πραγματοποίηση των τροχομετρικών προσομοιώσεων.

Θέσεις-πηγές εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης							
1η		2η		3η		4η	
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
368796.47	4260270.67	369232.68	4260272.41	369515.2	4260249.3	369020.561	4260302.09
368894.9	4260306.12	369278.87	4260300.07	369567.45	4260177.15	369065.491	4260311.08
368932.44	4260299.83	369325.75	4260349.12	369760.66	4260044.28	369110.42	4260284.12

Συγκεκριμένα, οι γεωγραφικές αυτές θέσεις προσδιορίστηκαν με τις ακριβείς συντεταγμένες (X, Y) των επισφαλών τεμαχών, με τη χρήση των τρισδιάστατων μοντέλων νεφών σημείων (3D point clouds), από τη λήψη με UAV, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper, με επαλήθευση από παρατήρηση στο πεδίο. Ταυτόχρονα προσδιορίστηκε η γεωμετρία των μπλοκ που δύνανται να αποκολληθούν, υπολογίζοντας τη μέση τιμή της διαμέτρου των τεμαχών που έχουν ήδη αστοχήσει και χαρτογραφήθηκαν στον Αρχαιολογικό χώρο σε προηγούμενο στάδιο της μεθοδολογίας. Οι ζώνες αυτές τοποθετήθηκαν ως γραμμές (lines) με αριθμό μπλοκ πτώσης, για την καθεμία, ίσο με 100. Οι πηγές τοποθετήθηκαν

χειροκίνητα, στη δισδιάστατη προβολή (2D), ελέγχοντας, ταυτόχρονα, τις θέσεις τους στην τρισδιάστατη προβολή (3D). Επομένως, δημιουργήθηκαν και σχεδιάστηκαν τέσσερις ζώνες εκκίνησης δυνητικών αστοχιών, όπως απεικονίζονται χαρακτηριστικά στο χάρτη της Εικόνας 70 ενώ παράλληλα προσδιορίστηκαν, για κάθε ζώνη-θέση ξεχωριστά, ο αριθμός των μπλοκ, το μέγεθος και το σχήμα, καθώς και η ταχύτητα εκκίνησής τους, με ή χωρίς την παρουσία εναύσματος.



Εικ. 70. Τρισδιάστατη ανάλυση βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό χώρο των Δελφών, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1, όπου προβάλλονται οι 4 θέσεις-ζώνες εκκίνησης των πιθανών αστοχιών στον Αρχαιολογικό χώρο των Δελφών (με πορτοκαλί χρώμα).

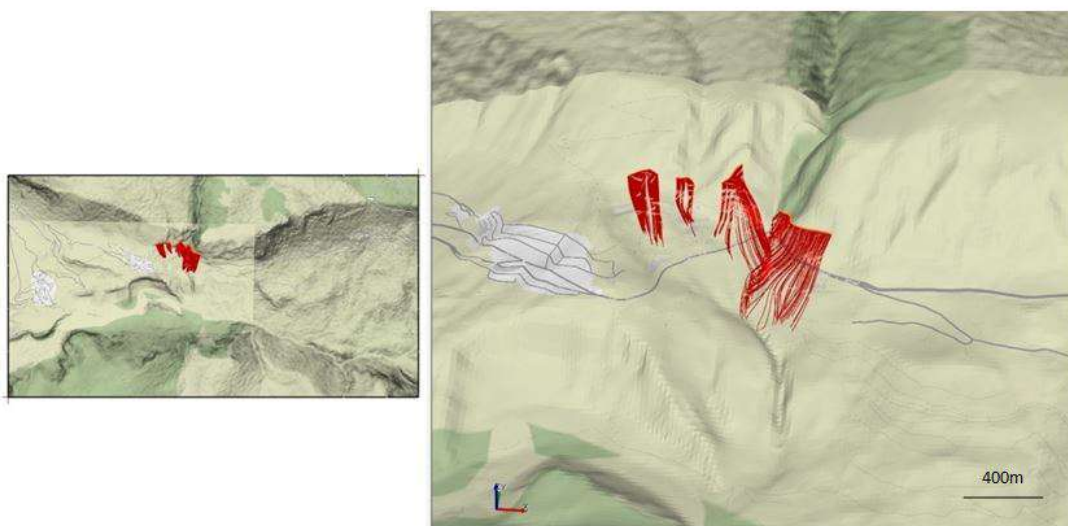
Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης έρευνας δημιουργήθηκαν και ερευνήθηκαν δύο σενάρια αστοχίας, με την παρουσία, ή μη, του εναύσματος του σεισμού και συγκεκριμένα της καταστροφικής σεισμικής ακολουθίας του 1870. Η συγκεκριμένη ακολουθία, με μέγεθος $M=6.7$, επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, καθώς αποτέλεσε έναν από τους πιο ισχυρούς σεισμούς στην περιοχή, προκαλώντας μεγάλες υλικές καταστροφές και θανάτους (Κεφάλαιο 2).

Επομένως, δημιουργήθηκαν, οι τροχομετρικές προσομοιώσεις της κίνησης των βραχωδών μπλοκ, με σεισμικές ή ασεισμικές συνθήκες. Όσον αφορά στις τελευταίες επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου, στο περιβάλλον του λογισμικού, οι παράμετροι της σεισμικής ακολουθίας του 1870, όπως αυτές υπολογίστηκαν και αναλύονται στο Κεφάλαιο 2. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως ταχύτητα εκκίνησης η ταχύτητα PGV της καταστροφικής

σεισμικής ακολουθίας του 1870 (σεισμικές συνθήκες), η οποία υπολογίστηκε ίση με 0,41 m/sec, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η τιμή αυτής της ταχύτητας επιλέχθηκε να είναι μηδενική (ασεισμικές συνθήκες). Τα δύο αυτά σενάρια, καθώς και τα αποτελέσματα της τροχομετρικής προσομοίωσης παρουσιάζονται, στη συνέχεια, αναλυτικά.

4. Διαμόρφωση του υπολογισμού της τροχιάς και πραγματοποίηση τροχομετρικής ανάλυσης.

Αφού προηγήθηκε ο προσδιορισμός και η εισαγωγή όλων των απαιτούμενων παραμέτρων των βραχωδών τεμαχών που δύνανται να αστοχήσουν, επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας ήταν η πραγματοποίηση των τροχομετρικών αναλύσεων, για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις-ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης ξεχωριστά. Δημιουργήθηκαν τέσσερις περιπτώσεις τροχιακής προσομοίωσης, για τις τέσσερις πιθανές θέσεις εκκίνησης αστοχίας, όπως χαρακτηριστικά αποτυπώνονται στους τρισδιάστατους (3D) χάρτες του ακολουθούν, μέσα από το περιβάλλον του RocPro3D v.6.1 (RocPro3D, 2018) (Εικ. 71).



Εικ. 71. Τρισδιάστατη απεικόνιση των τεσσάρων ζωνών πιθανής αστοχίας-τροχιών βραχοκαταπτώσεων μετά την πραγματοποίηση τροχομετρικής ανάλυσης (Trajectory analysis) στον αρχαιολογικό χώρο των Δελφών.

5. Ανάλυση των αποτελεσμάτων της τροχιακής ανάλυσης (trajectometric analysis) και δημιουργία τρισδιάστατων (3D) θεματικών φακέλων και χαρτών.

Μετά την ολοκλήρωση των τροχιακών προσομοιώσεων στις ζώνες εκκίνησης πιθανής αστοχίας δημιουργήθηκαν θεματικοί φάκελοι και χάρτες, παρέχοντας πληροφορίες για την τροχιακή πορεία που διέγραψαν τα βραχώδη τεμάχια από τη στιγμή της αποκόλλησής τους από το εξεταζόμενο πρηνές, έως και την τελική τους τοποθέτηση στο χώρο έρευνας. Συγκεκριμένα οι πληροφορίες αυτές αφορούν στην κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την πορεία καθόδου τους, το σημείο στο οποίο αυτή τερματίζει, το ύψος αναπήδησης των τεμαχίων, την ταχύτητα κίνησής τους, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Συνοψίζοντας, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1 (RocPro3D, 2018) πραγματοποιήθηκαν εξατομικευμένες τρισδιάστατες (3D) προσομοιώσεις βραχοκαταπτώσεων στην υπό έρευνα περιοχή. Το λογισμικό αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου πλέγματος (mesh) της περιοχής έρευνας, με τριγωνισμό, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Delaunay. Μέσω αυτού του υβριδικού μοντέλου, οι προσομοιώσεις της πτώσης των βράχων μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μία ενιαία μάζα (lumped mass), ως ένα μεμονωμένο υλικό σημείο (a single material point), ή ως ένα άκαμπτο σώμα (rigid body), λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα του θραύσματος. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του άκαμπτου σώματος (rigid body), καθώς υπολογίστηκε και λήφθηκε υπόψη, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, η μέση διάμετρος των βραχωδών τεμαχίων. Η συγκεκριμένη επιλογή (rigid body) θεωρεί την πρόσκρουση του ενός μπλοκ στην επιφάνεια του εδάφους ως ένα, σχεδόν, στιγμιαίο φαινόμενο κατά το οποίο η κίνηση είναι μηδενική. Το σημαντικό πλεονέκτημα χρήσης αυτού του λογισμικού είναι ότι επιτρέπει την τρισδιάστατη προσομοίωση των τροχιών των βραχοκαταπτώσεων, χρησιμοποιώντας μια πιθανολογική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις παραλλαγές στα σχήματα των τεμαχίων, τα χαρακτηριστικά και τις ανομοιομορφίες του εδάφους. Η πρόσκρουση χαρακτηρίζεται από διασπορά ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τους δύο συντελεστές απομείωσης R_N (κατακόρυφη) και R_T (εφαπτομενική), καθώς είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε αντίστοιχες έρευνες (Clemente et al. 2023).

Οι περισσότερες μεθοδολογίες ζωνοποίησης της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων βασίζονται κυρίως σε δισδιάστατη μοντελοποίηση της τροχιάς. Αυτή η προσέγγιση, όμως, συνήθως δεν παρέχει μια ρεαλιστική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο οι τροχιές πτώσης των βραχιδίων τεμαχίων και ο κίνδυνος που προκύπτει από αυτές, κατανέμονται χωρικά. Η παρούσα διατριβή παρουσιάζει μια νέα μεθοδολογία για την κατανομή της επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων, σε τρισδιάστατη μορφή, ξεκινώντας από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τρισδιάστατης τροχιάς. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στις αρχές της μεθοδολογίας Cadanan που εισήχθη για την τοποθέτηση ζωνών επικινδυνότητας κατά μήκος δισδιάστατων προφίλ κλίσης, με κάποιες διαφοροποιήσεις, λόγω της διαθεσιμότητας δεδομένων της περιοχή έρευνας.

5.2.1. Παρουσίαση Χαρτών και Φακέλων (Maps and envelopes)- Εκτίμηση Επικινδυνότητας (Hazard Assessment)

Όπως προαναφέρθηκε, με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και ακολουθήθηκε, δημιουργήθηκαν δύο σενάρια τροχομετρικής ανάλυσης. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η ύπαρξη σεισμού, ως έναυσμα ενεργοποίησης βραχοκαταπτώσεων και συγκεκριμένα επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη προσομοίωση της επικινδυνότητας, με βάση τα δεδομένα της σεισμικής ακολουθίας του 1870, η οποία σημειώθηκε στην περιοχή των Δελφών, προκαλώντας ανεπανόρθωτες καταστροφές και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η συγκεκριμένη σεισμική ακολουθία, επομένως, επιλέχθηκε να μελετηθεί ως σενάριο αστοχίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που υπολογίστηκαν για την ταχύτητα PGV (m/sec) της συγκεκριμένης σεισμικής ακολουθίας, στο Κεφάλαιο 2, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αναπτύχθηκε η μεθοδολογία ασεισμικά, όπου η ταχύτητα PGV (m/sec) του σεισμού επιλέχθηκε να είναι μηδενική. Παράλληλα και για τα δύο αυτά σενάρια δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας των μπλοκ. Όπως είναι γνωστό, το σχήμα και το μέγεθος των βραχοτεμαχίων αποτελούν αντιπροσωπευτικές παραμέτρους για τον τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχομάζας, από την οποία θα αποκολληθούν. Η κύλιση του βραχώδους τεμάχους στην επιφάνεια του πρανούς και η συνολική τροχιά-πορεία που θα διαγράψει είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το σχήμα και τις διαστάσεις του (Evans and Hungr 1993, Giani et al. 2004). Γενικά, τα βραχοτεμάχια, με σφαιρικό σχήμα, διανύουν τις μεγαλύτερες, σε μήκος, αποστάσεις κατά την κατάπτωσή τους, σε αντίθεση με τα επιμήκη και πεπλατυσμένα, τα οποία τερματίζουν νωρίτερα. Επομένως, στην υπό

έρευνα περιοχή υπολογίστηκε η μέση τιμή της διαμέτρου των βραχωδών τεμαχών, για κάθε μία από τις 4 θέσεις πιθανής αστοχίας, όπως αυτά χαρτογραφήθηκαν και υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο της επιδεκτικότητας των βραχοκαταπτώσεων (Κεφάλαιο 4). Σε όλες τις περιπτώσεις, ο μέγιστος αριθμός των πιθανών μπλοκ βράχου που εκτιμάται να αποκολληθεί ορίστηκε ίσος με 100, ενώ το σχήμα τους ως σφαιρικό (sphere), με βάση τις παρατηρήσεις και τα προερχόμενα, από προηγούμενες αστοχίες, τεμάχια που χαρτογραφήθηκαν στον περιβάλλοντα Αρχαιολογικό Χώρο.

Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία τεσσάρων σεναρίων τροχιακής προσομοίωσης, τα οποία απεικονίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 11, που ακολουθεί, καθένα από τα οποία παρουσιάζεται, στη συνέχεια, αναλυτικά.

Πίνακας 11. Σενάρια τροχιακής προσομοίωσης στις τέσσερις ζώνες πιθανής βραχοκατάπτωσης στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες και διαφορετικό μέση διάμετρο των βραχωδών τεμαχών (m).

	1 ^ο σενάριο	2 ^ο σενάριο	3 ^ο σενάριο	4 ^ο σενάριο
	Διάμετρος μπλοκ (m) / Ταχύτητα σεισμούPGV (m/sec)			
1 ^η Θέση πιθανής αστοχίας	1/0	1/0,41	1,3/0	1,3/0,41
2 ^η Θέση πιθανής αστοχίας	1/0	1/0,41	1,5/0	1,5/0,41
3 ^η Θέση πιθανής αστοχίας	1/0	1/0,41	1,3/0	1,3/0,41
4 ^η Θέση πιθανής αστοχίας	1/0	1/0,41	1,5/0	1,5/0,41

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν οι τροχομετρικές προσομοιώσεις, για κάθε μία περίπτωση ξεχωριστά, και για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής αστοχίας, δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες και φάκελοι (maps and envelopes) για τις τροχιές καθενός από τα 100 βραχώδη μπλοκ, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (Hazard Assessment),

όσο και για την ποιοτική αξιολόγηση του βαθμού διακινδύνευσης (Risk Assessment) που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Ορισμός χαρτών και φακέλων

Στο λογισμικό RocPro3D v.6.1, ένας χάρτης ή ένας φάκελος αποτελεί την τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση, ενός δεδομένου αποτελέσματος (ενέργεια, ταχύτητα κτλ.), αντιστοιχισμένη επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), με τη χρήση χρωματικής κλίμακας. Υπολογίζεται σε ένα πλέγμα προκαθορισμένο από τον εκάστοτε χρήστη, όπου κάθε κελί (i,j) χρωματίζεται σύμφωνα με την τιμή της παραμέτρου. Για κάθε κελί (i,j), η τιμή αυτή υπολογίζεται είτε από:

1)Χάρτες «συνόλου» (summation type maps): είναι μια τρισδιάστατη (3D) γραφική αναπαράσταση μιας δεδομένης παραμέτρου (ταχύτητα, ενέργεια), η οποία έχει αντιστοιχιστεί απάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), με τη χρήση χρωματικής κλίμακας. Υπολογίζεται σε ένα προκαθορισμένο, από τον ερευνητή, πλέγμα, όπου κάθε κελί (i,j) χρωματίζεται σύμφωνα με την τιμή της κάθε παραμέτρου. Για κάθε κελί (i,j), η τιμή υπολογίζεται από το άθροισμα των μοναδιαίων τιμών (0 ή 1), οι οποίες αντιστοιχούν στις παραμέτρους *Number*(Αριθμός τροχιών), *TrajDensity*, *Impacts*, *Stopping points* (σημεία τερματισμού των τροχιών) και *NumTrajSrcCell*. Για κάθε κελί, επομένως, προκύπτουν οι χάρτες: **1)Number of trajectories map**, **2)Trajectories density map**, **3)Impacts** και **Stopping points maps**, ή **4)NumTrajSrcCell map**.

Number of trajectories map: Αυτός ο χάρτης αντιστοιχεί σε ένα πλέγμα, επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), όπου κάθε κελί (i,j) περιλαμβάνει τον αριθμό των τροχιών που φτάνουν σε αυτό:

$NumTraj(i,j)$ = Αριθμός τροχιών που διέρχονται από το κελί (i,j)

Trajectories density map: Ο χάρτης πυκνότητας τροχιάς $TrajDensity(i,j)$ αντιστοιχεί σε ένα πλέγμα επάνω στο DTM, όπου κάθε κελί (i,j) περιλαμβάνει την πυκνότητα (που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1) των τροχιών που διέρχονται από αυτό (σε σχέση με τον συνολικό υπολογισμένο αριθμό των τροχιών):

$TrajDensity(i,j) = NumTraj(i,j) / TotalNumTraj$,

Όπου,

TotalNumTraj είναι ο συνολικός υπολογισμένος αριθμός των τροχιών.

Ο συγκεκριμένος χάρτης είναι σημαντικός στην περίπτωση που όλα τα βραχύδη μπλοκ έχουν σημείο εκκίνησης μία μόνο σημειακή πηγή.

Impacts and stopping points maps: Ο χάρτης αυτός αποτελεί ένα πλέγμα που απεικονίζεται επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), με κάθε κελί (i,j) να παρέχει τον αριθμό των επιπτώσεων που περιέχει.

Ο χάρτης τερματισμού των τροχιών Stop(i,j) αντιστοιχεί σε ένα πλέγμα που απεικονίζεται στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), με κάθε κελί (i,j) να παρέχει τον αριθμό των τροχιών που έχουν σταματήσει εκεί:

Stop(i,j) = είναι ο αριθμός των τροχιών, των οποίων η τελευταία πρόσκρουση εντοπίζεται στο κελί (i,j).

NumTrajSrcCellmap: Ο χάρτης αυτός αντιστοιχεί στο πλέγμα που έχει αντιστοιχιστεί στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), με κάθε κελί (i,j) να ορίζεται ως εξής:

NumTrajSrcCell(i,j) = συνολικός αριθμός τροχιών λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κελιά πηγής από τα οποία τουλάχιστον μία τροχιά φτάνει στο κελί (i,j)

Χάρτης «ελάχιστου χρόνου» (Carte du temps minimum): Ο χάρτης αυτός αντιστοιχεί σε ένα πλέγμα, το οποίο έχει αντιστοιχιστεί επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), όπου κάθε κελί (i,j) παρέχει την ελάχιστη τιμή του χρόνου διαδρομής για όλες τις τροχιές που φτάνουν σε αυτό:

TimeMin(i,j) = ο ελάχιστος χρόνος για να φτάσουν όλες οι τροχιές σε ένα κελί (i,j)

2)Χάρτες τύπου «φακέλου» (Envelope typemaps): Ο φάκελος αποτελεί τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου (ταχύτητα, ενέργεια), επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), με τη χρήση χρωματικής κλίμακας. Υπολογίζεται σε ένα πλέγμα προκαθορισμένο από τον εκάστοτε χρήστη, όπου κάθε κελί (i,j) χρωματίζεται σύμφωνα με την τιμή της

παραμέτρου. Για κάθε κελί (i,j), η τιμή αυτή υπολογίζεται από τον προσδιορισμό του φακέλου μιας συγκεκριμένης στατιστικής παραμέτρου. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι χάρτες τύπου «φακέλου», οι οποίες αντιστοιχούν στις παραμέτρους **Energy**, **Classes-E**, **Velocity** και **Height**(ύψος των βραχωδών τεμαχών πάνω από το έδαφος).

3) Με υπολογισμό χαρτών εκτίμησης και ποσοτικοποίησης του κινδύνου (ενεργειακές τάξεις (energy classes), πυκνότητα τροχιάς (trajectory density), πιθανότητα διάδοσης (probability of propagation), κατηγορίες πιθανότητας διάδοσης (classes of probability of propagation), σύμφωνα με τη μεθοδολογία CADANAV (2013).

Probability of propagation Map-P(propag):Αυτός ο χάρτης αντιστοιχεί στο αντίστοιχο πλέγμα με αυτό στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), όπου κάθε κελί (i,j) ορίζει την πιθανότητα διάδοσης των τροχιών στο κελί (i,j), που ορίζεται ως:

$$P(propag)(i,j) = NumTraj(i,j) / NumTrajSrcCell(i,j),$$

όπου:

NumTraj(i,j) αντιστοιχεί στο συνολικό αριθμό των τροχιών που διέρχονται από το κελί (i,j), και

NumTrajSrcCell(i,j) αποτελεί το συνολικό αριθμό των τροχιών από τα κελιά-πηγές, από τα οποία τουλάχιστον μία τροχιά φτάνει στο κελί (i,j).

P(propag)(i,j) αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ενός βραχώδους μπλοκ να φτάσει το κελί (i,j), από όλα τα μπλοκ συνολικά.

Classes of probability of propagation map, σύμφωνα με τη μεθοδολογία CADANAV (2013).

Ο χάρτης ενεργειακών τάξεων (φάκελος) αντιστοιχεί σε ένα πλέγμα χαρτογραφημένο επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), για το οποίο κάθε κελί αντιστοιχεί



στην ενέργεια κλάσης της μέγιστης ενέργειας για τμήματα τροχιών που το διασχίζουν.

Το λογισμικό RocPro3D προτείνει 3 ενεργειακές κατηγορίες, τα οποία αντιπροσωπεύονται από 3 χρώματα (κίτρινο, μπλε και κόκκινο).

Από προεπιλογή, τα όρια των ενεργειακών αυτών κλάσεων είναι τα ακόλουθα:

· κίτρινο χρώμα: 0 - 30 kJ

· μπλε χρώμα: 30 - 300 kJ

· κόκκινο χρώμα: >300 kJ,

σύμφωνα με τη μεθοδολογία CADANAV , η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα δεδομένα εισαγωγής, όπως αυτά εισήχθησαν μέσα στο περιβάλλον του RocPro3D v.6.1 και για τις τέσσερις ζώνες εκκίνησης πιθανής αστοχίας, καθώς και οι χάρτες ανάλυσης της τροχιάς των πιθανών βραχοκαταπτώσεων, με παράλληλη χωρική απεικόνιση των αντίστοιχων παραμέτρων τους, σε τρισδιάστατη (3D) μορφή. Η διαμόρφωση των υποκεφαλαίων αυτών βασίστηκε στη συγκριτική απεικόνιση της τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης των διαφόρων παραμέτρων των τροχιακών αναλύσεων, με βάση τη μέση διάμετρο (d) των τεμαχών που υπολογίστηκε για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις πιθανής βραχοκατάπτωσης, καθώς αυτή δημιουργεί διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα όπως φαίνεται αναλυτικά στους χάρτες που ακολουθούν.

5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.3.1. Αποτελέσματα τροχομετρικής προσομοίωσης με σεισμικές συνθήκες (PGV=0,41m/sec) και μέση διάμετρο βραχοτεμαχών (d)=1m και (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες τροχιές των πιθανών βραχοκαταπτώσεων, καθώς και οι χάρτες τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης των τεσσάρων ζωνών πιθανής βραχοκατάπτωσης με σεισμικές συνθήκες

(PGV=0,41m/sec) και μέση διάμετρο (d) για κάθε τέμαχος 1) ίση με 1m και 2) μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα παρατίθενται οι χάρτες α) για την κινητική ενέργεια (kJ), που αναπτύσσεται κατά τις πιθανές τροχιές, β) για το ύψος αναπήδησης του μπλοκ, όπως αυτό διακρίνεται στα διάφορα σημεία της κάθε τροχιάς, για κάθε τέμαχος, γ) για τον ελάχιστο χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μια τροχομετρική ανάλυση, δ) για τις προσκρούσεις των πιθανών βραχοκαταπτώσεων στο Μνημειακό Χώρο, ε) για τα σημεία όπου τερματίζονται οι τροχιές (stop points), στ) για τον αριθμό των τροχιών που φτάνουν σε ένα σημείο στο χώρο έρευνας, ζ) για το συνολικό αριθμό των τροχιών, η) για την πυκνότητα των τροχιακών αναλύσεων, θ) για την πιθανότητα ένα βραχώδες τέμαχος, από όλα τα μπλοκ συνολικά, να φτάσει σε ένα σημείο στο χώρο. Επίσης, παρατίθενται οι παράμετροι εισαγωγής, όπως αυτές εισήχθησαν στο περιβάλλον διεπιφάνειας, στο λογισμικό RocPro3D v.6.1 για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης στις τέσσερις θέσεις εκκίνησης (Εικ. 72 & 73).

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	368796.47	4260270.67
1	368894.9	4260306.12
2	368932.44	4260299.83

Starting condition of blocks

Min Max

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

Initial velocity

Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369232.68	4260272.41
1	369278.87	4260300.07
2	369325.75	4260349.12

Starting condition of blocks

☒ Absolute

Vx [m/s] Min Max

Vy [m/s] Min Max

Vz [m/s] Min Max

Vr [rad/s] Min Max

☐ Initial velocity

☒ Relative /local slope

||V|| [m/s] Min Max

Vr [rad/s] Min Max

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m] Min Max

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ) 1 [m]	1	1
Volume 0.524 [m ³]	0.524	0.524
m 1309 [kg]	1309	1309
I 130.9 [kg.m ²]	130.9	130.9
Δm 0 [%]		

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369515.2	4260249.3
1	369567.45	4260177.15
2	369760.66	4260044.28

Starting condition of blocks

☒ Absolute

Vx [m/s] Min Max

Vy [m/s] Min Max

Vz [m/s] Min Max

Vr [rad/s] Min Max

☐ Initial velocity

☒ Relative /local slope

||V|| [m/s] Min Max

Vr [rad/s] Min Max

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m] Min Max

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ) 1 [m]	1	1
Volume 0.524 [m ³]	0.524	0.524
m 1309 [kg]	1309	1309
I 130.9 [kg.m ²]	130.9	130.9
Δm 0 [%]		

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369020.561	4260302.09
1	369065.491	4260311.08
2	369110.42	4260284.12

Starting condition of blocks

Min Max

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

Initial velocity

Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Εικ. 72. Παράμετροι εισαγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1, με σεισμικές συνθήκες (PGV=0,41 m/sec) και μέση διάμετρο (d) ίση με 1 m, όπου κάθε μία από τις 4 εικόνες αντιστοιχεί στις 4 ζώνες (source id) πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	368796.47	4260270.67
1	368894.9	4260306.12
2	368932.44	4260299.83

Starting condition of blocks

Min Max

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

Initial velocity

Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369232.68	4260272.41
1	369278.87	4260300.07
2	369325.75	4260349.12

Starting condition of blocks

☒ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☒ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369515.2	4260249.3
1	369567.45	4260177.15
2	369760.66	4260044.28

Starting condition of blocks

☒ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☒ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]
☐ Blocks surfacic density [blocks/m²] ☐ Total number of blocks
 Number of blocks [blocks/source]

Individual sources properties

Source id ☐ Inversion ☐ (total number of sources = 4)
 Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection
 Lineic
 Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369020.561	4260302.09
1	369065.491	4260311.08
2	369110.42	4260284.12

Starting condition of blocks

Min Max

☐ Absolute

Vx [m/s]
 Vy [m/s]
 Vz [m/s]
 Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

Min Max

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]
 Vr [rad/s]
 ΔVi [%]

Initial falling height

Min Max

h [m]
 Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape
 d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1.5	1.5
Volume	1.767	1.767
m	4418	4418
I	994	994
Δm	0	0

Variability of rebound orientation at impacts

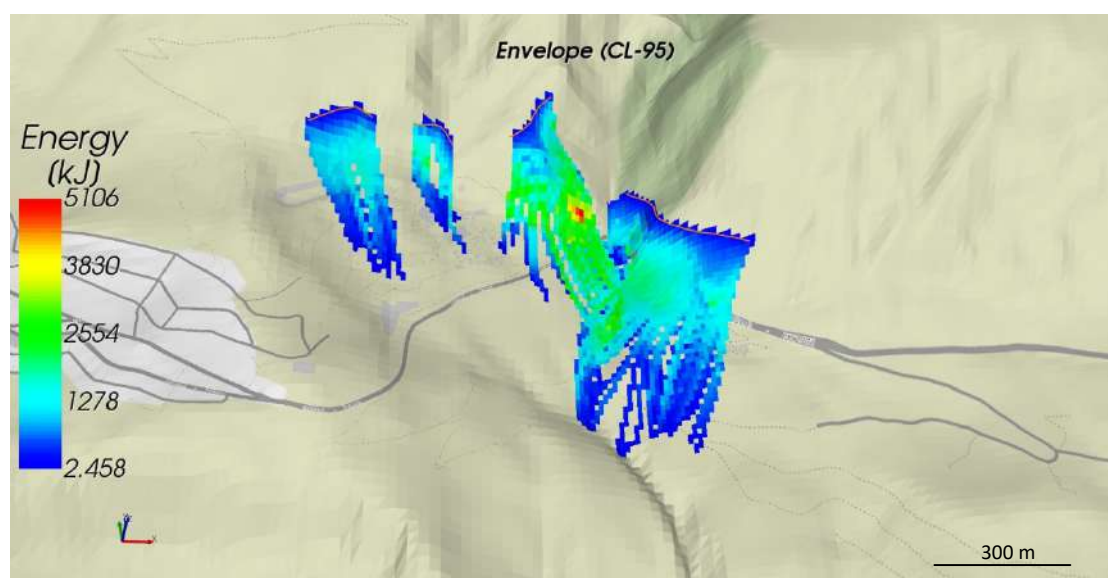
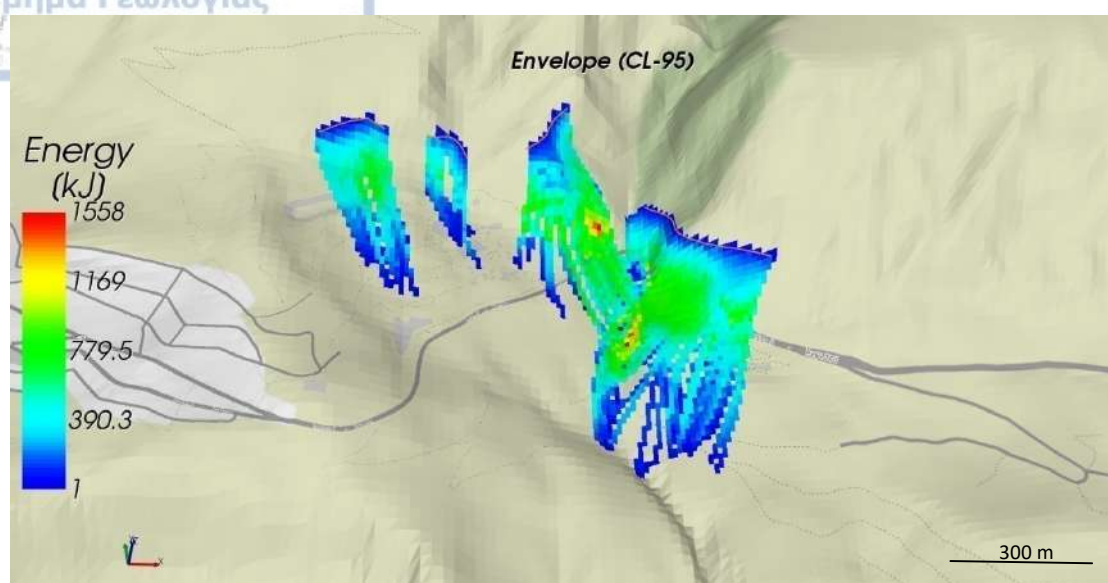
Deviation angle [°]

OK Cancel

Εικ. 73. Παράμετροι εισαγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα, όπου κάθε μία, από τις 4 εικόνες αντιστοιχεί στις 4 ζώνες (source id) πιθανής βραχοκατάπτωσης.

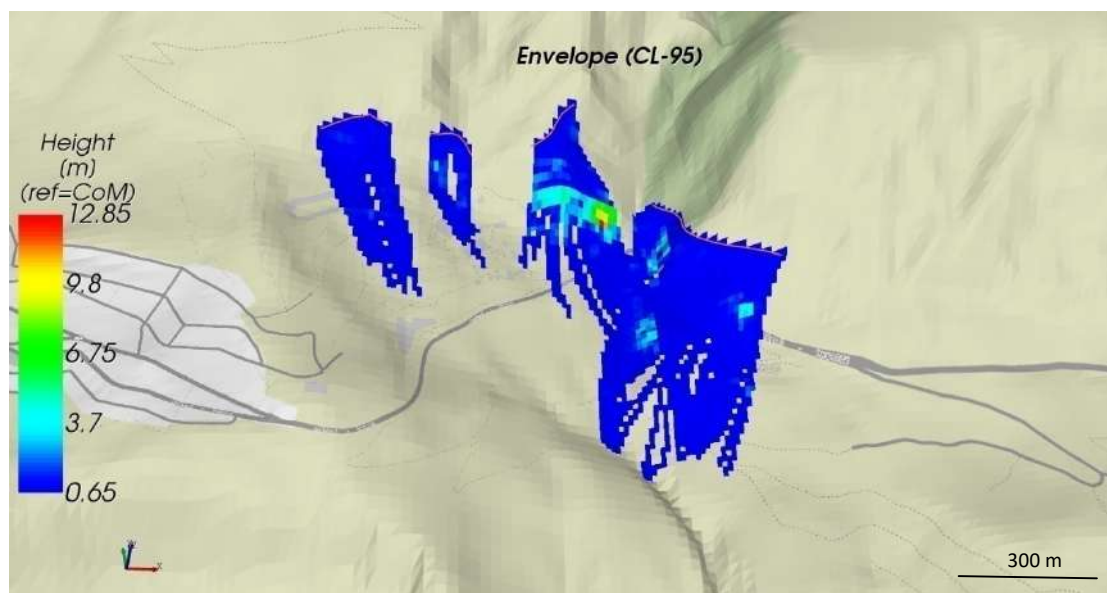
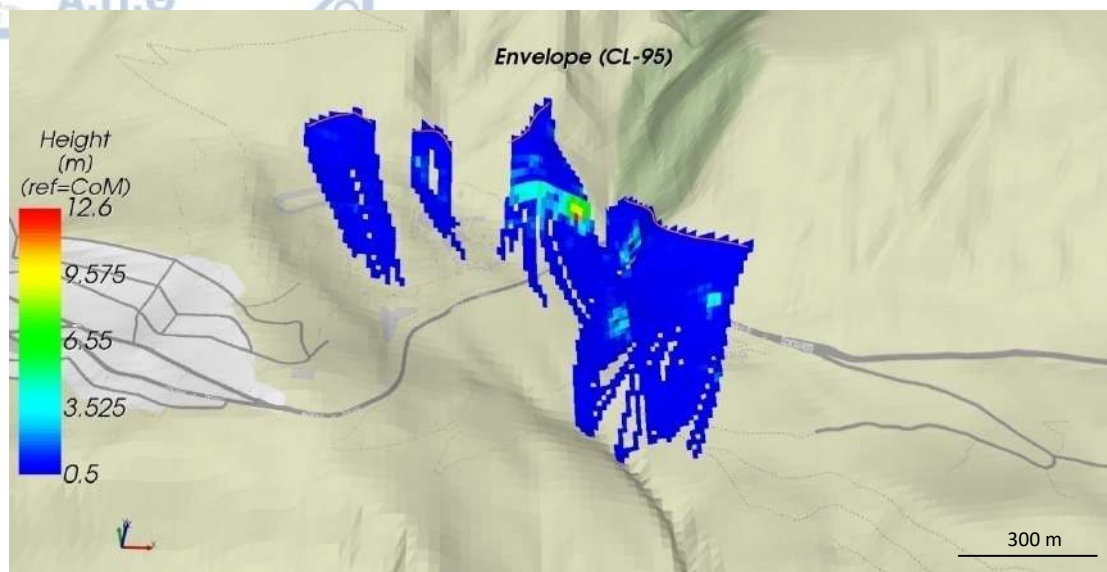
Στη συνέχεια παρατίθενται οι τρισδιάστατοι χάρτες χωρικής απεικόνισης για κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές, μελετώντας τις εξής περιπτώσεις, 1) την τροχιακή πορεία πιθανών βραχοκαταπτώσεων με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1m$ και d ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα, και 2) με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0$ m/sec) και μέση διάμετρο βραχοτεμαχών $d=1m$ και d ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m, για κάθε μία από τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.

Κινητική Ενέργεια-Energy (Kj)



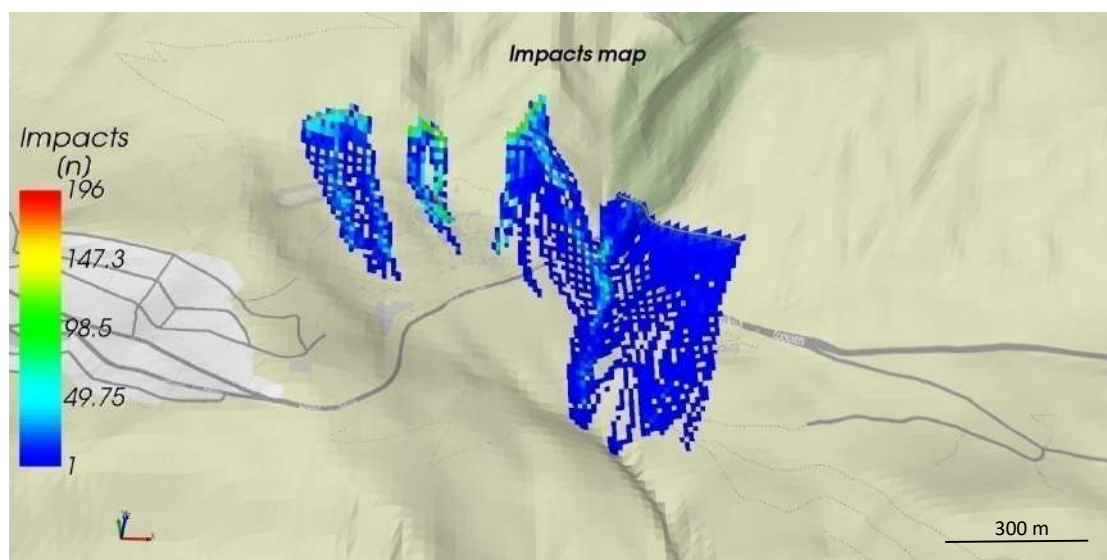
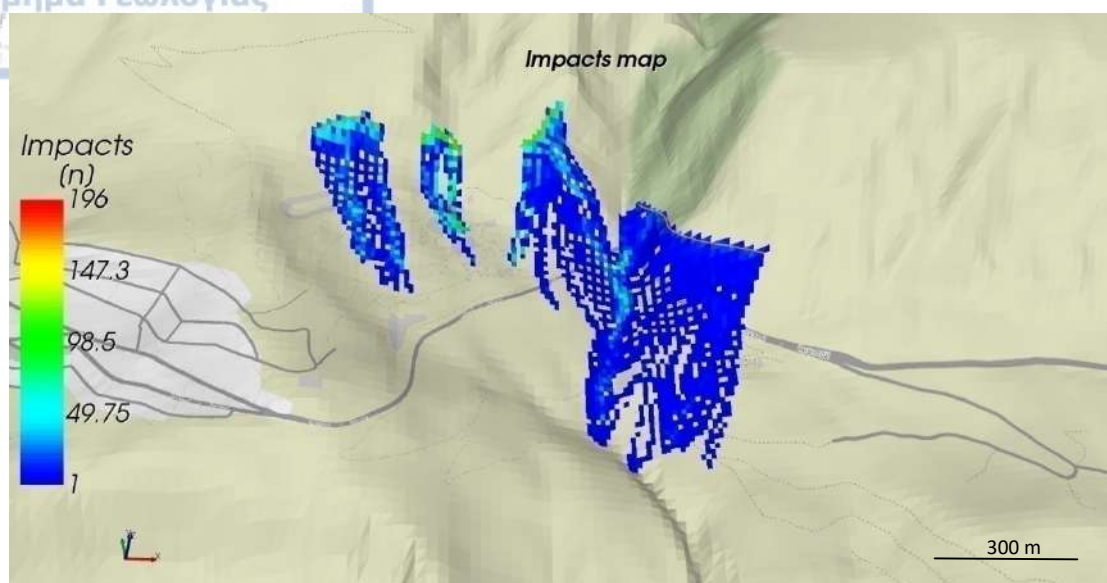
Εικ. 74. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της κινητικής ενέργειας στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση της κινητικής ενέργειας (kJ), με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Υψος αναπήδησης-Height (m)



Εικ. 75. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του ύψους αναπήδησης των τεμαχών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41 \text{ m/sec}$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση του ύψους αναπήδησης των βραχοτεμαχών, όπως αυτό καταγράφεται σε διάφορα σημεία των τροχιών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Προσκρούσεις-Impacts



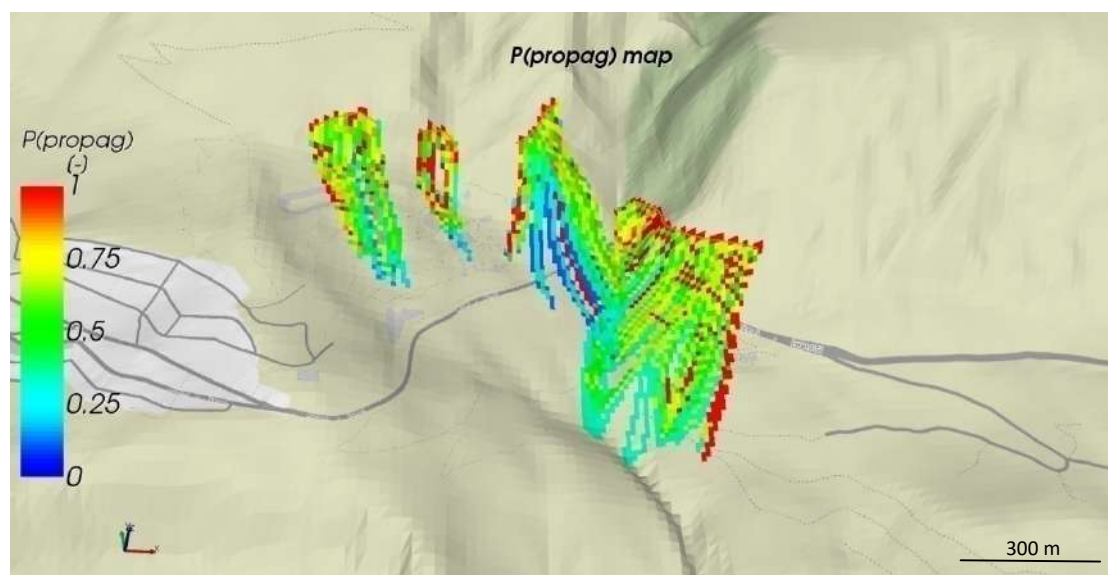
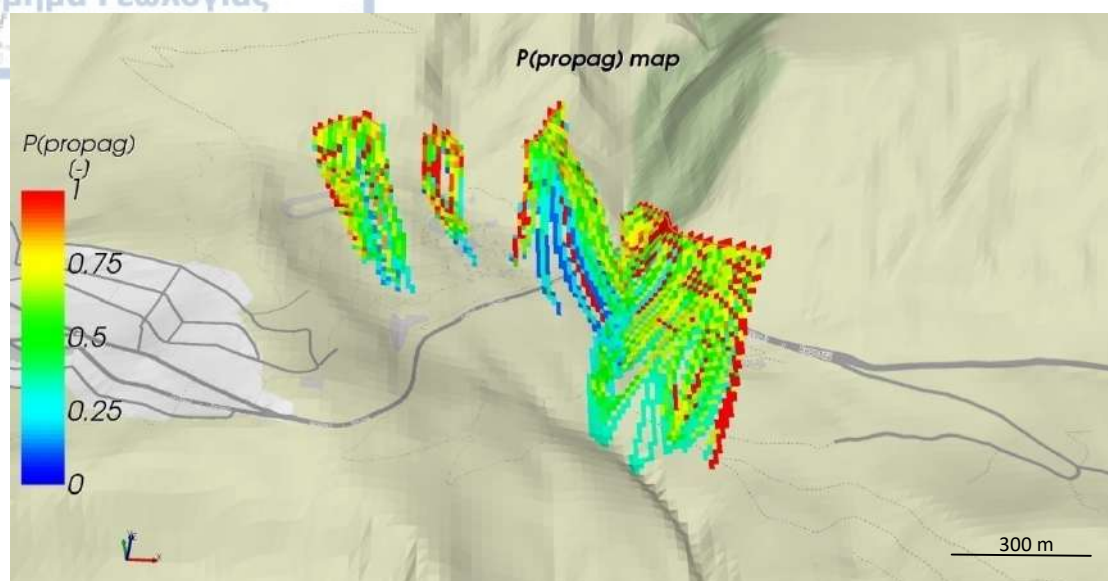
Εικ. 76. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση των επιπτώσεων που παρατηρούνται κατά μήκος των τροχιών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση των επιπτώσεων των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Σημεία τερματισμού των τροχιών-Stop points



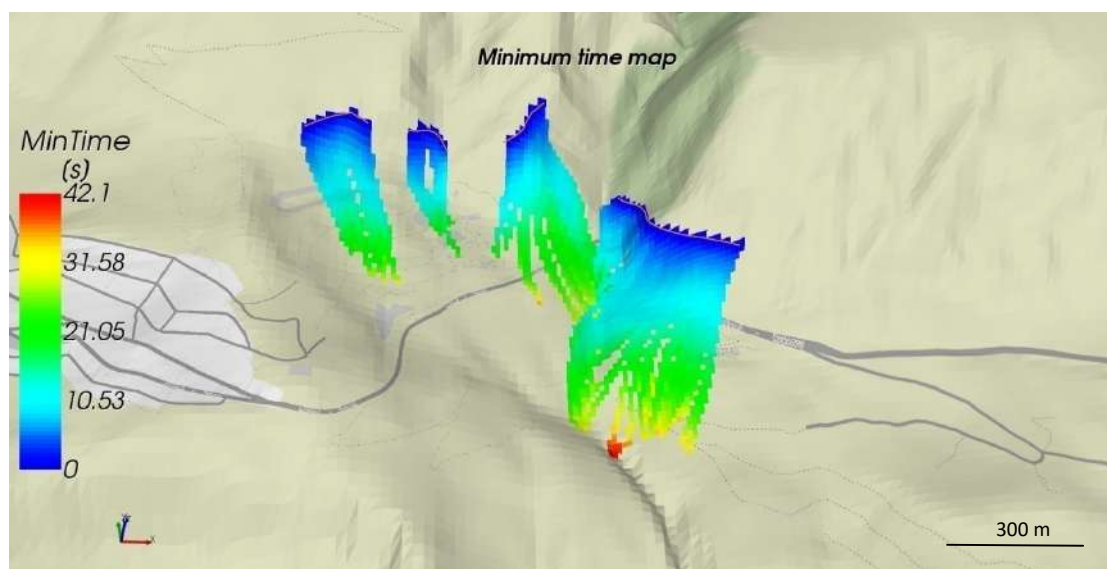
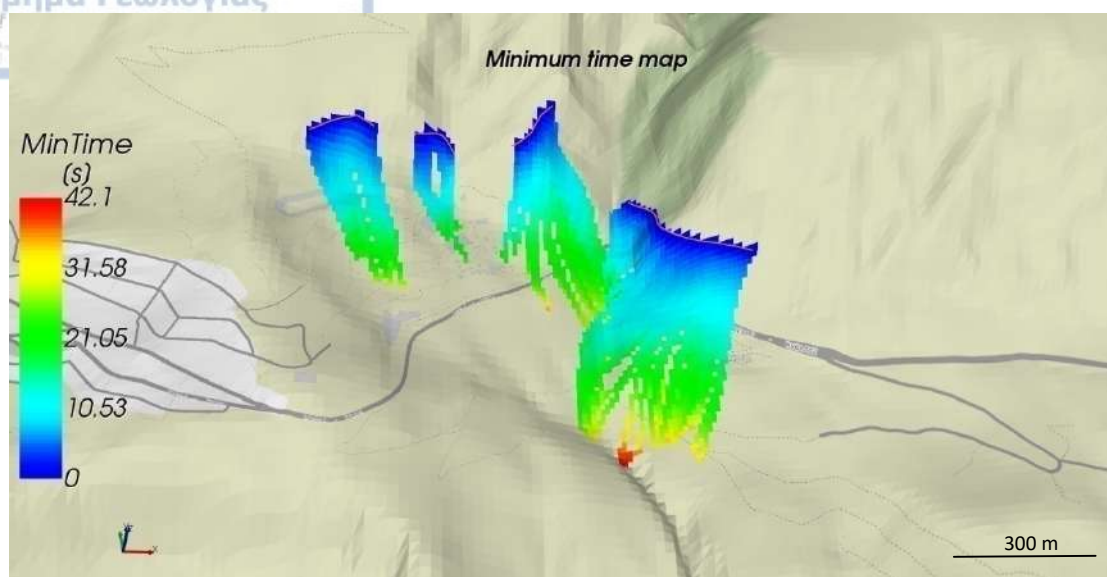
Εικ. 77. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση των σημείων τερματισμού των τροχιών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η χωρική κατανομή των σημείων τερματισμού των μπλοκ, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Πιθανότητα διάδοσης-P (Propag)



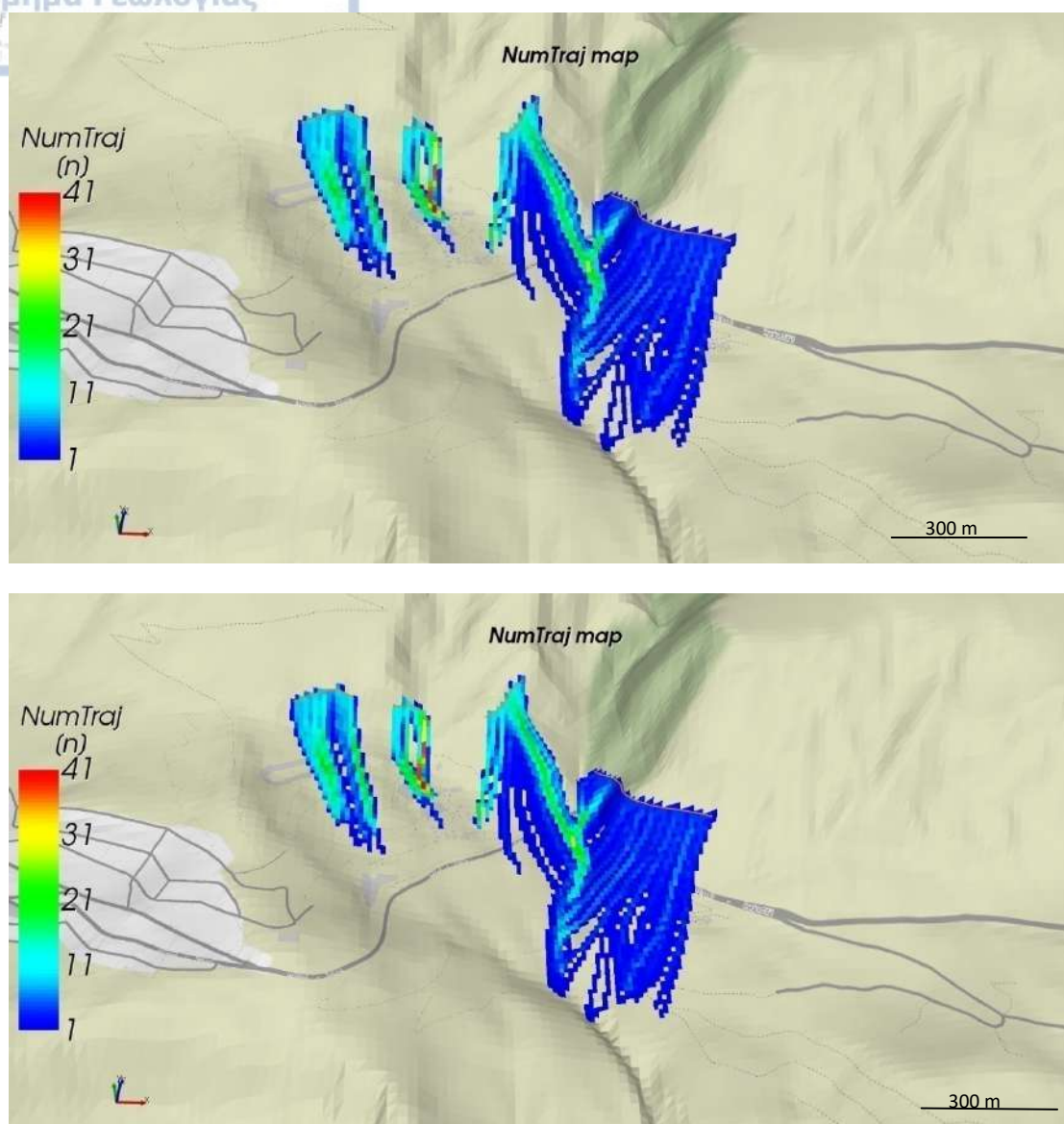
Εικ. 78. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της πιθανότητας διάδοσης-P (Propag) map, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η πιθανότητα διάδοσης των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Ελάχιστος χρόνος διαδρομής-Minimumtimemap (s)



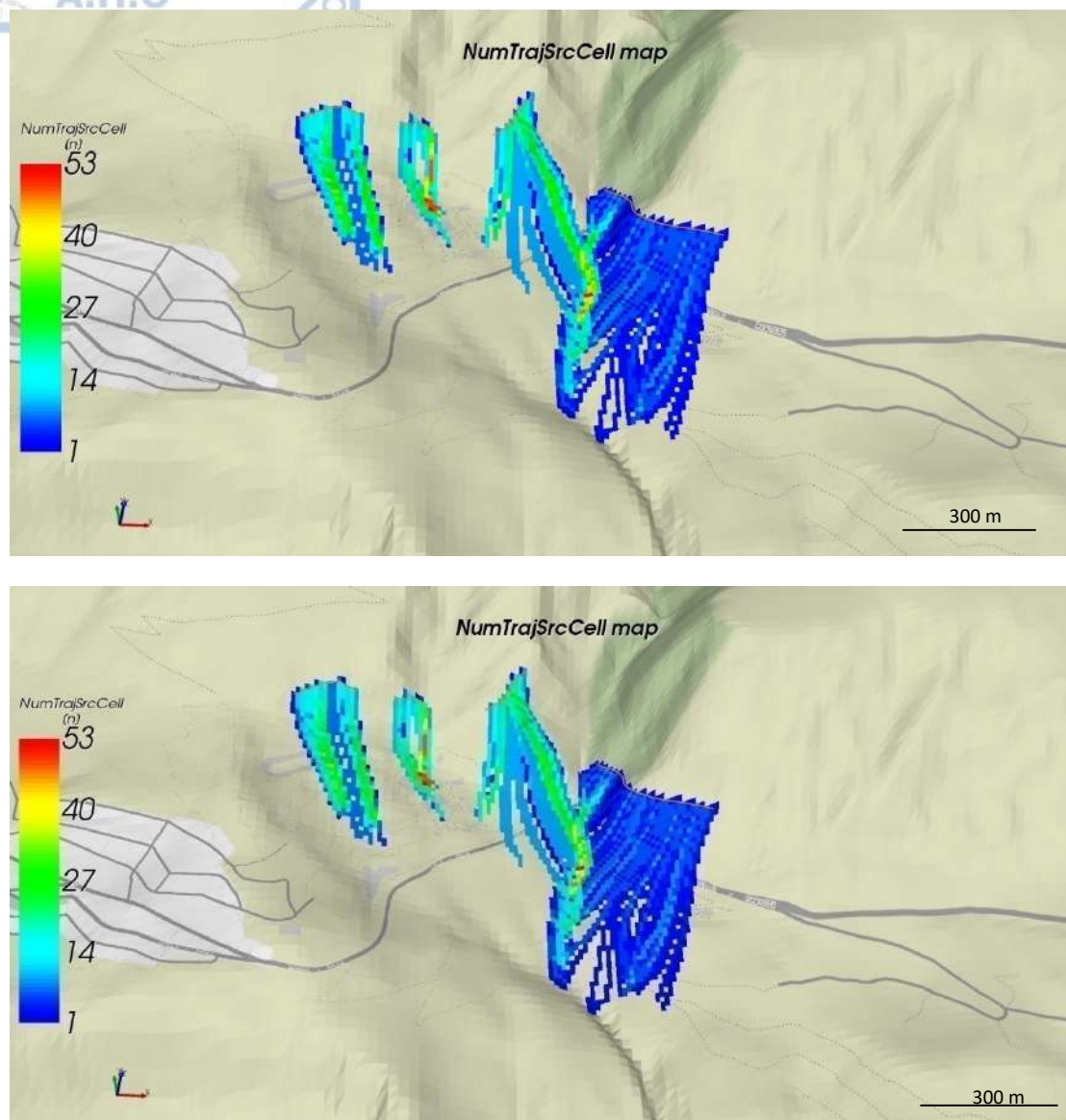
Εικ. 79. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του ελάχιστου χρόνου διαδρομής κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο ελάχιστος χρόνος διαδρομής των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Αριθμός τροχιών-NumTraj map



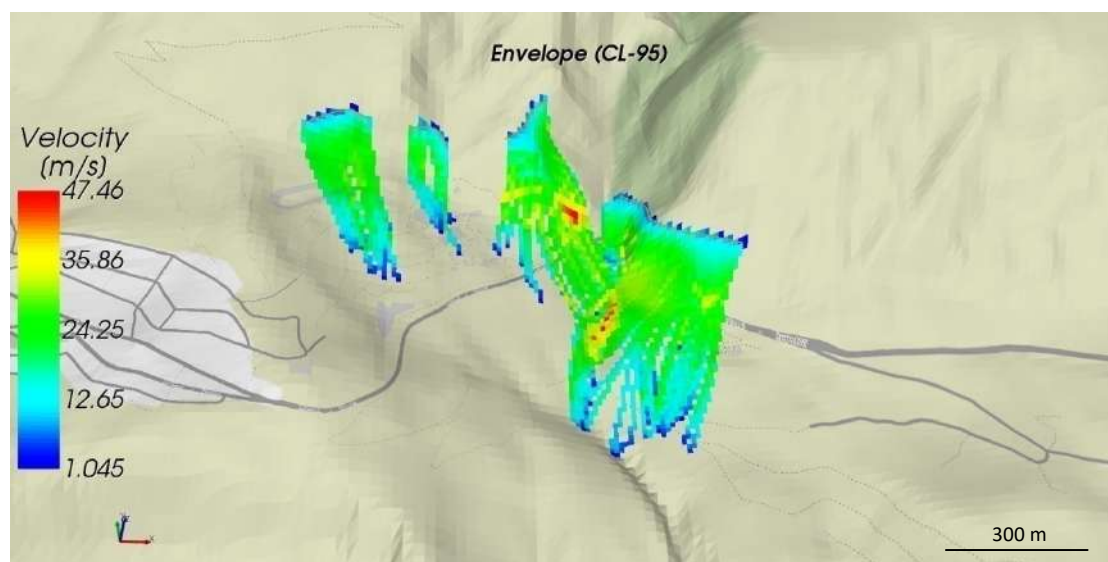
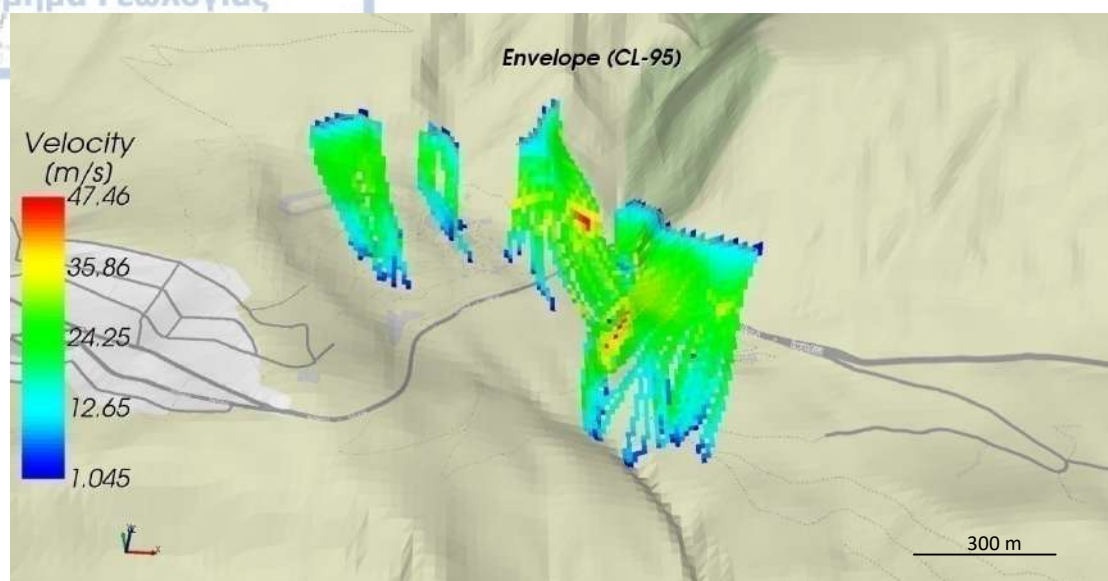
Εικ. 80. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του αριθμού των τροχιών κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο αριθμός των τροχιών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Συνολικός αριθμός τροχιών από τις πηγές πιθανής βραχοκατάπτωσης-
NumTrajSrcCell



Εικ. 81. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του συνολικού αριθμού των τροχιών, από τις ζώνες πιθανής βραχοκατάπτωσης κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο συνολικός αριθμός των τροχιών από τις πηγές ενεργοποίησης πιθανής αστοχίας, με μέση διάμετρο βραχιδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση ίση με διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Velocity-Ταχύτητα διάδοσης τροχιάς (m/sec)



Εικ. 82. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης της τροχιάς των βραχωδών τεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0$, 41 m/sec). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση της ταχύτητας με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο ίση με $1,3\text{m}$, $1,5\text{m}$, $1,3\text{m}$ και $1,5\text{m}$ για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

5.3.2.Αποτελέσματα της τροχομετρικής προσομοίωσης, με σεισμικές συνθήκες (PGV=0m/sec)και μέση διάμετρο βραχοτεμαχών d=1m και με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες τροχιακές αναλύσεις των πιθανών βραχοκαταπτώσεων, καθώς και οι χάρτες τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης των τεσσάρων ζωνών πιθανής βραχοκατάπτωσης με σεισμικές συνθήκες (PGV=0 m/sec) και μέση διάμετρο (d) για κάθε τέμαχος 1) ίση με 1m και 2) με μέση διάμετρο ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα. Παράλληλα, παρατίθενται οι παράμετροι εισαγωγής, όπως αυτές εισήχθησαν στο περιβάλλον διεπιφάνειας, του λογισμικού RocPro3D v.6.1, για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης στις τέσσερις θέσεις εκκίνησης (Εικ. 83 & 84).

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density: 0 [blocks/m]
☐ Blocks surfacic density: 0 [blocks/m²]
 Number of blocks: 0 [blocks/source]
 Total number of blocks: 400

Individual sources properties

Source Id: 0 Inversion (total number of sources = 4)
 Number of blocks: 100

Geometry of the blocks source

Base line projection: Horizontal
 Lineic
 Length (X-Y projection): 144.2 [m]

	X [m]	Y [m]
0	368796.47	4260270.67
1	368894.9	4260306.12
2	368932.44	4260299.83

Geometry of blocks

Shape: Sphere
 d: 1 [m]

Density of blocks

ρ : 2500 [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1 [m]	1
Volume	0.524 [m³]	0.524
m	1309 [kg]	1309
I	130.9 [kg.m²]	130.9
Δm	0 [%]	

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle: 0 [°]

Starting condition of blocks

☒ Absolute
 Vx: 0 [m/s]
 Vy: 0 [m/s]
 Vz: 0 [m/s]
 Vr: 0 [rad/s]

☐ Initial velocity
 Relative /local slope
 ||V||: 0 [m/s]
 Vr: 0 [rad/s]
 ΔVi : 0 [%]

☐ Initial falling height
 h: 1 [m]
 Δh : 0 [%]
☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²] ☐ Total number of blocks

Number of blocks [blocks/source]

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369232.68	4260272.41
1	369278.87	4260300.07
2	369325.75	4260349.12

Starting condition of blocks

☐ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔV_i [%]

☐ Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ) 1 [m]	1	1
Volume 0.524 [m³]	0.524	0.524
m 1309 [kg]	1309	1309
I 130.9 [kg.m²]	130.9	130.9
Δm 0 [%]		

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²] ☐ Total number of blocks

Number of blocks [blocks/source]

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369515.2	4260249.3
1	369567.45	4260177.15
2	369760.66	4260044.28

Starting condition of blocks

☐ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔV_i [%]

☐ Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ) 1 [m]	1	1
Volume 0.524 [m³]	0.524	0.524
m 1309 [kg]	1309	1309
I 130.9 [kg.m²]	130.9	130.9
Δm 0 [%]		

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369020.561	4260302.09
1	369065.491	4260311.08
2	369110.42	4260284.12

Starting condition of blocks

☐ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

Relative / local slope

Vr [rad/s]

ΔV_i [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ) 1 [m]	1 1	1 1
Volume 0.524 [m ³]	0.524 0.524	0.524 0.524
m 1309 [kg]	1309 1309	1309 1309
I 130.9 [kg.m ²]	130.9 130.9	130.9 130.9
Δm 0 [%]		

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Εικ. 83. Παράμετροι εισαγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3Dv.6.1, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$) και μέση διάμετρο (d) ίση με 1 m, όπου κάθε εικόνα 1, 2, 3 και 4 αντιστοιχεί στις 4 ζώνες (source id) πιθανής βραχόκατάπτωσης.

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	368796.47	4260270.67
1	368894.9	4260306.12
2	368932.44	4260299.83

Starting condition of blocks

☐ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1.3 [m]	1.3
Volume	1.15 [m ³]	1.15
m	2876 [kg]	2876
I	486 [kg.m ²]	486
Δm	0 [%]	

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

	X [m]	Y [m]
0	369232.68	4260272.41
1	369278.87	4260300.07
2	369325.75	4260349.12

Starting condition of blocks

☐ Absolute

Vx [m/s]

Vy [m/s]

Vz [m/s]

Vr [rad/s]

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

||V|| [m/s]

Vr [rad/s]

ΔVi [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1.5 [m]	1.5
Volume	1.767 [m ³]	1.767
m	4418 [kg]	4418
I	994 [kg.m ²]	994
Δm	0 [%]	

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1.3	1.3
Volume	1.15	1.15
m	2876	2876
I	486	486
Δm	0	0

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

Starting condition of blocks

☐ Absolute

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

ΔV_i [%]

Initial falling height

h [m]

Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

Blocks sources settings

Global sources properties

Blocks lineic density [blocks/m]

☐ Blocks surfacic density [blocks/m²]

Number of blocks [blocks/source]

Total number of blocks

Individual sources properties

Source Id Inversion ☐ (total number of sources = 4)

Number of blocks

Geometry of the blocks source

Base line projection

Lineic

Length (X-Y projection) [m]

Geometry of blocks

Shape

d [m]

Density of blocks

ρ [kg/m³]

Volume, Mass & Inertia

	Min	Max
d(equ)	1.5	1.5
Volume	1.767	1.767
m	4418	4418
I	994	994
Δm	0	0

Variability of rebound orientation at impacts

Deviation angle [°]

Starting condition of blocks

☐ Absolute

☐ Initial velocity

☐ Relative /local slope

ΔV_i [%]

Initial falling height

h [m]

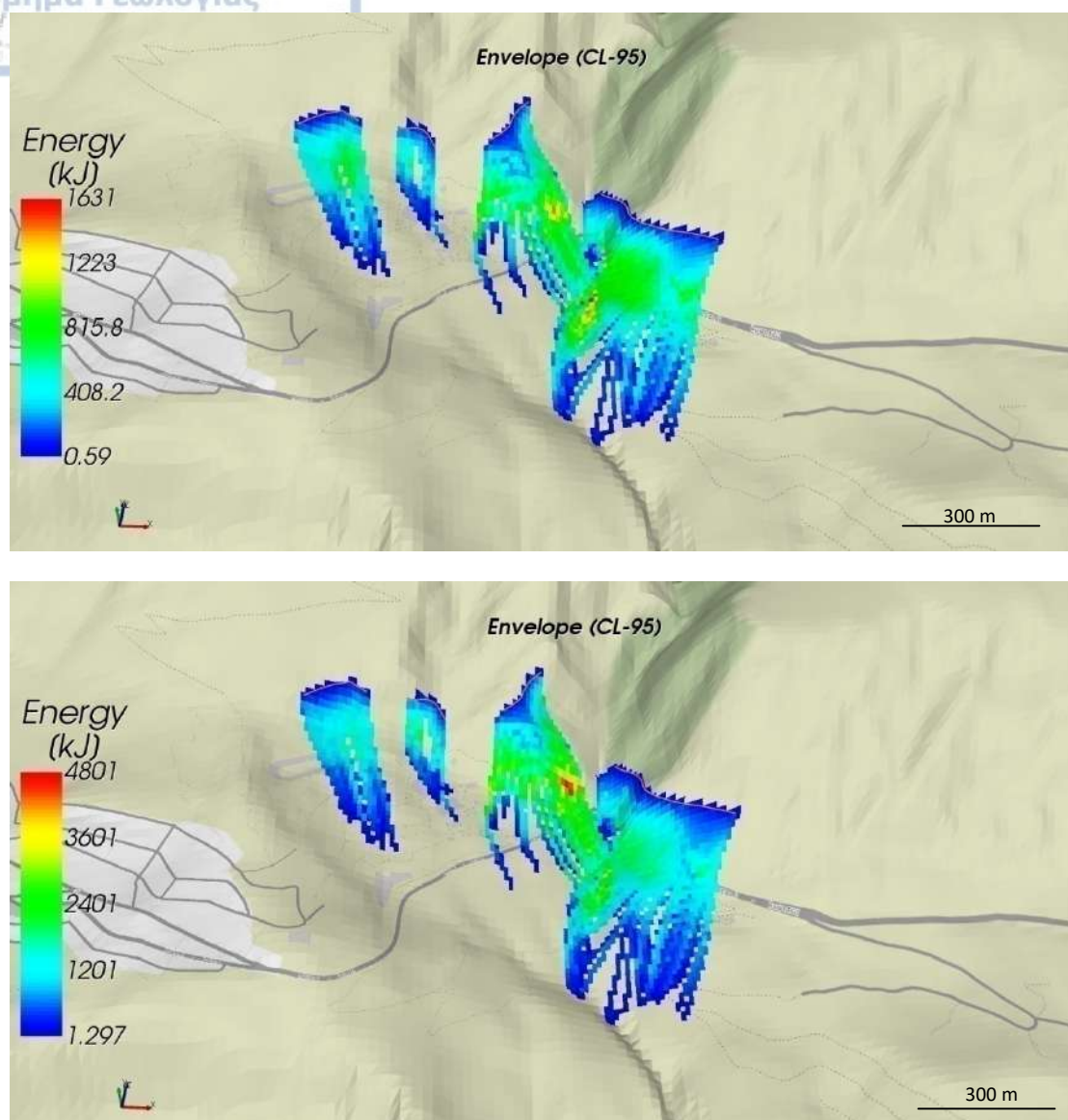
Δh [%]

☐ Mixed (initial velocity and falling height)

OK Cancel

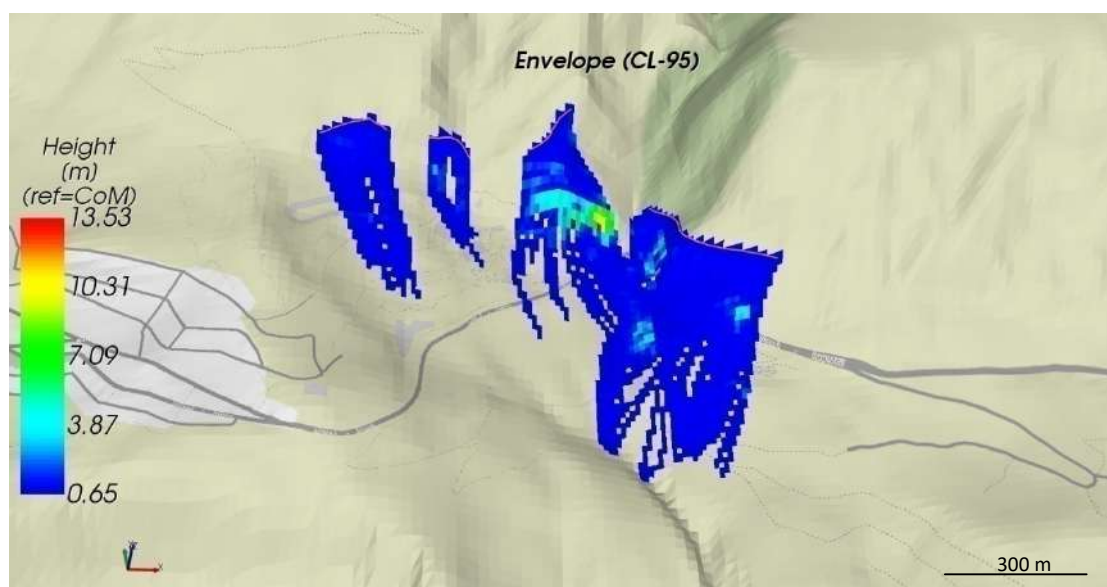
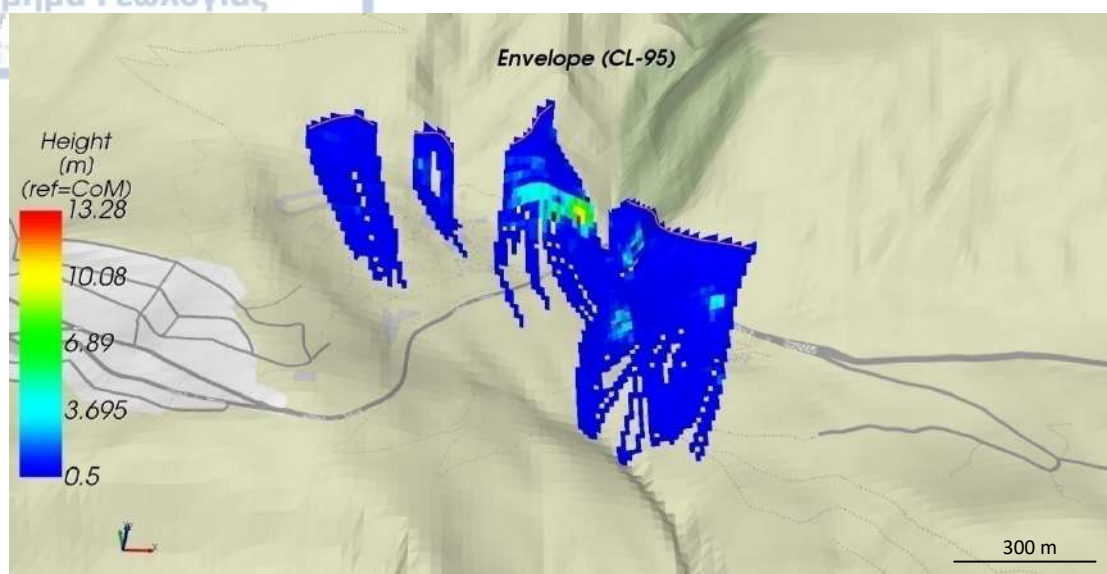
Εικ. 84. Παράμετροι εισαγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3Dv.6.1, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$) και μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα, όπου κάθε εικόνα 1, 2, 3 και 4 αντιστοιχεί στις 4 ζώνες (source id) πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Κινητική Ενέργεια-Energy (Kj)



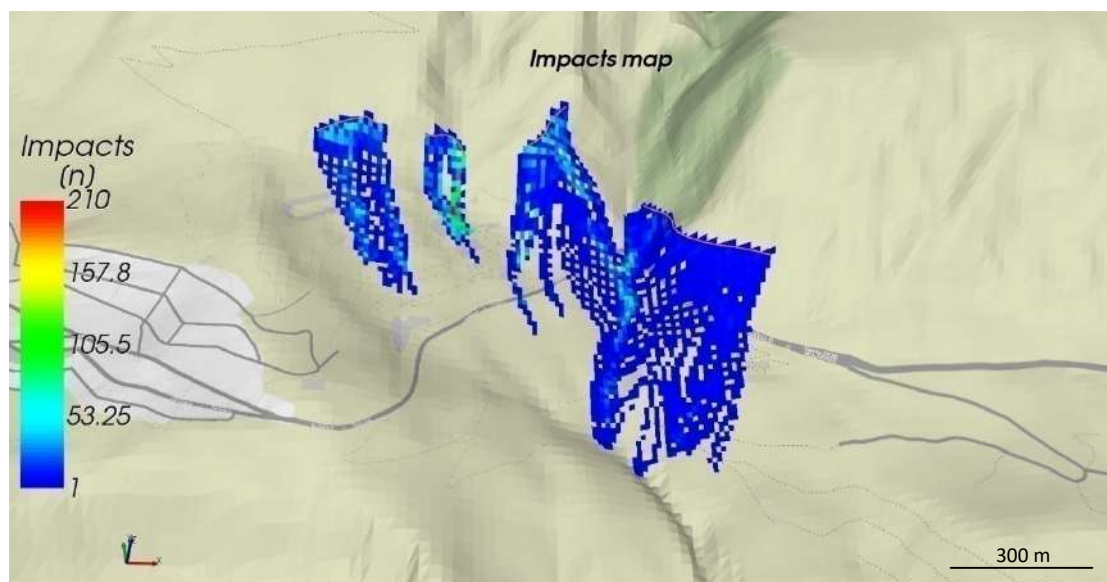
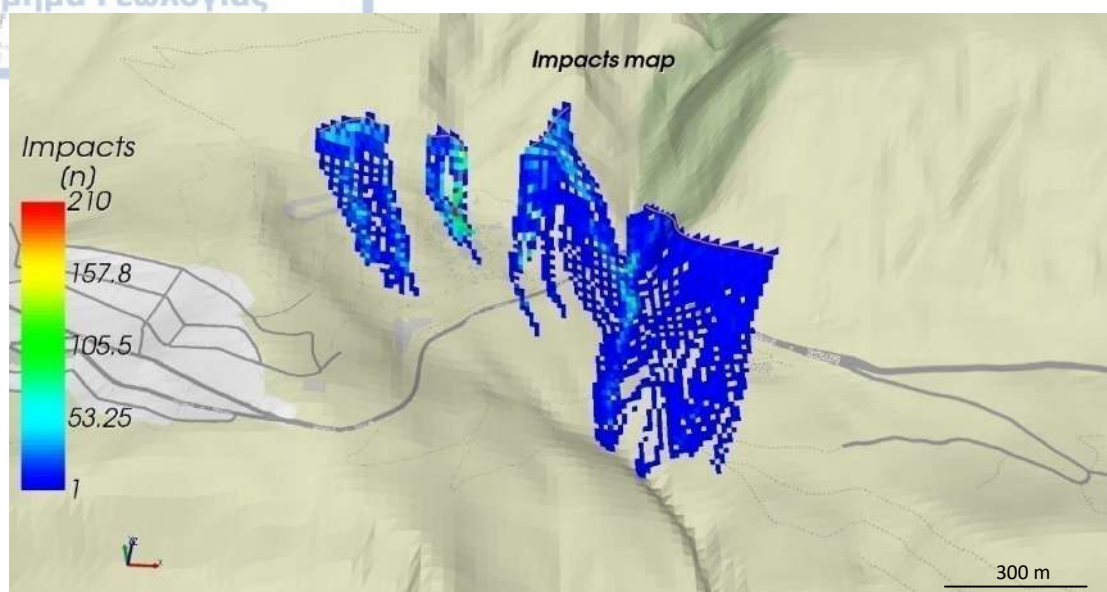
Εικ. 85. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της κινητικής ενέργειας στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση της ενέργειας με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχίων (d ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Υψος αναπήδησης-Height (m)



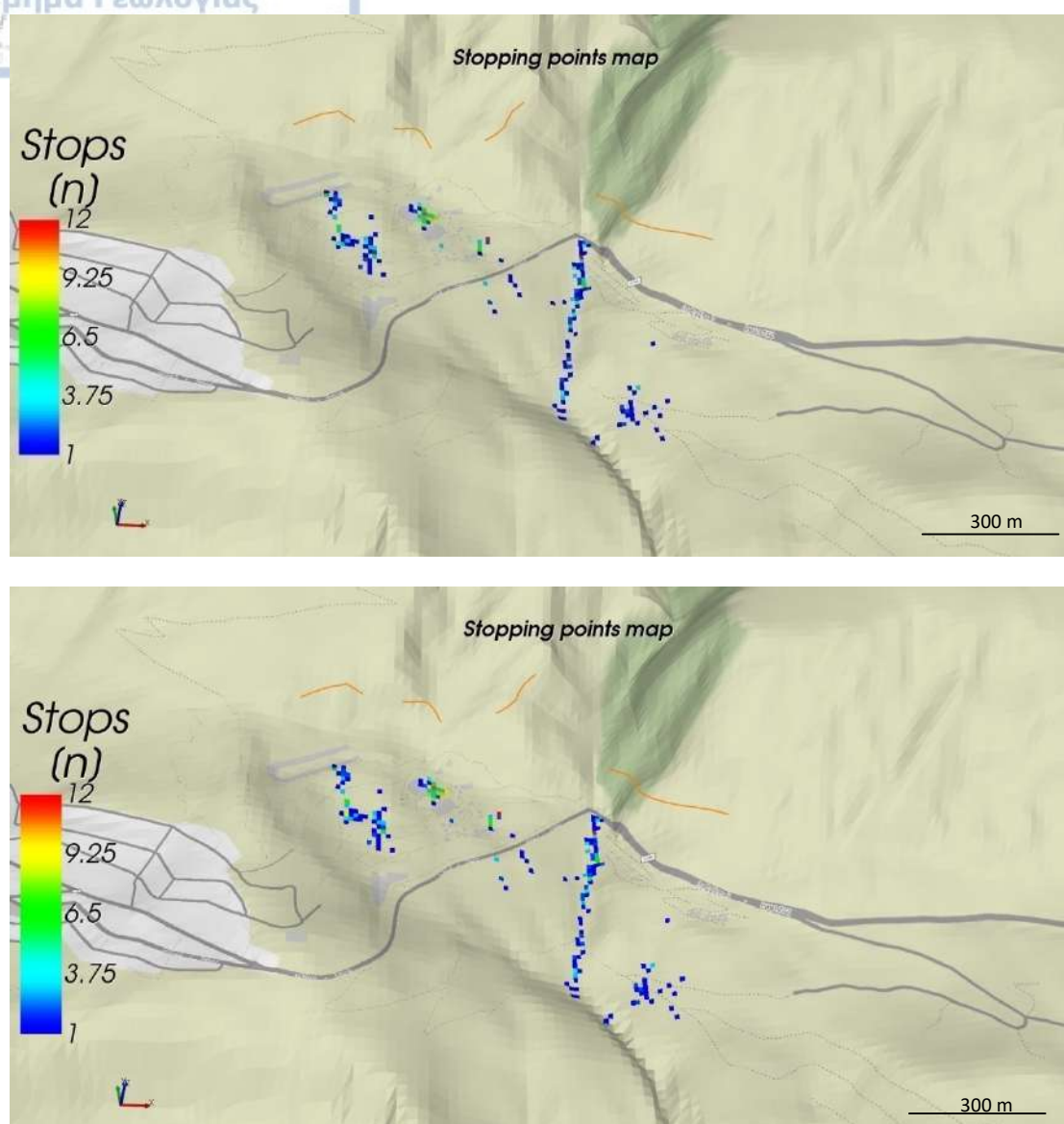
Εικ. 86. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του ύψους αναπήδησης των τεμαχών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση του ύψους αναπήδησης των βραχοτεμαχών, όπως αυτό καταγράφεται σε διάφορα σημεία των τροχιών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Προσκρούσεις-Impacts



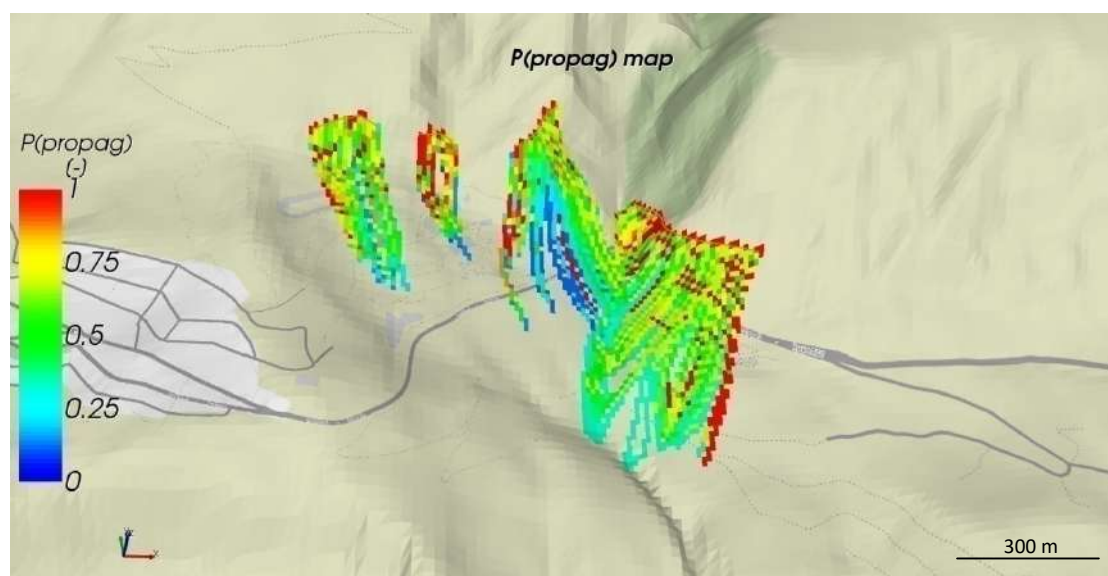
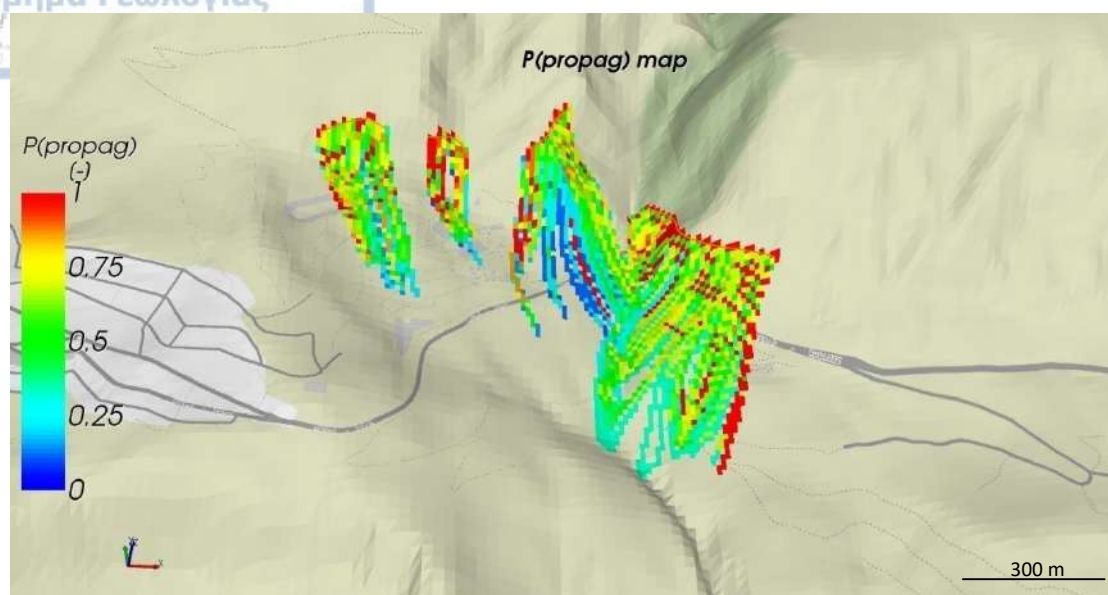
Εικ. 87. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση των επιπτώσεων που παρατηρούνται κατά μήκος των τροχιών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση των επιπτώσεων των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Σημεία τερματισμού των τροχιών-Stop points



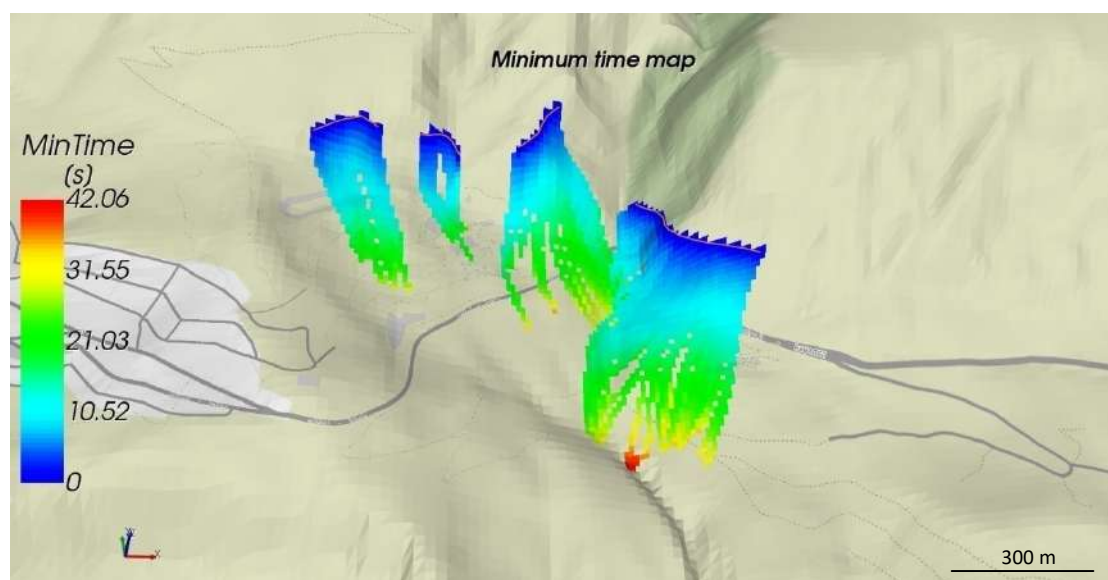
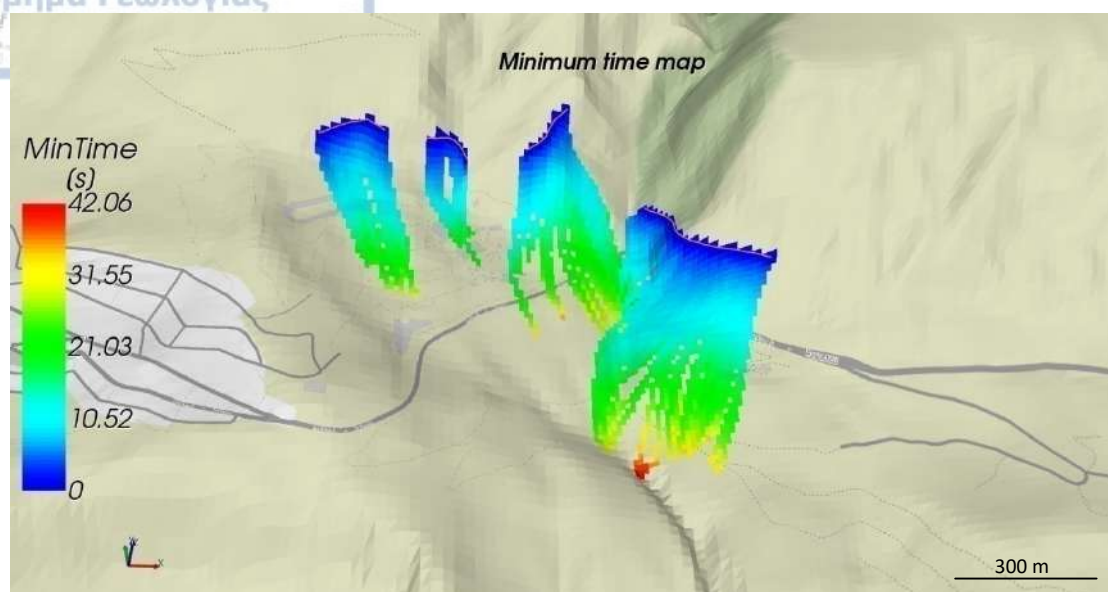
Εικ. 88. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση των σημείων τερματισμού των τροχιών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η χωρική κατανομή των σημείων τερματισμού των μπλοκ, με μέση διάμετρο (d) βραχωδών τεμαχών d ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Πιθανότητα διάδοσης-P (Propag)



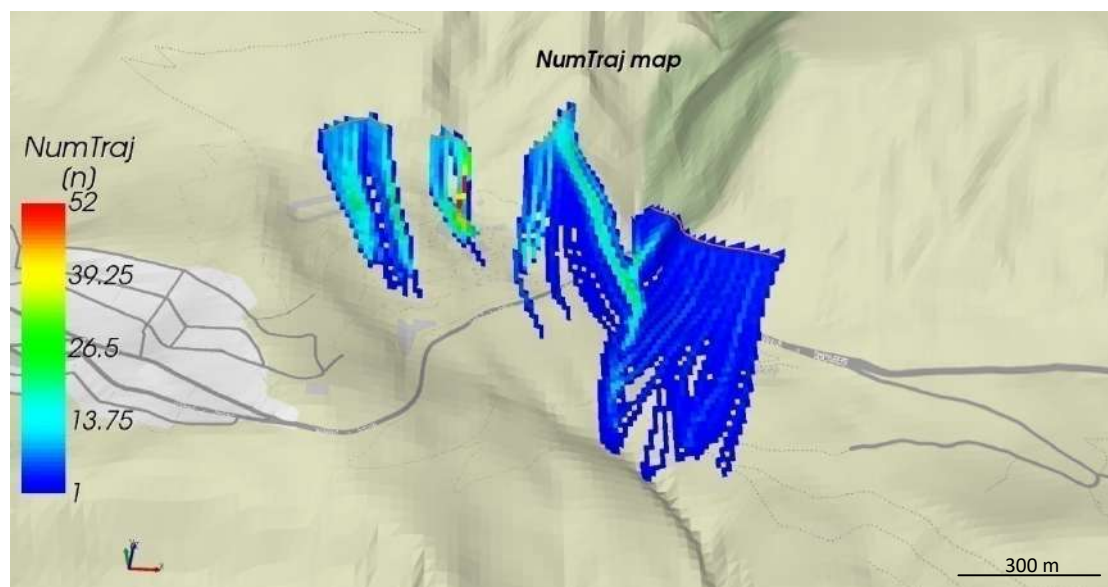
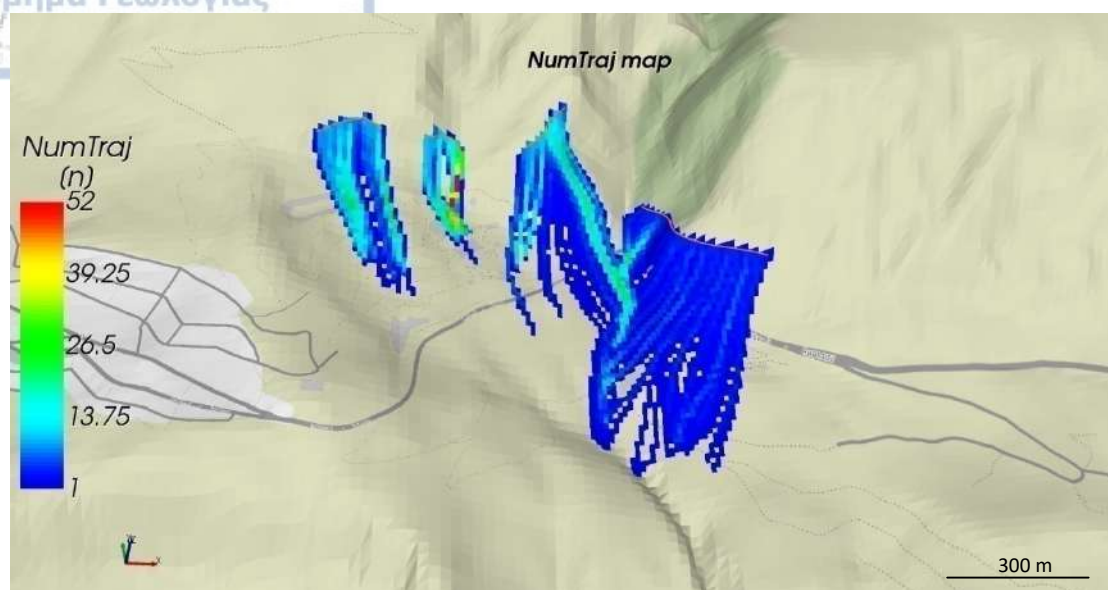
Εικ. 89. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της πιθανότητας διάδοσης-P (Propag) map, κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η πιθανότητα διάδοσης των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Ελάχιστος χρόνος διαδρομής-Minimum time map (s)



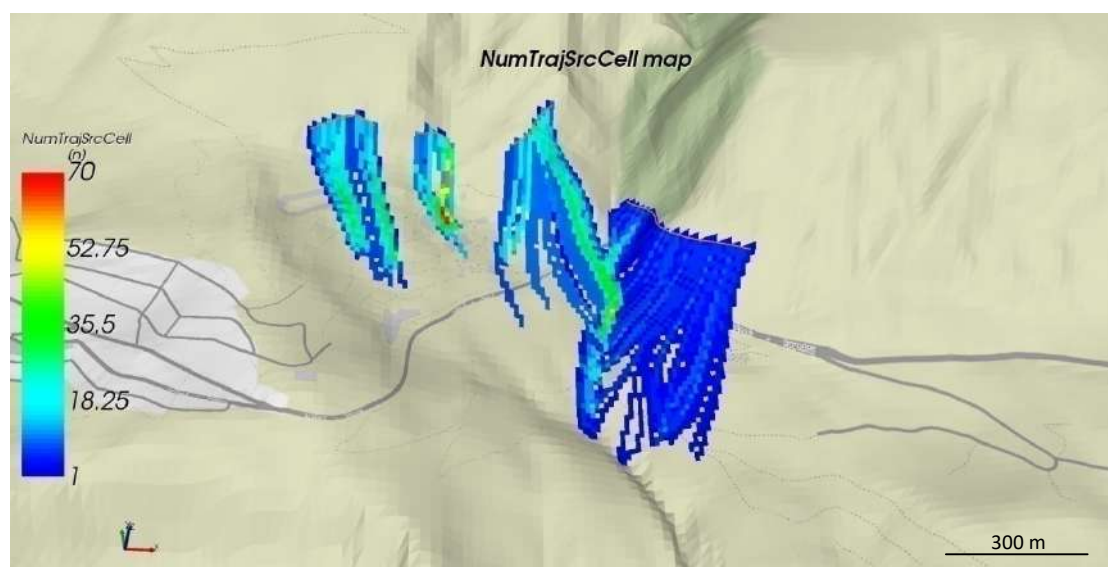
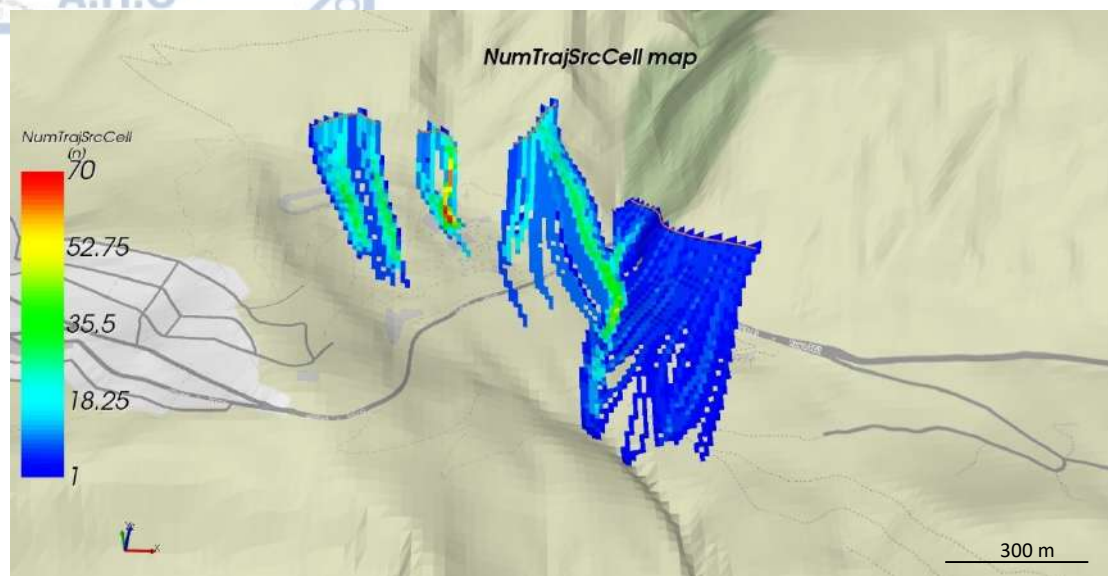
Εικ. 90. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του ελάχιστου χρόνου διαδρομής κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο ελάχιστος χρόνος διαδρομής των βραχοτεμαχών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Αριθμός τροχιών-NumTraj map



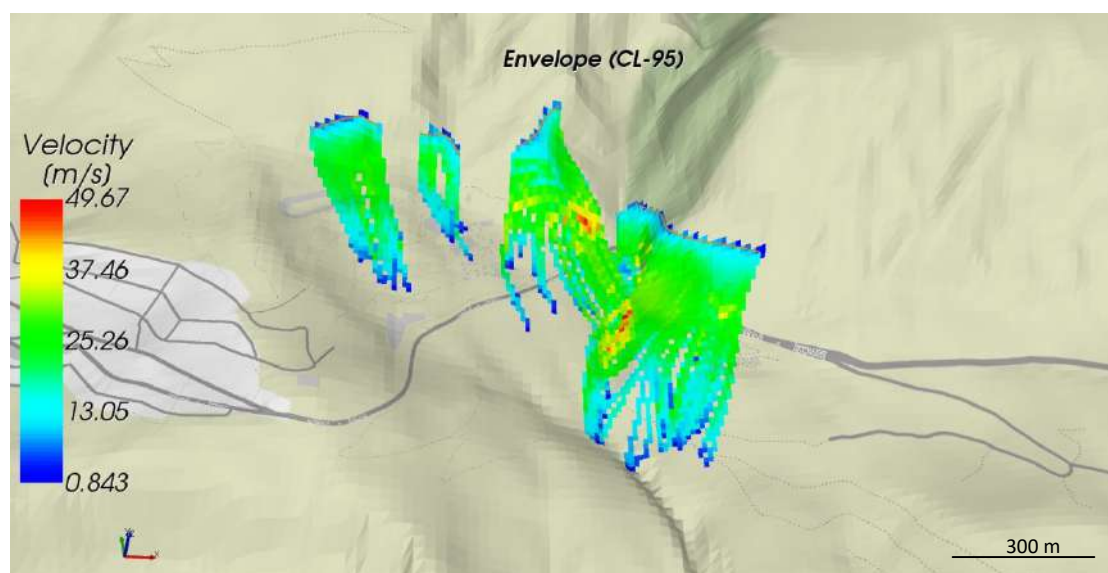
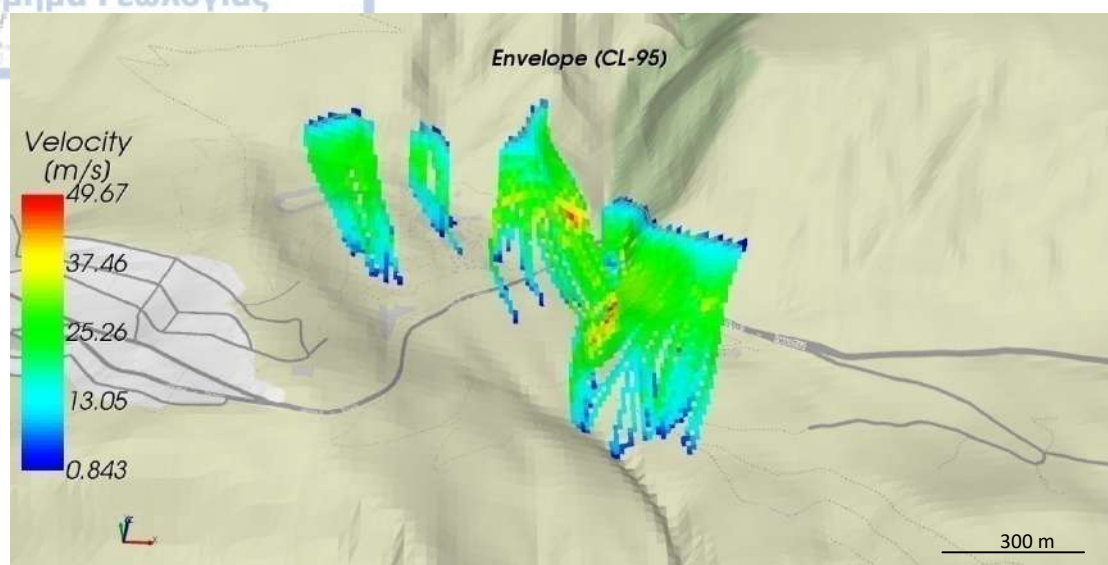
Εικ. 91. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του αριθμού των τροχιών κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο αριθμός των τροχιών, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Συνολικός αριθμός τροχιών από τις πηγές πιθανής βραχοκατάπτωσης-
NumTrajSrcCell



Εικ. 92. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση του συνολικού αριθμού των τροχιών, από τις ζώνες πιθανής βραχοκατάπτωσης κατά μήκος των τροχιών, στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0m/sec$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ο συνολικός αριθμός των τροχιών από τις πηγές ενεργοποίησης πιθανής αστοχίας, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Velocity-Ταχύτητα διάδοσης τροχιάς (m/sec)

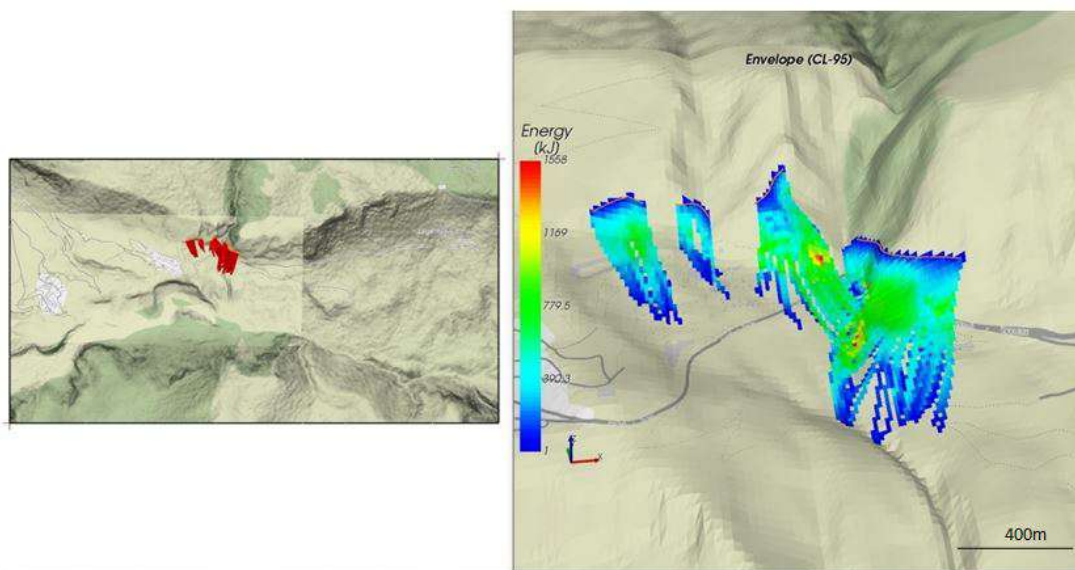


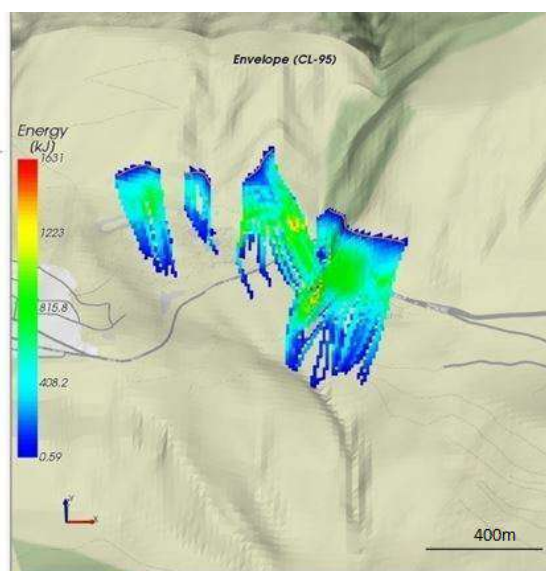
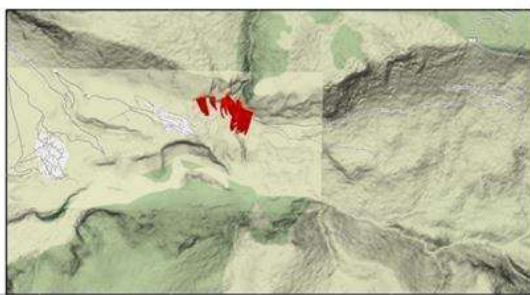
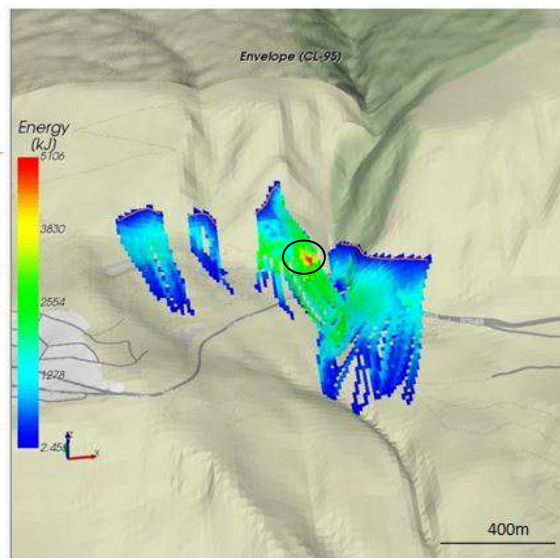
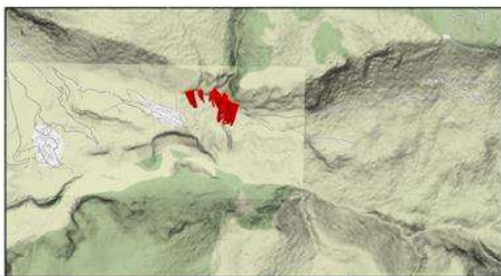
Εικ. 93. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της ταχύτητας διάδοσης της τροχιάς των βραχωδών τεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$). Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση της ταχύτητας, με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών (d) ίση με 1m και στην κάτω εικόνα με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

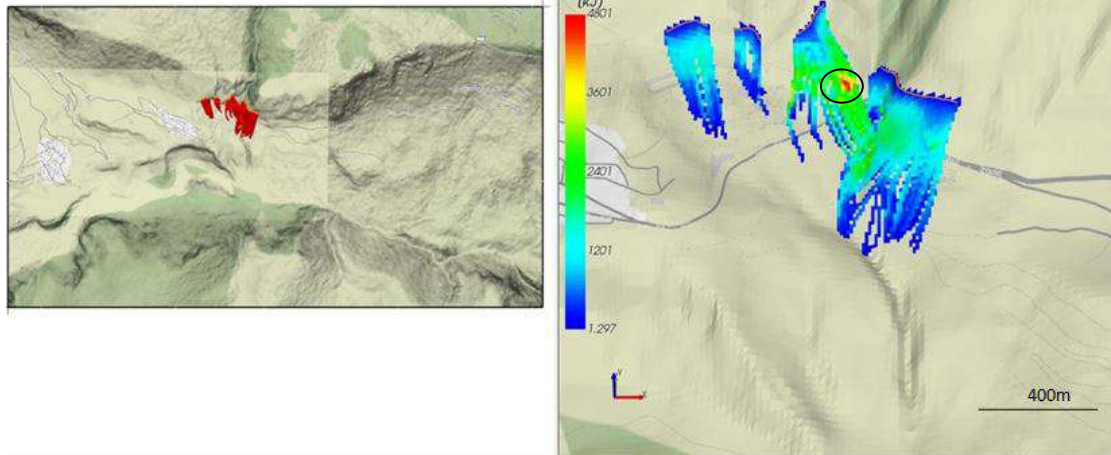
5.3.3 Σύγκριση των δύο περιπτώσεων προσομοιώσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια πραγματοποιήθηκαν οι τροχομετρικές προσομοιώσεις, σε τρισδιάστατη μορφή για όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες εναύσματος και με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1\text{m}$ και $d=1,3\text{m}$, $d=1,5\text{m}$, $d=1,3\text{m}$ και $d=1,5\text{m}$ αντίστοιχα για τις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα ακόλουθα:

1) Όπως φαίνεται στους τρισδιάστατους χάρτες χωρικής απεικόνισης της κινητικής ενέργειας που ακολουθούν (Εικ. 93), το μέγεθος (d) των βραχοτεμαχών διαφοροποιεί αρκετά τις τιμές της έντασης των βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή έρευνας, τόσο με σεισμικές, όσο και ασεισμικές συνθήκες. Οι υψηλές τιμές, τόσο με σεισμικές όσο και με ασεισμικές συνθήκες που καταγράφηκαν στην περίπτωση των βραχωδών τεμαχών με διάμετρο $d=1,3$, $d=1,5\text{m}$, $d=1,3$ και $d=1,5\text{m}$ είναι αναμενόμενες, καθώς η κινητική ενέργεια ενός σώματος αυξάνεται όσο αυξάνεται ο όγκος του σώματος και συνεπώς και η διάμετρός του (d).



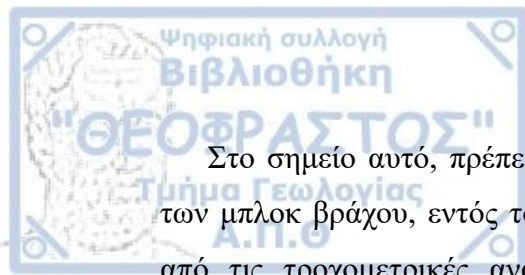




Εικ. 94. Τρισδιάστατοι χάρτες χωρικής απεικόνισης της κινητικής ενέργειας (kJ), που αναπτύσσουν τα μπλοκ κατά την τροχιά τους στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, οι οποίοι, με εμφάνιση από πάνω προς τα κάτω είναι οι εξής: με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα (εικόνες στα αριστερά) και με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο (d) ίση με 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα (εικόνες στα δεξιά). Στη δεξιά πλευρά κάθε χάρτη απεικονίζονται οι τροχιές και στις 4 θέσεις εκκίνησης αστοχίας, σε δισδιάστατη μορφή.

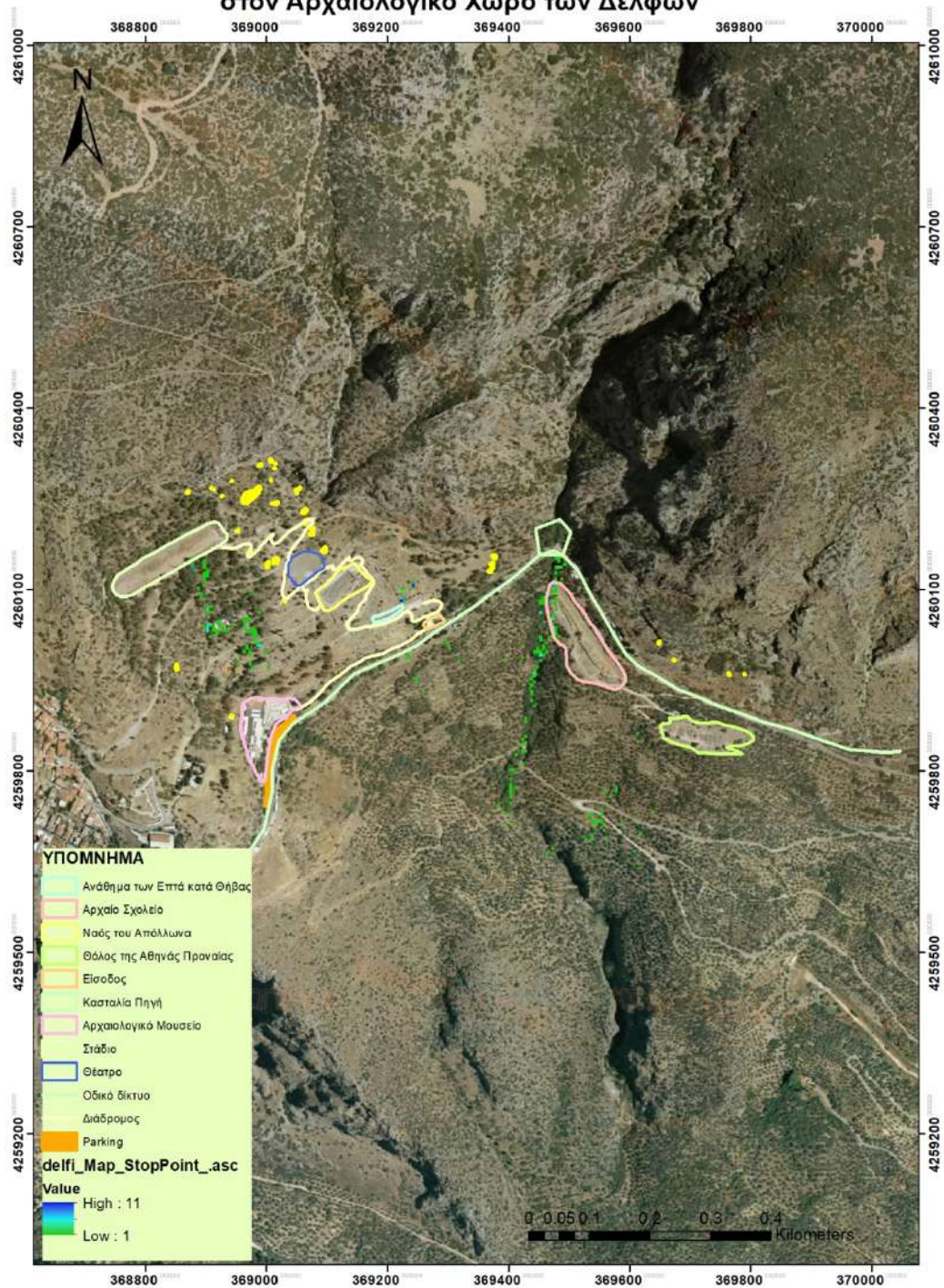
Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας, οι μεγαλύτερες τιμές της καταγράφηκαν στην περιοχή της Κασταλίας πηγής, τόσο με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και διάμετρο (d) ίση με 1,3m στην τρίτη ζώνη εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης (5106 kJ) (Εικ. 93, κυκλικό πλαίσιο με μαύρο χρώμα), όσο και με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0$ m/sec) και ίδια διάμετρο (d) τεμαχών, στην ίδια θέση εκκίνησης (4601 kJ).

2) Οι τροχιές των μπλοκ, καθώς και τα σημεία τερματισμού τους εμφανίζονται σε πιο πυκνή μορφή κυρίως στην περιοχή της Κασταλίας Πηγής, ενώ στο σύνολό τους και στις τέσσερις θέσεις παρατηρείται πως ακολουθούν μορφολογικά τη μισγάγγεια, δηλαδή τη γραμμή συνάντησης των δύο κλιτύων, στα χαμηλότερα υψόμετρα, όπου παρατηρείται συγκέντρωση των υδάτων.



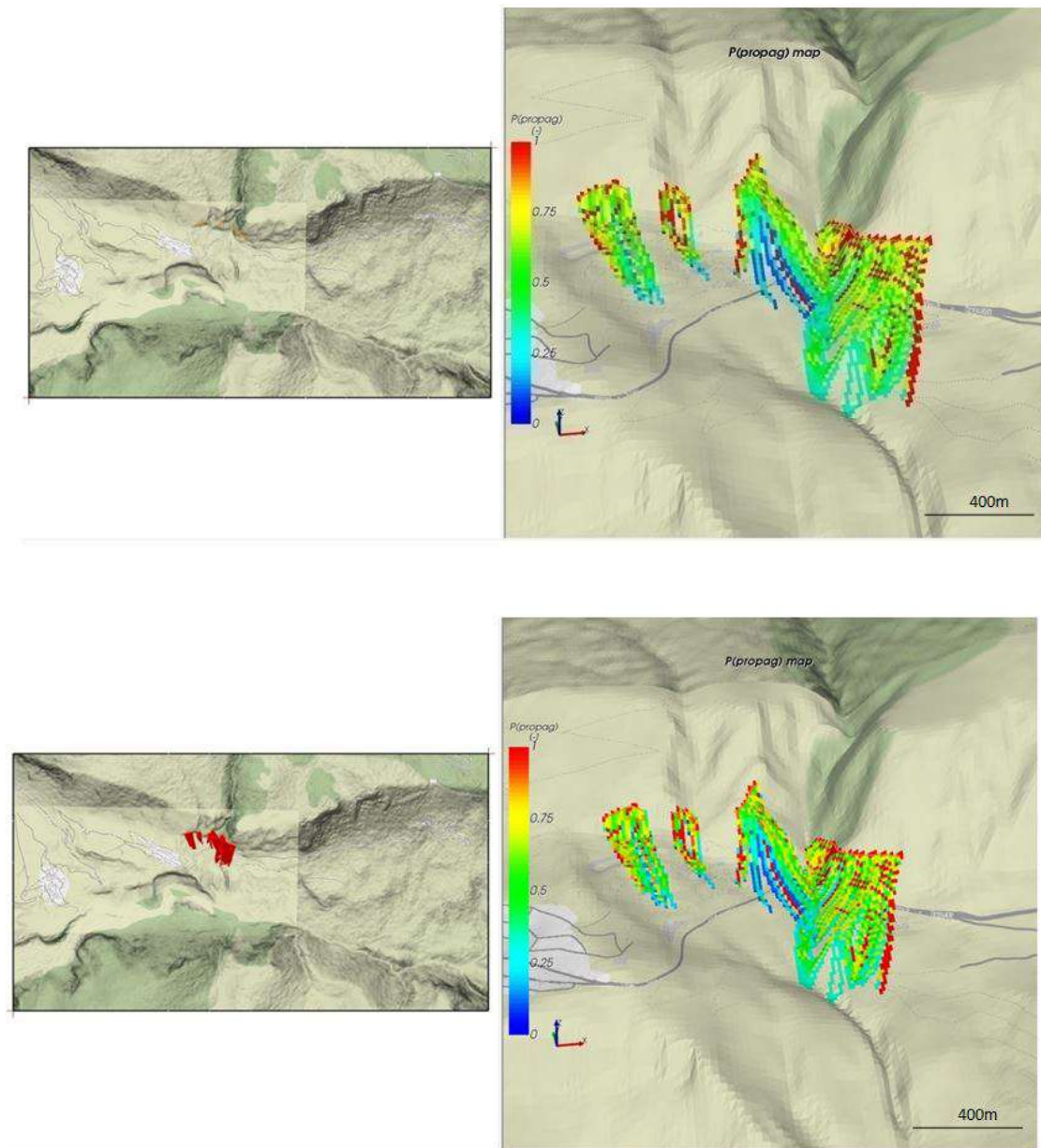
Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι τα σημεία τερματισμού (stop points) των μπλοκ βράχου, εντός του Αρχαιολογικού Χώρου, όπως αυτά προέκυψαν, μέσα από τις τροχομετρικές αναλύσεις, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D σε τρισδιάστατη απεικόνιση (3D) ταυτίζονται με τις θέσεις απόθεσης των αποκολλημένων βραχωδών τεμαχών (X, Y), έπειτα από τη χαρτογράφησή τους εντός του Μνημειακού Χώρου, με τη χρήση των τρισδιάστατων (3D) point clouds, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού Pix4Dmapper (Pix4D, Switzerland). Για την παρουσίαση των ανωτέρω δημιουργήθηκε ο χάρτης της Εικόνας 95, με τη χρήση του ArcMap, σε περιβάλλον ArcGIS.

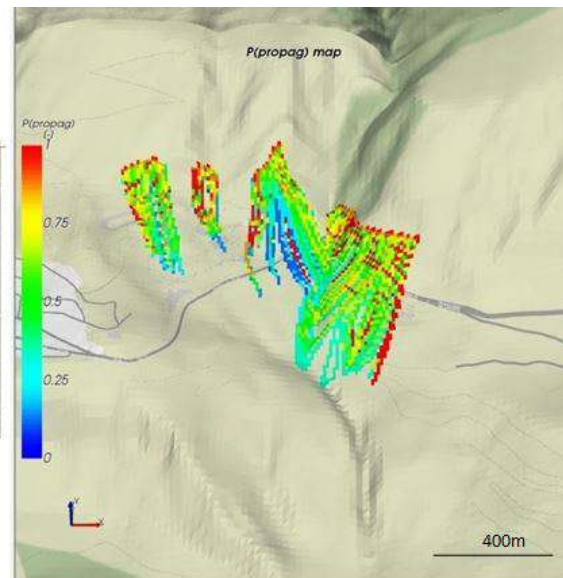
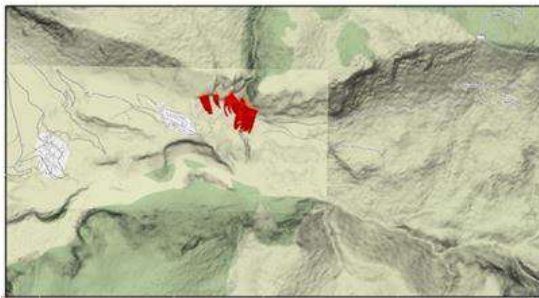
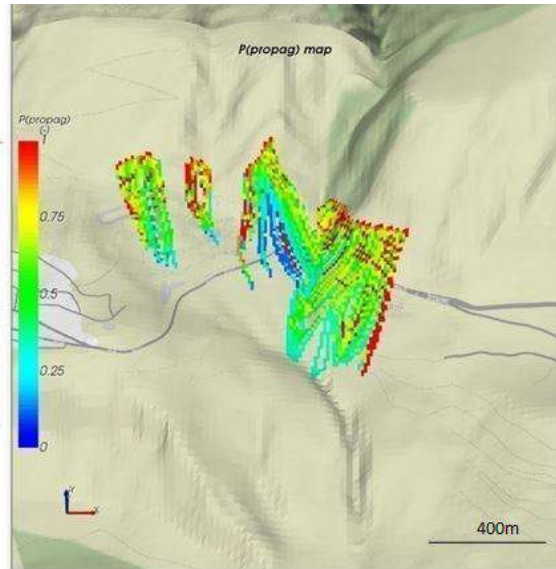
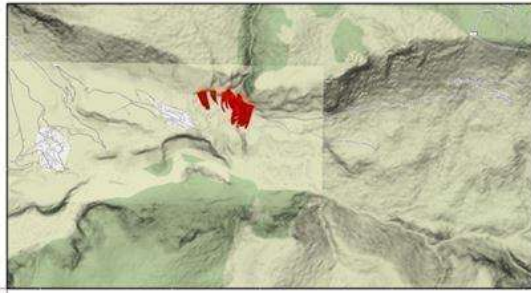
Συγκεντρωτικός χάρτης αποκολλημένων
βραχοτεμαχών και stop points
στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών



Εικ. 95. Χωρική κατανομή των αποκολλημένων όγκων, εντός του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών και των σημείων κατάληξης των βραχοτεμαχών (stop points), μετά από πιθανή βραχοκατάπτωση, με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και διάμετρο d ίση με 1.3 m, 1.5m, 1.3m & 1.5m, για κάθε μία από τις 4 θέσεις εκκίνησης πιθανής αστοχίας, αντίστοιχα, με τη χρήση του ArcMap, σε περιβάλλον ArcGIS.

3) Η πιθανότητα διάδοσης των τροχιών – P (propag) είναι αρκετά υψηλή, κυρίως στα σημεία ενδιαφέροντος στον Αρχαιολογικό Χώρο, με βάση το χρωματικό υπόμνημα των αντίστοιχων χαρτών και κυμαίνεται σε ποσοστό από 50 έως 75 % (Εικ. 96). Τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και αυτά από τους αντίστοιχους χάρτες της έντασης (kJ), αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία των χαρτών ποιοτικής αξιολόγησης του βαθμού διακινδύνευσης που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.





Εικ. 96. Τρισδιάστατοι χάρτες απεικόνισης της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών τεμαχών προς τα σημεία ενδιαφέροντος του Χώρου, με σειρά εμφάνισης από πάνω προς τα κάτω ως εξής: με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα και με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

4) Όσον αφορά στις επιπτώσεις από την τροχιακή πορεία που διαγράφουν τα βραχώδη τεμάχια στον Αρχαιολογικό Χώρο, με βάση τους τρισδιάστατους χάρτες χωρικής τους απεικόνισης προκύπτει ότι στην περίπτωση που υπάρχει έναυσμα σεισμού, με αρχική ταχύτητα $PGV=0,41 \text{ m/sec}$ και μέση διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα, αυτές εμφανίζουν μια μικρή αύξηση, σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$) και διάμετρο $d=1\text{m}$.

5) Από τη χωρική κατανομή του ύψους αναπήδησης και για τις δύο περιπτώσεις που ερευνήθηκαν, με σεισμικές και ασεισμικές συνθήκες και διαφορετικής διαμέτρου μπλοκ, συμπεραίνουμε ότι στην 3^η θέση-ζώνη εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή τη ζώνη τα βραχώδη πρηνή εμφανίζονται σε υψόμετρο περίπου 700 μέτρων και τα βραχώδη τεμάχια διαγράφουν μεγάλη υψομετρική απόσταση από τη στιγμή της αποκόλλησής τους από το πρηνές έως την κατάληξή τους στον Αρχαιολογικό Χώρο.

6) Σχετικά με τις τιμές της ταχύτητας διάδοσης (m/sec) των τροχιών, οι τιμές που καταγράφηκαν στους χάρτες χωρικής κατανομής της εμφανίζουν παρόμοια εικόνα διακύμανσης, τόσο με σεισμικές ($PGV=0,41\text{m/sec}$) όσο και με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0\text{m/sec}$). Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές ταχύτητας καταγράφηκαν στην περιοχή της Κασταλίας πηγής και στην κοιλάδα του Πλείστου, ίσες με 47,5 m/sec.

7) Τέλος, όπως φαίνεται στους χάρτες κατανομής του ελάχιστου χρόνου διαδρομής-Minimum time map (s) παρουσιάζεται παρόμοια εικόνα με έναυσμα σεισμού ($PGV=0,41\text{m/sec}$) ή χωρίς ($PGV=0\text{m/sec}$), με μέγιστες τιμές χρόνου διαδρομής, περίπου 21 sec εντός του Αρχαιολογικού Χώρου.

5.3.4 Τροχιακές αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού RocFall και ενεργειακό καθεστώς με τη χρήση των λογισμικών RocFall και ROCPRO3D v.6.1

Ταυτόχρονα με τις τροχιακές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ROCPRO3D v.6.1 πραγματοποιήθηκαν τροχομετρικές αναλύσεις και με τη χρήση του λογισμικού RocFall της εταιρίας RocScience. Η γεωμετρία και οι μηχανικές παράμετροι του βραχώδους πρανούς και των μπλοκ που δύνανται να αστοχήσουν αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στο λογισμικό και καθορίζουν την ανάλυση της τροχιάς των βραχοκαταπτώσεων (rockfall trajectographic analysis) (Agliardi and Crosta 2003, Guzzetti et al. 2002, 2003, 2004).

Με τον όρο γεωμετρικά χαρακτηριστικά καλούνται η τοπογραφία της περιοχής έρευνας, το σχήμα και ο όγκος των βραχωδών τεμαχών, οι θέσεις-ζώνες εκκίνησης μιας πιθανής βραχοκατάπτωσης, ο τύπος των γεωυλικών που συνιστούν το πρανές από όπου ενεργοποιούνται οι καταπτώσεις βράχων και τα στοιχεία που βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk), όπως αυτά προσδιορίστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Αντίστοιχα μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall ορίζονται και οι μηχανικές παράμετροι, οι οποίες ορίστηκαν ίδιες με το λογισμικό ROCPRO3D v.6.1, δηλαδή οι συντελεστές απομείωσης ενέργειας R_N και R_T (coefficients of restitution). Για να καταστεί δυνατή η προσομοίωση των βραχοκαταπτώσεων έπρεπε αρχικά να χαραχτούν οι αντιπροσωπευτικές διατομές κατά μήκος των πρανών της περιοχής έρευνας.

Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν οι πιο αντιπροσωπευτικές διατομές και από τις τέσσερις θέσεις-πηγές ενεργοποίησης πιθανής αστοχίας, όπως ακριβώς ορίστηκαν και στο λογισμικό ROCPRO3D v.6.1, αντίστοιχα. Αρχικά, μέσω του ArcMap, μέσα στο περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcGIS) δημιουργήθηκαν οι αντιπροσωπευτικές διατομές (cross sections), για κάθε ζώνη-πηγή (source) ενεργοποίησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM του Εθνικού Κτηματολογίου & Χαρτογράφησης, με χωρική ανάλυση 5 μέτρα (m).

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η χάραξη των διατομών κάθετα στις ισουψείς και δημιουργήθηκαν τα προφίλ - πλάγιες όψεις αυτών των διατομών, τα οποία στη συνέχεια εισήχθησαν στο λογισμικό Rocfall της Rocscience, όπου με την εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων, όπως ήδη προαναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της συνολικής κινητικής ενέργειας για κάθε θέση ξεχωριστά. Η διαδικασία

αυτή ακολουθήθηκε και για τις τέσσερις θέσεις – πηγές στο βραχώδες πρηνές και τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν στους διδιάστατους χάρτες που ακολουθούν.

Από αυτή την ανάλυση κατέστη, επομένως, δυνατός ο προσδιορισμός και η εκτίμηση του ενεργειακού καθεστώτος των δυνητικών βραχοκαταπτώσεων, από τις πιθανές θέσεις-ζώνες αστοχίας. Οι διατομές για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης και τα αποτελέσματά τους αποτυπώνονται σε διαγράμματα διακύμανσης των τιμών της κινητικής ενέργειας, παράλληλα με τους αντίστοιχους χάρτες τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης της έντασης (kJ) των βραχοκαταπτώσεων, όπως αυτοί δημιουργήθηκαν μέσα από το λογισμικό ROCPRO3D v.6.1.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που ακολουθούν, η κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την τροχιά των βραχωδών τεμαχίων, στις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, παρουσιάζει παρόμοιες τιμές (kJ), τόσο από την προσομοίωση μέσα στο λογισμικό Rocfall της Rocscience, όσο και με την τροχομετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσα στο λογισμικό ROCPRO3D v.6.1.

Συγκεκριμένα, στη **Θέση 1**, οι μέγιστες τιμές της κινητικής ενέργειας που καταγράφηκαν από την τρισδιάστατη τροχιακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ROCPRO3D v.6.1 ισούνται με **1012 kJ**, ενώ αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές έντασης, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο διάγραμμα συνολικής κινητικής ενέργειας, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Rocfall της Rocscience είναι της τάξης περίπου των **1100 kJ**.

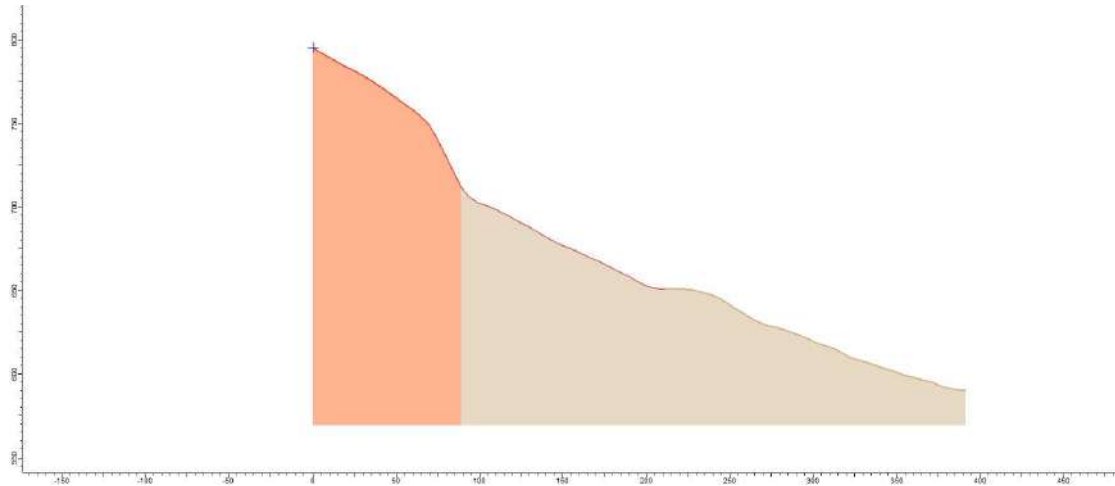
Στη **Θέση 2**, οι μέγιστες τιμές της κινητικής ενέργειας μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού ROCPRO3D v.6.1 είναι ίσες με **1247 kJ**, περίπου, ενώ οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές ενέργειας, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Rocfall της Rocscience ισούνται περίπου με **1230 kJ**.

Στη **Θέση 3**, οι μέγιστες τιμές της κινητικής ενέργειας μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού ROCPRO3D v.6.1 είναι της τάξης των **2006 kJ**, ενώ αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές έντασης, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο διάγραμμα συνολικής κινητικής ενέργειας, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Rocfall της Rocscience είναι της τάξης περίπου των **2100 kJ**.

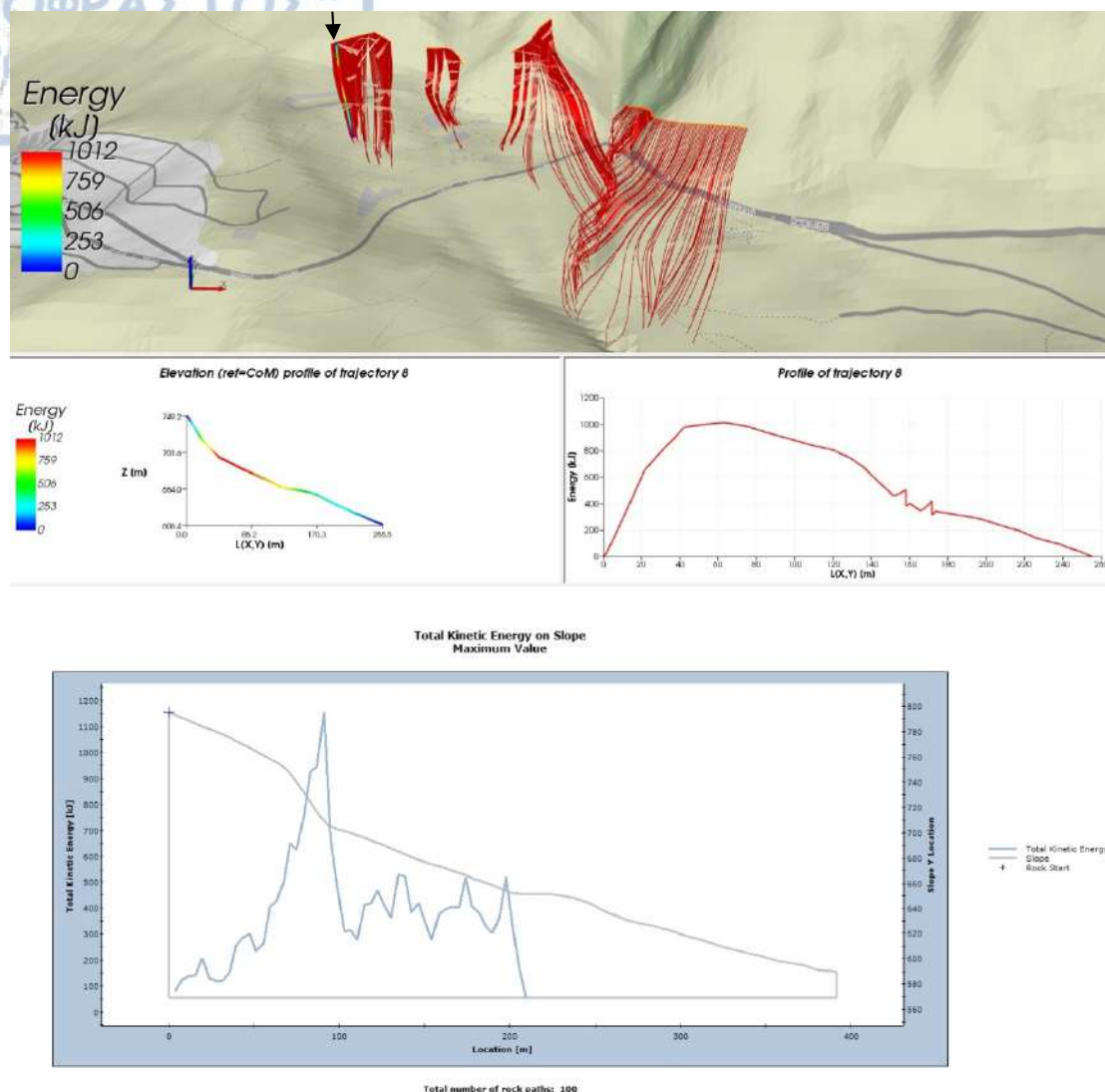
Τέλος, στη Θέση 4, ομοίως, οι μέγιστες τιμές της κινητικής ενέργειας μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού ROCPRO3D v.6.1 καταγράφηκαν ίσες με 2354 kJ,

ενώ αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές κινητικής ενέργειας, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Rocfall της Rocscience ισούνται περίπου με **2100 kJ**.

ΘΕΣΗ 1



Εικ. 97. Διατομή 1^{ης} Θέσης εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης μέσα στο λογισμικό RocFall της Rocscience. Η θέση είναι η ίδια, με αυτή που εισήχθη στο λογισμικό RocPro3Dv.6.1 για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης.

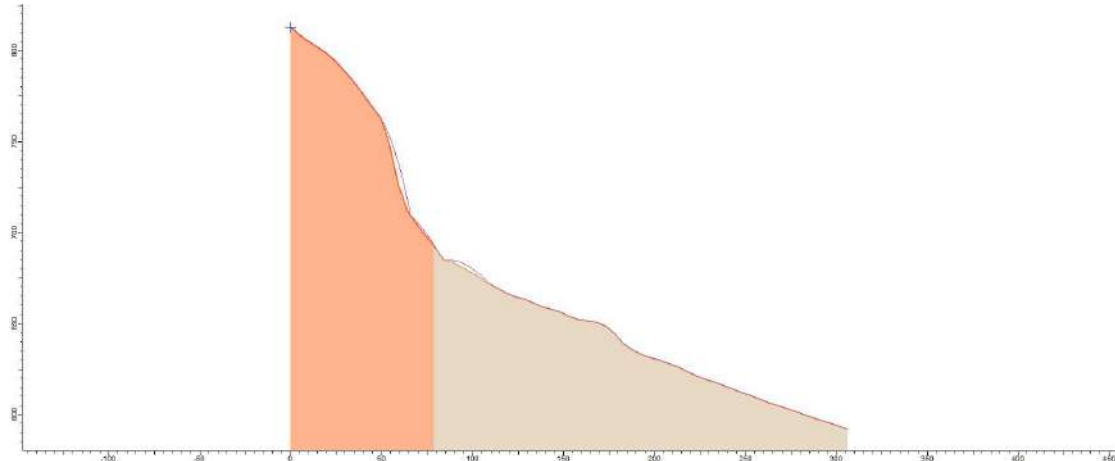


Εικ. 98. Διακύμανση της συνολικής κινητικής ενέργειας κατά μήκος της αντιπροσωπευτικής τροχιάς στη **Θέση 1** (επάνω εικόνα), μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1. Διάγραμμα διακύμανσης της συνολικής έντασης (kJ), όπως δημιουργήθηκε μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (κάτω εικόνα), της διατομής που δημιουργήθηκε και προηγήθηκε της ανάλυσης.

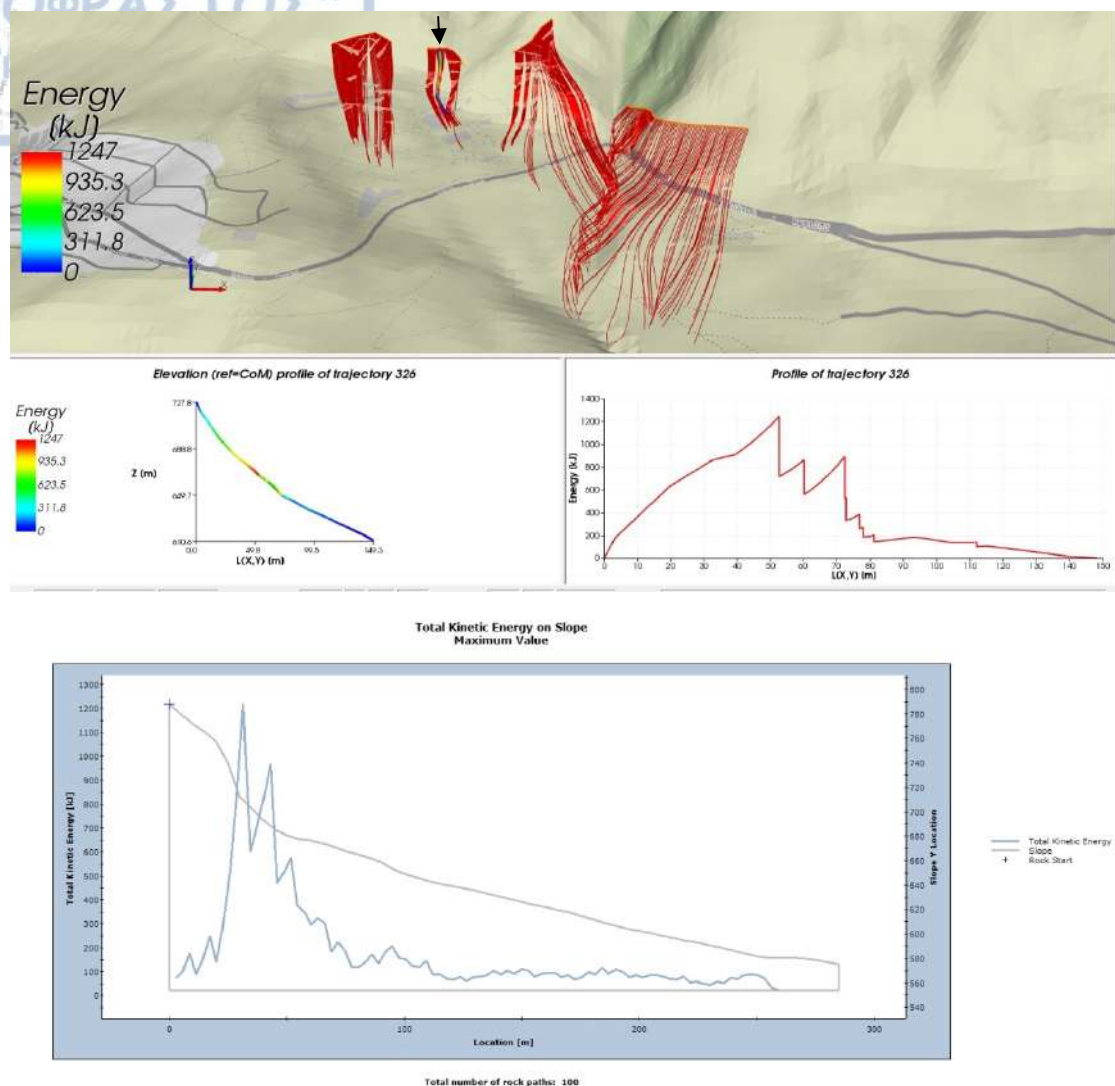
Όπως φαίνεται στο προφίλ της επιλεγμένης τροχιάς (Εικ. 98, πάνω αριστερή εικόνα), όπως δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του RocPro3D v.6.1, τα βραχοτεμάχια, αναπτύσσουν τις μέγιστες τιμές κινητικής ενέργειας (kJ) (κόκκινο χρώμα), κατά την πρόσκρουσή τους στον Αρχαιολογικό Χώρο, από το υψόμετρο των 700 μέτρων, έως τα 650 μέτρα (m), περίπου. Από το σημείο αυτό, η κινητική τους ενέργεια αρχίζει και μειώνεται (γαλάζιο χρώμα στο υπόμνημα), έως ότου σταματήσουν την πορεία τους (μπλε χρώμα), σε υψόμετρο, περίπου 600 μέτρων. Η παραπάνω περιγραφή συνάδει με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας, όπως αποτυπώθηκε στο διάγραμμα

κατανομής της, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (Εικ. 98, κάτω εικόνα).

ΘΕΣΗ 2



Εικ. 99. Διατομή 2^{ης} Θέσης εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης μέσα στο λογισμικό RocFall της Rocscience. Η θέση είναι η ίδια, με αυτή που εισήχθη στο λογισμικό RocPro3Dv.6.1 για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης.

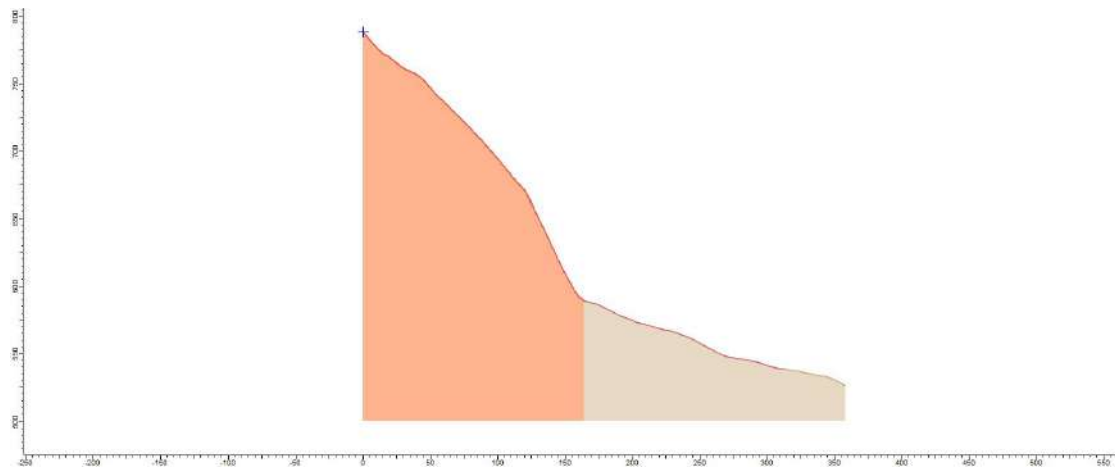


Εικ. 100. Διακύμανση της συνολικής κινητικής ενέργειας κατά μήκος της αντιπροσωπευτικής τροχιάς στη **Θέση 2** (επάνω εικόνα), μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1. Διάγραμμα διακύμανσης της συνολικής έντασης (kJ), όπως δημιουργήθηκε μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (κάτω εικόνα), της διατομής που δημιουργήθηκε και προηγήθηκε της ανάλυσης.

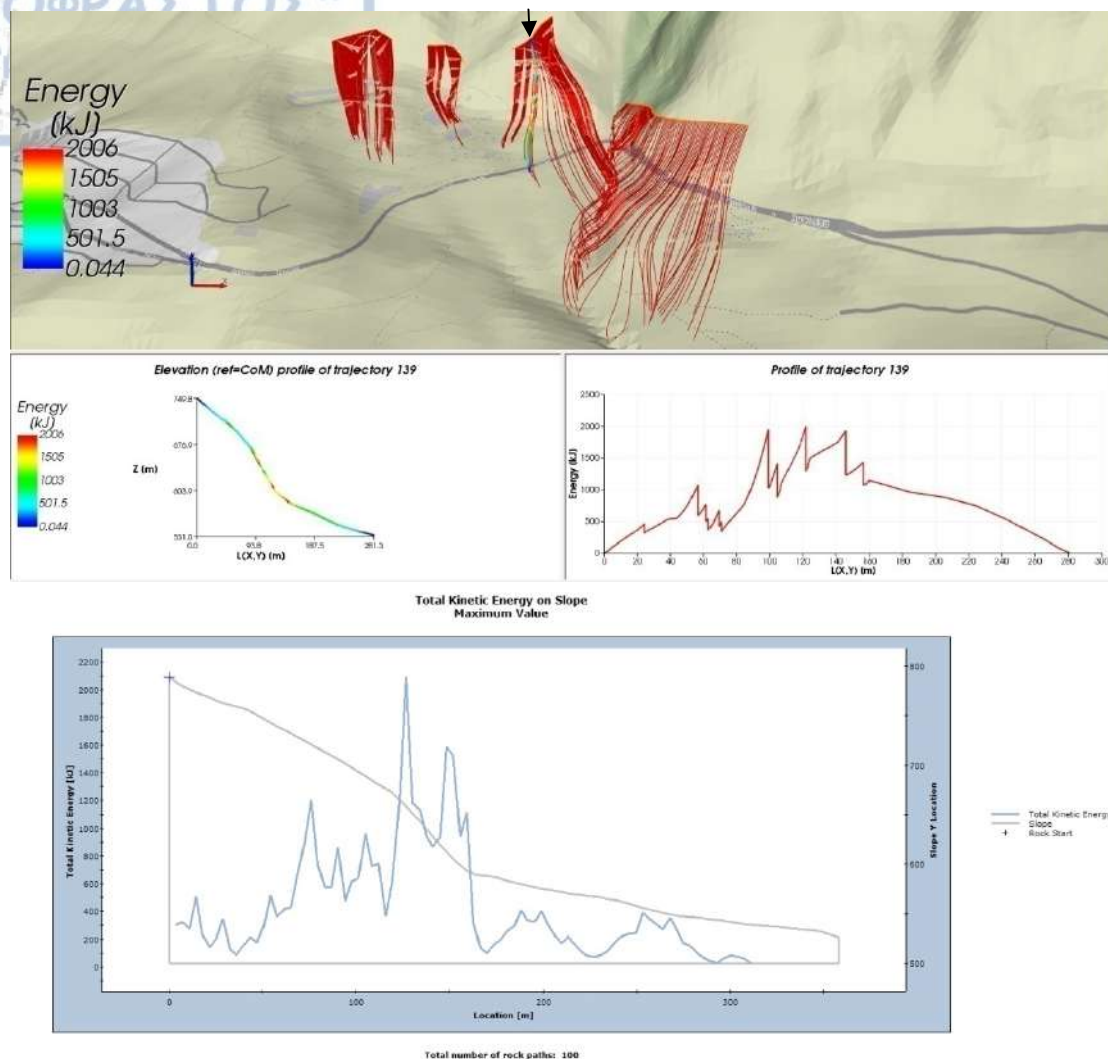
Με βάση, λοιπόν, τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας (kJ), στο προφίλ της επιλεγμένης τροχιάς (Εικ. 100, επάνω αριστερή εικόνα), όπως δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του RocPro3D v.6.1, τα βραχοτεμάχια αναπτύσσουν τις μέγιστες τιμές κινητικής ενέργειας (kJ) (κόκκινο χρώμα), κατά την πρόσκρουσή τους στον Αρχαιολογικό Χώρο, από το υψόμετρο των 680 μέτρων, έως τα 660 μέτρα (m), περίπου. Από το σημείο αυτό, η κινητική τους ενέργεια αρχίζει και μειώνεται (πράσινο και γαλάζιο χρώμα στο υπόμνημα), έως ότου σταματήσουν την πορεία τους (μπλε χρώμα), σε υψόμετρο, περίπου 600 μέτρων. Η ανωτέρω περιγραφή είναι

σύμφωνη με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας, όπως αποτυπώθηκε στο διάγραμμα κατανομής της, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (Εικ. 100, κάτω εικόνα).

ΘΕΣΗ 3



Εικ. 101. Διατομή 3^{ης} Θέσης εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης μέσα στο λογισμικό RocFall της Rocscience. Η θέση είναι η ίδια, με αυτή που εισήχθη στο λογισμικό RocPro3Dv.6.1 για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης.

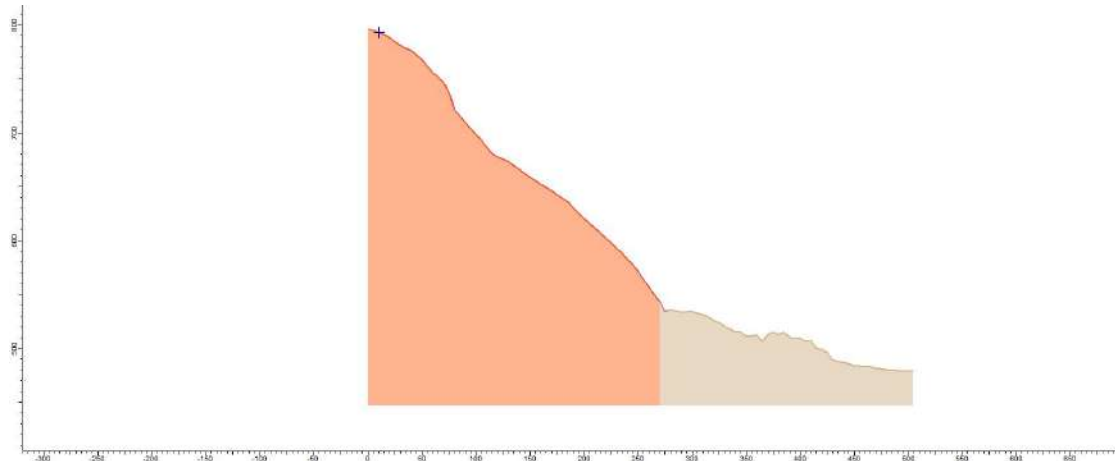


Εικ. 102. Διακύμανση της συνολικής κινητικής ενέργειας κατά μήκος της αντιπροσωπευτικής τροχιάς στη **Θέση 3** (επάνω εικόνα), μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1. Διάγραμμα διακύμανσης της συνολικής έντασης (kJ), όπως δημιουργήθηκε μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (κάτω εικόνα), της διατομής που δημιουργήθηκε και προηγήθηκε της ανάλυσης.

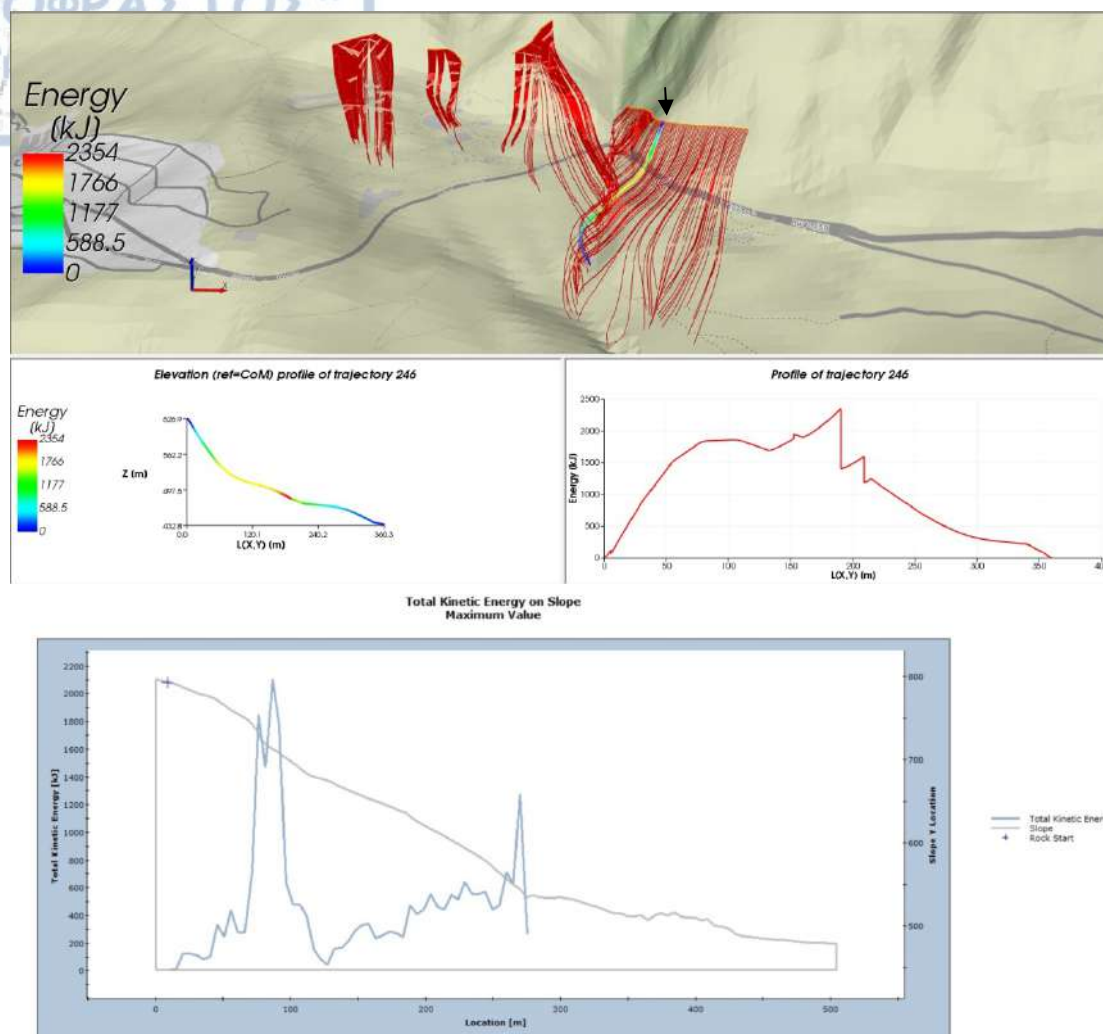
Ομοίως με τις προηγούμενες θέσεις, σύμφωνα με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας (kJ), στο προφίλ της επιλεγμένης τροχιάς (Εικ. 102, επάνω αριστερή εικόνα), όπως δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του RocPro3D v.6.1, τα βραχοτεμάχια αναπτύσσουν τις μέγιστες τιμές κινητικής ενέργειας (kJ) (κόκκινο χρώμα), κατά την πρόσκρουσή τους στον Αρχαιολογικό Χώρο, από το υψόμετρο των 650 μέτρων, έως τα 580 μέτρα (m), περίπου. Από το σημείο αυτό, η κινητική τους ενέργεια αρχίζει και μειώνεται (πράσινο και γαλάζιο χρώμα στο υπόμνημα), έως ότου σταματήσουν την πορεία τους (μπλε χρώμα), σε υψόμετρο, περίπου 530 μέτρων. Η ανωτέρω περιγραφή είναι σύμφωνη με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας, όπως

αποτυπώθηκε στο διάγραμμα κατανομής της, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (Εικ. 102, κάτω εικόνα).

ΘΕΣΗ 4



Εικ. 103. Διατομή 4^{ης} Θέσης εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης μέσα στο λογισμικό RocFall της Rocscience. Η θέση είναι η ίδια με αυτή που εισήχθη στο λογισμικό RocPro3Dv.6.1 για την πραγματοποίηση της τροχομετρικής ανάλυσης.



Εικ. 104. Διακύμανση της συνολικής κινητικής ενέργειας κατά μήκος της αντιπροσωπευτικής τροχιάς στη Θέση 4 (επάνω εικόνα), μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1. Διάγραμμα διακύμανσης της συνολικής έντασης (kJ), όπως δημιουργήθηκε μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (κάτω εικόνα), της διατομής που δημιουργήθηκε και προηγήθηκε της ανάλυσης.

Με βάση τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας (kJ), στο προφίλ της επιλεγμένης τροχιάς (Εικ. 104, επάνω αριστερή εικόνα), όπως δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του RocPro3D v.6.1, τα βραχοτεμάχια αναπτύσσουν τις μέγιστες τιμές κινητικής ενέργειας (kJ) (κόκκινο χρώμα), κατά την πρόσκρουσή τους στον Αρχαιολογικό Χώρο, από το υψόμετρο των 530 μέτρων, έως τα 470 μέτρα (m), περίπου. Από το σημείο αυτό, η κινητική τους ενέργεια αρχίζει και μειώνεται (γαλάζιο χρώμα στο υπόμνημα), έως ότου σταματήσουν την πορεία τους (μπλε χρώμα), σε υψόμετρο, περίπου 430 μέτρων. Η ανωτέρω περιγραφή είναι σύμφωνη με τη διακύμανση της κινητικής ενέργειας, όπως αποτυπώθηκε στο διάγραμμα

κατανομής της, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocFall της Rocscience (Εικ. 104, κάτω εικόνα).

5.3.5. Τρισδιάστατη αποτύπωση της επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία Cadanan

Αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούν τεχνικές προσομοιώσεων βραχοκαταπτώσεων (τροχομετρική ανάλυση) λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό των μπλοκ που φτάνουν σε ένα σημείο, καθώς και την κινητική ενέργεια. Σύμφωνα με τους Ελβετικούς κώδικες, σχετικά με τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Lateltin 1997, Raetzo et al. 2002) είναι δυνατό να δημιουργηθούν ζώνες χαμηλής, μέσης και υψηλής επικινδυνότητας (Jaboyedoff and Labiouse 2002), με βάση την τοπογραφία, τη συχνότητα των αστοχιών, την περίοδο επαναφοράς, καθώς και την προσομοίωση πιθανής βραχοκατάπτωσης, ορίζοντας έναν στόχο σταθερού μεγέθους, καθώς ένα μπλοκ είναι πιθανό να «χτυπήσει» ένα μεγαλύτερο, σε μέγεθος, αντικείμενο κατά την αστοχία του (Jaboyedoff et al. 2005).

Η αρχική μεθοδολογία Cadanan αναπτύχθηκε από το Rock Mechanics Laboratory του EPFL, για την παραγωγή χαρτών επικινδυνότητας των βραχοκαταπτώσεων για την περιοχή Canton of Vaud (Jaboyedoff and Labiouse 2002). Η μεθοδολογία Cadanan πρότεινε μία περισσότερο αντικειμενική ζωνοποίηση και χωροθέτηση της επικινδυνότητας από τις καταπτώσεις βραχιδών μπλοκ, με βάση την ποσοτική ανάλυση (Jaboyedoff et al. 2005) και δημιουργήθηκε με βάση τις Ελβετικές προδιαγραφές για τη ζωνοποίηση της επικινδυνότητας (Raetzo et al. 2002, Lateltin et al. 2005). Σημαντικά στοιχεία αυτής της μεθοδολογίας, η οποία βασίζεται στην τροχομετρική μοντελοποίηση αποτελούν η ποσοτικοποίηση της συχνότητας μιας βραχοκατάπτωσης και η πραγματική συσχέτιση μεταξύ της κινητικής ενέργειας και της συχνότητας, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Σύμφωνα, επομένως, με τη μεθοδολογία Cadanan (Jaboyedoff et al. 2005), η επικινδυνότητα $H(E,x)$ σε ένα δεδομένο σημείο x ενός πρανούς ορίζεται ως το γινόμενο μεταξύ της μέσης συχνότητας αστοχίας του βραχιδούς πρανούς (λ_f), του αριθμού των βραχιδών μπλοκ (N_{blocks}) που αποσπώνται από εξεταζόμενο πρανές, σε ένα μεμονωμένο συμβάν και την πιθανότητα προσέγγισης $P_p(E,x)$, δηλαδή, την πιθανότητα ένα μπλοκ να φτάσει στην επιλεγμένη τετμημένη (x) με μια δεδομένη ένταση (E):

$$H(E, x) = \lambda_f \cdot N_{\text{blocks}} \cdot P_p(E, x) \quad (4)$$

Στην Ελβετία, η μέθοδος χαρτογράφησης που χρησιμοποιείται για τον χωροταξικό σχεδιασμό περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός «χάρτη επικινδυνότητας» (Raetzo et al. 2002), ο οποίος βασίζεται σε ένα διάγραμμα μέσης πιθανότητας-έντασης, όπου ως ένταση ορίζεται η συνολική κινητική ενέργεια (kJ). Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση και όσο μεγαλύτερη η μέση πιθανότητα συμβάντος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός επικινδυνότητας.

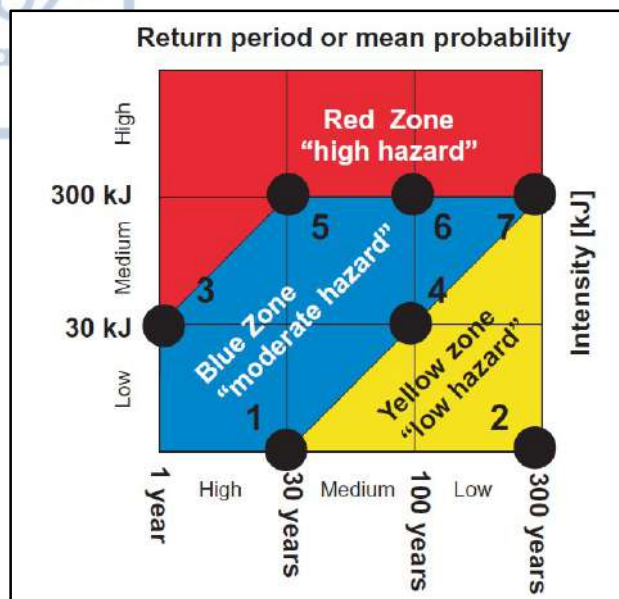
Συγκεκριμένα, όσον αφορά στις βραχοκαταπτώσεις, σύμφωνα με τους ελβετικούς κώδικες (Lateltin 1997) η μέση πιθανότητα εμφάνισης ή περίοδος επαναφοράς θεωρείται «υψηλή» εάν συμβαίνουν περισσότερα από ένα συμβάντα σε διάστημα 30 ετών, «μέτρια» εάν η περίοδος επαναφοράς είναι μεταξύ 30 και 100 ετών και "χαμηλή" εάν είναι μεταξύ 100 και 300 ετών, ενώ θεωρείται "μηδενική" εάν είναι πάνω από 300 χρόνια, με εξαίρεση τα μεγάλα καταστροφικά φαινόμενα. Αντίστοιχα, η ένταση χαρακτηρίζεται ως «χαμηλή» για πτώσεις βράχου με κινητική ενέργεια (E) μικρότερη από 30 kJ, «μέτρια» για E μεταξύ 30 και 300 kJ και «υψηλή» εάν η κινητική ενέργεια E είναι μεγαλύτερη από 300 kJ. Τα όρια αυτά ορίστηκαν με στόχο την οριοθέτηση των μέτρων προστασίας των κτιρίων. Συγκεκριμένα, 30 kJ αντιστοιχούν στην αντίσταση ενός άκαμπτου φράγματος από ξύλο βελανιδιάς, ενώ 300 kJ αντιστοιχούν στην αντίσταση ενός τοίχου από οπλισμένο σκυρόδεμα (Raetzo et al. 2002). Επομένως, οι ζώνες επικινδυνότητας ορίζονται ως ακολούθως (Εικ. 105):

1. Ζώνη «Υψηλής επικινδυνότητας» (ή αλλιώς, «κόκκινη ζώνη»): Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει πιθανή βραχοκατάπτωση, με ενέργεια μεγαλύτερη από 300 kJ και με μέση συχνότητα, πάνω από ένα συμβάν κάθε 300 χρόνια. Επίσης, στην κόκκινη ζώνη περιλαμβάνονται περιοχές με πιθανές βραχοκαταπτώσεις, με ενέργεια άνω των 30 kJ και μέση συχνότητα πάνω από ένα συμβάν κάθε 30 χρόνια.
2. Ζώνη «Μέτριας επικινδυνότητας» (ή αλλιώς «Μπλε ζώνη»): Η ενέργεια των πιθανών βραχοκαταπτώσεων είναι μικρότερη από 300 kJ. Για υψηλές συχνότητες, η παρατηρούμενη ενέργεια είναι κάτω από 30 kJ. Ενώ για χαμηλές συχνότητες (πάνω από 1 συμβάν σε 100 χρόνια), η παρατηρούμενη ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 30 και 300 kJ.

3. Ζώνη «Χαμηλής επικινδυνότητας» (ή αλλιώς «Κίτρινη ζώνη»): Η εκτιμώμενη ενέργεια είναι κάτω από 30 kJ, για μια περίοδο επαναφοράς 100 ετών και 300 kJ για περίοδο επαναφοράς 300 ετών αντίστοιχα.

Η μέθοδος που παρουσιάστηκε αποτελεί μια γενικευμένη παρουσίαση της ελβετικής μεθόδου χαρτογράφησης της επικινδυνότητας, όπου ένα όριο έντασης (kJ) και μια τιμή περιόδου επαναφοράς μπορεί να προσδιορίσει ένα όρο επικινδυνότητας. Οι ανωτέρω κατηγορίες ζωνοποίησης της επικινδυνότητας μπορούν να προσαρμοστούν και σε διαφορετικά όρια κινητικής ενέργειας και περιόδου επαναφοράς, ανάλογα με τις ανάγκες του χωροταξικού σχεδιασμού (Jaboyedoff et al. 2005).

Στην παρούσα έρευνα, οι τιμές της κινητικής ενέργειας (kJ), οι οποίες αναπτύσσονται κατά την τροχιακή πορεία των βραχωδών τεμαχίων, από τη στιγμή της αποκόλλησής τους από το βραχώδες πρηνές, αποτυπώνονται στους τρισδιάστατους χάρτες, που προέκυψαν από το RocPro3D v.6.1. Η συχνότητα εμφάνισης αντίστοιχων γεγονότων αντιστοιχεί σε 1 βραχοτέμαχος/μήνα, σύμφωνα με προφορικές πληροφορίες του προσωπικού του Αρχαιολογικού Χώρου.



Εικ. 105. Διάγραμμα προσδιορισμού της επικινδυνότητας, σύμφωνα με τα Ελβετικά πρότυπα βασισμένο στην περίοδο επαναφοράς και την κινητική ενέργεια (μετά από Lateltin 1997, Raetzo et al. 2002). Τα αριθμημένα σημεία στο γράφημα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ζωνοποίησης, με τη χρήση 3 χρωμάτων: κίτρινο, μπλε και κόκκινο, τα οποία αντιστοιχούν σε «χαμηλή», «μέση» και «υψηλή» επικινδυνότητα. Η επικινδυνότητα θεωρείται υψηλή για περιόδους επαναφοράς κάτω από 300 έτη και για τιμές ενέργειας (έντασης) πάνω από 300 kJ (Jaboyedoff et al. 2005).

Σύμφωνα, επομένως, με τη μεθοδολογία Cadanav, εξήχθησαν αποτελέσματα για την περιοχή έρευνας και αποτυπώθηκαν σε τρισδιάστατους χάρτες χωρικής κατανομής, μέσα από τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 5.1.1. Συγκεκριμένα, από την τροχομετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 δημιουργήθηκαν τρισδιάστατοι χάρτες κατανομής διαφόρων παραμέτρων (υποκεφάλαιο 5.3.1), ανάμεσα στους οποίους και οι χάρτες τύπου «*Classes of probability of propagation map*», σύμφωνα με τη μεθοδολογία CADANAV (2013).

Οι χάρτες αυτοί, των ενεργειακών τάξεων (φάκελοι), αντιστοιχούν σε ένα πλέγμα χαρτογραφημένο επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (DTM), για το οποίο κάθε κελί αντιστοιχεί στην ενέργεια κλάσης της μέγιστης κινητικής ενέργειας για τμήματα τροχιών που το διασχίζουν.

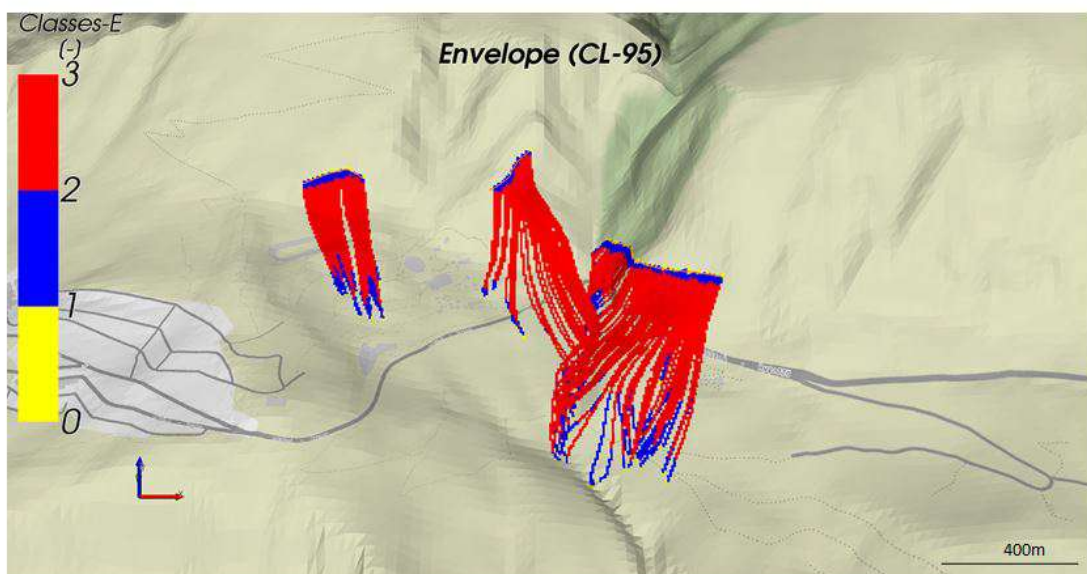
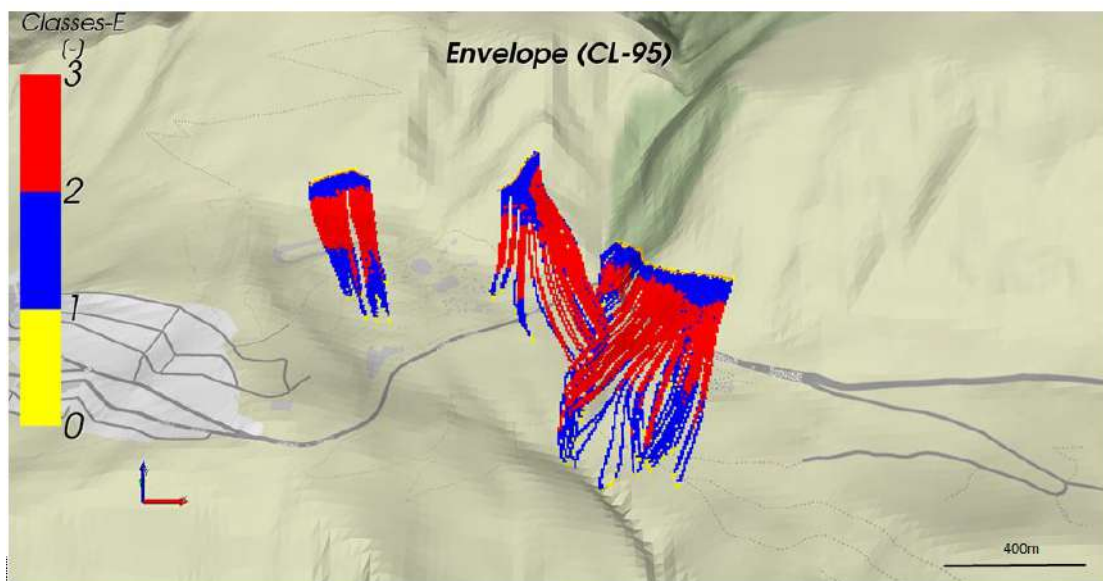
Το λογισμικό RocPro3D v.6.1 προτείνει 3 ενεργειακές κατηγορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από 3 χρώματα (κίτρινο, μπλε και κόκκινο).

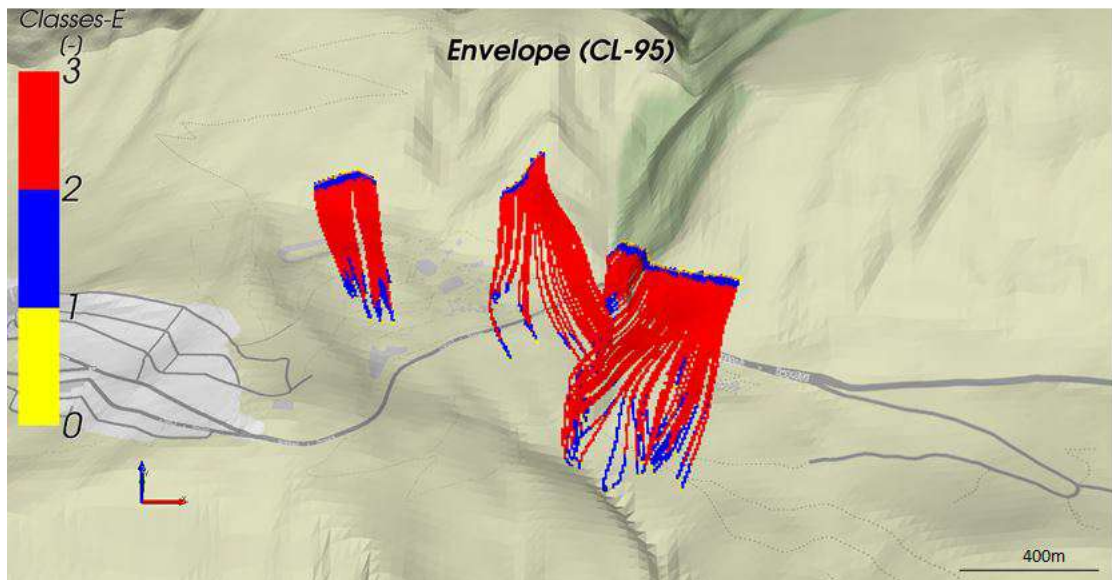
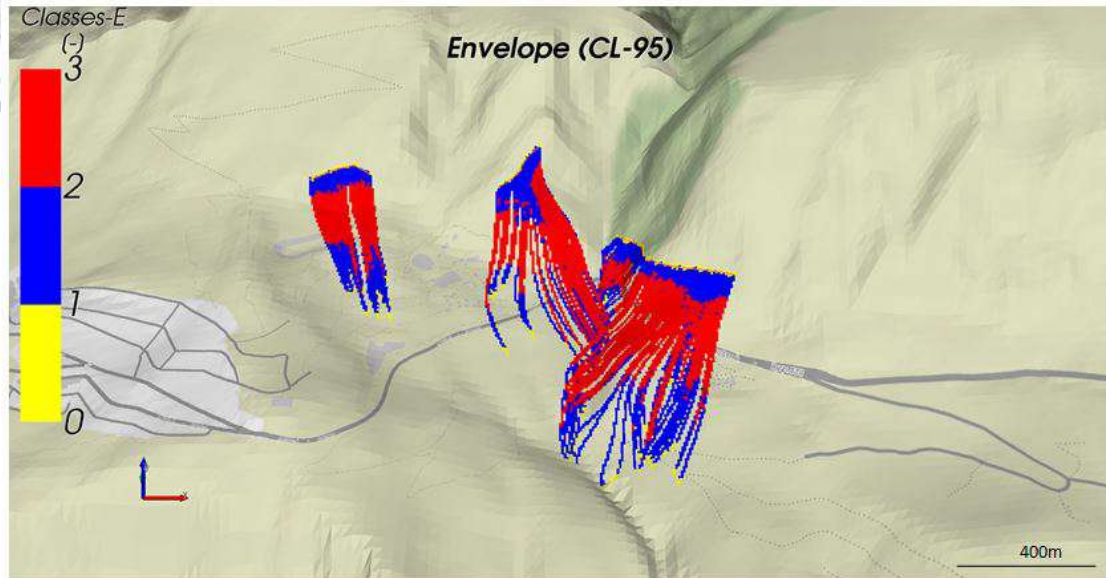
Από προεπιλογή, τα όρια των ενεργειακών αυτών κλάσεων είναι τα ακόλουθα:

- κίτρινο χρώμα: 0 - 30 kJ
- μπλε χρώμα: 30 - 300 kJ
- κόκκινο χρώμα: >300 kJ,

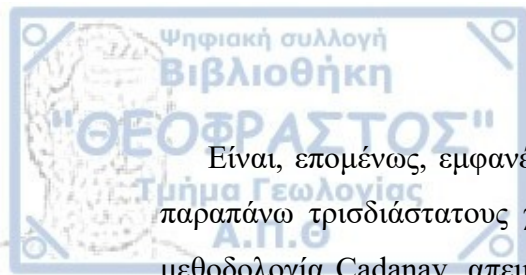
σύμφωνα με τη μεθοδολογία CADANAV.

Οι τρισδιάστατοι χάρτες που ακολουθούν βασίζονται στην παραπάνω μεθοδολογία.





Εικ. 106. Χάρτες χωρικής απεικόνισης της εκτίμησης της επικινδυνότητας, με βάση τη μεθοδολογία CADANAV (2013), όπως αυτοί δημιουργήθηκαν μέσα στο λογισμικό RocPro3D v.6.1, με σειρά εμφάνισης από πάνω προς τα κάτω ως εξής: με σεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα και με ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0$ m/sec) και 1) με μέση διάμετρο βραχωδών τεμαχών $d=1$ m και 2) με μέση διάμετρο 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα.



Είναι, επομένως, εμφανές ότι η επικινδυνότητα, όπως αυτή αποτυπώνεται στους παραπάνω τρισδιάστατους χάρτες χωρικής εμφάνισής της (Εικ. 106), με βάση τη μεθοδολογία Cadanan, απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα, στο μεγαλύτερο μέρος και των τεσσάρων ζωνών του Μνημειακού Χώρου, όπου περιλαμβάνεται το σύνολο των Μνημείων, με ένα εύρος ενεργειακών τιμών >300 kJ. Και στις δύο περιπτώσεις, με σεισμικές ($PGV=0$ m/sec) και ασεισμικές συνθήκες ($PGV=0,41$ m/sec), η διαφορά έγκειται κυρίως στις περιοχές εκκίνησης και τερματισμού των τροχιών. Παρατηρούμε ότι στους χάρτες με διάμετρο τεμαχών 1,3m, 1,5m, 1,3m και 1,5m για τις 4 ζώνες εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης οι τιμές έντασης (kJ) είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις περιπτώσεις διαμέτρου τεμαχών ίση με 1 m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ (RISK)

6.1 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Οι βραχοκαταπτώσεις συνιστούν μεγάλη απειλή, κυρίως στις ορεινές περιοχές, προκαλώντας σοβαρές καταστροφές σε υποδομές και κτίρια, σε Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς και απώλειες ανθρώπινης ζωής (Scavia et al. 2020). Κατανοώντας τη σοβαρότητα του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων, καθώς και των επιπτώσεων που επιφέρουν σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο, πολλοί ερευνητές ανέπτυξαν τεχνικές βαθμονόμησης και αξιολόγησης της διακινδύνευσης, σε ασταθή πρανή, βασισμένες σε οπτική παρακολούθηση, απλούς υπολογισμούς και εκτιμώντας τις ιδιότητες της βραχομάζας, μέσω συστημάτων ταξινόμησης και αξιολόγησής της (Pantelidis 2009). Σύμφωνα με τους Koukis et al. (1994), η κυριότερη μορφή εμφάνισης κατολισθήσεων, στον ελληνικό χώρο, είναι οι καταπτώσεις βράχων, με συχνότερη εμφάνιση στη Δυτική Ελλάδα.

Γενικά, η αξιολόγηση της διακινδύνευσης περιλαμβάνει τα στάδια: α) της ανάλυσης της διακινδύνευσης και β) της αξιολόγησής της. Ωστόσο, πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για την εκτίμηση της διακινδύνευσης των βραχοκαταπτώσεων, μία εκ των οποίων αναπτύχθηκε στο Υπουργείο Μεταφορών της Πολιτείας της Ουάσινγκτον (WSDOT 2010), για την δημιουργία μιας μεθόδου αξιολόγησης των ασταθών πρανών.

Μια άλλη μεθοδολογία, η οποία δημιουργήθηκε από το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Γραφείο Οδών (FEDRO 2009), για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης, την πρόληψη και την απόκριση στην εμφάνιση φυσικών κινδύνων σε εθνικές οδούς περιλαμβάνει: α) το στάδιο της ανάλυσης της διακινδύνευσης, συμπεριλαμβανομένων της επικινδυνότητας, της έκθεσης των στοιχείων και της ανάλυσης των συνεπειών που μπορεί να προκληθούν, β) την εκτίμηση της διακινδύνευσης και γ) την πρόταση των μέτρων αντιμετώπισης. Η αξιολόγηση και η ανάλυση της διακινδύνευσης πραγματοποιείται με την εξής σειρά:

- 1) Στόχοι και όρια της ανάλυσης και προπαρασκευαστική έρευνα
- 2) Αναγνώριση και ανάλυση της επικινδυνότητας και των επιπτώσεων
- 3) Προσδιορισμός και ανάλυση των στοιχείων υπό διακινδύνευση
- 4) Ανάλυση των συνεπειών
- 5) Εκτίμηση και παρουσίαση της διακινδύνευσης (Andrianopoulos et al. 2013).

Η διακινδύνευση (Risk) αποδίδεται βασιζόμενη σε τρεις βασικές συνιστώσες, οι οποίες είναι οι εξής: 1) η επικινδυνότητα, 2) η έκθεση των στοιχείων στον εκάστοτε κίνδυνο και 3) η τρωτότητά τους (Corominas et al. 2014).

Σύμφωνα με την Mavrouli (2011), το βασικό πλαίσιο εργασίας, για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης των βραχοκαταπτώσεων παρουσιάζεται ως εξής:

1. Εκτίμηση της επικινδυνότητας, με παράλληλο προσδιορισμό της πιθανότητας να προκληθεί αστοχία, της σφοδρότητάς και της πιθανής τροχιάς που δύνανται να διαγράψουν τα αποκολλημένα τεμάχια, σε μια πιθανή βραχοκατάπτωση.
2. Προσδιορισμός των στοιχείων που βρίσκονται υπό διακινδύνευση και συγκεκριμένα του αριθμού τους, της θέσης και του όγκου τους, καθώς και του βαθμού έκθεσής τους σε πιθανή αστοχία.
3. Εκτίμηση της τρωτότητας.
4. Εκτίμηση και υπολογισμός της διακινδύνευσης.

Παρόλο που υπάρχει πληθώρα μεθοδολογιών, βιβλιογραφικά, η ανάλυση της Επικινδυνότητας (Hazard) και της Διακινδύνευσης (Risk) αντιμετωπίζει περιορισμούς. Μέσα στα χρόνια έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές αξιολόγησης και εκτίμησης της διακινδύνευσης, βασισμένες είτε σε πιθανολογικές ή ποσοτικές μεθοδολογίες, είτε σε απλές προσεγγίσεις (Andrianopoulos et al. 2013). Η επιλογή της μεθόδου, συνήθως, πραγματοποιείται, ανάλογα με το σκοπό σχεδιασμού, μεταξύ των ποιοτικών (Qualitative) και των ποσοτικών (Quantitative) μεθόδων, οι οποίες διατίθενται βιβλιογραφικά και επιτρέπουν διαφορετικές αναλύσεις, αλλά και τη δημιουργία κλάσεων επικινδυνότητας. Οι διαφορές επικεντρώνονται κυρίως στα δεδομένα εισαγωγής, στις διαδικασίες ανάλυσης και στα εξαγόμενα αποτελέσματα (Ferrari et al. 2016).

Συγκεκριμένα, οι ποιοτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν δεδομένα, βασισμένα σε υποκειμενικά, περιγραφικά και αριθμητικά κριτήρια για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας, σε αντίθεση με τις ποσοτικές μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν αριθμητικά κριτήρια, σε συνδυασμό με την πιθανότητα να συμβούν τα φαινόμενα που μελετώνται (Guzzetti et al. 1999). Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης και

αξιολόγησης της διακινδύνευσης γίνεται σύμφωνα με το πρόβλημα το οποίο εξετάζεται, κάθε φορά, σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων για την περιοχή που ερευνάται (Dai et al. 2002). Παρόλα αυτά, σε μεγάλης κλίμακας περιοχές, όπου τα διαθέσιμα, ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα, δεν επαρκούν για να πραγματοποιηθεί μια ακριβής ποσοτική ανάλυση τα διακινδύνευσης, επιλέγεται κυρίως η ποιοτική μέθοδος αξιολόγησης (Corominas and Mavrouli, 2011).

Οι ποιοτικές μέθοδοι ορίζουν την επικινδυνότητα (Hazard), τα στοιχεία που βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk) και την τρωτότητά τους (Vulnerability), χρησιμοποιώντας ποιοτικούς δείκτες, συστήματα αξιολόγησης και βαθμολόγησης, καθώς και πίνακες κατάταξης (Cruden and Fell 1997). Η ποιοτική αξιολόγηση βασίζεται, είτε σε αντικειμενικές (στατιστικές ή μαθηματικές) εκτιμήσεις, είτε σε υποκειμενικές αξιολογήσεις, είτε στο συνδυασμό και των δύο και τα αποτελέσματά τους εκφράζονται συνήθως με τη χρήση των όρων «υψηλή», «μέση» και «χαμηλή». Για τη διαχείριση της αξιολόγησης χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι και συντελεστές βαρύτητας.

Οι ποιοτικές μέθοδοι ανάλυσης, αποτελούν το πρώτο στάδιο, για τον προσδιορισμό των κρίσιμων ζωνών-θέσεων, όπου στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ποσοτική ανάλυση. Γενικά, οι μέθοδοι ποιοτικής ανάλυσης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, τη σύγκριση διαφορετικών περιοχών και θέσεων έρευνας, καθώς και την ιεράρχηση των προτάσεων των μέτρων μετριασμού τους (Fell et al. 2005). Επομένως, ο ποιοτικός τρόπος αξιολόγησης αποτελεί το πρωταρχικό στάδιο εκτίμησης σε μια συγκεκριμένη περιοχή (Ferrari et al. 2017). Στην πλειοψηφία τους, οι ποιοτικές μέθοδοι αξιολόγησης χρησιμοποιούν παραμέτρους, όπως ο αριθμός, είτε των έργων υποδομής που επλήγησαν, είτε απώλειας της ανθρώπινης ζωής, οι οποίες στοχεύουν στην ποσοτικοποίηση της πιθανότητας απώλειας από το εξεταζόμενο φαινόμενο. Η προαναφερθείσα, όμως, προσέγγιση εμπεριέχει το υποκειμενικό κριτήριο, καθώς ορίζεται, σε μεγάλο βαθμό, από τον εκάστοτε ερευνητή (Κωνσταντινίδης, 2021).

Όσον αφορά στην ποσοτική εκτίμηση της διακινδύνευσης χρησιμοποιείται ένα εύρος τιμών αξιολόγησης, τόσο της επικινδυνότητας, όσο και της διακινδύνευσης, σε αντίθεση με τις ποιοτικές μεθόδους. Στις ποσοτικές μεθόδους ανάλυσης (Quantitative methods), τα στοιχεία που αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται είναι η Επικινδυνότητα του φαινομένου που εξετάζεται (Hazard), η Τρωτότητα (Vulnerability), καθώς και τα στοιχεία υπό διακινδύνευση (elements at risk), σε

συνδυασμό με την αποτίμησή τους (Value). Το αποτέλεσμα αυτής της εκτίμησης είναι η έκφραση, είτε της πιθανότητας διακινδύνευσης, είτε των αναμενόμενων συνεπειών – απωλειών από την εκδήλωση του φαινομένου. Σύμφωνα με τους Corominas et al. (2014), η διακινδύνευση (R), για κάθε μεμονωμένο συμβάν, υπολογίζεται, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$R = P(P_i) \times P(X_j / M_i) \times P_p(T/X_j) \times V_{ij} \times C, (5)$$

όπου,

$P(P_i)$ είναι η πιθανότητα να συμβεί ένα φαινόμενο κατολίσθησης, με ένταση M_i ,

$P(X_j | M_i)$ είναι η πιθανότητα να φτάσει μια κατολίσθηση σε ένα σημείο, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση X από την πηγή εκκίνησης της κατολίσθησης, με ένταση j ,

$P(T | X_j)$ είναι η πιθανότητα, ένα στοιχείο υπό διακινδύνευση να βρίσκεται στο σημείο X την ώρα που συμβαίνει κατολίσθηση,

V_{ij} είναι η τρωτότητα του στοιχείου, και

C είναι η τιμή του στοιχείου υπό διακινδύνευση (Ferrari et al. 2016).

Στις μεθόδους ποσοτικής αξιολόγησης, όσον αφορά στις βραχοκαταπτώσεις, η διακινδύνευση αποδίδεται με την ποσοτική εκτίμηση και την οικονομική αξιολόγηση των συνεπειών της.

Ενώ στις ποιοτικά βασιζόμενες αναλύσεις η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα, την ποσότητα, την ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων εισαγωγής, στις ποσοτικές αναλύσεις δεν ισχύει το ίδιο. Σύμφωνα με την Mavrouli (2011), τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσπάθειες καθορισμού σταθερών οδηγιών, σχετικά με ποσοτικού τύπου αναλύσεις, την εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων, βασιζόμενοι σε εθνικές προδιαγραφές και κατευθυντήριες οδηγίες.

Η ποσοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης κατηγοριοποιείται στις άμεσες και έμμεσες απώλειες. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι άμεσες συνέπειες από

τη επίδραση του φαινομένου, όπως για παράδειγμα, οι καταστροφές που σημειώθηκαν στις υποδομές, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, των έμμεσων απωλειών, ανήκουν εκείνες που δε σχετίζονται με την άμεση δράση του κινδύνου, όπως είναι η διακοπή στην κυκλοφορία του οδικού δικτύου (Παπαθανασίου, 2022). Όσον αφορά στην ποιοτική αξιολόγηση, γίνεται ένας συνδυασμός των περιγραφικών και ποιοτικών παραμέτρων της επικινδυνότητας, ενός συγκεκριμένου φυσικού φαινομένου και του κοινωνικού αντίκτυπού του και συνηθίζει να επιλέγεται σε μελέτες μικρής κλίμακας, όπου δε δύναται, εύκολα, να αξιολογηθεί η χωρική και χρονική επικινδυνότητα και δεν υπάρχουν δεδομένα, σε σχέση με την τρωτότητα των στοιχείων υπό διακινδύνευση. Η κατηγοριοποίηση, επομένως, της διακινδύνευσης γίνεται με τη δημιουργία ενός πίνακα (risk matrix) (Πίνακας 8) και χαρακτηρίζεται συνήθως ως χαμηλή, μέση και υψηλή. Για τη δημιουργία αυτού του πίνακα, στους άξονές του αναγράφονται οι επιπτώσεις-απώλειες, λόγω εκδήλωσης του φαινομένου, καθώς και η πιθανότητα του να εκδηλωθεί.

Στο παρόν κεφάλαιο, κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας των δεδομένων για την περιοχή έρευνας, αναπτύχθηκε και επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε η ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης των βραχοκαταπτώσεων (Qualitative Risk Assessment), μέσω πινάκων (risk matrix) και χαρτών (Ferrari, 2016).

Αρχικά, προσδιορίστηκαν και οριοθετήθηκαν τα στοιχεία τα οποία εκτίθενται σε διακινδύνευση (elements at risk), ενώ, στη συνέχεια αναπτύχθηκε η μεθοδολογία, η οποία ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

6.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ (QUALITATIVE RISK ASSESSMENT)

6.2.1 Προσδιορισμός των στοιχείων υπό διακινδύνευση (elements at risk)

Για να καταστεί εφικτή η εκτίμηση της διακινδύνευσης, αρχικά, θα πρέπει να προηγηθεί καταγραφή όλων των στοιχείων που είναι εκτεθειμένα σε αυτήν (elements at risk), όπως αυτά ορίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο. Ο συνδυασμός της πληροφορίας από τα στοιχεία αυτά, καθώς και από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, σχετικά με την επικινδυνότητα ενός φυσικού φαινομένου (Κεφάλαιο 5), καθορίζει την τρωτότητα (vulnerability) και την έκθεσή (exposure) τους στο φαινόμενο αυτό. Συγκεκριμένα, στα στοιχεία υπό διακινδύνευση περιλαμβάνονται οι ανθρώπινες ζωές, οι υποδομές (οδικά δίκτυα, έργα ύδρευσης κ.ά.), τα κτίρια, οι δημόσιες υπηρεσίες, οι οικονομικές δραστηριότητες και η Πολιτιστική Κληρονομιά και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, με βάση τον υπολογισμό των απωλειών τους από ένα φυσικό κίνδυνο: α) στα άμεσα, δηλαδή σε αυτά, που οι απώλειές τους μπορούν να εκτιμηθούν ποσοτικά και β) στα έμμεσα, όπου η ποσοτικοποίηση της απώλειας δεν μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί, καθώς δεν υπάρχει ευκρινής χωρική διάσταση (Παπαθανασίου, 2022). Παράλληλα, τα στοιχεία που βρίσκονται υπό διακινδύνευση χωρίζονται σε άλλες δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν οι απώλειες από την έκθεσή τους σε κάποιο κίνδυνο είναι άμεσες ή έμμεσες. Στις άμεσες υπολογίσιμες, λοιπόν, απώλειες εντάσσονται οι υποδομές, τα κτίρια κ.ά., ενώ οι απώλειες ανθρώπινων ζώων, οι τραυματισμοί, οι ζημιές και οι απώλειες σε Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς κτλ. ανήκουν στις άυλες άμεσες απώλειες των στοιχείων που εκτίθενται σε φυσικό κίνδυνο, και δεν είναι εύκολα υπολογίσιμες. Αντίθετα, στις έμμεσες απώλειες αυτών των στοιχείων εντάσσονται κάποιες που μπορούν να υπολογιστούν ποσοτικά, όπως για παράδειγμα η διακοπή παραγωγής κ.ά., ενώ στις άυλες έμμεσες απώλειες ανήκουν η ανεργία, η μετανάστευση κτλ. (Αργυρούδης, 2017). Καθώς, όμως, η συγκέντρωση των ανάλογων πληροφοριών για τα στοιχεία υπό διακινδύνευση καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, η ανάλυση της διακινδύνευσης επικεντρώνεται, συνήθως, στις ανθρώπινες ζωές και στις υποδομές (Παπαθανασίου, 2022). Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, η εκτίμηση της διακινδύνευσης μπορεί να επιτευχθεί, είτε με ποιοτικό, είτε με ποσοτικό τρόπο. Για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό της διακινδύνευσης, συνυπολογίζονται τα περιγραφικά και ποιοτικά στοιχεία της

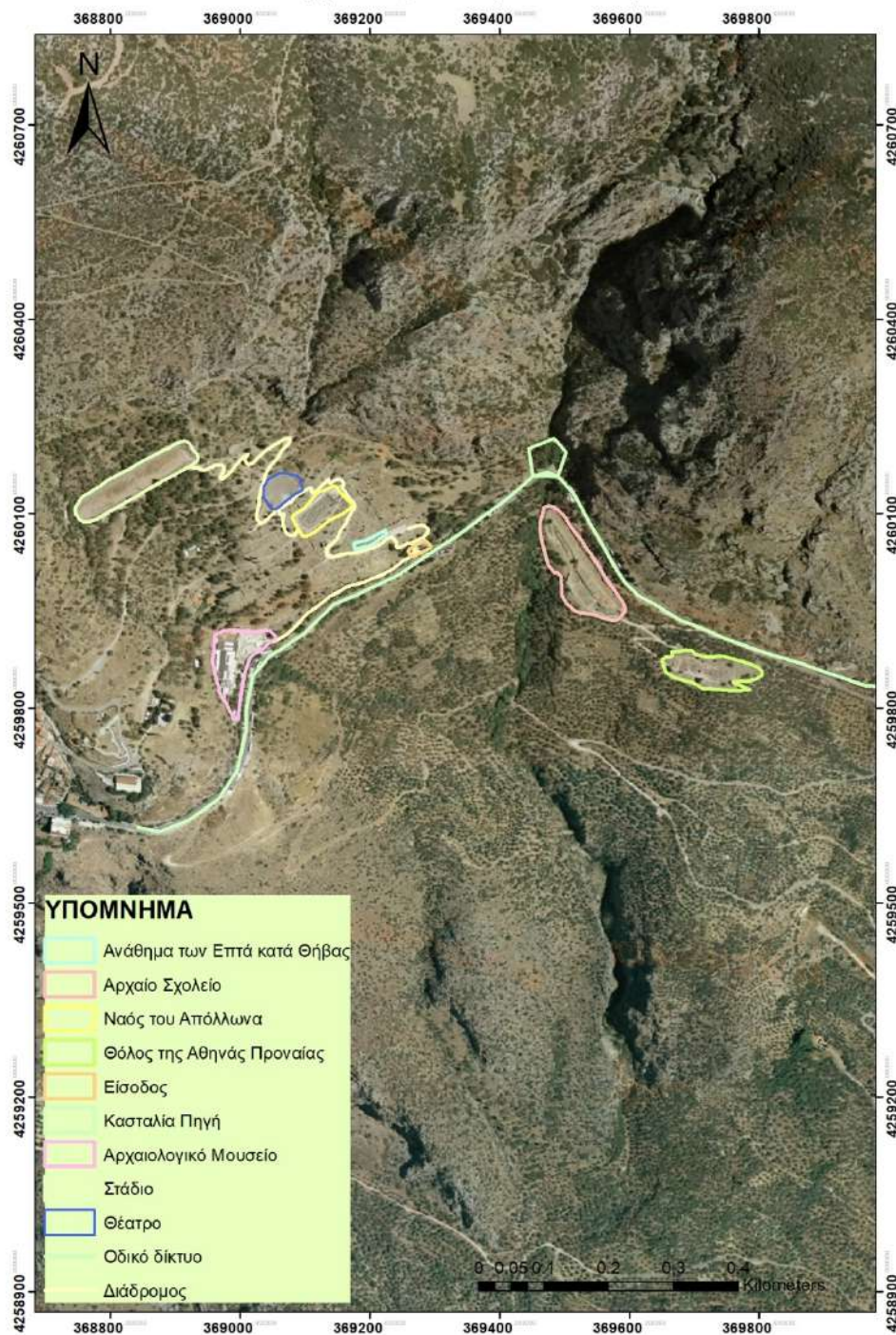
περιοχής που μελετάται, καθώς και οι επιπτώσεις που αναμένεται να επέλθουν κοινωνικά, από το φυσικό φαινόμενο που εξετάζεται. Συνήθως παρατηρείται δυσκολία στη χωρική και χρονική αξιολόγηση και εκτίμηση της επικινδυνότητας του φαινομένου, ή παρατηρείται απουσία δεδομένων, σχετικών με την τρωτότητα των στοιχείων υπό διακινδύνευση και εφαρμόζεται, κυρίως, σε μικρής κλίμακας έρευνες. Η ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης, όπως γίνεται αντιληπτό, περιλαμβάνει το υποκειμενικό κριτήριο του εκάστοτε ερευνητή, με το χαρακτηρισμό «Υψηλή», «Μέση» και «Χαμηλή», μέσα από έναν πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix). Ο πίνακας αυτός αποτελείται από δύο άξονες, όπου στον οριζόντιο αναφέρονται οι επιπτώσεις-απώλειες που επέρχονται σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο, από το εξεταζόμενο φαινόμενο, ενώ στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζεται η πιθανότητα (ποιοτική) εκδήλωσης του φαινομένου αυτού. Εφόσον οριστούν οι τάξεις απωλειών και πιθανότητας, στη συνέχεια προκύπτει ο χαρακτηρισμός και η κατηγοριοποίηση της διακινδύνευσης, από το συνδυασμό των δύο αυτών παραμέτρων. Μια άλλη μέθοδος είναι η αξιολόγηση της διακινδύνευσης, σύμφωνα με την τρωτότητα και την επικινδυνότητα του φαινομένου που εξετάζεται (Παπαθανασίου, 2022).

Το risk matrix αποτελεί ένα διάγραμμα βαθμονόμησης της επικινδυνότητας, το οποίο δημιουργήθηκε για την Ελβετία, ώστε να εξασφαλιστεί ένα ομοιόμορφο και ομοιογενές μέσο αξιολόγησης των διάφορων ειδών φυσικών κινδύνων που απειλούν, σε μεγάλο βαθμό, τη χώρα (πλημμύρες, χιονοστιβάδες, κατολισθήσεις κ.λπ.). Οι δύο κύριοι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση είναι η ένταση και πιθανότητα (συχνότητα ή περίοδος επαναφοράς). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τρεις βαθμοί επικινδυνότητας, οι οποίοι αντιπροσωπεύονται από τα χρώματα κόκκινο, μπλε και κίτρινο (Raetz et al. 2002). Στην παρούσα διατριβή, η εκτίμηση της διακινδύνευσης στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι, καθώς πρόκειται για έναν Χώρο Πολιτιστικής Κληρονομιάς, παγκόσμιας εμβέλειας και ανυπέρβλητης Πολιτιστικής αξίας, με πολύ μεγάλη προσέλευση επισκεπτών, περίπου 2000 άτομα ημερησίως, από όλον τον κόσμο. Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν σύνηθες φαινόμενο στην περιοχή έρευνας, με εμφανίσεις από την αρχαιότητα έως και σήμερα και συχνότητα εμφάνισης, σύμφωνα με προφορικές πληροφορίες, περίπου ένα βραχοτέμαχος το μήνα. Επομένως, η αξιολόγηση της διακινδύνευσης αποτέλεσε επιτακτική ανάγκη και το τελικό στάδιο

για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών.

Με βάση την ανωτέρω κατηγοριοποίηση των απωλειών, από την εμφάνιση μιας βραχοκατάπτωσης και σε συνδυασμό με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, από τους χάρτες εκτίμησης της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Κεφάλαιο 5), στον Αρχαιολογικό χώρο των Δελφών, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των στοιχείων, εντός και εκτός του Μνημειακού Χώρου, που βρίσκονται υπό διακινδύνευση, τα οποία χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, αναφορικά με τις απώλειες που μπορεί να προκληθούν: 1) στις άμεσα υλικές και 2) στις άμεσα άυλες απώλειες. Οι έμμεσες απώλειες επιλέχθηκε να μην συμπεριληφθούν στη συγκεκριμένη ανάλυση, καθώς η συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με αυτές καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη και κυρίως επειδή δε δύναται να προσδιοριστεί η χωρική τους διάσταση. Συγκεκριμένα, για την πληρέστερη χωρική απεικόνιση, αλλά και τη συγκέντρωση όλων των πληροφοριών δημιουργήθηκε ένας χάρτης χωρικής απεικόνισης όλων των στοιχείων υπό διακινδύνευση, σε περιβάλλον ArcGIS (Εικ. 107). Αρχικά πραγματοποιήθηκε γεωαναφορά των χαρτών του ΕΑΓΜΕ (ΦΥΛΛΟ ΔΕΛΦΟΙ), σε ελληνικές συντεταγμένες ΕΓΣΑ 87' (greek grid), ενώ παράλληλα αξιοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (DEM) της ευρύτερης περιοχής του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, του Κτηματολογίου, με διακριτική ανάλυση 5 m, καθώς και η αντίστοιχη εικόνα της ευρύτερης περιοχής του Αρχαιολογικού Χώρου, από το Google Earth. Στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν και οριοθετήθηκαν όλα τα στοιχεία του χώρου υπό διακινδύνευση, στα οποία περιλαμβάνονται τα Μνημεία του Χώρου (ο ναός του Απόλλωνα, το Αρχαίο θέατρο, το Στάδιο, το Ανάθημα των Επτά κατά Θήβας, το Αρχαίο Σχολείο, ο Θόλος της Αθηνάς Προναίας), το Αρχαιολογικό Μουσείο, ο διάδρομος των επισκεπτών, η είσοδος στον Αρχαιολογικό Χώρο, η Κασταλία πηγή, το οδικό δίκτυο και το parking εκτός του Μνημειακού Χώρου, η χωρική απεικόνιση των οποίων παρουσιάζεται στον ακόλουθο χάρτη (Εικ 106). Τελικό βήμα της μεθοδολογίας αποτέλεσε η συνδυαστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις τροχιακές αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1 και παρουσιάστηκαν στο πέμπτο Κεφάλαιο, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας, με αποτέλεσμα να μπορεί να αποδοθεί η ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης.

Στοιχεία υπό διακινδύνευση (elements at risk)
στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών



Εικ. 107. Χάρτης κατανομής των στοιχείων υπό διακινδύνευση, όπως αυτά ψηφιοποιήθηκαν και οριοθετήθηκαν, μέσω του ArcMap, σε περιβάλλον ArcGIS.

6.2.2 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση της διακινδύνευσης, σημαντικό στάδιο αποτελεί η αξιολόγηση της επίδρασης ενός φυσικού φαινομένου, το οποίο περιλαμβάνει δύο στάδια: α) την ανάλυση της διακινδύνευσης και β) την αποτίμησή της. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο VanWesten (2011), η αξιολόγηση της διακινδύνευσης είναι η διαδικασία, που πρέπει να ακολουθηθεί, με στόχο τη λήψη αποφάσεων για την οριοθέτηση του επιπέδου ανοχής ενός κινδύνου σε μια περιοχή, ή την πρόταση μέτρων προστασίας. Όσον αφορά στην ανάλυση της διακινδύνευσης, σε αυτήν εμπεριέχεται η εκτίμηση της διακινδύνευσης, που προκαλείται από έναν φυσικό κίνδυνο στον άνθρωπο, στις υποδομές και στις περιουσίες, ενώ σχετικά με την αποτίμησή της, συνυπολογίζονται τα ποσοτικά στοιχεία από την επίδραση του φυσικού φαινομένου, με στόχο την ακριβή αποτύπωση των επιπτώσεών του στο περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία, αλλά και την αναζήτηση βέλτιστων τρόπων διαχείρισης της διακινδύνευσης αυτής.

Ακολουθώντας τον ποιοτικό τρόπο εκτίμησης της διακινδύνευσης, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικοί πίνακες αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), ακολουθώντας τη χρωματική κατηγοριοποίηση που προτάθηκε (Παπαθανασίου, 2022). Ο πρώτος πίνακας αφορά στην πιθανότητα των υλικών απωλειών και ο δεύτερος αναφέρεται στις άυλες απώλειες, και η δημιουργία τους βασίστηκε στα αποτελέσματα της ανάλυσης της επικινδυνότητας (Hazard) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο εκτίμησης της επικινδυνότητας (Κεφάλαιο 5). Συγκεκριμένα, στους άξονες του κάθε πίνακα σημειώνονται οι επιπτώσεις, λόγω της εκδήλωσης των βραχοκαταπτώσεων, καθώς και η πιθανότητα τους να εκδηλωθούν, αφού, πρωτίστως, προσδιορίστηκαν οι τάξεις των απωλειών και της πιθανότητας και στη συνέχεια της διακινδύνευσης.

Καθώς η εκτίμηση της διακινδύνευσης σχετίζεται με Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς, η δημιουργία αυτών των δύο πινάκων (Risk matrix) πραγματοποιείται ως εξής: στον πρώτο πίνακα περιλαμβάνονται οι άμεσες επιπτώσεις, από την επίδραση του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων, δηλαδή οι επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν, όπως η καταστροφή των κτιρίων-Μνημείων του Χώρου. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των Μνημείων του Χώρου (ναός του Απόλλωνα, Αρχαίο θέατρο, Στάδιο, Ανάθημα των Επτά κατά Θήβας, Αρχαίο Σχολείο, Θόλος της Αθηνάς Προναίας), σε μία κατηγορία, με το χαρακτηρισμό "Μνημεία". Το Αρχαιολογικό Μουσείο και το Parking εισήχθησαν ξεχωριστά.

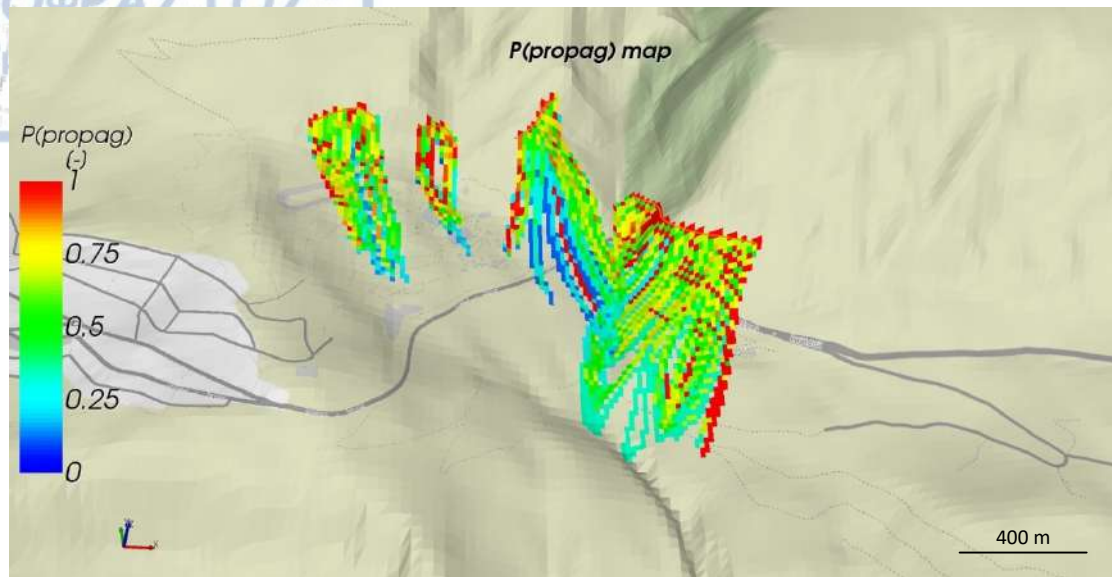
Ο δεύτερος πίνακας περιλαμβάνει τις άυλες επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει η εμφάνιση των καταπτώσεων βράχων (απώλεια και τραυματισμός του πληθυσμού, καταστροφή πολιτιστικής κληρονομιάς).

Πίνακας 12. Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου, καθώς και των επιπτώσεών του στο ανθρωπογενές περιβάλλον (Παπαθανασίου 2022).

↑ πιθανότητα	Υψηλή	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή	Υψηλή
	Μέση	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή
	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή
	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέση
		Ελάχιστες	Μικρές	Μέτριες	Μεγάλες
		επιπτώσεις →			

Για τη δημιουργία, επομένως, των Πινάκων ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), τόσο για τις Άμεσες Υλικές (Πίνακας 13), όσο και για τις Άμεσες Άυλες (Πίνακας 14) απώλειες, αξιοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα του χάρτη απεικόνισης της τρισδιάστατης χωρικής ανάλυσης της Πιθανότητας Προσέγγισης – P (Propag) των βραχωδών τεμαχών, στα στοιχεία που βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk), όπως προέκυψαν στο κεφάλαιο εκτίμησης της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Κεφάλαιο 5).

Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο χάρτης απεικόνισης της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών τεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών P (Propag), με την ύπαρξη του εναύσματος του σεισμού και με μέση διάμετρο βραχωδών μπλοκ ίση με $d=1,3m$, $d=1,5m$, $d=1,3m$ και $d=1,5m$, αντίστοιχα, για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης (Εικ. 107), καθώς αποτελεί το χειρότερο σενάριο πιθανής αστοχίας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εκτίμησης της επικινδυνότητας (Κεφάλαιο 5). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποτυπώνονται στους Πίνακες και στους Χάρτες που ακολουθούν.



Εικ. 108. Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών τεμαχών στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών P (Propag), με την ύπαρξη του εναύσματος του σεισμού ($PGV=0,41$ m/sec) και διάμετρο (d)βραχωδών μπλοκ ίση με $d=1,3$ m, $d=1,5$ m, $d=1,3$ m και $d=1,5$ m, αντίστοιχα, για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης.

Ειδικότερα, για τη δημιουργία του Πίνακα 13 (Άμεσες Υλικές Απώλειες), με βάση τη χρωματική διαβάθμιση του χάρτη τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών μπλοκ στον Αρχαιολογικό Χώρο και στα στοιχεία, τα οποία βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk) (Εικ. 108), και προσδιορίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα μπλοκ την Είσοδο στον Αρχαιολογικό Χώρο, την Κασταλία Πηγή, το Διάδρομο των επισκεπτών και τα Μνημεία είναι υψηλή,
- 2) η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα βραχώδες τέμαχος το οδικό δίκτυο είναι μέση
- 3) η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα βραχοτέμαχος το Αρχαιολογικό Μουσείο και το Parking είναι πολύ χαμηλή.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 6.2.1, (Παπαθανασίου, 2022), οι επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει μια πιθανή βραχοκατάπτωση, με την ταυτόχρονη ύπαρξη σεισμού και με μέση διάμετρο τεμαχών 1,5 m είναι:

- 1) μεγάλες στα Μνημεία και στο Αρχαιολογικό Μουσείο

2) μέτριες στην Κασταλία πηγή το οδικό δίκτυο και το parking

3) μικρές στην είσοδο και τον διάδρομο των επισκεπτών

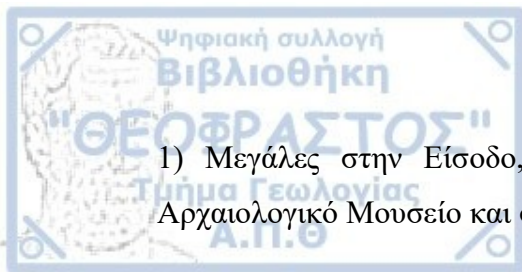
Από το συνδυασμό του χαρακτηρισμού των δύο παραπάνω παραμέτρων προκύπτει ο Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, καθώς και των Άμεσων Υλικών Απωλειών-επιπτώσεων του (Πίν. 13).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix) για τις Άμεσες Άυλες Απώλειες (Πίν. 14), που δύνανται να προκληθούν από την ενεργοποίηση πιθανών βραχοκαταπτώσεων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5). Ομοίως εργαζόμενοι, εδώ παρατηρούμε κάποια διαφοροποίηση σχετικά με την πιθανότητα διάδοσης των βραχωδών τεμαχών, αλλά και τις αντίστοιχες επιπτώσεις τους στα σημεία ενδιαφέροντος ή αλλιώς, στα στοιχεία υπό διακινδύνευση (elements at risk), σε σχέση με το αντίστοιχο για τις Άμεσες Υλικές Απώλειες.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη χρωματική διαβάθμιση του χάρτη τρισδιάστατης χωρικής απεικόνισης της πιθανότητας διάδοσης των βραχωδών μπλοκ στον Αρχαιολογικό Χώρο και στα στοιχεία, τα οποία προσδιορίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο ότι βρίσκονται υπό διακινδύνευση (elements at risk) (Εικόνα 109) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα τέμαχος την Κασταλία πηγή, την Είσοδο στον Αρχαιολογικό Χώρο, το διάδρομο των επισκεπτών και το σύνολο των Μνημείων εμφανίζεται υψηλή,
- 2) Η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα βραχοτέμαχος το οδικό δίκτυο εμφανίζεται μέση
- 3) Η πιθανότητα να προσεγγίσει ένα βραχώδες τέμαχος το Αρχαιολογικό Μουσείο και το parking εμφανίζεται πολύ χαμηλή.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 6.2.1, (Παπαθανασίου, 2022), οι επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει μια πιθανή βραχοκατάπτωση, με την ταυτόχρονη ύπαρξη σεισμού και με μέση διάμετρο βραχοτεμαχών 1,5 m είναι:



1) Μεγάλες στην Είσοδο, στο διάδρομο των επισκεπτών, στα Μνημεία, στο Αρχαιολογικό Μουσείο και στο parking

2) Μέτριες στην Κασταλία Πηγή και στο οδικό δίκτυο

Από το συνδυασμό του χαρακτηρισμού των δύο παραπάνω παραμέτρων προκύπτει ο Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών (Πιν. 13), καθώς και των Άμεσων Άυλων Απωλειών-επιπτώσεών του.

Πίνακας 13. Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, καθώς και των Άμεσων Υλικών Απωλειών-επιπτώσεών του.

Άμεσες υλικές απώλειες

Πιθανότητα ↑	Υψηλή		Είσοδος, Διάδρομος επισκεπτών	Κασταλία πηγή	Μνημεία
	Μέση			Οδικό δίκτυο	
	Χαμηλή				
	Πολύ χαμηλή			Parking	Αρχαιολογικό Μουσείο
		Ελάχιστες	Μικρές	Μέτριες	Μεγάλες
		Επιπτώσεις →			

Επομένως, όσον αφορά στις Άμεσες Υλικές απώλειες (Πίν. 13) παρατηρούμε ότι η διακινδύνευση φαίνεται να είναι υψηλή στο σύνολο το Μνημείων του Χώρου, καθώς και στην Κασταλία πηγή (κόκκινο χρώμα), ενώ μέση εμφανίζεται στην Είσοδο στον Αρχαιολογικό Χώρο, στο διάδρομο των επισκεπτών, στο οδικό δίκτυο και στο Αρχαιολογικό Μουσείο (κίτρινο χρώμα). Τέλος, η διακινδύνευση εμφανίζεται μικρή στο χώρο του parking (πράσινο χρώμα).

Πίνακας 14 Πίνακας ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, καθώς και των Άμεσων Άυλων Απωλειών-επιπτώσεών του.

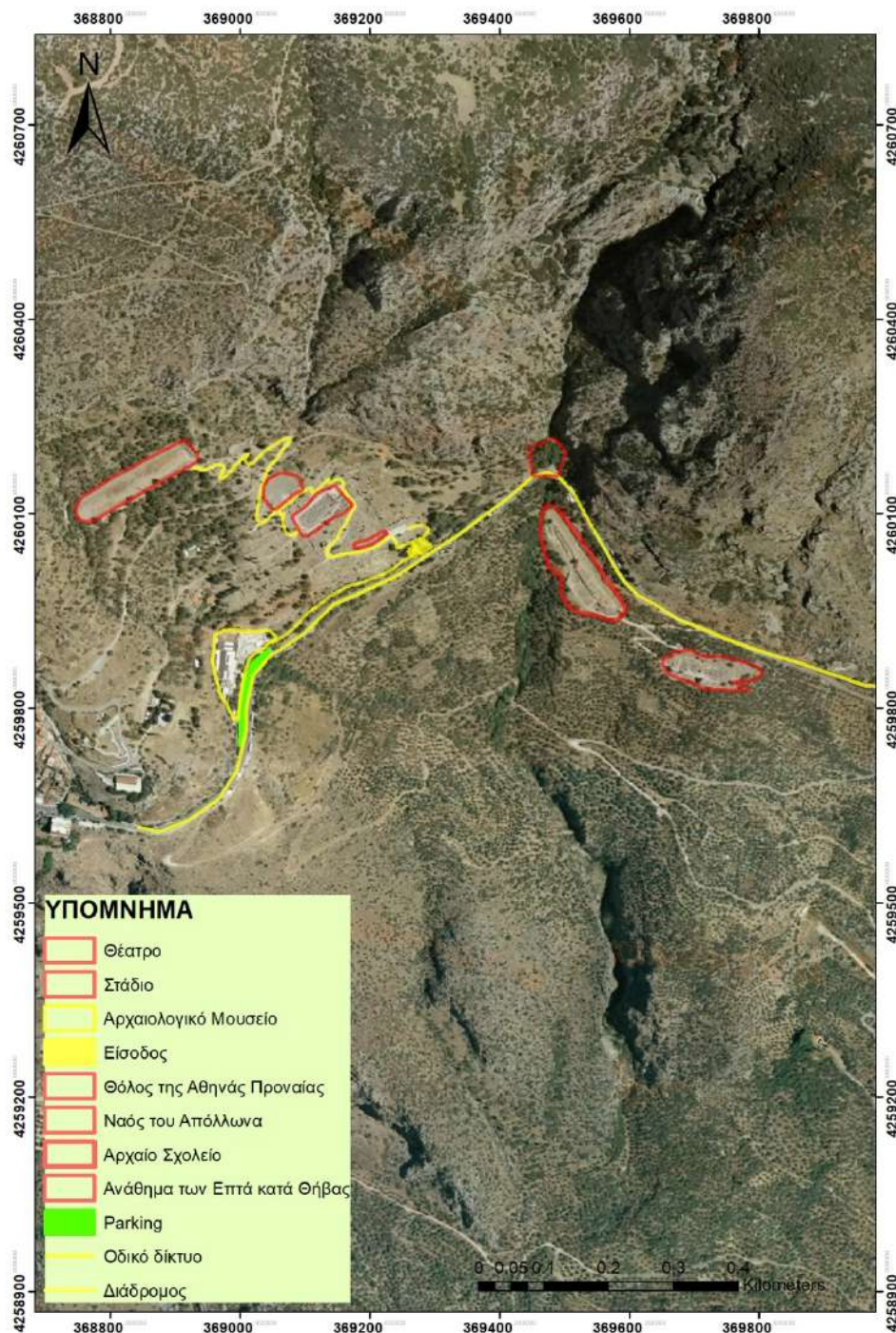
Άμεσες άυλες απώλειες

Πιθανότητα ↑	Υψηλή			Κασταλία Πηγή,	Είσοδος, Διάδρομος επισκεπτών, Μνημεία
	Μέση			Οδικό δίκτυο	
	Χαμηλή				
	Πολύ χαμηλή				Αρχαιολογικό Μουσείο Parking
		Ελάχιστες	Μικρές	Μέτριες	Μεγάλες
		Επιπτώσεις →			

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, αξιολογήθηκε η διακινδύνευση για τις Άμεσες Άυλες απώλειες. Σύμφωνα, λοιπόν, με τον Πίνακα 14 η διακινδύνευση εμφανίζεται υψηλή στην Είσοδο, στο σύνολο των Μνημείων, στο διάδρομο των επισκεπτών και στην Κασταλία Πηγή (κόκκινο χρώμα). Στο Οδικό δίκτυο, στο Αρχαιολογικό Μουσείο και το Parking χαρακτηρίζεται ως Μέση (κίτρινο χρώμα).

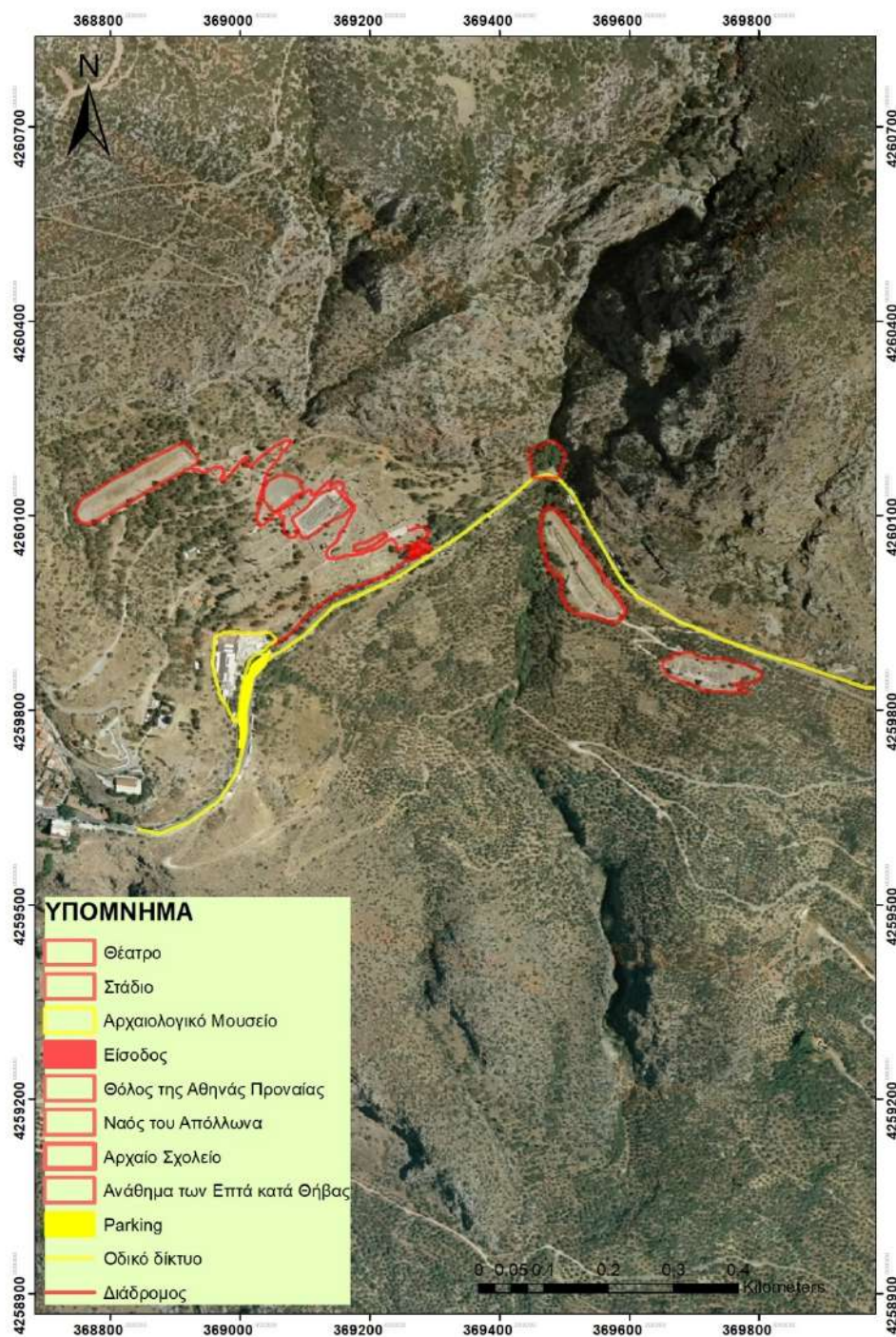
Παράλληλα, δημιουργήθηκαν, στον ArcMap, σε περιβάλλον ArcGIS, οι αντίστοιχοι χάρτες χωρικής απεικόνισης της διακινδύνευσης, βάσει των αποτελεσμάτων των Πινάκων ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης που προηγήθηκαν (Πίν. 13 & 14), ακολουθώντας την ίδια χρωματική διαβάθμιση (κίτρινο, πράσινο, κόκκινο). Συγκεκριμένα, ως υπόβαθρο, αξιοποιήθηκε ο χάρτης που δημιουργήθηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο και, παράλληλα, ψηφιοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία υπό διακινδύνευση, όπως προσδιορίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο της ανάλυσης. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία των δύο ακόλουθων χαρτών, για τις Άμεσες Υλικές (Εικ. 109) και τις Άμεσες Άυλες Απώλειες αντίστοιχα (Εικ. 110).

Άμεσες υλικές απώλειες



Εικ.109. Χάρτης κατανομής της ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, καθώς και των Άμεσων Υλικών Απωλειών-επιπτώσεών του.

Άμεσες άυλες απώλειες



Εικ. 110. Χάρτης κατανομής της ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στον Αρχαιολογικό Χώρο των Δελφών, καθώς και των Άμεσων Άυλων Απωλειών-επιπτώσεών του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν πολύ σύνθετο φυσικό φαινόμενο, με ακαριαία δράση, που δύνανται να προκαλέσουν σημαντικές υλικές επιπτώσεις, έως και απώλεια της ανθρώπινης ζωής, ενώ, ταυτόχρονα, αποτελούν μεγάλη απειλή για τους Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς, κυρίως όταν εντοπίζονται πλησίον μεγάλων ορεινών όγκων, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού και των επισκεπτών και τη βιωσιμότητα των ίδιων των Χώρων. Πολλές φορές οι καταπτώσεις βράχων ακολουθούν την εκδήλωση ενός σεισμού, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα, κυρίως στις ορεινές περιοχές, η μελέτη των οποίων καθίσταται συνήθως δύσκολη, λόγω της δυσκολίας πρόσβασης. Στις μέρες μας, όμως, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση καινοτόμων τεχνικών Τηλεπισκόπησης και Φωτογραμμετρίας συνέβαλε στη μελέτη περιοχών, όπου η προσβασιμότητα για την πραγματοποίηση συμβατικών μετρήσεων ήταν σχεδόν αδύνατη, με ταυτόχρονη μείωση τόσο του χρόνου όσο και του κόστους. Αντικείμενο, λοιπόν, της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αποτελεί η ανάπτυξη λεπτομερούς μεθοδολογίας αξιολόγησης, εκτίμησης και ανάλυσης της επικινδυνότητας (Hazard) και της διακινδύνευσης (Risk) των βραχοκαταπτώσεων, σε συνδυασμό με τα πολύ υψηλής ανάλυσης, ευκρίνειας και ακρίβειας τρισδιάστατα δεδομένα που προήλθαν από τη λήψη με Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV-Unmanned Aerial Vehicles).

Η μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή στοχεύει στη λεπτομερή έρευνα του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, τα αποτελέσματα της οποίας συνιστούν βασική προϋπόθεση για την πρόταση των ορθών παρεμβάσεων και την αντιμετώπιση του συνεπειών που επιφέρουν οι καταπτώσεις βράχων στον Μνημειακό Χώρο.

Τα αποτελέσματα της λεπτομερούς έρευνας συνοψίζονται στα κάτωθι:

1) Πραγματοποίηση φωτογραμμετρικής μελέτης, με τη λήψη 640 γεωαναφερμένων φωτογραφιών της υπό έρευνα περιοχής, και συγκεκριμένα του ασβεστολιθικού πρανούς, ανάντη του Μνημειακού Χώρου, με πτήση UAV (Unmanned Aerial

Vehicles) και συγκεκριμένα του eBee X (senseFly S.O.D.A. 3D) και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), το οποίο καλύπτει όλη την περιοχή έρευνας, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την ακριβή τοποθεσία της περιοχής έρευνας, την αναλυτική καταγραφή της γεωμετρίας και τα στοιχεία προσανατολισμού τους.

Ειδικότερα, το ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε χωρίστηκε σε 3 υπό-περιοχές, όπου προσδιορίστηκαν και οι θέσεις – ζώνες ενεργοποίησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, οι οποίες επιλέχθηκαν για την ανάλυση και την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, εξήχθησαν τα αποτελέσματα, σχετικά με τα στοιχεία προσανατολισμού των επιφανειών των ασυνεχειών, για τις τρεις υπό-περιοχές, καθώς και για την απόσταση (spacing) μεταξύ των επιφανειών των ασυνεχειών που ανήκουν στην ίδια κύρια οικογένεια, τόσο με εμμονή (Persistent), όσο και χωρίς εμμονή (Non Persistent), τα οποία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πίνακες.

2) Προσδιορισμός της επιδεκτικότητας βραχοκαταπτώσεων, με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας (Corominas, J. et al. 2017). Συγκεκριμένα, έγινε χαρτογράφηση και υπολογισμός της κατανομής του όγκου των κενών (scars), που δημιουργήθηκαν από προγενέστερες καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών, στα μεγάλης κλίσης και πολύ έντονα διαρρηγμένα ασβεστολιθικά πρανή, ανάντη του Αρχαιολογικού Χώρου των Δελφών, όπου καταγράφηκαν 119 τιμές όγκων (m^3) των κενών (scars) των βραχωδών τεμαχών, από τη συνολική επιφάνεια του ασβεστολιθικού πρανούς. Η μέση τιμή αποκολλημένου βραχώδους υλικού μετρήθηκε ίση με $22,2 m^3$.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση-ογκομέτρηση των βραχωδών τεμαχών, που εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή, κατάντη των θέσεων αστοχίας του πρανούς, με τη χρήση του τρισδιάστατου (3D) μοντέλου που δημιουργήθηκε από την εναέρια αποτύπωση της περιοχής έρευνας, από τη λήψη με UAV, προσδιορίζοντας τις ακριβείς συντεταγμένες των σημείων τελικής απόθεσης (stop points) των βραχοτεμαχών που έχουν αστοχήσει στο παρελθόν, καθώς και του όγκου τους (m^3). Συνολικά μετρήθηκαν 46 βραχώδη μπλοκ, με μέση μετρούμενη τιμή όγκου ίση με $7,6 m^3$, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του κατακερματισμού των μπλοκ (fragmentation), από τη στιγμή της αποκόλλησής τους, μέχρι την τελική τους απόθεση στο χώρο, σε χαμηλότερα υψόμετρα, κατάντη της θέσης αστοχίας.

3) Αναπτύχθηκε μεθοδολογία τρισδιάστατης τροχομετρικής προσομοίωσης πιθανών βραχοκαταπτώσεων, από τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής αστοχίας, με τη χρήση του λογισμικού RocPro3D v.6.1., καθώς και δισδιάστατες τροχιακές αναλύσεις, με τη χρήση του λογισμικού RocFall της RocScience, ενώ προσδιορίστηκε το ενεργειακό καθεστώς (kJ) με τη χρήση των λογισμικών RocFall και RocPro3Dv.6.1, σε τρισδιάστατο (3D) και δυσδιάστατο (2D) περιβάλλον αντίστοιχα.

Ειδικότερα, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3Dv.6.1 πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση των καταπτώσεων των βραχιδών τεμαχών, μέσα από την ανάπτυξη τρισδιάστατων τροχομετρικών προσομοιώσεων (3D trajectometric analysis): 1) με σεισμικές ($PGV=0,41$ m/sec) και 2) ασεισμικές ($PGV=0$ m/sec) συνθήκες και 1) διάμετρο (d) βραχιδών τεμαχών ίση με 1 m και 2) διάμετρο (d) βραχιδών τεμαχών ίση με 1,3m, 1,5 m, 1,3 m και 1,5m, για κάθε θέση πιθανής βραχοκατάπτωσης αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αφορούν σε διαφορετικές παραμέτρους και παρουσιάζονται σε τρισδιάστατους θεματικούς χάρτες και φακέλους.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι ο **παράγοντας που μεταβάλλει και καθορίζει το εύρος της κινητικής ενέργειας είναι, κυρίως, η διάμετρος(d) των βραχιδών τεμαχών**. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερες τιμές έντασης (kJ) καταγράφηκαν στην περίπτωση όπου πραγματοποιείται ανάλυση με μέγεθος βραχιδών μπλοκ $d=1,3$ m και $d=1,5$ m, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου πραγματοποιείται τροχιακή ανάλυση με διάμετρο τεμαχών ίση 1m.

Επίσης παρατηρείται ότι η ύπαρξη εναύσματος σεισμού δε διαφοροποιεί τόσο τις τιμές της κινητικής ενέργειας (kJ), αλλά αλλάζει ο τρόπος και ο τύπος εκκίνησης της πορείας των μπλοκ από το πρανές.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν τροχομετρικές αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού RocFall της εταιρίας RocScience, όπου δημιουργήθηκαν 4 διατομές, για κάθε μία θέση – ζώνη ενεργοποίησης πιθανής βραχοκατάπτωσης. Από αυτή την ανάλυση κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός και η εκτίμηση του ενεργειακού καθεστώτος των δυνητικών βραχοκαταπτώσεων, από τις πιθανές θέσεις-ζώνες πιθανής αστοχίας, καθώς αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ποιοτική αξιολόγηση της διακινδύνευσης (Risk). Συμπεραίνεται, επομένως, ότι **η κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την τροχιά των βραχιδών τεμαχών, στις τέσσερις θέσεις εκκίνησης πιθανής βραχοκατάπτωσης, παρουσιάζει παρόμοιες τιμές (kJ), μέσα από τα δύο περιβάλλοντα τροχομετρικής ανάλυσης.**

4) Παράλληλα, από την τροχιακή ανάλυση, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού RocPro3D v.6.1 προσδιορίστηκε η τελική θέση απόθεσης των βραχωδών τεμαχίων (stop points) μέσα στο Χώρο, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια χωρική κατανομή με αυτή των βραχωδών τεμαχίων που χαρτογραφήθηκαν και υπολογίστηκαν, με τη χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου νέφους σημείων (3D point cloud), από τη λήψη δεδομένων με UAV και του λογισμικού Pix4Dmapper, σε προηγούμενο στάδιο.

5) Τέλος πραγματοποιήθηκε ποιοτική αξιολόγηση του βαθμού διακινδύνευσης (Risk), με τη δημιουργία Πινάκων και χαρτών ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix), τόσο για τις Άμεσες Υλικές, όσο και για τις Άμεσες Άυλες απώλειες. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης χωρικής ανάλυσης της Πιθανότητας Προσέγγισης – P (Propag) των βραχωδών μπλοκ στα σημεία υπό διακινδύνευση (elements at risk), τα οποία εξήχθησαν και αποτυπώθηκαν στους αντίστοιχους τρισδιάστατους χάρτες Εκτίμησης της Επικινδυνότητας (Hazard). Όσον αφορά στις Άμεσες Υλικές απώλειες παρατηρούμε ότι η διακινδύνευση χαρακτηρίζεται υψηλή στο σύνολο το Μνημείων του Χώρου, καθώς και στην Κασταλία πηγή, ενώ αντίστοιχα χαμηλή εμφανίζεται στο χώρο του Parking. Παράλληλα, στον Πίνακα ποιοτικής αξιολόγησης της διακινδύνευσης (risk matrix) για τις Άμεσες Άυλες απώλειες παρατηρούμε μια διαφοροποίηση σχετικά με την πιθανότητα διάδοσης των βραχωδών τεμαχίων, αλλά και τις αντίστοιχες επιπτώσεις τους στα σημεία ενδιαφέροντος (elements at risk), ενώ η διακινδύνευση εμφανίζεται υψηλή στο σύνολο των Μνημείων, στην Είσοδο, στην Κασταλία Πηγή και στο διάδρομο των επισκεπτών.



- Abbruzzese J., M., Sauthier C., Labiouse V. 2009, Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 9, 095–1109.
- Alvioli, M., Santangelo, M, Fiorucci, F., Cardinali, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Guzzetti, F., Peruccacci, S. 2021. Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway. *Engineering Geology*. Elsevier. 293.
- Ambraseys, N. and Pantelopoulos, P. 1989. The Fokis earthquake of 1 August 1870. *J. Europ. Earthq. Eng.*, 3, 10-18.
- Andrianopoulos, A., Saroglou, H. and Tsiambaos, G. 2013. Rockfall Hazard and Risk Assessment of road slopes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. XLVII, Proceedings of the 13th International Congress, Chania.
- Ayala-Carcedo, F.J., Cubillo-Nielsen, S., Alvarez, A., Domínguez, M.J., Laín, L., Laín, R., Ortiz, G., 2003. Large Scale Rockfall Reach Susceptibility Maps in La Cabrera Sierra (Madrid) performed with GIS and Dynamic Analysis at 1:5,000. *Natural Hazards* 30, 325–340.
<https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007095.12516.90>.
- Barton, N.R, 1978. International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests - Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.* 15, 319–368.
- Bathrellos, G. D., Kalivas, D. P., Skilodimou, H. D. 2017. Landslide Susceptibility Assessment Mapping: A Case Study in Central Greece. In *Remote Sensing of Hydrometeorological Hazards*, Petropoulos, G.P., Islam, T., Ends CRC Press, Taylor & Francis Group: London, UK, 2017, 493-512, ISBN-13:978-1498777582.

Botev, Z. I., Grotowski, J. F., D. P. Kroese. 2010. Kernel Density Estimation Via Diffusion. <http://www.imstat.org/aos/>. 38 (5), 2916–2957, <http://dx.doi.org/10.1214/10-AOS799>.

Brabb, E.E. Innovative approaches to landslide hazard mapping. In Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, Toronto, ON, Canada, 23–31 August 1985, 307–323.

Brodu, N., Lague, D. 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 68:121-134, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.

Budetta, P., 2004. Assessment of Rockfall Risk Along Roads. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4. 71–81.

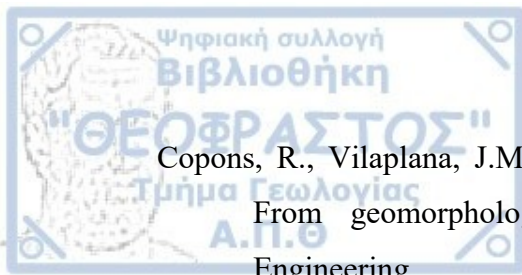
Cancelli, A., Crosta, G. B. 1993. Hazard and risk assessment in rockfallprone areas. In: Telford T (ed) Risk reliability in groundengineering, 177–190.

Christaras, B., & Vouvalidis, K. 2010. Rockfalls in the archaeological site of Delphi, Greece. In: Proceedings of the IAEG 2010 International Congress, Auckland, New Zealand, pp. 5-10.

Cignetti, M., Godone, D., Bertolo, D., Paganone, M., Thuegaz, P., Giordan, D. 2021. Rockfall susceptibility along the regional road network of Aosta Valley Region (northwestern Italy). J. Maps. 17, 54–64.

Scavia, C., Barbero, M., Castelli, M., Marchelli, M., Peila, D., Torsello G. and Vallero, G. 2020. Evaluating Rockfall Risk: Some Critical Aspects, Geosciences, 10(3), 98; <https://doi.org/10.3390/geosciences10030098>.

Constantinidis, C. V., Christodoulis, J., & Sofianos, A. I. 1988. Weathering processes leading to rockfalls at Delphi archaeological site. In: Proceedings of International symposium on engineering geology of ancient works, monuments and historical sites: preservation and protection, Balkema, Rotterdam, Brookfield, 201-205.



Copons, R., Vilaplana, J.M., 2008. Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology* 102, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.020>.

Corominas, J., Mavrouli, O. 2011. Rockfall quantitative risk assessment. In: Lambert S, Nicot F (eds) *Rockfall engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken, 255–296.

Corominas, J., Mavrouli, O., Santana, D., Moya, J. 2012. Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. In: Eberhardt E et al (eds) *Proceedings of the 11 International Symposium on Landslides*, Banff, Canada, 2. CRCPress/Balkema, Leiden, 1159–1164.

Corominas, V., Mavrouli, O. and Carulla R., 2017. «Rockfall Occurrence and Fragmentation», 4th World Landslide Forum LJUBLJANA, SLOVENIA, EU.

Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P., Lari, S. 2014. Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection. In: 12th International IAEG Congress, 43-58, Torino, Italy, DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_4.

Crosta, G. B., Frattini, P., Sterlacchini, S. 2001. *Valutazione e gestione del rischio da frana: principi e metodi*. Regione Lombardia Publication, Milano 169.

Crosta, G. B., Locatelli, C. 1999. Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo. In: *Proceedings Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni*. Glauco Brigatti Publisher, Genoa, 259–286.

Crosta, G.B., Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 407–422. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-407-2003>.

Cruden, D. M., Varnes, D. J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*. National Research Council, Transportation Research Board, Special Report 247, 36–75.

Cruden, D.M.; Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. In Landslides Investigation and Mitigation; Turner, A.K., Schuster, R.L., Eds.; Transportation research board, US National Research Council: Washington, DC, USA, 247, 36–75.

Dai FC, Lee CF, Ngai YY. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Eng Geol 64:65–87.

Devlioti K., Christaras B., Marinos V., Vouvalidis K., Giannakopoulos, N. 2019. "Kinematic analysis of rock instability in the archaeological site of Delphi using Innovative Techniques", Communications in Computer and Information Science, Springer, 407-418, 2019.

Devlioti, K., Christaras, B., Marinos, V., Vouvalidis, V., Fais, S. 2021. "Structural analysis of Rock slopes, using UAV & LiDAR, in the Archaeological site of Delphi, Greece", Proceedings of 3rd European Regional Conference of IAEG, Athens, Greece, 6-10 October 2021.

Hantz, D., Dussauge-Peisser, C., Jeannin, M., Vengeon, J. M. 2003. Rock fall hazard assessment: from qualitative to quantitative failure probability. Int. Conf. on Fast Slope Movements, Prediction and Prevention for Risk Mitigation, May 2003, Naples, Italy. 263-267. hal-00337780.

Dussauge, C., Carine, J.R., Helmstetter, A. 2007. Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. J. Geophys. Res. Sol. Ea., 108, 2286.

Einstein, H.H., 1988. Landslides: proceedings of the fifth International symposium on landslides, 10-15 July 1988, Lausanne. A. A. Balkema, Rotterdam Brookfield.

Evans, S. G., Hungr, O, 1993. The assessment of rock fall hazard at the base of talus slopes. Can Geotech J 30, 620–636.

Fell, R. 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. Can Geotech J 31(2):261–272.

Fell, R., Hartford, D. 1997. Landslide risk management. Cruden and Fell. Landslide risk assessment, Balkema, Rotterdam, 51–109.

Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K. 2016. Qualitative rockfall hazard assessment: a comprehensive review of current practices. *Rock Mech RockEng* 49:2865–2922. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s00603- 016- 0918-z](https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z).

Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K. and Lambert, C. 2017. Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, vol. 98, pp. 88-101.

Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K. 2016. Qualitative Rockfall Hazard Assessment: A Comprehensive Review of Current Practices, *Rock Mechanics and Rock Engineering* volume 49, pages2865–2922.

Giani, G.P., Giacomini, A., Migliazza, M., Segalini, A., 2004. Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. *RockMechanics and RockEngineering* 37, 369–389. <https://doi.org/10.1007/s00603-004-0027-2>.

Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., Dorsch, S. J., 2006. Analysis of LiDAR – derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 73 (1), 131-148.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *Geomorphology* 31:181–216.

Guzzetti, F. Landslide Hazard and Risk Assessment. Ph.D. Thesis, Mathematisch–NaturwissenschaftlichenFakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms–Universität, University of Bonn, Bonn, Germany, 2006; 389p.

Hoek, E. 2000. Analysis of rockfall hazards. In: Hoek E (ed) *Practicalrock engineering*, pp 117–136.

<https://whc.unesco.org/en/list/393/>

Hungr, O, Evans, S.1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Int Symp Landslides* 5:685–690.

Hungr, O., Evans, S. G., Hazzard, J. 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Can Geotech J* 36:224–238. <https://doi.org/10.1139/t98-106>.

Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. 2014. The Varnes classification of landslides types, an update. *Landslides* 11:167–194.

Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellan A, Derron M-H, Loye A, Metzger R, Pedrazzini A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards* 61(1):5-28, DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2.

Jaboyedoff, M., Dudt, J. P. and Labiouse V. An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. 2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5, 621–632.

Jon Ander Clemente, Jesus A. Uriante, Daniele Spizzichino, Francesco Faccini, Tomás Morales, 2023. *Engineering Geology*, Elsevier, 314.

Karantanellis E., 2021. – Landslide Detection and Characterisation Using OBIA Methodology and UAV Photogrammetry. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of the School of Geology No XXX, 177.

Koroniotis, K. S., Collios, A. A., & Basdekis, A. P. 1988. Stabilisation of the rock slopes at the region of Kastalia spring at Delphi. In: *International symposium on engineering geology of ancient works, monuments and historical sites: preservation and protection*, Balkema, Rotterdam, Brookfield, 207-211.

Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., Bonnard, C., 2005. Landslide risk management in Switzerland. *Landslides* 2, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0018-8>.

Li HB, Yang XG, Sun HL, Qi SC, Zhou JE. 2019a. Monitoring of displacement evolution during the pre-failure stage of a rock block using ground-based radar interferometry. *Landslides* 16(9):1721-1730, DOI: 10.1007/s10346-019-01228-1.

Lukovic M., Ziegler M., Aaron J., Perras M. 2021. Rockfall susceptibility and runout in the Valley of the Kings. *Natural Hazards*. Springer. . vol. 110, pp. 451-485.

M. Jaboyedoff, J. P. Dudt, V. Labiouse, 2005, An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 621–632.

Marinos, P., &Rondoyanni, T. (2005) The archaeological site of Delphi, Greece: a site vulnerable to earth-quakes, rockfalls and landslides, *Landslides*, Springer, Berlin, Heidelberg, 225-230.

Mavrouli, O., & Corominas, J. 2020. Evaluation of maximum rockfall dimensions based on probabilistic as-sessment of the penetration of the sliding planes into the slope. *Rock Mechanics and Rock Engineer-ing*, 53(5), 2301-2312.

Michoud, C., Derron, M.-H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F.-J., Loye, A., Nicolet, P., Pedrazzini, A., Queyrel, A. 2012. Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 615–629. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-615-2012>.

Nex, F. And Remondino, F. 2004. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1-15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x.

NGA-West2 -- Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes (<https://ngawest2.berkeley.edu/>).

NOAFaultsv5.01 (DatabaseofactivefaultsinGreece, InstituteofGeodynamics).

Pantelidis L. 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 315–325.

Pitilakis K., Fotopoulou S. 2011. SafeLand Deliverable D2.5: physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines.

Pix4D. 2021. “Pix4D.”

Raetzo, H., Lateltin, Z O. Bollinger, Z D., Tripet, Z J.P. 2002. Hazard assessment in Switzerland –Codes of Practice for massmovements. Springer. vol. 61. pp. 63–268.

Riquelme, A.J., Abellan, A., and Tomas, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195. 185–195.

Riquelme, A.J., Abellan, A., Tomas, R., & Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers and Geosciences*, 68. 38–52.

Robotham, M. E. and Wang, H., and Walton, G. 1995." ""Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes."" *Institution of mining and Metallurgy*", Section A.104(Jan-April), A25-A33. @ Limestonequarry in England.

Rocfall (Rocscience Inc.).

Rochet, L. 1987. Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des eboulements rocheux. *Bull Liaison Pont Chaussée*, 150/151, 84–95.

Rockfall modelling and risk zoning: a case study in the french alps using geomatics, airborne laser scanning, 2d & 3d runout models , Nicolas Clouet¹, Frédéric Berger² and Jerome Liévois³, 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France Conference Proceedings www.interpraevent.at.

RocPro3D software http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php. 2018. Google Scholar.

Rosser, N., Lim, M., Petley, D., Dunning, S., Allison, R. 2007. Patterns of precursory rockfall prior to slope failure. *J Geophys Res* 112:F04014.

Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S. 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, 114, 129–142.

Ruiz-Carulla, R., Corominas, J. 2020. Analysis of rockfalls by means of a fractal fragmentation model. *Rock Mech Rock Eng* 53:1433–1455. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01987-2>.

Sabatakakis, N., G. Koukis, E. Vassiliades, and S. Lainas. 2013. "Landslide Susceptibility Zonation in Greece." *Natural Hazards* 65(1):523–43. doi: 10.1007/s11069-012-0381-4.

Salvini, R., Francioni, M., Riccucci, S., Bonciani, F., Callegari, I. Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps. *Geomorphology* 2013, 185, 110–122.

Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P. and Tsiambaos, G. 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 1823–1836, doi:10.5194/nhess-12-1823-2012.

Scaloni, M., Longoni, L., Melillo, V. and Papini, M. 2014. "Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives." *Remote Sensing* 6(7):5909–37.

Scavia, C., Barbero, M., Castelli, M., Marchelli, M., Peila, D., Torsello, G. and Vallero, G. 2020. Evaluating Rockfall Risk: Some Critical Aspects. *Innovative Strategies for Sustainable Mitigation of Landslide Risk. Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030098>.

Schmidt, J. 1879. *Studien ueber Erdbeben*, ed. Georgi, A. (Leipzig), 352.

Simone, M., 2020. Comparing rockfall hazard and risk assessment procedures along roads for different planning purposes. *Journal of Mountain Science* 17(3). <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5766-3>.

Stanley, Thomas, and Dalia B. Kirschbaum. 2017. "A Heuristic Approach to Global Landslide Susceptibility Mapping." *Natural Hazards* 87(1):145–64. doi: 10.1007/s11069-017-2757-y.

Eeckhaut, V. D., Miet, Kerle, N., Poesen, J. and Hervás, J. 2012. "Object-Oriented Identification of Forested Landslides with Derivatives of Single Pulse LiDAR Data." *Geomorphology* 173–174:30–42. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.024.

Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: SchusterRL, Krizek RJ (eds) Landslide analysis and control. Transportation Research Board, Special report 176. National Academy Sciences, Washington, DC, 11–33.

Varnes, D. J., IAEG—International Association Engineering Geology, Commission on Landslides and other Mass-Movements Landslide 1984. Hazard zonation: a review of principles and practice, the UNESCO Press, Paris.

Wang, X. L., Liu, H. Y., Sun, J.J. A new approach for identification of potential rockfall source areas controlled by rock mass strength at a regional scale. RemoteSens. 2021, 13, 938.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αργυρούδης, Σ. 2017. Σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος «Εκτίμηση επικινδυνότητας και διακινδύνευσης στην εκδήλωση φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών». ΜΠΣ Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

Κωνσταντινίδης Ι. Κ., 2021. Εκτίμηση της Επικινδυνότητας Εκδήλωσης Βραχοκαταπτώσεων στη περιοχή της Μονής Κηπίνας στους Καλαρρύτες Ηπείρου, με τη Χρήση UAV. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 106 σελ.

Λέκκας, Ε. & Γουλιώτης, Α. 2010. «ΔΕΛΦΟΙ: ΕΝΑ ΜΟΝΑΔΙΚΟ ΜΝΗΜΕΙΟ ΣΕ ΕΝΑ ΕΝΕΡΓΟ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ». Council of Europe European Center on Prevention and Forecasting of Earthquakes (E.C.P.F.E.), Training Course Seismic Risk Assessment in Specific Areas with Monumental Structures, Αθήνα.

Μαριολάκος, Η. & Μπαντέκας Ι. 2010. ΤΟΜΑΝΤΕΙΟΤΩΝΔΕΛΦΩΝ: ΜΙΑ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΥΘΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.

Μουντράκης, Δ. 2010. Γεωλογία Ελλάδος.

Μουντράκης, Δ. 2010. Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας.

Παπαθανασίου, Γ. 2022. Τεχνική Γεωλογία και Γεωλογικοί Κίνδυνοι [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-96>.



Παπανικολάου, Δ. Ι. 2015. Γεωλογία της Ελλάδας: τεκτονική και παλαιογεωγραφική – γεωδυναμική εξέλιξη.

Διαδικτυακές Πηγές

Γ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, Υπουργείο Πολιτισμού.
<http://odysseus.culture.gr/h/3/gh30.jsp>.