



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ανάστροφη ανάλυση
καταπτώσεων βραχοτεμαχίων
προκαλουμένων από σεισμό στην
Κεφαλονιά (2014) και στη
Λευκάδα (2015)

Κυρατζή Αικατερίνη

Επιβλέπων Καθηγητής Μ. Σακελλαρίου

Αθήνα, 2017



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Ανάστροφη ανάλυση καταπτώσεων βραχοτεμαχίων προκαλουμένων από σεισμό στην Κεφαλονιά (2014) και στη Λευκάδα (2015)»

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων Καθηγητής

Μ. Σακελλαρίου

Καθηγητής

Λ. Τσούλος

Καθηγητής

Ε. Λέκκας



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αφιερώνω τη Μεταπτυχιακή Διπλωματική μου Εργασία στους γονείς μου και στον αδερφό μου, που με την αγάπη τους με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού μου αλλά και στις αποφάσεις μου για τη μετέπειτα επαγγελματική μου πορεία.

Η ολοκλήρωση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής μου Εργασίας σηματοδοτεί το τέλος της φοίτησής μου στο Μεταπτυχιακό «Γεωπληροφορική» της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά τη διάρκεια αυτής εμπλούτισα τις γνώσεις μου, ανέπτυξα τις ικανότητές μου, απέκτησα νέες δεξιότητες και το πιο σημαντικό γνώρισα ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και έμαθα από την εμπειρία τους, για αυτό τους ευχαριστώ θερμά.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον επιβλέποντα της Εργασίας μου, Καθηγητή κ. Μιχάλη Σακελλαρίου για τις γνώσεις που μου μετέδωσε, την καθοδήγηση και την ανάθεση του θέματος, που μου επέτρεψε ίσως για τελευταία φορά να ασχοληθώ με ένα επιστημονικό πρόβλημα που σχετίζεται με τη γεωλογία.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Λύσανδρο Τσούλο για την αμέριστη αρωγή του στη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων για την διεκπεραίωση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Ακολούθως, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Ευθύμη Λέκκα για την προτροπή του να παρακολουθήσω το μεταπτυχιακό αλλά και για τα βιβλιογραφικά δεδομένα και το πλούσιο φωτογραφικό υλικό των περιοχών μελέτης.

Σε αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Τσόμπο, Διευθυντή Χαρτογραφίας του Ι.Γ.Μ.Ε. για τη διάθεση των γεωλογικών χαρτών και την εταιρεία «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε» για την παροχή των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους.

Τέλος, ευχαριστώ την υποψήφια Διδάκτωρ της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Κατερίνα Καψαμπέλη που με την επιμονή της κατάφερε να τρέξει αρχικά την εφαρμογή και στη συνέχεια με βοήθησε σε όσα προβλήματα αντιμετώπισα.

Κυρατζή Αικατερίνη

Αθήνα,

Οκτώβριος 2017



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχίων προκαλούμενες από σεισμό εκδηλώνονται συχνά στον ελλαδικό χώρο, με σημαντικές συνέπειες στις υποδομές και στον άνθρωπο. Μέχρι σήμερα, ο σχεδιασμός προστατευτικών μέτρων γίνεται με τη χρήση δισδιάστατων (2D) μοντέλων προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίων, τα οποία εμπεριέχουν σημαντικά σφάλματα καθώς αμελούν τη χωρική διασπορά της κατάπτωσης. Τα τρισδιάστατα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί επιλύουν αυτό το πρόβλημα αλλά δημιουργούν άλλα σφάλματα, που σχετίζονται με την ποιότητα των δεδομένων και την ακρίβεια του αναγλύφου. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιεί την εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS», η οποία δίνει λύση σε αυτά τα προβλήματα με τη χρήση ενός νέου μοντέλου τρισδιάστατης προσομοίωσης, προκειμένου να μοντελοποιήσει καταπτώσεις βραχοτεμαχίων. Εκτελείται ανάστροφη ανάλυση τριών καταπτώσεων βραχοτεμαχίων προκαλούμενων από σεισμό, οι δύο στην παραλία του Μύρτου στην Κεφαλονιά και η τρίτη στο χωριό Πόντι στη Λευκάδα, προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα του προτεινόμενου μοντέλου.

SUMMARY

Earthquake induced Rockfalls occur frequently in Greece, causing damage on structure and having significant impact on humans. Until today, protective measures are designed with the use of 2D rockfall simulation modeling, which result in important errors as they neglect the lateral dispersion of rockfalls. 3D models that have been developed solve those issues, but other errors occur concerning the data quality and the elevation model accuracy. This Master Thesis uses the “ROCKFALL ANALYSIS” application, which solves the above mentioned errors by using a new 3D rockfall simulation model. Inverse analysis of three earthquake induced rockfalls is conducted, two of them occurred at Myrtos beach at Kefalonia island and the third one at Ponti village at Lefkada island, in order to test the effectiveness and efficiency of the proposed model.



Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
SUMMARY.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	8
2.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	8
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	9
2.3 ΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	10
2.4 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΥ	14
3.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (2D) ΜΟΝΤΕΛΑ	14
3.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (3D) ΜΟΝΤΕΛΑ	14
3.3 ΤΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ «ROCKFALL ANALYSIS»	15
3.3.1 ΜΕΡΟΣ 1 ^ο – ArcMap “ROCKFALL_ANALYSIS.mxd”	17
3.3.2 ΜΕΡΟΣ 2 ^ο – ArcScene “ROCKFALL_ANALYSIS_3D.sxd”	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ & ΛΕΥΚΑΔΑ	23
4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	23
4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ	26
4.2.1 ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ – 26 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2014 $M_w=6.1$	28
4.2.2 ΛΕΥΚΑΔΑ – 17 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2015 $M_w=6.4$	30
4.3 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΩΝ.....	32
4.3.1 ΜΥΡΤΟΣ – ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ	35
4.3.2 ΠΟΝΤΙ – ΛΕΥΚΑΔΑ	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΥΡΤΟΣ «ROCKFALL ANALYSIS».....	43
5.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	43
5.1.1 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (ΨΜΕ) ΜΟΡΦΗΣ TIN.....	43
5.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	44
5.1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ.....	47
5.1.4 ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	48
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΟΝΤΙ «ROCKFALL ANALYSIS».....	54
6.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	54
6.1.1 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (ΨΜΕ) ΜΟΡΦΗΣ TIN.....	54
6.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	55
6.1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ.....	58
6.1.4 ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	58
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Ανάστροφη ανάλυση καταπτώσεων βραχοτεμαχίων προκαλουμένων από σεισμό στην Κεφαλονιά (2014) και στη Λευκάδα (2015)»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΡΤΩΝ	79



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να αναδείξει το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο προσομοίωσης κατάπτωσης βράχου «ROCKFALL ANALYSIS» ως εργαλείο χωρικής ανάλυσης και σχεδιασμού για τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της πολιτικής προστασίας από φυσικές καταστροφές.

Μέχρι σήμερα, ο σχεδιασμός προστατευτικών μέτρων από καταπτώσεις βραχοτεμαχίων γίνεται με τη χρήση δισδιάστατων μοντέλων, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη την τρισδιάστατη επίδραση της τοπογραφίας στη χωρική διασπορά της τροχιάς της κατάπτωσης. Υπάρχοντα μοντέλα τρισδιάστατης προσομοίωσης επιλύουν αυτό το πρόβλημα, αλλά εμπεριέχουν προβλήματα ακρίβειας λόγω της ποιότητας των δεδομένων και του αναγλύφου. Η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» χρησιμοποιεί ένα νέο μοντέλο, υλοποιείται μέσα στο περιβάλλον ArcGIS της ESRI και επιλύει τα ανωτέρω προβλήματα προσφέροντας μια ακριβέστερη εκτίμηση των πιθανών τροχιών βραχοτεμαχίων που μπορούν να ξεκινήσουν την πτώση τους από οποιοδήποτε σημείο του πρανούς.

Για την εκτέλεση της εφαρμογής «ROCKFALL ANALYSIS» επιλέχθηκαν δύο νησιά της Ελλάδας, η Κεφαλονιά και η Λευκάδα, στα οποία εκδηλώνονται συχνά καταπτώσεις λόγω της γεωλογίας και της υψηλής σεισμικότητας. Πραγματοποιήθηκε ανάστροφη ανάλυση τριών καταπτώσεων βραχοτεμαχίων που συνέβησαν μετά από δύο μεγάλους καταστροφικούς σεισμούς στην περιοχή. Στην Κεφαλονιά προσομοιώθηκαν οι δύο καταπτώσεις βράχων που προκλήθηκαν στην παραλία του Μύρτου από το σεισμό της 26^{ης} Ιανουαρίου 2014 μεγέθους $M_w=6.0$. Στη Λευκάδα επιλέχθηκε η μοντελοποίηση της κατάπτωσης στο χωριό Πόντι από το σεισμό της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015 μεγέθους $M_w=6.4$, η οποία εκτός από υλικές ζημιές προκάλεσε και το θάνατο μιας γυναίκας.

Η Διπλωματική Εργασία δομείται από 7 Κεφάλαια. Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται το φυσικό φαινόμενο των κατολισθήσεων, η έκτασή του στην Ελλάδα και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων προκαλουμένων από σεισμό. Στο τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα υπάρχοντα μοντέλα (2D και 3D) προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίων και στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο «ROCKFALL ANALYSIS» και ο τρόπος λειτουργίας της εφαρμογής. Στο τέταρτο Κεφάλαιο περιγράφεται η γεωλογία των περιοχών μελέτης, τα χαρακτηριστικά των σεισμών που έπληξαν την Κεφαλονιά και τη Λευκάδα και τα χαρακτηριστικά των βραχοπτώσεων που εκδηλώθηκαν στην παραλία του Μύρτου και στο χωριό Πόντι. Στο πέμπτο και έκτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που εισήχθησαν στην εφαρμογή, οι δοκιμές που έγιναν και τα αποτελέσματα αυτών για το Μύρτο και το Πόντι αντίστοιχα. Τέλος, στο έβδομο Κεφάλαιο αξιολογείται συνολικά η εφαρμογή ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν και την αποδοτικότητά της, προτείνοντας βελτιώσεις.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Με τον όρο κατολίσθηση ορίζεται η γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού (residual) εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω (Terzaghi, 1950). Είναι η φυσιολογική αντίδραση των γεωλικών να επανακτήσουν την ισορροπία τους, που διαταράχθηκε για κάποιο λόγο. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια φυσική γεωλογική εξέλιξη που αρχίζει με πρόδρομα φαινόμενα (ορατά ή όχι και με εσωτερικές και εξωτερικές θραύσεις και παραμορφώσεις) και εκδηλώνεται στην τελική φάση με γενικώς πολύ μεγάλες ταχύτητες.

Οι κατολίσθησεις συνιστούν μαζί με τους σεισμούς, τις εκρήξεις ηφαιστειών, τις ανεξέλεγκτες πυρκαγιές και τις πλημμύρες τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές (natural disasters) και αποτελούν βασική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζωών καθώς και περιουσιών με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

2.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Ο μηχανισμός εκδήλωσης μιας κατολίσθησης περιλαμβάνει γενικά μια αλληλουχία γεγονότων που αρχίζουν με την επίδραση διάφορων αιτίων, τα οποία επηρεάζουν τις συνθήκες ισορροπίας του πρανούς και προκαλούν τη διατάραξή του με τελικό αποτέλεσμα τη θραύση και τη μετακίνηση αυτού. Σπάνια μπορεί να αποδοθεί μια κατολίσθηση σε ένα και μοναδικό αίτιο. Η διαδικασία που οδηγεί στην ανάπτυξη μιας μετακίνησης πρανούς αρχίζει θεωρητικά με το σχηματισμό του ίδιου του γεωλογικού υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές, όταν καθορίζονται οι βασικές φυσικές του ιδιότητες και περιλαμβάνει όλα τα επακόλουθα γεγονότα των μετακινήσεων του φλοιού, της αποσάθρωσης και της διάβρωσης. Τελικά, κάποια συγκεκριμένη δράση, ίσως ασήμαντη, προκαλεί την έναρξη της μετακίνησης του γεωλογικού υλικού προς τα κατόντη. Η δράση αυτή όμως, δε μπορεί να θεωρηθεί σαν η κύρια αιτία, έστω και αν ήταν αναγκαία, μέσα στην αλυσίδα των γεγονότων (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Αν και η εκδήλωση του φαινομένου έχει συγκεκριμένα πάντα αίτια, οι παράγοντες που συνεργούν στη διαμόρφωση των οριακών καταστάσεων και τελικά στην εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου μπορεί να είναι (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011):

- Γεωλογικοί: Η φύση του εδάφους ή της βραχομάζας, η δομή, η γεωμετρία και οι σχέσεις με το υπόλοιπο γεωλογικό περιβάλλον.
- Γεωμορφολογικοί: Φυσικοί και χημικοί παράγοντες με τους οποίους μεταβάλλεται η αρχική σύσταση και δομή των πετρωμάτων λόγω της δράσης του νερού, του ανέμου, του πάγου, της αποσάθρωσης, της διάβρωσης, της απολέπισης και της ηφαιστειότητας.
- Τοπογραφικοί: Η εξωτερική γεωμετρία.



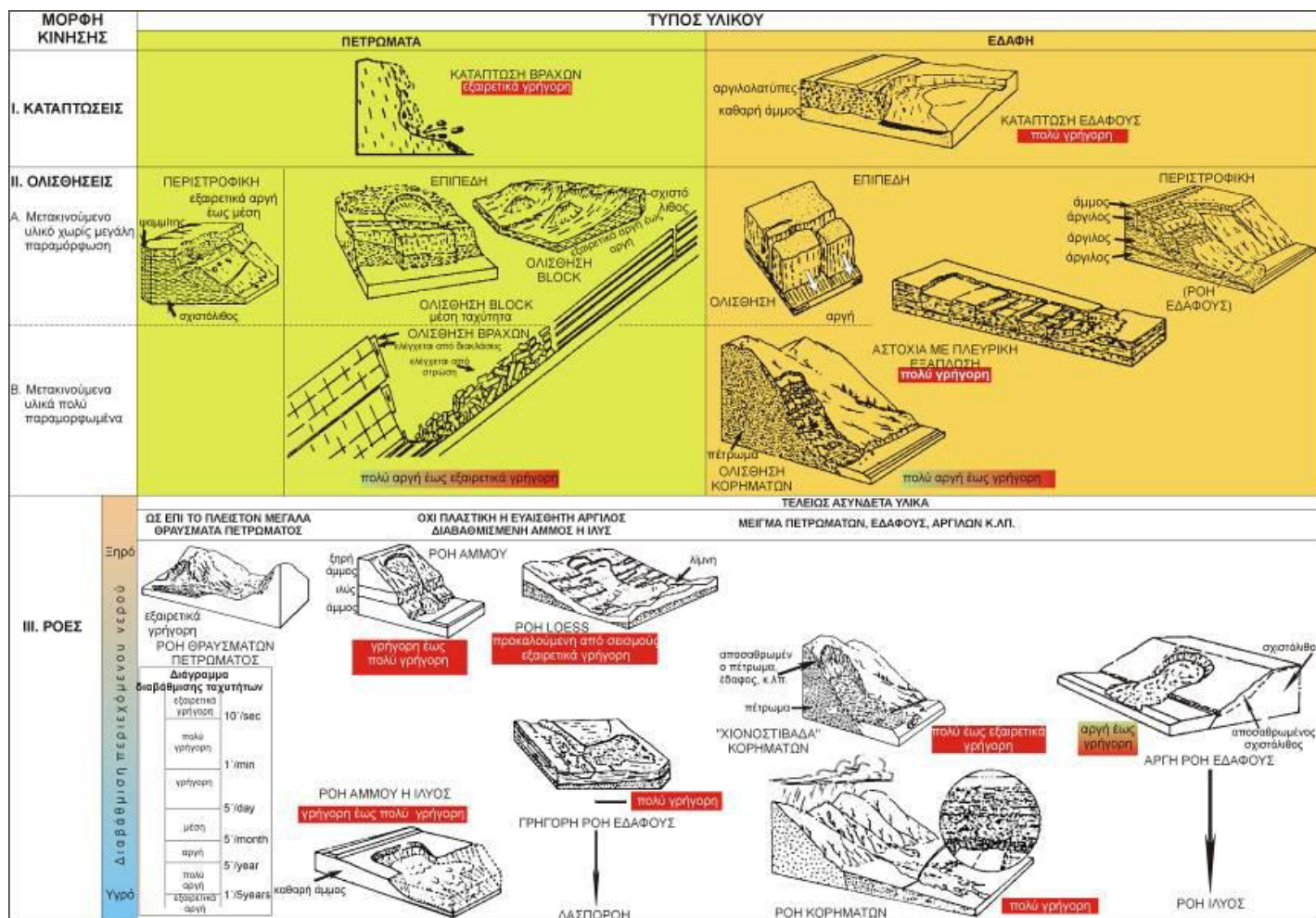
- Υδρολογικοί: Τα επιφανειακά και υπόγεια νερά και η φυσική υγρασία.
- Κλιματολογικοί: Οι κλιματολογικές συνθήκες, ο κλιματολογικός τύπος, το μικροκλίμα, οι εναλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και το καθεστώς κατακρημνισμάτων.
- Μηχανικοί: Μηχανικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών, τεκτονικά επεισόδια, διαμορφωμένες ή σε εξέλιξη εντατικές καταστάσεις.
- Ανθρωπογενείς: Κατασκευή τεχνικών έργων, υδραυλικές διευθετήσεις, εκμετάλλευση υπογείων νερών και ορυκτών πόρων, υλοτομία, πυρκαγιές κ.α.

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Σχετικά με την ταξινόμηση των κατολισθήσεων, η ταξινόμηση του Varnes (Varnes, 1978) είναι η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη. Η διατύπωση κατολίσθησης έχει αντικατασταθεί από τον όρο «μετακίνηση μαζών» (mass movements), περιλαμβάνοντας έτσι κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό (Πίνακας 2.1 & Εικόνα 2.1).

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν την κίνηση)		
		ΒΡΑΧΟΣ	ΕΛΑΦΟΣ	
			ΚΟΡΗΜΑΤΑ	ΓΑΙΕΣ
Πτώσεις		Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βράχων	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βράχων	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρικές εξάπλωσεις		Πλευρική εξάπλωση βράχων	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροές		Ροή – Ερπυσμός βράχων	Ροή – Ερπυσμός κορημάτων	Ροή – Ερπυσμός γαιών
Σύνθετες		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων μετακίνησης		



Εικόνα 2.1: Ταξινόμηση κατά Varnes (1978), σχηματική αναπαράσταση και κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης κατολισθήσεων (WP/WLI 1995).

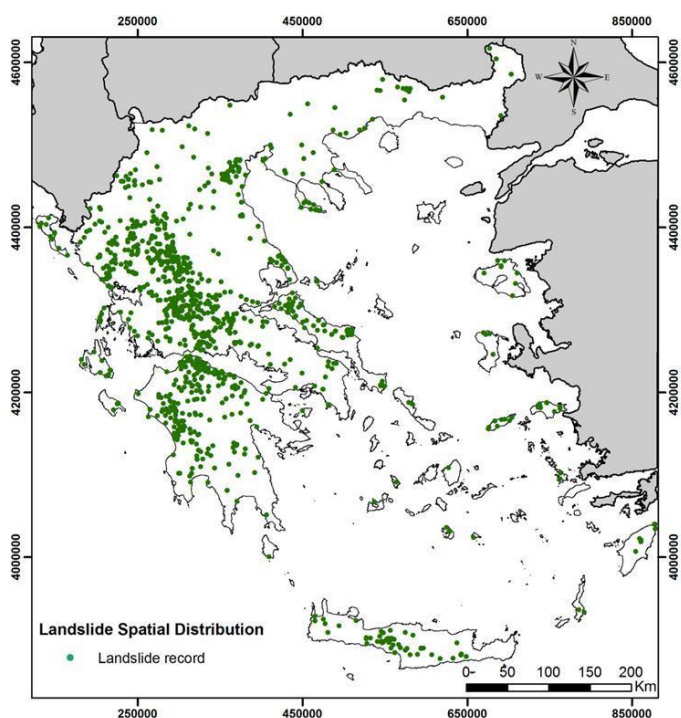
2.3 ΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι πρόσφατες κατολισθητικές κινήσεις εκδηλώνονται είτε αυτοτελώς λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας (διαρκώς αυξανόμενη αστικοποίηση), της μεγάλης έντασης των βροχοπτώσεων και της μορφολογίας, είτε συνοδευόμενες από ισχυρούς σεισμούς (Koukis & Zioukas, 1991). Η πιο συχνή μορφή κατολισθήσεων στην Ελλάδα είναι οι καταπτώσεις βράχων, αλλά και η συχνότερη μορφή αστοχίας που προκαλείται από σεισμό. Η γεωλογική δομή (συχνές εμφανίσεις βραχωδών σχηματισμών, ύπαρξη ρηγμάτων και έντονης ρωγμάτωσης των πετρωμάτων), η απότομη τοπογραφία και το ορεινό ανάγλυφο καθώς και η υψηλή σεισμικότητα συμβάλλουν στη δημιουργία σημαντικού κινδύνου εκδήλωσης καταπτώσεων βράχων (Koukis, et al., 1997).

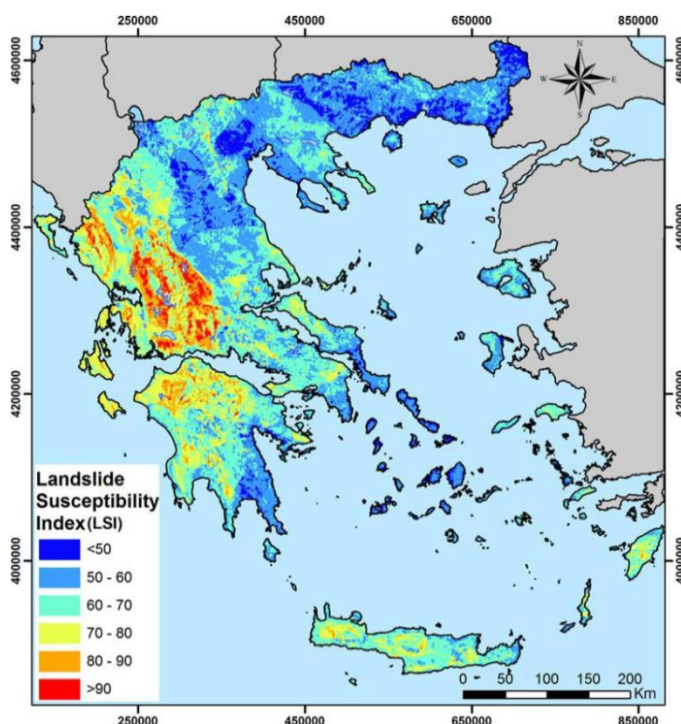
Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από σύνθετη και πολύπλοκη γεωλογική δομή και καθεστώς έντονης τεκτονικής καταπόνησης και παραμόρφωσης των σχηματισμών της, ως αποτέλεσμα των επάλληλων ορογενετικών κινήσεων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν και συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Οι κατολισθητικές κινήσεις κατανέμονται ανομοιόμορφα σε όλη τη χώρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 που είναι καταγεγραμμένες 1635 σημαντικές κατολισθήσεις έως το 2010 (Σαμπατακάκης Ν, n.d.). Εκδηλώνονται κυρίως σε περιοχές που επικρατούν σχηματισμοί των γεωτεκτονικών ζωνών της κεντρικής και δυτικής Ελλάδας, ενώ αντίθετα στις ζώνες της Ανατολικής Ελλάδας περιορίζονται σημαντικά. Στη Δυτική και Κεντρική Ελλάδα επικρατούν

πρόσφατοι αλπικοί σχηματισμοί (φλύσσης) και μεταλλικά ιζήματα (κυρίως Νεογενή), που συνήθως καλύπτονται από μανδύα αποσάθρωσης μεγάλου πάχους και χαρακτηρίζονται από ημισυνεκτικοί έως χαλαροί σχηματισμοί, καθώς και βραχώδεις σχηματισμοί που είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε κατολισθήσεις. Η γεωλογία σε συνδυασμό με την τεκτονική καταπόνηση (ισχυρή διάρρηξη και έντονος κατακερματισμός λόγω των νεοτεκτονικών τάσεων και σεισμών), το έντονο μορφολογικό ανάγλυφο (πρόσφατη σχετικά δράση των τεκτονικών δυνάμεων σε συνδυασμό με την διάβρωση) και τις έντονες βροχοπτώσεις είναι καθοριστικής σημασίας για την συχνή εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων. Αντίθετα, στην Ανατολική Ελλάδα η επικράτηση προαλπικών (συνεκτικών) σχηματισμών, η περιορισμένη δράση των τεκτονικών δυνάμεων κατά τον αλπικό κύκλο και ο χαμηλός βροχομετρικός δείκτης αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων (Κούκης, 1980) (Κούκης & Ρόζος, 1982).

Οι κατολισθήσεις αποτελούν σοβαρό καταστροφικό γεωλογικό φαινόμενο με τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις στις περιοχές που εκδηλώνονται. Ειδικότερα, οι καταπτώσεις βράχων μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές και διακοπή του οδικού δικτύου αλλά και μεγάλο αριθμό θανάτων. Παρά το ότι άλλοι μηχανισμοί αστοχίας χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο οικονομικό ρίσκο, οι καταπτώσεις έχουν σημαντική καταστροφική ιδιότητα λόγω της υψηλής ενέργειας και κινητικότητάς τους. Οι περισσότερες περιοχές του ελλαδικού χώρου ανήκουν σε ζώνες με αυξημένη επιδεκτικότητα προς κατολίσηση (landslide susceptibility), δηλαδή δυνατότητα να συμβεί χωρίς αυτή να προσδιορίζεται χρονικά (Εικόνα 2.3) αλλά και επικινδυνότητα προς κατολίσηση (landslide hazard), δηλαδή πιθανότητα να συμβεί οπότε αυτή καθορίζεται χρονικά (Σαμπατακάκης Ν, n.d.).



Εικόνα 2.2: Θέσεις 1635 σημαντικών καταγεγραμμένων κατολισθήσεων μέχρι το 2010 (Σαμπατακάκης Ν, n.d.).



Εικόνα 2.3: Χάρτης επιδεκτικότητας προς κατολίσηση της Ελλάδας (Σαμπατακάκης Ν, n.d.).

2.4 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ

Κάθε τύπος μετακίνησης έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφορετική έκφραση στην επιφάνεια του εδάφους. Οι καταπτώσεις, που κύρια ερευνά η παρούσα Διπλωματική Εργασία, είναι η



απότομη μετακίνηση μιας μάζας (κυρίως πετρώματος αλλά και συνεκτικού εδάφους) οποιουδήποτε μεγέθους, που αποσπάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρηνές. Οι διαστάσεις των υλικών της μάζας μετακίνησης ποικίλουν, από μεμονωμένους λίθους μέχρι τεράστιες μάζες πετρωμάτων, τα οποία δημιουργούν κώνους κορημάτων ή πλευρικά κορήματα. Στο ύπαιθρο αναγνωρίζονται από τη συγκέντρωση υλικού που δεν προέρχεται από το υποκείμενο πρηνές ή τη διαδικασία της διάβρωσης. Το μεγαλύτερο μέρος του υλικού βρίσκεται υποχρεωτικά κοντά στο απότομο πρηνές από το οποίο προέρχεται. Κάποια τεμάχια από το υλικό μπορεί να αναπηδήσουν – κυλήσουν και να φτάσουν σε σχετικά μεγάλη απόσταση.

Σε απότομα πρηνή με κλίση μεγαλύτερη του 4:1 (= ύψος : βάση), δηλαδή με κλίση περίπου 80° παρατηρείται συνήθως ελεύθερη πτώση της μάζας που αποκόπτεται από το πρηνές. Σε ηπιότερα πρηνή παρατηρείται αναπήδηση της μάζας πάνω στο πρηνές και θραύση σε μικρότερα τεμάχια, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη γωνία πρόσπτωσης. Σε πρηνή με κλίση μικρότερη των 45° (1:1) η κύρια κίνηση της κατάπτωσης μετατρέπεται σε κύλιση. Έτσι σε ένα πρηνές που παρουσιάζει μεταβολές στην κλίση του είναι δυνατό η κίνηση της μάζας να μετατρέπεται από ελεύθερη πτώση σε αναπήδηση και κύλιση και αντίστροφα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Σχετικά με την ταχύτητα μετακίνησης, οι καταπτώσεις εκδηλώνονται με πολύ γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη ταχύτητα, σύμφωνα με την Εικόνα 2.1, καθώς η πτώση γίνεται ελεύθερα, με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρηνούς. Είναι γνωστό ότι οι επιπτώσεις που έχει μια κατολισθήση αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας μετακίνησης, αφού γενικά οι πολύ γρήγορες κατολισθήσεις προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες σε ζωές και περιουσίες σε σχέση με τις αργές (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Σύμφωνα με την κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης κατολισθήσεων (WP/WLI 1995), οι πιθανές βλάβες στις κατηγορίες που υπάγονται οι καταπτώσεις δίνονται στον Πίνακα 2.2. Το όριο μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών είναι σημαντικό καθώς κρίνεται η δυνατότητα διαφυγής των ανθρώπων από την επικίνδυνη περιοχή και η απώλεια ζωών.

Πίνακας 2.2: Πιθανές βλάβες ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης (WP/WLI 1995).

Κατηγορία	Περιγραφή	Τυπική ταχύτητα	Πιθανές βλάβες
7	Εξαιρετικά γρήγορη	> 5 m/sec	Καταστροφές κτιρίων λόγω έντονων μετακινήσεων ή πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Πολύ γρήγορη	> 3 m/min	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1, η εκδήλωση των κατολισθήσεων μπορεί να οφείλεται σε πολλά αίτια τα οποία αναφέρονται κυρίως σε γεωλογικούς, γεωμορφολογικούς, κλιματικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες. Το έναυσμα μετακίνησης όμως για την εκδήλωσή τους τις περισσότερες φορές αποτελεί κάποιο συγκεκριμένο γεγονός, όπως η έντονη βροχόπτωση, το γρήγορο λιώσιμο του χιονιού, οι μεταβολές στη στάθμη του νερού, η ηφαιστειακή δράση και η σεισμική δραστηριότητα. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετώνται καταπτώσεις βράχων που προκλήθηκαν από έντονη σεισμική δραστηριότητα στην Ελλάδα.

Οι ισχυρές σεισμικές δονήσεις διαταράσσουν την ισορροπία των πρηνών με την προσωρινή μεταβολή των τάσεων (λόγω δημιουργίας ελαστικών κυμάτων διαφορετικής συχνότητας στα



γεωλογικά υλικά) και αποτελούν πολλές φορές το έναυσμα για την εκδήλωση κατολισθήσεων. Στα απότομα πρανή εκδηλώνονται συνήθως καταπτώσεις βράχων και ολισθήσεις κορημάτων και βράχων, ενώ στα ηπιότερα πρανή εκδηλώνονται περιστροφικές και μεταθετικές ολισθήσεις καθώς και πλευρικές εξαπλώσεις. Λόγω του ότι οι σεισμικές δονήσεις ευθύνονται για την χαλάρωση της συνοχής των πετρωμάτων και επομένως τη μείωση της αντοχής τους, είναι απαραίτητη η μελέτη της σεισμικότητας της περιοχής ενδιαφέροντος. Η διεξαγωγή αυτής συνίσταται στη μελέτη του σεισμικού ιστορικού της, των πιθανών μακροσεισμικών εντάσεων και των παραμέτρων της σεισμικής κίνησης (κυρίως σεισμική επιτάχυνση) σε σχέση με τον ισχύοντα αντισεισμικό κανονισμό (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Στην Ελλάδα, όπως αναφέρθηκε, η πιο συχνή μορφή αστοχίας που προκαλείται από σεισμό είναι οι καταπτώσεις βράχων. Η εκδήλωση βραχόπτωσης σε μια θέση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του σεισμού και από την απόσταση από το σεισμογόνο ρήγμα. Εξαρτάται όμως και από τις τοπικές γεωτεχνικές συνθήκες και την τοπογραφία του πρανούς, οι οποίες επηρεάζουν τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα καθώς και την κατάσταση της βραχομάζας (αποσάθρωση, ρωγμάτωση) πριν την εκδήλωση του σεισμού και τη δυναμική της σε αποσπάσεις βραχοτεμαχίων (Saroglou, et al., 2017). Η σχέση μεγέθους – απόστασης, που επηρεάζει τις κατολισθήσεις προκαλούμενες από σεισμό στην Ελλάδα έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Οι (Papadopoulos & Plessa, 2000) μελέτησαν 47 κατολισθήσεις, από τις οποίες οι 20 ήταν καταπτώσεις βράχων, και συμπέραναν ότι στην Ελλάδα οι περισσότερες προκαλούνται από σεισμούς μεγέθους $5.3 \leq M_s \leq 7.5$ και παρατηρούνται σε μέγιστη επικεντρική απόσταση (R_e) που περιγράφεται από τη σχέση $\log(R_e) = -2.98 + 0.75M_s$, για $M_s \geq 5.3$. Ειδικότερα για τις καταπτώσεις βράχων, ο (Saroglou, 2016) αναφέρει ότι στην Ελλάδα για να προκαλέσει ένας σεισμός καταπτώσεις βράχων θα πρέπει να έχει μέγεθος τουλάχιστον $M_w = 5.7$, ενώ η μέγιστη απόσταση που έχει καταγραφεί από το επίκεντρο μέχρι τη θέση της κατάπτωσης είναι 37 km.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

ΒΡΑΧΟΥ

Τα μοντέλα προσομοίωσης κατάπτωσης βράχου έχουν ως στόχο να προσδιορίσουν το μονοπάτι της πτώσης ενός βραχοτεμαχίου, τη μέγιστη απόσταση στην οποία μπορεί να φτάσει, την περιβάλλουσα της τροχιάς του και την κατανομή της ταχύτητας και της ενέργειάς του κατά μήκος αυτής (Crosta & Agliardi, 2003). Τα αποτελέσματα ενός τέτοιου μοντέλου συμβάλλουν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας και του κινδύνου κατάπτωσης βράχων, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους αρμόδιους φορείς στο σχεδιασμό προστατευτικών μέτρων για την πολιτική προστασία.

3.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (2D) ΜΟΝΤΕΛΑ

Για τις ανάγκες του έργου των μηχανικών στην κατασκευή προστατευτικών μέτρων, οι προσομοιώσεις των καταπτώσεων γίνονται κατά μήκος συγκεκριμένων δισδιάστατων τοπογραφικών προφίλ. Υπάρχει πληθώρα δισδιάστατων (2D) μοντέλων προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίου, τα οποία μελετούν την τροχιά του κατά μήκος περιορισμένων τοπογραφικών προφίλ που έχουν προκαθοριστεί από το χρήστη.

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενός δισδιάστατου μοντέλου κρίνεται κυρίως από την επιλογή του προφίλ (θεωρώντας ότι τα τοπογραφικά, γεωλογικά κ.α. δεδομένα έχουν συλλεχθεί με μεγάλη ακρίβεια). Αυτό έγκειται στην αμέλεια των 2D μοντέλων της τρισδιάστατης επίδρασης της τοπογραφίας κατά την πτώση ενός βράχου, που συμβάλλει στη χωρική διασπορά της τροχιάς της κατάπτωσης. Η επίδραση αυτή έχει χαρακτηριστεί ως «εγκάρσια διασπορά», που είναι ο λόγος της εγκάρσιας απόστασης μεταξύ των ακραίων τροχιών μιας κατάπτωσης προς το μήκος του πρσανούς (Azzoni, et al., 1995). Επομένως, υπεισέρχεται ένας σημαντικός υποκειμενικός παράγοντας τόσο στην απόκτηση και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του δισδιάστατου μοντέλου όσο και στην εκτίμηση της επικινδυνότητας μιας περιοχής στις καταπτώσεις βράχων.

3.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (3D) ΜΟΝΤΕΛΑ

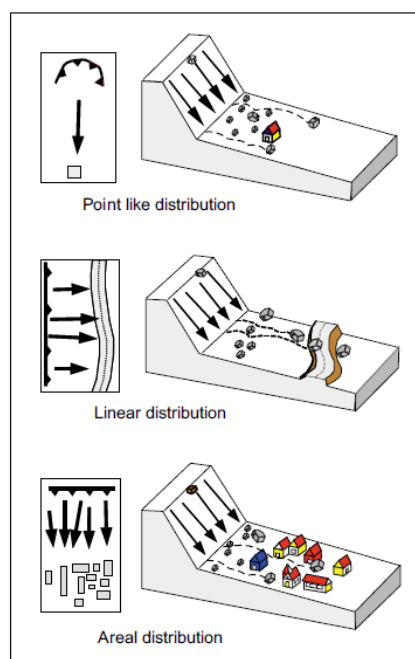
Όπως αναφέρθηκε, τα δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης δεν έχουν τη δυνατότητα της χωρικής ανάλυσης και μοντελοποίησης των πιθανών τροχιών της κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου, καθώς αυτή περιπλέκεται από την τοπογραφία και τη γεωμετρία των πρσανών. Προκειμένου να λυθεί αυτό



το πρόβλημα δημιουργήθηκαν κάποια μοντέλα τρισδιάστατης (3D) προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίου. Αυτά παραμένουν μέχρι και σήμερα λίγα σε αριθμό. Συνήθως χρησιμοποιούν τοπογραφικά δεδομένα, τα οποία προέρχονται από μετασχηματισμό άλλων δεδομένων όπως ΨΜΕ (Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους) μορφής TIN (Triangulated Irregular Network – Δίκτυο Ακανόνιστων Τριγώνων) ή κανονικού καννάβου (regular Grid). Επίσης, άλλα θεματικά επίπεδα πληροφορίας όπως η γεωλογία, οι χρήσεις γης και η φυτοκάλυψη δεν περιέχονται αυτόματα στην ανάλυση. Ο μετασχηματισμός και η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων εμπεριέχουν πιθανώς σφάλματα. Συνεπώς, ο έλεγχος και η διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων είναι σημαντικοί παράμετροι κατά τη χρήση των μέχρι σήμερα γνωστών τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίου (Lan, et al., 2007).

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης ενός τρισδιάστατου μοντέλου είναι οι εξισώσεις κίνησης που χρησιμοποιεί. Η κίνηση του βραχοτεμαχίου στον τρισδιάστατο χώρο είναι πιο περίπλοκη από ότι στο δισδιάστατο χώρο. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιούνται εξισώσεις κίνησης που αναπαριστούν ρεαλιστικά την πορεία του βραχοτεμαχίου στο χώρο, με ιδιαίτερη έμφαση στην πορεία που θα ακολουθήσει μετά την πρόσκρουσή του στην επιφάνεια. Οι εξισώσεις αυτές θα πρέπει να στηρίζονται στη θεωρία των κρούσεων στο χώρο, καθώς η εφαρμογή μιας απλής ανάκλασης θεωρείται λανθασμένη (Χαραλάμπους, 2006).

Παρά τις ατέλειες που παρουσιάζουν μέχρι σήμερα τα τρισδιάστατα μοντέλα, η χρήση τους είναι απαραίτητη προκειμένου να αντιμετωπιστούν διαφορετικής τάξης επικινδυνότητα προβλήματα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, μια κατάπτωση μπορεί να επηρεάσει ένα στοιχείο σημειακής μορφής στο χώρο (ανεξάρτητα κτίσματα, αυτοκίνητα ακόμα και ανθρώπους), γραμμικά στοιχεία (οδικό δίκτυο) αλλά και περιοχές μεγάλης έκτασης (οικιστικές περιοχές, τουριστικές παραλίες). Λόγω της μεγάλης διαφοράς στο μέγεθος του χωρικού στοιχείου που μπορεί να επηρεαστεί από μια κατάπτωση, η εκτίμηση της επικινδυνότητας καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη (Crosta & Agliardi, 2003).



Εικόνα 3.1: Διαφορετικής επικινδυνότητας προβλήματα ανάλογα με τη μορφή των χωρικών στοιχείων (Crosta & Agliardi, 2003).

3.3 ΤΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ «ROCKFALL ANALYSIS»

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο τρισδιάστατης (3D) προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίου, που είναι ενσωματωμένο στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS». Η εφαρμογή τρέχει μέσα στο περιβάλλον ArcGIS 9.3 της ESRI. Το μοντέλο και η εφαρμογή αναπτύχθηκαν από τον Στέφανο Χαραλάμπους κατά την εκπόνηση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας του (Χαραλάμπους, 2006), στα πλαίσια του



Μεταπτυχιακού «Γεωπληροφορική» του ΕΜΠ που εκπονείται και η παρούσα Διπλωματική Εργασία. Η εφαρμογή έχει αναβαθμιστεί από τότε και σήμερα βρίσκεται στην 5^η έκδοση. Το προτεινόμενο μοντέλο λειτουργεί με βάση τις ακόλουθες παραδοχές, προϋποθέσεις και περιορισμούς:

- Το βραχοτεμάχιο προσομοιώνεται ως μια σημειακή μάζα και υιοθετείται μια κινηματική προσέγγιση, που επιτρέπει τη μοντελοποίηση της κατάπτωσης ως ελεύθερη πτώση, αναπήδηση λόγω κρούσης, κύλιση και ολίσθηση στον τρισδιάστατο χώρο.
- Προσομοιώνεται η κατάπτωση ενός μόνο βραχοτεμαχίου ή πολλών μεμονωμένων βραχοτεμαχίων, θεωρώντας ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ τους είναι μηδενική ή αμελητέα. Επίσης, δε λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση του αέρα και η θραύση του βραχοτεμαχίου σε μικρότερα τεμάχια κατά την πτώση.
- Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση του μεγέθους, του σχήματος και της ροπής αδράνειας του βραχοτεμαχίου πάνω στην τροχιά της κατάπτωσης, παρά μόνο όταν προκύπτει κύλιση αυτού. Όταν το βραχοτεμάχιο βρίσκεται στον αέρα, αγνοείται η περιστροφική ταχύτητα και λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεταφορική.
- Η τοπογραφία εισάγεται ως ΨΜΕ (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους) μορφής TIN (Triangulated Irregular Network – Δίκτυο Ακανόνιστων Τριγώνων), χωρίς περιορισμό στην ανάλυση. Έτσι, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την τρισδιάστατη επίδραση της τοπογραφίας και της εγκάρσιας διασποράς.
- Δεδομένα που αφορούν την περιοχή μελέτης (όπως συντελεστές ανάκλασης, γωνία εσωτερικής τριβής των σχηματισμών) εισάγονται σε μορφή shapfile και κατανέμονται χωρικά.
- Η αρχή της κατάπτωσης μπορεί να οριστεί ως σημείο, γραμμή, πολύγωνο, τετράγωνο, κύκλος ή έλλειψη. Εάν οριστεί ως γραμμή ή επιφάνεια, επιλέγεται η ανάλυση σύμφωνα με την οποία θα δημιουργηθούν ισομερώς κατανομημένα σημεία σε μορφή καννάβου πάνω στη γραμμή ή εντός της επιφάνειας αντίστοιχα. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει έναν αριθμό σημείων για να προσομοιωθεί η κατάπτωση, η θέση των οποίων επιλέγεται τυχαία από το μοντέλο από το σύνολο των σημείων που έχουν δημιουργηθεί στη γραμμή ή στην επιφάνεια. Έτσι, το μοντέλο εκτελεί στοχαστική ανάλυση με τη χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo, θεωρώντας το σημείο αρχής της κατάπτωσης ως τυχαία μεταβλητή.
- Οι παράμετροι που εισάγονται στο μοντέλο (γωνία εσωτερικής τριβής, συντελεστές ανάκλασης, ταχύτητα) μπορούν να μεταβληθούν σε προκαθορισμένα όρια τυπικής κατανομής (τυπική απόκλιση – standard deviation). Επομένως, το μοντέλο εκτελεί στοχαστική ανάλυση με τη χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo και με αυτόν τον τρόπο.
- Το μοντέλο εξετάζει καταπτώσεις βραχοτεμαχίων που έχουν προκληθεί από σεισμό εισάγοντας μια αρχική ταχύτητα V_0 . Η ταχύτητα αυτή είναι μεταφορική και περιγράφεται από το μέγεθός της, τη γωνία α_0 (η γωνία μεταξύ του διανύσματος και του επιπέδου XY) και τη γωνία θ_0 (η γωνία μεταξύ της προβολής του διανύσματος της ταχύτητας στο επίπεδο XY και του άξονα X, δηλαδή ο προσανατολισμός (aspect) του διανύσματος της ταχύτητας). Παράλληλα ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα V_{\min} , κάτω από την οποία η κατάπτωση μετατρέπεται σε κύλιση, ολίσθηση ή στάση του βραχοτεμαχίου.

Σε αυτήν την τελευταία έκδοση της εφαρμογής παρέχονται στατιστικά εργαλεία για την ανάλυση όλων των παραγόμενων βραχοπτώσεων. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα στατιστικά στοιχεία κάθε βραχοπτώσεως και η δυνατότητα δημιουργίας πολυγωνικού shapfile επιδεκτικότητας προς βραχοπτώσεις της περιοχής μελέτης. Σε αυτό, κάθε πολύγωνο περιέχει πληροφορίες σχετικά με το πλήθος των βραχοπτώσεων που πέρασαν από αυτό, τη μέγιστη ταχύτητα και το μέγιστο ύψος που παρατηρήθηκε. Επιπλέον, είναι δυνατή η τρισδιάστατη αναπαράσταση κάθε κατάπτωσης που υπολογίστηκε (3D animation), όπως θα συνέβαινε σε πραγματικό χρόνο.



Η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» εκτελείται μέσω των προγραμμάτων ArcMap και ArcScene του λογισμικού ArcGIS. Ο αλγόριθμος της εφαρμογής έχει γραφτεί στην γλώσσα προγραμματισμού VBA (Visual Basic for Applications). Η εφαρμογή υλοποιείται σε δυο μέρη:

A. ArcMap

Το πρώτο μέρος της εφαρμογής υλοποιείται στο ArcMap και είναι αποθηκευμένο στο αρχείο “ROCKFALL_ANALYSIS.mxd”. Σε αυτό εισάγονται τα δεδομένα της περιοχής μελέτης και οι παράμετροι της κατάπτωσης, υπολογίζεται η τροχιά του βραχοτεμαχίου και απεικονίζεται στις δύο διαστάσεις. Επίσης, είναι δυνατή η εκτέλεση στατιστικής επεξεργασίας, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω.

B. ArcScene

Το δεύτερο μέρος της εφαρμογής υλοποιείται στο ArcScene και είναι αποθηκευμένο στο αρχείο “ROCKFALL_ANALYSIS_3D.sxd”. Σε αυτό γίνεται απεικόνιση σε τρεις διαστάσεις της τροχιάς της κατάπτωσης που υπολογίστηκε στο πρώτο μέρος. Επίσης, είναι δυνατή η αναπαράσταση της τροχιάς της κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου (3D animation), όπως αναφέρθηκε ανωτέρω.

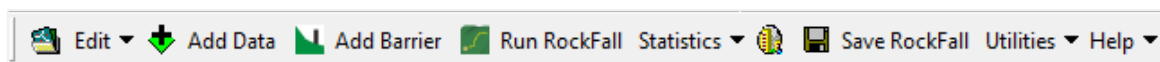
Αυτά τα δύο αρχεία της εφαρμογής πρέπει να βρίσκονται αποθηκευμένα στον ίδιο φάκελο στον υπολογιστή, προκειμένου να λειτουργήσει το πρόγραμμα χωρίς σφάλματα.

3.3.1 ΜΕΡΟΣ 1^ο – ArcMap “ROCKFALL_ANALYSIS.mxd”

Η υλοποίηση του πρώτου μέρους της εφαρμογής γίνεται στο ArcMap. Ο χρήστης εκτελεί το αρχείο “ROCKFALL_ANALYSIS.mxd”. Στον κενό χώρο εργασίας με την επιλογή “Add Data” του ArcMap προσθέτει τα αρχεία που περιέχουν τα δεδομένα της περιοχής μελέτης (shapefile και TIN) και αποθηκεύει το αρχείο με διαφορετικό όνομα (π.χ. “newproject.mxd”). Στη συνέχεια, εκτελεί το νέο αυτό αρχείο και εμφανίζεται η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL Utilities” (Εικόνα 3.2). Αυτή δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να σχεδιάσει το σημείο/γραμμή/επιφάνεια εκκίνησης της κατάπτωσης και προστατευτικά μέτρα (φράχτης). Ο χρήστης επιλέγει το “Load R.A.” για να φορτώσει τη μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL” (Εικόνα 3.3), η οποία περιέχει τις απαραίτητες εντολές για την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο, την εκτέλεση της προσομοίωσης και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου.



Εικόνα 3.2: Η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL Utilities”, με την επιλογή “Load R.A.”.



Εικόνα 3.3: Η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL”.

Η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL” (Εικόνα 3.3) παρέχει στο χρήστη τις εξής επιλογές (Πίνακας 3.1):

**Πίνακας 3.1:** Οι επιλογές της μπάρας εργαλείων “LHA-ROCKFALL”.

	Define Project Workspace: Ο χρήστης ορίζει το φάκελο στον οποίο βρίσκονται αποθηκευμένα τα απαραίτητα αρχεία δεδομένων, όπου θα αποθηκευτούν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
Edit ▼	Edit: Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τις τιμές από κάποια δεδομένα (Geo-materials, Restitution Coefficient).
 Add Data	Add Data: Ανοίγει ένα νέο παράθυρο με τρεις καρτέλες. Σε αυτές ο χρήστης εισάγει στο μοντέλο τα αρχεία των δεδομένων, την εκκίνηση της κατάπτωσης και τα στοιχεία του σεισμού (γίνεται αναλυτική περιγραφή στη συνέχεια).
 Add Barrier	Add Barrier: Ο χρήστης επιλέγει ή σχεδιάζει στην περιοχή μελέτης προστατευτικά μέτρα (φράχτη).
 Run RockFall	Run Rockfall: Ο χρήστης ελέγχει τα τελικά δεδομένα και προχωράει στην εκτέλεση του μοντέλου για να υπολογιστεί η κατάπτωση του βραχοτεμαχίου.
Statistics ▼	Statistics: Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει εδώ τα διαθέσιμα εργαλεία στατιστικής ανάλυσης που αναφέρθηκαν ανωτέρω.
	Open ArcScene – ROCKFALL_ANALYSIS_3D.sxd: Ο χρήστης οδηγείται στο τρισδιάστατο περιβάλλον απεικόνισης της κατάπτωσης.
 Save RockFall	Save Rockfall: Ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει τα σημεία και τη γραμμή της τελευταίας τροχιάς της κατάπτωσης που προσομοιώθηκε ως layer ή shapefile.
Utilities ▼	Utilities: Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να σχεδιάσει προστατευτικά μέτρα, το σημείο εκκίνησης της κατάπτωσης, να απεικονίσει την ταχύτητα και το προφίλ της κατάπτωσης.

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 3.1, με την επιλογή “Add Data” ανοίγει ένα παράθυρο με τρεις καρτέλες (Εικόνες 3.4 – 3.6), στις οποίες ο χρήστης εισάγει στο μοντέλο τα εξής δεδομένα.

Στην πρώτη καρτέλα (Step 1 – Εικόνα 3.4) εισάγονται τα εξής δεδομένα για την περιοχή μελέτης (Σημείωση: τα αρχεία θα πρέπει να έχουν το όνομα που αναφέρεται παρακάτω, αλλιώς το πρόγραμμα εμφανίζει μήνυμα για να δημιουργήσει αντίγραφο του αρχείου με το όνομα που χρειάζεται ώστε να λειτουργήσει):

❖ **tin_study_area**

Στο πεδίο εισάγεται το αρχείο της τοπογραφίας ως ΨΜΕ μορφής TIN με το όνομα “tin_study_area”. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να ορίσει μια τιμή τυπικής απόκλισης για τη γωνία κλίσης (slope angle) ή τον προσανατολισμό (orientation) των τριγώνων του TIN, προκειμένου το μοντέλο να εκτελέσει στοχαστική ανάλυση μεταβάλλοντας αυτές τις παραμέτρους.

❖ **geo_materials**

Στο πεδίο εισάγεται το αρχείο της γεωλογίας σε μορφή shapefile με το όνομα “geo_materials”, το οποίο περιέχει τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. Κάθε σχηματισμός έχει δύο πεδία που περιέχουν τη γωνία εσωτερικής τριβής (Phi) και την τυπική απόκλιση αυτής (PHI_ST_DEV), σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να εκτελέσει στοχαστική ανάλυση με βάση αυτή την παράμετρο.



❖ coefficients_restitution

Στο πεδίο αυτό εισάγεται το αρχείο των συντελεστών ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης σε μορφή shapefile με το όνομα “coefficients_restitution”. Στο αρχείο δεν περιέχονται μόνο γεωλογικοί σχηματισμοί αλλά και άλλες επιφάνειες που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης, όπως το οδικό δίκτυο. Κάθε επιφάνεια έχει τέσσερα πεδία που περιέχουν τον εφαπτομενικό (R_t) και τον κάθετο (R_n) συντελεστή ανάκλασης και τις τυπικές αποκλίσεις τους ($R_t_ST_DEV$ και $R_n_ST_DEV$ αντίστοιχα). Σε περίπτωση που ο χρήστης έχει αποθηκεύσει τις διάφορες επιφάνειες της περιοχής μελέτης σε ξεχωριστά shapefile, μπορεί να τις ενώσει σε ένα shapefile εκτελώντας το εργαλείο “Union” του ArcMap.

ROCKFALL ANALYSIS. DATA INPUT

STEP 1 | STEP 2 | STEP 3

STEP 1. TIN SURFACE, GEO - MATERIALS & COEFFICIENTS OF RESTITUTION

Select the TIN Surface that will represent the Digital Terrain Model (DTM) of your Study Area :

* tin_study_area

Standard Deviation : For Slope Angle (°) :

For Orientation (°) :

Select the "Geo - materials" Shapefile of your Study Area :

* geo_materials

* Field of Friction Angle ϕ (in rad) : Shapefile Fields ... Standard Deviation for Friction Angle (Field 'PHI_ST_DEV')

Select the "Coefficients of Restitution" (R_t, R_n) Shapefile of your Study Area :

* coefficients_restitution

* Field of R_t : Shapefile Fields ...

Standard Deviation for R_t, R_n (Fields ' $R_t_ST_DEV$ ' and ' $R_n_ST_DEV$ ')

* Field of R_n : Shapefile Fields ...

(*) : Required Fields

LOAD DATA SAVE DATA OK CANCEL

Εικόνα 3.4: Step 1 – Εισαγωγή δεδομένων περιοχής μελέτης.

Στη δεύτερη καρτέλα (Step 2 – Εικόνα 3.5) ο χρήστης επιλέγει την εκκίνηση της κατάπτωσης στο χώρο. Μπορεί να επιλέξει σημείο, γραμμή, πολύγωνο, τετράγωνο, κύκλο ή έλλειψη. Εάν επιλέξει σημείο μπορεί να εισάγει τις συντεταγμένες του αν είναι γνωστές (στη μορφή του συστήματος συντεταγμένων του TIN) ή να το επιλέξει στο χάρτη της περιοχής μελέτης. Εάν επιλέξει γραμμή ή επιφάνεια πρέπει πρώτα να ορίσει την ανάλυση σύμφωνα με την οποία θα δημιουργηθούν ισομερώς καταναμημένα σημεία σε μορφή καννάβου, πάνω στη γραμμή ή εντός της επιφάνειας αντίστοιχα. Στη συνέχεια σχεδιάζει ή επιλέγει μια ήδη υπάρχουσα γραμμή/επιφάνεια στο χάρτη.



Data Input

ROCKFALL ANALYSIS. DATA INPUT

STEP 1 | **STEP 2** | STEP 3

STEP 2. ROCKFALL SOURCE DEFINITION

* Select the way Rockfall Source is represented :

Point Keyboard Entry

Polyline Rectangle Polygon Circle Ellipse

Resolution (m) :

Points generated (based on resolution) :

Xo : Yo : Zo :

Select from Map

Xo : Yo : Zo :

Draw in Map

Draw in 3D View

Select from Map

(*) : Required Fields

LOAD DATA SAVE DATA OK CANCEL

Εικόνα 3.5: Step 2 – Εισαγωγή σημείου/γραμμής/επιφάνειας εκκίνησης κατάπτωσης.

Στην τρίτη καρτέλα (Step 3 – Εικόνα 3.6) ο χρήστης επιλέγει τα χαρακτηριστικά του εναύσματος εκκίνησης της κατάπτωσης. Για να εξετάσει την περίπτωση σεισμού πρέπει να ορίσει το διάνυσμα της αρχικής ταχύτητας V_0 στο Καθολικό Τρισδιάστατο Σύστημα Συντεταγμένων XYZ εισάγοντας το μέγεθός του (Magnitude V_0), τη γωνία α_0 που σχηματίζει με το επίπεδο XY και τη γωνία θ_0 που αντιπροσωπεύει τον προσανατολισμό (Direction) του (Εικόνα 3.7). Μπορεί να ορίσει μια τιμή τυπικής απόκλισης στα μεγέθη αυτά ώστε το μοντέλο να εκτελέσει στοχαστική ανάλυση. Στη συνέχεια, ορίζει το κατώφλι της ταχύτητας (V_{\min}) κάτω από το οποίο η κατάπτωση μετατρέπεται από αναπήδηση σε κύλιση ή ολίσθηση.

Συστήνεται η αποθήκευση των δεδομένων (Save Data). Ακολούθως ο χρήστης επιλέγει “OK” και ολοκληρώνεται η εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο.

ROCKFALL ANALYSIS. DATA INPUT

STEP 1 STEP 2 **STEP 3**

STEP 3. INITIAL VELOCITY (V_0) SETTINGS AND OTHER DATA

Initial Velocity V_0 :

* - Magnitude V_0 (m/s) : Standard Deviation (°) :

* - Angle α_0 (°) : Standard Deviation (°) :

(Slope in Starting Point (°) : 0)

* - Direction (°) :

As Slope's Steepest Path

Custom Direction (°)

- Direction (°) :

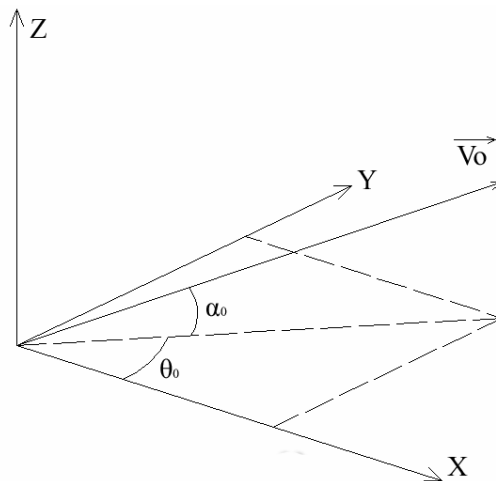
Standard Deviation (°) :

V minimum (m/s) :

* - Magnitude V_{min} (m/s) :

(*) : Required Fields

Εικόνα 3.6: Step 3 – Εισαγωγή χαρακτηριστικών έναρξης της κατάπτωσης.



Εικόνα 3.7: Το διάνυσμα αρχικής ταχύτητας V_0 στο Καθολικό Τρισδιάστατο Σύστημα Συντεταγμένων XYZ (Χαραλάμπους, 2006).

Προκειμένου το μοντέλο να εκτελέσει την προσομοίωση της κατάπτωσης, ο χρήστης επιλέγει στη μπάρα εργαλείων LHA-ROCKFALL “Run Rockfall”. Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο στο οποίο ο χρήστης πραγματοποιεί τελικό έλεγχο των δεδομένων που εισήγαγε στο μοντέλο. Εάν ο χρήστης έχει επιλέξει να προσομοιωθεί η κατάπτωση από πολλά σημεία εκκίνησης (γραμμή ή επιφάνεια), τότε πρέπει να επιλέξει ένα υποσύνολο των συνολικών σημείων (το μοντέλο «κολλάει» αν είναι



πολλά τα σημεία), η θέση των οποίων επιλέγεται τυχαία από το μοντέλο. Έτσι, το μοντέλο εκτελεί στοχαστική ανάλυση με τη χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo, θεωρώντας το σημείο αρχής της κατάπτωσης ως τυχαία μεταβλητή.

Αφότου εκτελεστεί ο αλγόριθμος, εμφανίζεται στο χάρτη σε δύο διαστάσεις η προσομοιωμένη τροχιά της κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου (ή όσες επέλεξε ο χρήστης να προσομοιωθούν κατά τη στοχαστική ανάλυση). Δημιουργούνται δύο θεματικά επίπεδα, ένα σημειακό (Trajectory_Points – περιέχει τα σημεία που πέρασε το βραχοτεμάχιο) και ένα γραμμικό (Trajectory_Line – δείχνει συνολικά την τροχιά που ακολούθησε). Ο Πίνακας Περιγραφικών Χαρακτηριστικών (Attribute Table) του θεματικού επιπέδου των σημείων που απαρτίζουν την κατάπτωση (Trajectory_Points) περιέχει τις εξής πληροφορίες για κάθε σημείο της τροχιάς του βραχοτεμαχίου:

- Συντεταγμένες θέσης (XYZ).
- Υψομετρική διαφορά (DZ) από την επιφάνεια, αν βρίσκεται στον αέρα.
- Συνολική απόσταση (Distance) και χρόνος (A_Time) που έχει διανύσει.
- Χρόνος μετάβασης μεταξύ των σημείων (Time).
- Οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας και το μέγεθός της (V_x , V_y , V_z , V).
- Η κλίση (slope) και ο προσανατολισμός (aspect) του πρανούς, αν κινείται ή προσκρούεται σε αυτό.
- Η γωνία εσωτερικής τριβής (Friction_A) του πρανούς, αν ολισθαίνει πάνω σε αυτό.
- Οι συντελεστές ανάκλασης (R_t , R_n) του πρανούς, αν ανακλαστεί πάνω σε αυτό.
- Σχόλια που περιγράφουν το είδος της κίνησης.

Στο σημείο αυτό ο χρήστης είναι σε θέση να αναλύσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου στο δισδιάστατο χώρο, αξιοποιώντας τα στατιστικά και άλλα εργαλεία που του παρέχει η εφαρμογή και το λογισμικό ArcMap.

3.3.2 ΜΕΡΟΣ 2^ο – ArcScene “ROCKFALL_ANALYSIS_3D.sxd”

Η υλοποίηση του δεύτερου μέρους της εφαρμογής γίνεται στο ArcScene. Ο χρήστης εκτελεί το αρχείο “ROCKFALL_ANALYSIS_3D.sxd”, το οποίο περιέχει την τρισδιάστατη απεικόνιση της τελευταίας προσομοιωμένης κατάπτωσης. Όπως αναφέρθηκε, είναι πολύ σημαντικό το αρχείο αυτό να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο με το αρχείο “ROCKFALL_ANALYSIS.mxd”, προκειμένου να μεταφερθούν τα δεδομένα της προσομοιωμένης κατάπτωσης χωρίς σφάλματα. Με το άνοιγμα του αρχείου εμφανίζεται η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL 3D”. Σε αυτή ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να δημιουργήσει την τρισδιάστατη αναπαράσταση κάθε κατάπτωσης που υπολογίστηκε (3D animation), όπως θα συνέβαινε σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τα στατιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.



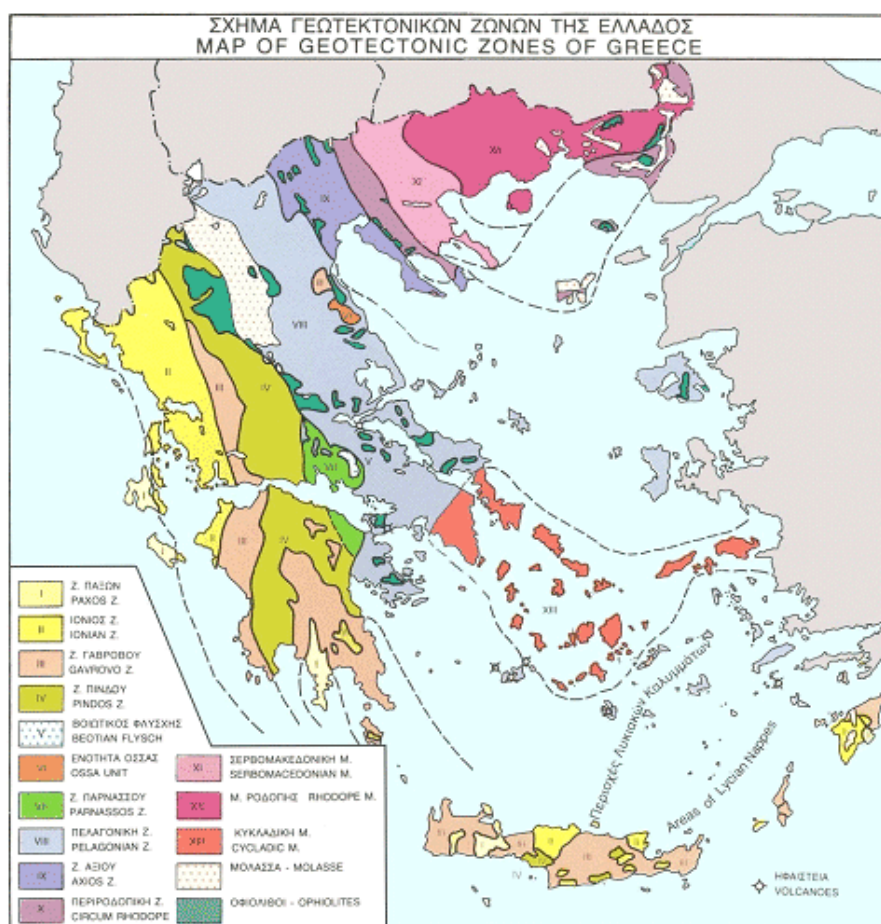
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ –

ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ & ΛΕΥΚΑΔΑ

4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

Στα νησιά της Κεφαλονιάς και της Λευκάδας εμφανίζονται οι γεωτεκτονικές ενότητες Παζών και Ιόνια (Εικόνα 4.1: ενότητες I, II).



Εικόνα 4.1: Οι γεωτεκτονικές ενότητες της Ελλάδας (www.orykta.gr).



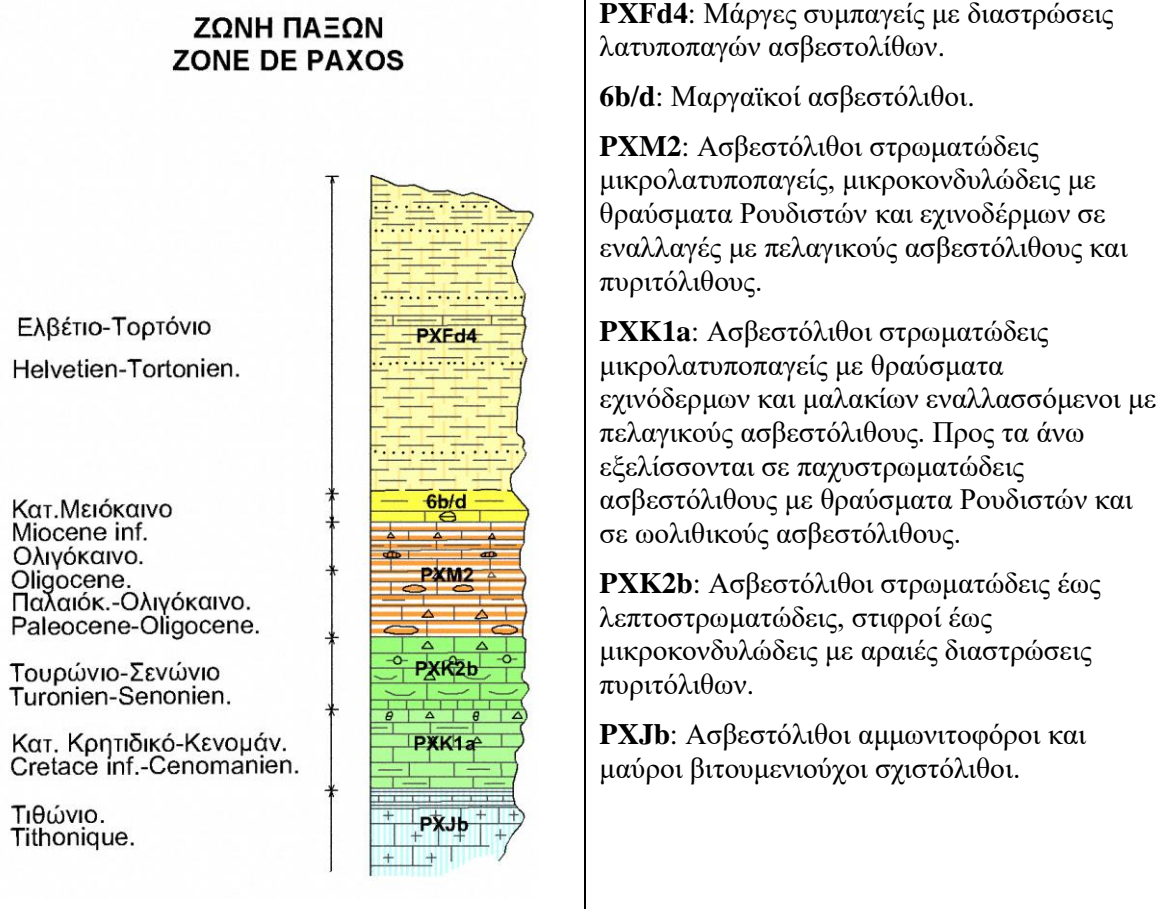
Οι ενότητες αυτές ανήκουν στις εξωτερικές Ελληνίδες και έχουν παρόμοιες στρωματογραφικές κολώνες, καθώς ανήκουν σε έναν ενιαίο ευρύτερο παλαιογεωγραφικό χώρο των Ελληνίδων. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στη σημερινή τους τεκτονική θέση και στη μετα-Ηωκαινική γεωδυναμική εξέλιξή τους μέσα στο ελληνικό τόξο (Παπανικολάου, 1986).

ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΑΞΩΝ

Η ενότητα Παξών εμφανίζεται σε Παξούς, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο. Από γεωτεκτονική άποψη, αποτελεί την πιο εξωτερική ενότητα και προχώρα των Ελληνίδων. Ο τεκτονισμός της ενότητας Παξών είναι Μειοκαινικός, και στην Κεφαλονιά εντοπίζεται στο όριο Μειοκαίνου – Πλειοκαίνου.

Στρωματογραφικά, πρόκειται για μια νηριτική ανθρακική ακολουθία από το Ιουρασικό έως το ανώτερο Μειόκαινο. Στο Ακουϊτάνιο εμφανίζονται μαργαϊκοί σχηματισμοί και τουρβιδιτικοί ασβεστόλιθοι, που υποκαθιστούν την τυπική φλύσχική ιζηματογένεση. Η ενότητα Παξών είναι η μόνη που στερείται τυπικού φλύσχη (Εικόνα 4.2).

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας υπαγορεύουν ικανοποιητικές γεωτεχνικές συνθήκες στις θέσεις που δεν είναι ιδιαίτερα ρηγματωμένοι και τεκτονικά καταπονημένοι. Αντίθετα, οι Νεογενείς σχηματισμοί και οι χαλαρές Τεταρτογενείς αποθέσεις εμφανίζουν κατολισθητικά φαινόμενα, διαφορικές καθιζήσεις και υποχωρήσεις, ρευστοποιήσεις κ.α.

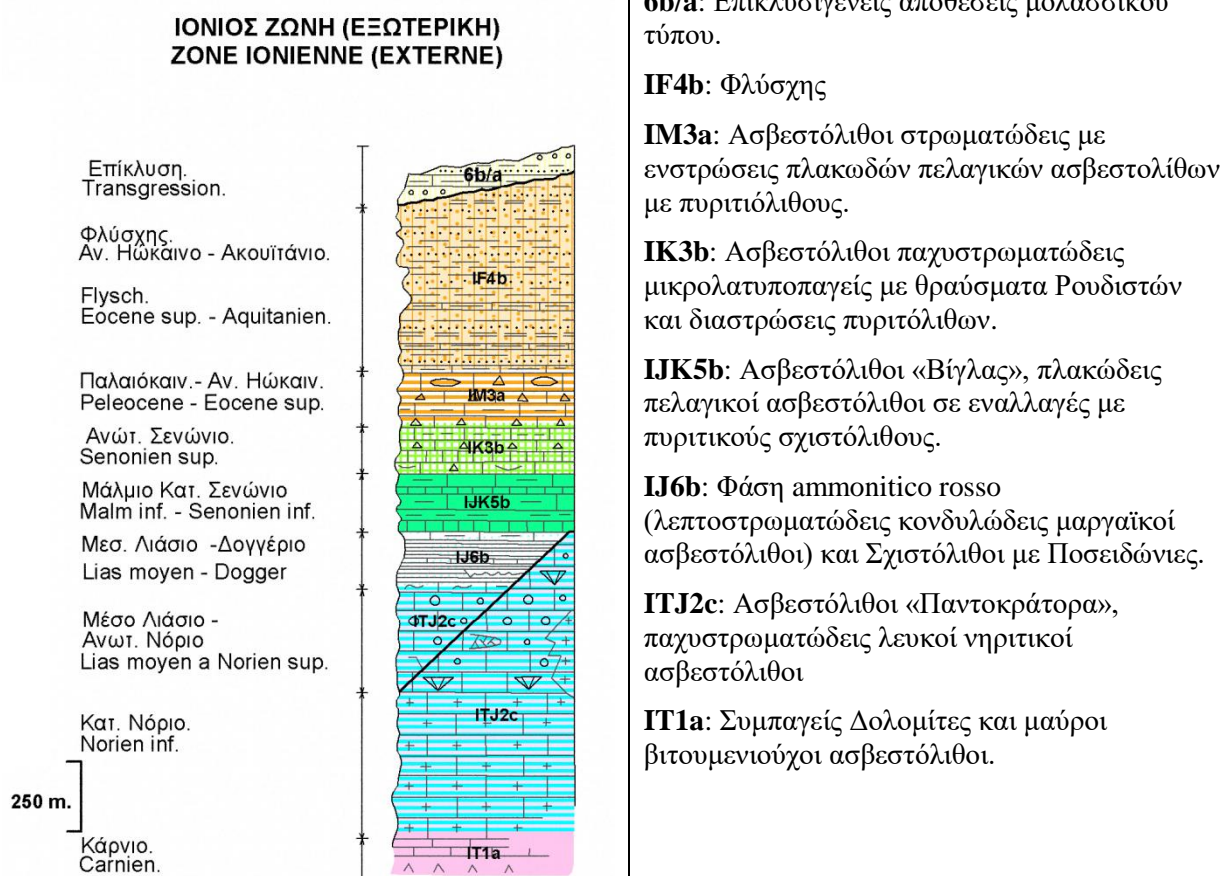


Εικόνα 4.2: Η στρωματογραφική στήλη της ενότητας Παξών, όπως εμφανίζεται στη Λευκάδα (Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο Λευκάς).

ΙΟΝΙΑ ΕΝΟΤΗΤΑ

Η Ιόνια ενότητα εμφανίζεται στα Ιόνια νησιά, στην Ήπειρο, στη Δυτική Στερεά Ελλάδα και στη Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Κύριο χαρακτηριστικό της στρωματογραφικής κολώνας της Ιόνιας (Εικόνα 4.3) είναι η ύπαρξη δύο «ορίων», που την χωρίζουν σε τρεις περιόδους. Από το Τριαδικό έως το τέλος του Λιασίου επικρατεί η νηριτική βιοχημική ιζηματογένεση, με νηριτικούς ασβεστόλιθους οι οποίοι στη βάση τους έχουν γύψους (Κάρνιο). Στο τέλος του Λιασίου η ενότητα αλλάζει παλαιογεωγραφικές συνθήκες, βαθαίνει και επικρατεί πλέον η πελαγική βιοχημική ιζηματογένεση, με πελαγικά κυρίως ανθρακικά ιζήματα. Στο Ανώτερο Ηώκαινο έως τη βάση του Ολιγοκαίνου (στη Λευκάδα μέχρι το Ακουϊτάνιο) αρχίζει η κλαστική ιζηματογένεση με τυπικό φλύσχη (Παπανικολάου, 1986).

Οι σχηματισμοί της Ιόνιας ενότητας παρουσιάζουν ιδιαίτερες γεωτεχνικές συνθήκες. Ο φλύσχος είναι έντονα καταπονημένος κατά μήκος των γραμμών επώθησης – εφίππευσης, με μεγάλο πάχος κορημάτων και ιδιάζουσες υδρογεωλογικές συνθήκες. Μαζί με τις Νεογενείς αποθέσεις και τα χαλαρά Τερταρογενή συνιστούν σχηματισμούς που ευνοούν την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Επίσης, ιδιαίτερα ασταθή είναι τα μικρού πάχους καλύμματα σκληρών πετρωμάτων στους σχηματισμούς του φλύσχη.



Εικόνα 4.3: Η στρωματογραφική στήλη της Ιόνιας ενότητας, όπως εμφανίζεται στη Λευκάδα (Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο Λευκάς).

4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

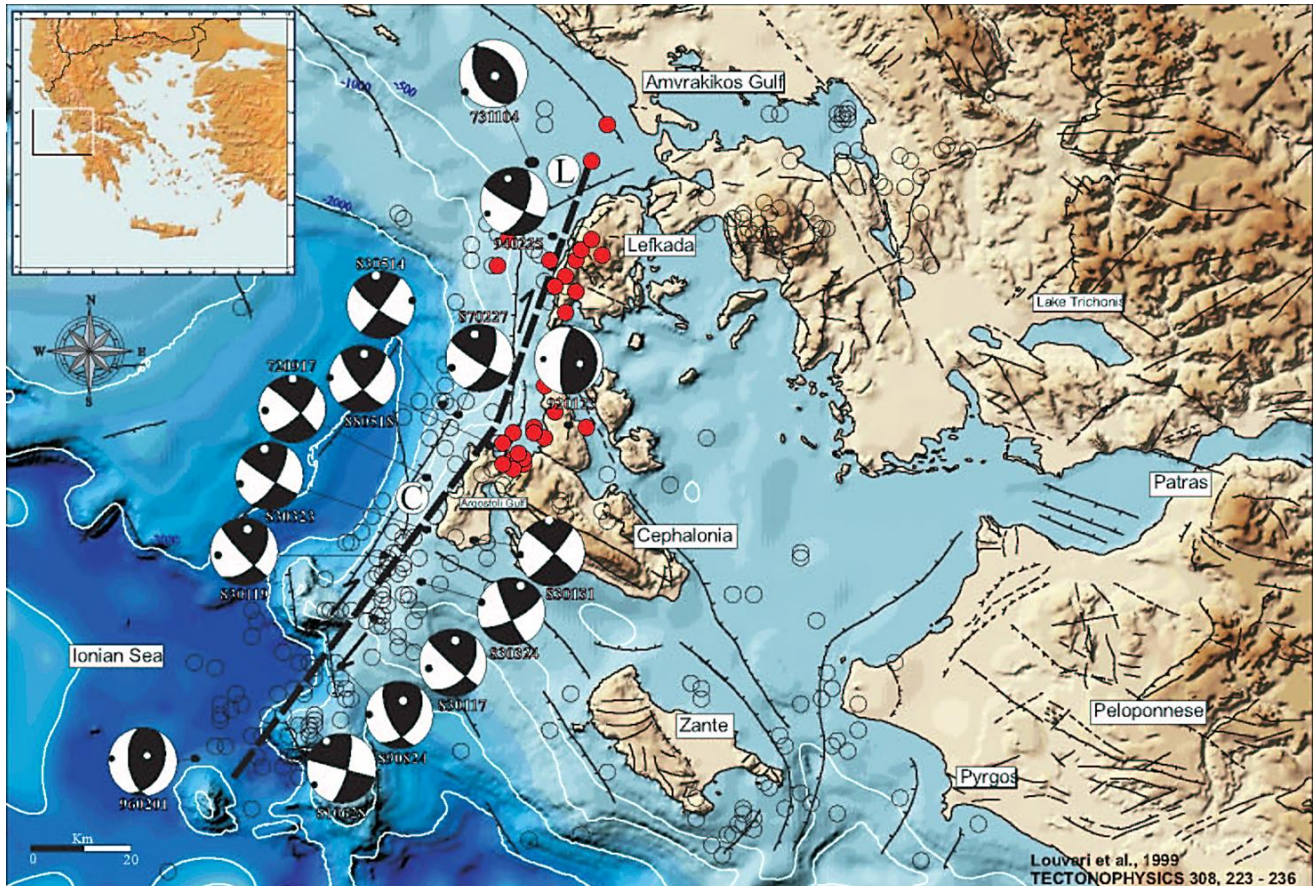
Ο ελλαδικός χώρος τοποθετείται στο πιο δραστήριο γεωλογικά τμήμα του ενεργού νότιου ηπειρωτικού περιθωρίου της ευρωπαϊκής πλάκας που προελαύνει προς Νότο, κάτω από το οποίο υποβυθίζονται τα αρχαιότερα τμήματα της αφρικανικής πλάκας που κινείται προς Βορρά (Εικόνα 4.4). Η συνολική ταχύτητα σύγκλισης Ευρώπης και Αφρικής στο ελληνικό τόξο φτάνει περίπου τα 5 cm/έτος, καθιστώντας το ελληνικό τόξο σήμερα την πιο ενεργή γεωλογική δομή της Ευρώπης. Για αυτό το λόγο ο ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονη παραμόρφωση και πολύ υψηλή σεισμικότητα (Παπανικολάου & Σίδερης, 2012).



Εικόνα 4.4: Οι κυριότερες τεκτονικές δομές της Ανατολικής Μεσογείου (Papazachos, et al., 1998).

Τα Ιόνια Νησιά (Κέρκυρα, Λευκάδα, Ιθάκη, Κεφαλονιά και Ζάκυνθος) βρίσκονται στη ζώνη μετάβασης μεταξύ του ελληνικού τόξου και της ηπειρωτικής σύγκρουσης στα βόρεια. Το όριο αυτό είναι ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (Εικόνα 4.5), γνωστό και ως Cephalonia Transform Fault (CTF). Το κύριο τμήμα του ρήγματος βρίσκεται δυτικά της Κεφαλονιάς (Cephalonia segment), είναι δεξιόστροφο οριζόντιας ολίσθησης με μικρή ανάστροφη συνιστώσα, ολισθαίνει με βορειοανατολική διεύθυνση, κλίνει προς νοτιοανατολικά και έχει μήκος περίπου 90 km. Το ρήγμα επεκτείνεται βορειοανατολικά προς τις δυτικές ακτές της Λευκάδας. Αυτό το βόρειο τμήμα (Lefkada segment) του ρήγματος χαρακτηρίζεται επίσης από δεξιόστροφο οριζόντια ολίσθηση με μικρή ανάστροφη συνιστώσα, ολισθαίνει με βόρεια-βορειοανατολική διεύθυνση, κλίνει ανατολικά-νοτιοανατολικά και έχει μήκος περίπου 40 km. Τα δύο αυτά τμήματα του CTF δομούν το όριο μετασχηματισμού με ρυθμό ολίσθησης 2–3 cm/έτος (Louvari, et al., 1999).

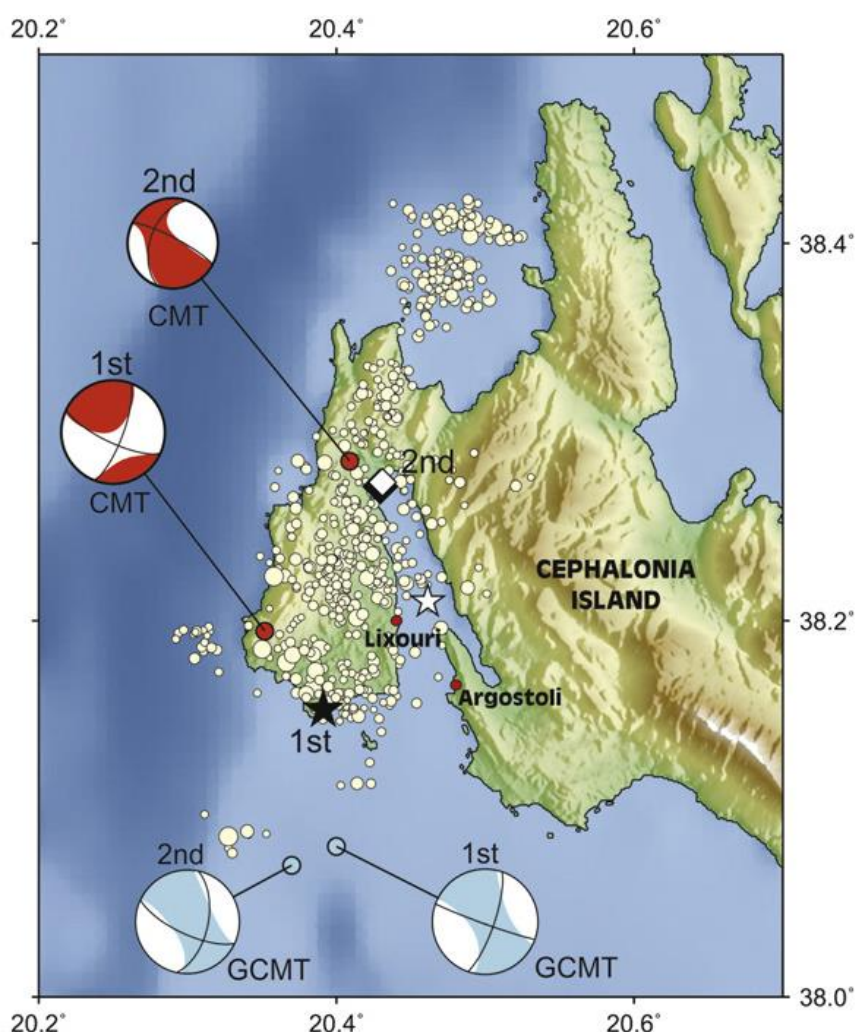
Το υψηλό επίπεδο σεισμικότητας των Ιόνιων Νησιών, το οποίο είναι από τα υψηλότερα στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου, εκφράζει την έντονη παραμόρφωση του φλοιού. Τα τελευταία 100 περίπου χρόνια η περιοχή έχει χτυπηθεί από πολλούς μεγάλο μεγέθους σεισμούς, και σε αρκετές περιπτώσεις θανατηφόρους. Ο μεγαλύτερος σεισμός, που έχει καταγραφεί, είχε μέγεθος 7.2 και έλαβε χώρα στις 12 Αυγούστου 1953 (Sboras, et al., 2016). Υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα για τουλάχιστον 24 σεισμούς από το 1612, οι οποίοι προκάλεσαν κατολισθήσεις στο νησί της Λευκάδας (Parathanassiou, et al., 2016). Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι δύο τελευταίοι καταστροφικοί σεισμοί στην Κεφαλονιά και στη Λευκάδα, που έλαβαν χώρα στις 26 Ιανουαρίου 2014 ($M_w=6.1$) και στις 17 Νοεμβρίου 2015 ($M_w=6.5$) αντίστοιχα.



Εικόνα 4.5: Το ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (Cephalonia Transform Fault). Το τμήμα της Κεφαλονιάς σημειώνεται ως C και της Λευκάδας ως L. Φαίνεται η κατανομή της σεισμικότητας και οι μηχανισμοί γένεσης μεγάλων σεισμών (Louvari, et al., 1999).

4.2.1 ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ – 26 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2014 $M_w=6.1$

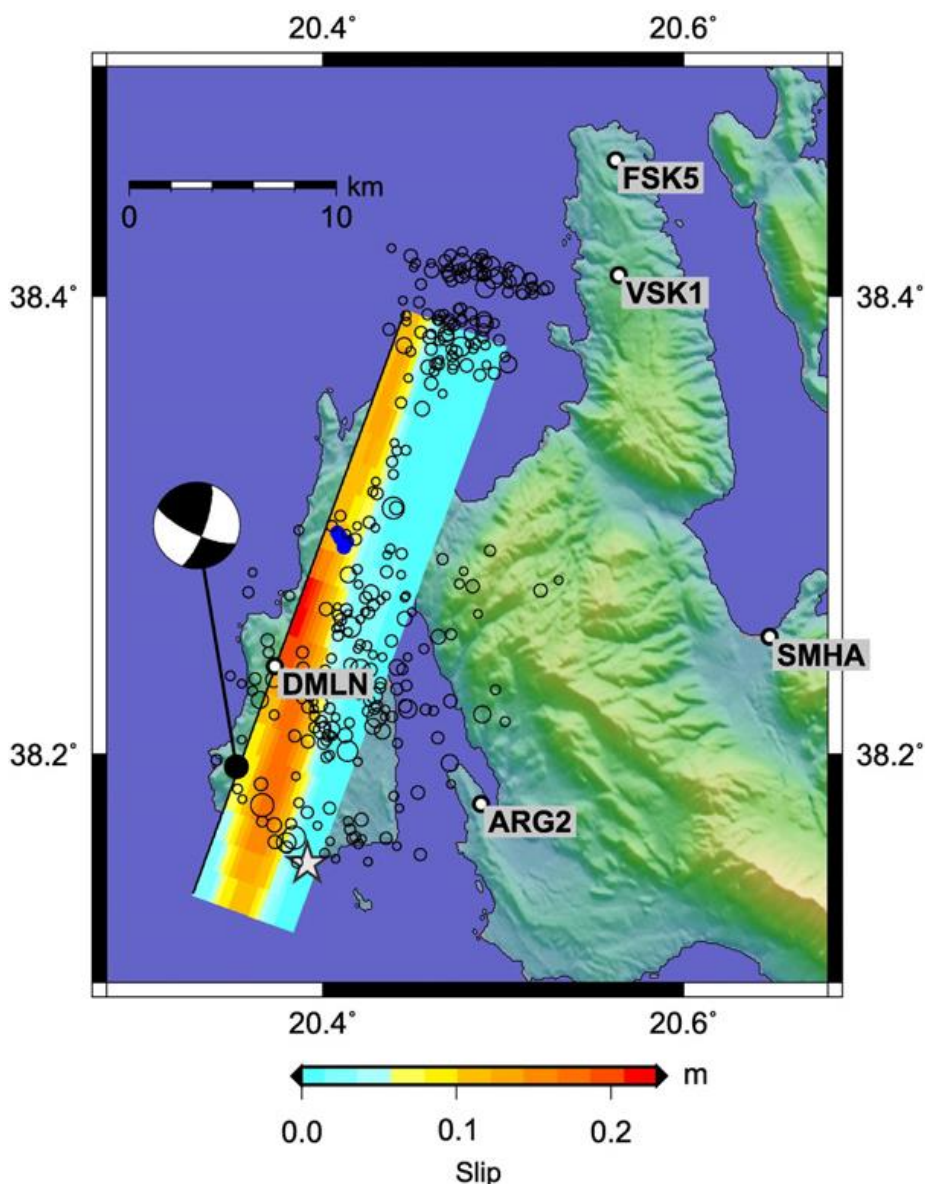
Στις 26 Ιανουαρίου 2014 και ώρα 13:55:43 (UTC) εκδηλώθηκε στην Κεφαλονιά ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_w=6.1$ (Sokos, et al., 2015). Το επίκεντρο της αυτόματης λύσης, σύμφωνα με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, βρίσκεται 6 km βορειοανατολικά από το Αργοστόλι. Το επαναπροσδιορισμένο (relocated) επίκεντρο σύμφωνα με τους (Karastathis, et al., 2015) βρίσκεται βορειοδυτικά του Αργοστολίου (Εικόνα 4.6 – γκρι αστέρι) ενώ σύμφωνα με τους (Sokos, et al., 2015) βρίσκεται στη χερσόνησο της Παλικής (Εικόνα 4.6 – μαύρο αστέρι). Τον κύριο σεισμό ακολούθησαν δυο ισχυρές σεισμικές δονήσεις, μια την ίδια μέρα στις 18:45:08 (UTC) μεγέθους $M_w=5.3$ και μια ακόμη στις 3 Φεβρουαρίου 2014 στις 03:08:44 (UTC) μεγέθους $M_w=5.9$, σύμφωνα με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο (Institute of Geodynamics, 2017).



Εικόνα 4.6: Επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των δύο μεγάλων σεισμών: Το μαύρο αστέρι αντιπροσωπεύει το επίκεντρο του κύριου σεισμού της 26^{ης} Ιανουαρίου 2014 και το μαύρο διαμάντι το επίκεντρο του σεισμού της 3^{ης} Φεβρουαρίου 2014 (Sokos, et al., 2015). Το γκρι αστέρι και διαμάντι αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των (Karastathis, et al., 2015). Επίσης, φαίνονται οι θέσεις και οι λύσεις CMT (Centroid Moment Tensor) για τους δύο σεισμούς και τα επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των μετασεισμών (Sokos, et al., 2015).

Οι δύο σεισμοί έχουν παρόμοιους μηχανισμούς γένεσης που υποδεικνύουν δεξιόστροφη διάρρηξη με διεύθυνση BBA-NNΔ και κλίση προς ΝΑ. Το μήκος του ρήγματος είναι περίπου 25 km. Εκτός από τους δύο μεγάλους μετασεισμούς έγιναν και χιλιάδες μικρότεροι (Εικόνα 4.6). Η σεισμική ακολουθία της Κεφαλονιάς του 2014 εξελίσσεται σε ένα σεισμογόνο χώρο με γενική διεύθυνση από BBA προς NNΔ, ο οποίος αποτελεί την προς τα NNΔ συνέχεια του σεισμογόνου χώρου της Λευκάδας του 2003 (Παπαδόπουλος, et al., 2014).

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα σεισμικά δεδομένα της ανάλυσης των (Sokos, et al., 2015) προκειμένου να υπολογιστεί η PGV στην παραλία του Μύρτου, που απαιτεί η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» (βλ. Κεφάλαιο 5.1.4). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η θέση του κεντροειδούς (Εικόνα 4.7 – μαύρος κύκλος) για τον υπολογισμό της επικεντρικής απόστασης της παραλίας του Μύρτου από το σημείο της διάρρηξης. Το κεντροειδές (centroid) είναι το σημείο του ρήγματος που εκλύθηκε η μέγιστη ενέργεια και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα στον υπολογισμό των μέγιστων παραμέτρων της εδαφικής κίνησης, καθώς η παραλία του Μύρτου βρίσκεται στο κοντινό πεδίο.



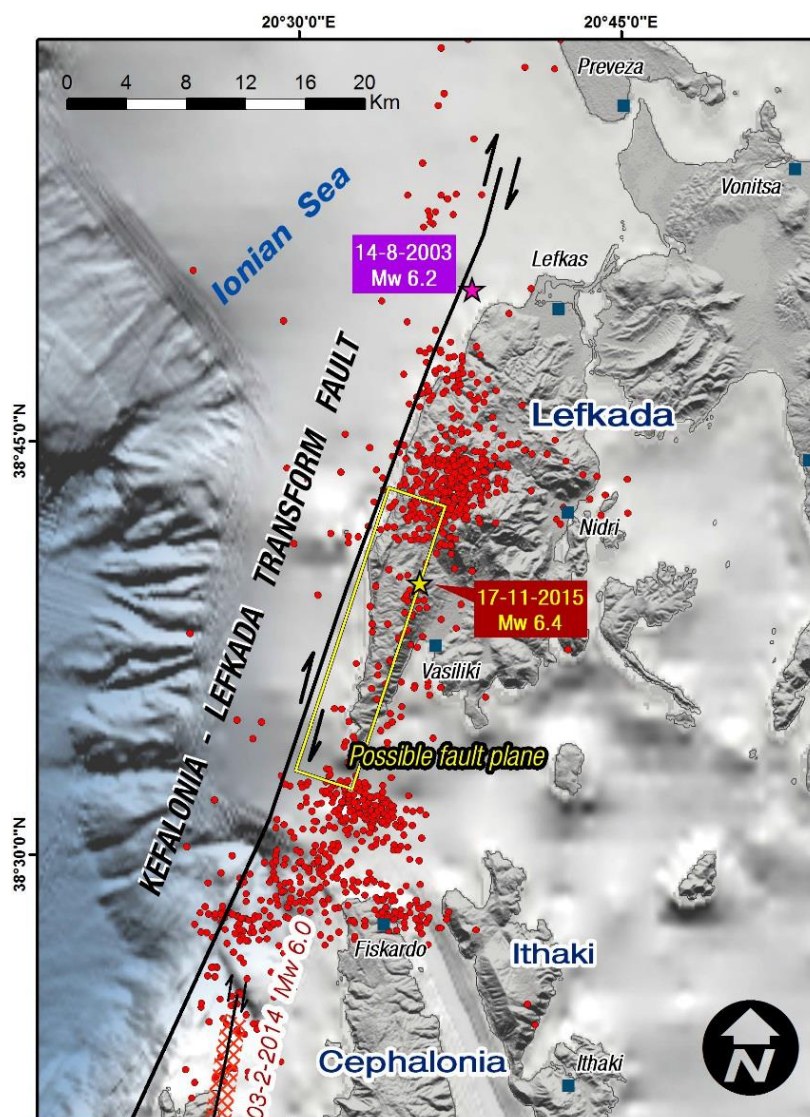
Εικόνα 4.7: Προβολή στην επιφάνεια της κατανομής της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος, σύμφωνα με την κλίμακα. Το αστέρι αντιπροσωπεύει το επίκεντρο του κύριου σεισμού και ο μαύρος κύκλος τη θέση του κεντροειδούς μαζί με τη λύση CMT. Το μήκος του ρήγματος είναι περίπου 25 km (Sokos, et al., 2015).



Ο σεισμός της 26^{ης} Ιανουαρίου 2014 στην Κεφαλονιά προκάλεσε δύο καταπτώσεις βραχοτεμαχίων μεγάλου όγκου στην παραλία του Μύρτου (βλ. Κεφάλαιο 4.3.1), οι οποίες αποτελούν αντικείμενο μελέτης και προσομοίωσης με το τρισδιάστατο μοντέλο «ROCKFALL ANALYSIS» της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (βλ. Κεφάλαιο 5).

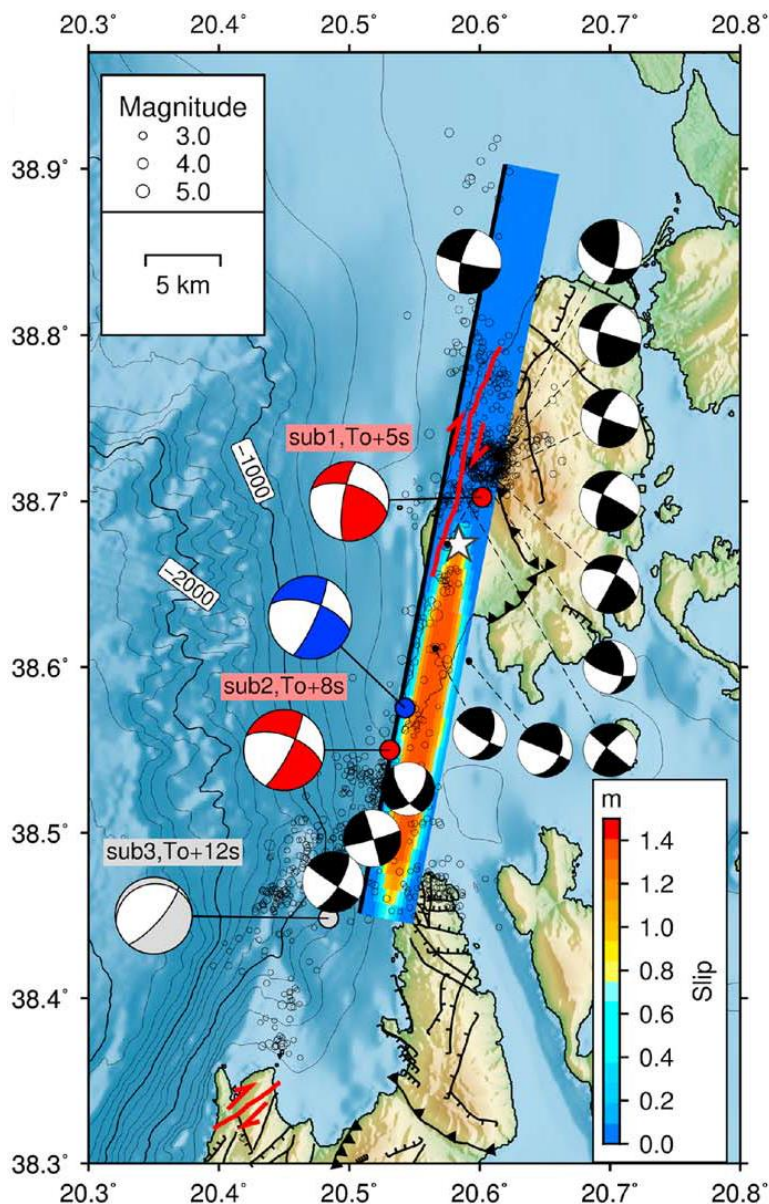
4.2.2 ΛΕΥΚΑΔΑ - 17 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2015 $M_w=6.4$

Στις 17 Νοεμβρίου 2015 και ώρα 07:10:07 (UTC) εκδηλώθηκε στη Λευκάδα ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_w=6.4$. Το επαναπροσδιορισμένο επίκεντρο σύμφωνα με τους (Parathanassiou, et al., 2016) εντοπίζεται περίπου 20 km νοτιοδυτικά της πόλης της Λευκάδας (Εικόνα 4.8). Η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή ήταν ουσιαστικά αναμενόμενη σε μεσοπρόθεσμη κλίμακα μετά τον σεισμό της Λευκάδας το 2003 και τους σεισμούς της Κεφαλονιάς το 2014. Στον ενδιάμεσο χώρο οι γεωτεκτονικές δυνάμεις δεν είχαν εκτονωθεί μετά τους σεισμούς του 1948 με αποτέλεσμα την εκδήλωση του πρόσφατου σεισμού (Lekkas, et al., 2016).



Εικόνα 4.8: Το επαναπροσδιορισμένο επίκεντρο του σεισμού της Λευκάδας (17/11/2015) και των 1038 μετασεισμών της περιόδου 17 Νοεμβρίου – 17 Δεκεμβρίου, 2015 (Parathanassiou, et al., 2016).

Σύμφωνα με τους (Sokos, et al., 2016), το επαναπροσδιορισμένο επίκεντρο και η θέση του κεντροειδούς (centroid) σημειώνονται στο χάρτη της Εικόνας 4.9. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα σεισμικά δεδομένα της ανάλυσης των (Sokos, et al., 2016) προκειμένου να υπολογιστεί η PGV στο Πόντι της Βασιλικής, που απαιτεί η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» (βλ. Κεφάλαιο 6.1.4). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η θέση του κεντροειδούς (Εικόνα 4.9 – μπλε κύκλος) για τον υπολογισμό της επικεντρικής απόστασης του πρηνούς στο Πόντι από το σημείο της διάρρηξης. Το κεντροειδές (centroid) είναι το σημείο του ρήγματος που εκλύθηκε η μέγιστη ενέργεια και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα στον υπολογισμό των μέγιστων παραμέτρων της εδαφικής κίνησης, καθώς το Πόντι βρίσκεται στο κοντινό πεδίο.



Εικόνα 4.9: Η θέση του επίκεντρου (άσπρο αστέρι) και του κεντροειδούς (μπλε κύκλος) σύμφωνα με τους (Sokos, et al., 2016).

Ο σεισμός της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015 στη Λευκάδα προκάλεσε μια κατάπτωση βραχοτεμαχίου μεγάλου μήκους στο χωριό Πόντι Βασιλικής, η οποία διαπέρασε μια κατοικία και σκότωσε μια γυναίκα (βλ. Κεφάλαιο 4.3.2). Η βραχόπτωση αυτή αποτελεί αντικείμενο μελέτης και προσομοίωσης με το τρισδιάστατο μοντέλο «ROCKFALL ANALYSIS» της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (βλ. Κεφάλαιο 6).

4.3 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΩΝ

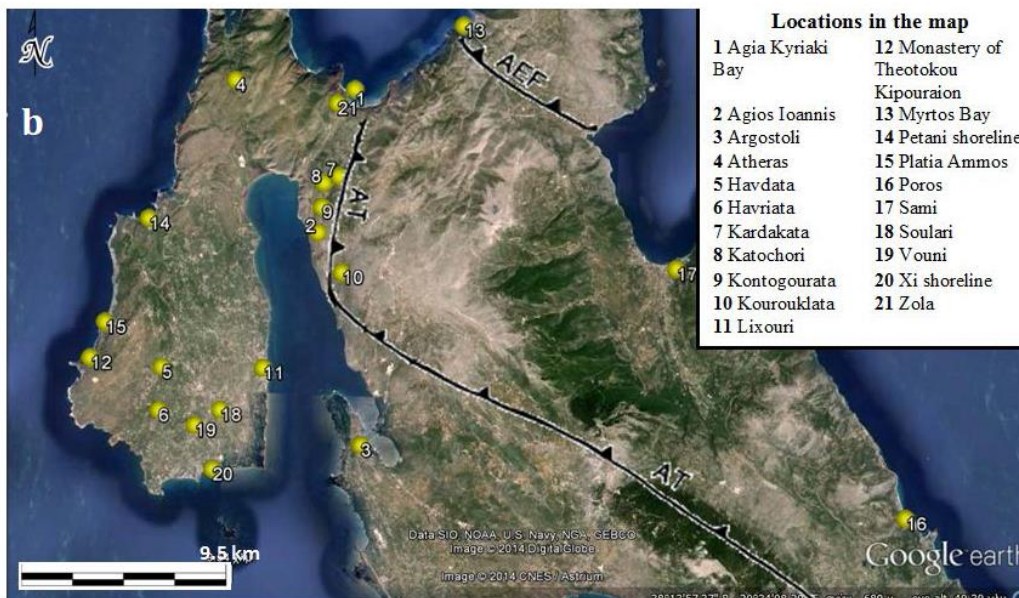
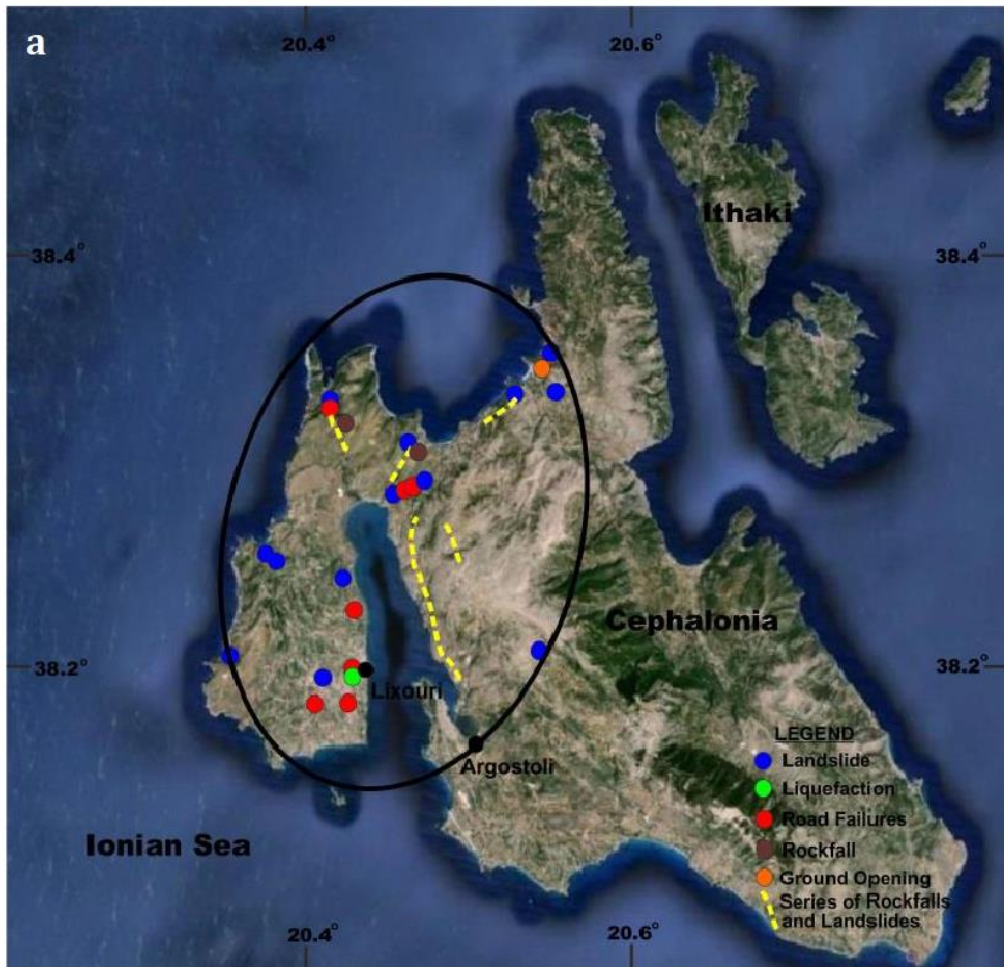
Η Κεφαλονιά και η Λευκάδα ανήκουν στις περιοχές της Ελλάδας με τη συχνότερη εμφάνιση κατολισθήσεων και συγκεκριμένα καταπτώσεων βράχων προκαλουμένων από σεισμό, λόγω της έντονης σεισμικής δραστηριότητας, της γεωλογίας και της τοπογραφίας των νησιών που αναφέρθηκε ανωτέρω.

Μετά τους σεισμούς της Κεφαλονιάς στις 26 Ιανουαρίου και 3 Φεβρουαρίου, 2014 έγιναν έρευνες πεδίου στην πληγείσα επικεντρική περιοχή. Η γεωγραφική κατανομή των συνοδών φαινομένων των σεισμών (Εικόνα 4.11.a) περιορίζεται στο δυτικό τμήμα του νησιού (τη χερσόνησο της Παλικής) και κατά μήκος της ακτής από το Αργοστόλι έως την παραλία του Μύρτου. Παρατηρήθηκαν πρωτογενή και δευτερογενή φαινόμενα, κυρίως εδαφικές διαρρηξεις, ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις, καταπτώσεις και αστοχίες κτηρίων και άλλων κατασκευών. Στο βόρειο και ανατολικό τμήμα του νησιού δεν έχουν καταγραφεί αστοχίες, το οποίο εξηγείται από την κατανομή της έντασης των σεισμών, που προέκυψε από καταγραφές της ισχυρής σεισμικής κίνησης. Στην Εικόνα 4.11.b σημειώνονται οι θέσεις κατολισθήσεων και καταπτώσεων που καταγράφηκαν στο διάστημα 8–23 Φεβρουαρίου 2014 (GEER/EERI/ATC, 2014).

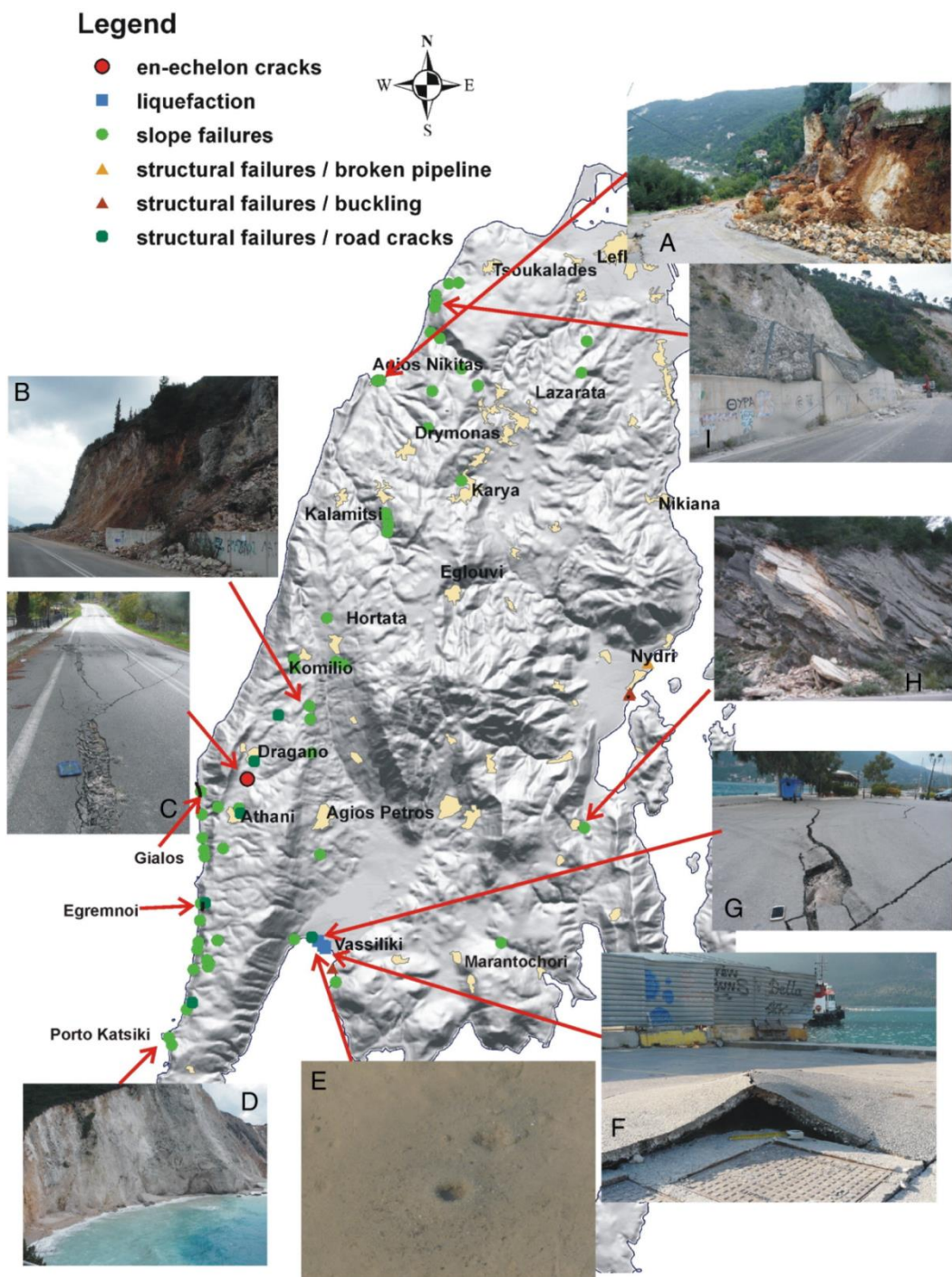
Αντίστοιχα, μετά το σεισμό της Λευκάδας στις 17 Νοεμβρίου 2015 καταγράφηκαν πολλά δευτερογενή συνοδά φαινόμενα, όπως αστοχίες πρανών και ρευστοποιήσεις, κυρίως κοντά στη δυτική και νότια ακτή του νησιού (Sboras, et al., 2016), ενώ δεν εντοπίστηκε επιφάνεια διάρρηξης κατά μήκος του ρήγματος Δράγανο ή στην κοιλάδα Δράγανο – Αθάνι (Εικόνα 4.10). Στο δυτικό τμήμα του νησιού εντοπίζονται εκτεταμένες κατολισθήσεις και καταπτώσεις τόσο σε φυσικά όσο και σε τεχνητά πρανή, οι οποίες είναι συγκεντρωμένες κυρίως στην παράκτια περιοχή από το Πόρτο Κατσίκι έως το Κομηλιό (Εικόνα 4.12). Η περιοχή αυτή έχει ταξινομηθεί ως πολύ επιδεκτική σε αστοχίες πρανών (Parathanassiou, et al., 2013).



Εικόνα 4.10: Κατολισθήσεις προκαλούμενες από το σεισμό στην κοιλάδα Δράγανο – Αθάνι, στη νοτιοδυτική Λευκάδα (Ganas, et al., 2016).



Εικόνα 4.11: (a) Γεωγραφική κατανομή των φαινομένων που προκλήθηκαν από τους σεισμούς της Κεφαλονιάς στις 26/01 και 03/02, 2014 (Παπαδόπουλος, et al., 2014) και (b) κατολισθήσεις και καταπτώσεις που καταγράφηκαν στις 8–23 Φεβρουαρίου 2014 (GEER/EERI/ATC, 2014) AT: Mt. Ainos Thrust, AEF: Aghia Ephyimia Fault.

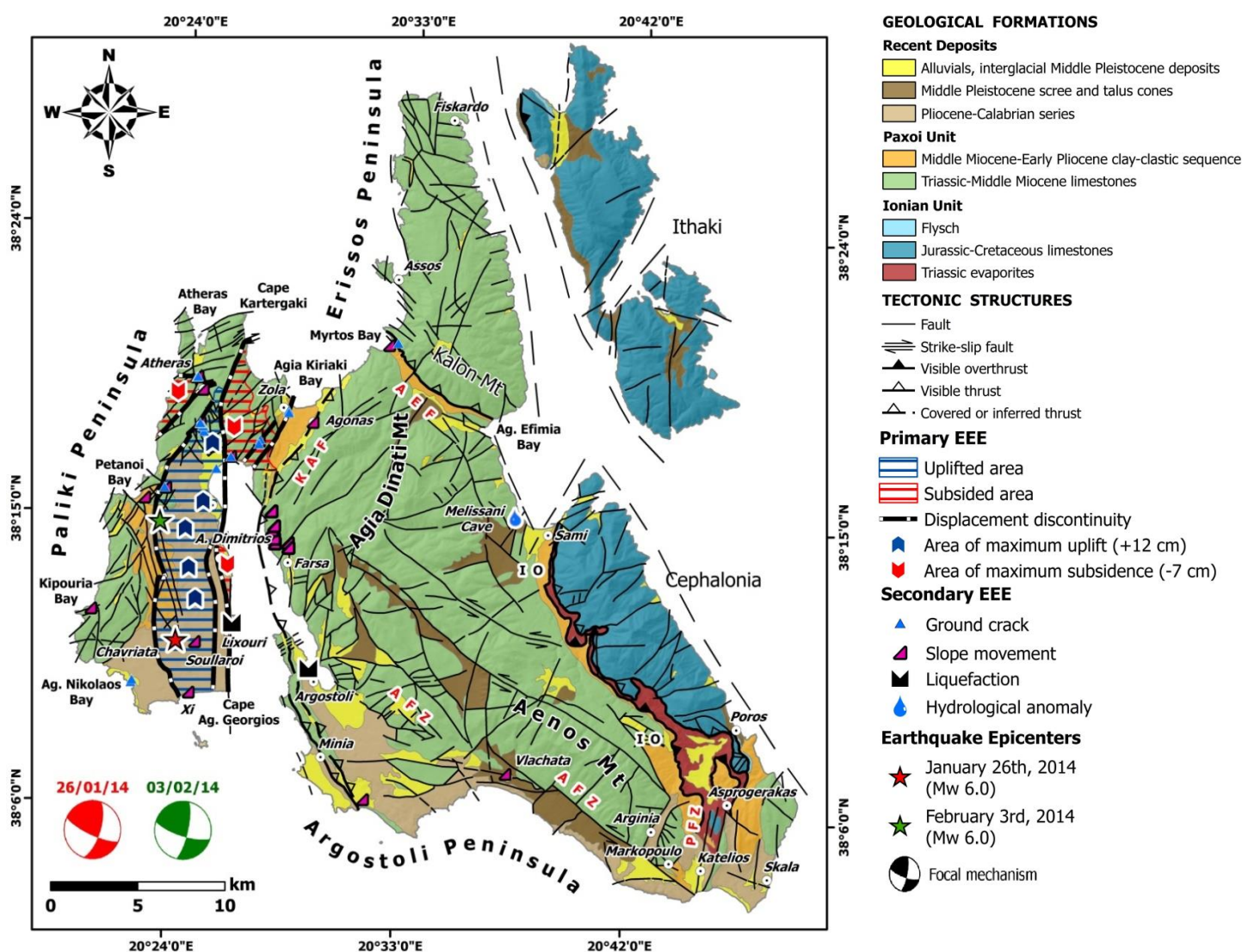


Εικόνα 4.12: Γεωγραφική κατανομή των συνοδών φαινομένων του σεισμού της Λευκάδας στις 17 Νοεμβρίου 2015 και αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν στις 19–22 Νοεμβρίου 2015 (Ganas, et al., 2016).

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάει δύο συγκεκριμένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων που προέκυψαν μετά από το σεισμό της Κεφαλονιάς στις 26 Ιανουαρίου 2014 ($M_w=6.1$) στην παραλία του Μύρτου (βλ. Κεφ. 4.3.1) και μετά από το σεισμό της Λευκάδας στις 17 Νοεμβρίου 2015 ($M_w=6.4$) στο Πόντι Βασιλικής (βλ. Κεφ. 4.3.2). Οι καταπτώσεις αυτές επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν για δύο λόγους. Αρχικά γιατί είναι γνωστή η ακριβής αρχική και τελική θέση των βραχοτεμαχίων και κατέστη δυνατή η αποτύπωσή τους στο Google maps και η εισαγωγή τους στην εφαρμογή ώστε να συγκριθούν με τις μοντελοποιημένες τροχιές. Ο δεύτερος λόγος είναι η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων του τρισδιάστατου μοντέλου «ROCKFALL ANALYSIS» με τα αποτελέσματα ενός δισδιάστατου μοντέλου για τις ίδιες βραχοπτώσεις της εργασίας των (Saroglou, et al., 2017).

4.3.1 ΜΥΡΤΟΣ - ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ

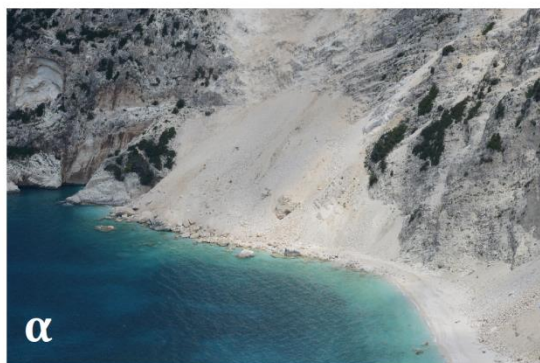
Η παραλία του Μύρτου βρίσκεται στη βορειοδυτική Λευκάδα σε μια μεταβατική ζώνη μεταξύ του βόρειου τμήματος του Όρους Αίνου (Όρος Αγία Δυνατή) και του νότιου της χερσονήσου της Ερίσσου (Καλόν Όρος). Σε αυτή τη μεταβατική ζώνη οι Κρητιδικόι έως Κάτω Μειοκαινικοί ασβεστόλιθοι της ενότητας Παξών επιπεύουν τους Κάτω Μειοκαινικούς – Πλειοκαινικούς μαργαϊκούς σχηματισμούς της ίδιας ενότητας (Εικόνα 4.13). Η κύρια τεκτονική δομή της ζώνης αυτής είναι το ρήγμα της Αγίας Ευφημίας, ένα ανάστροφο ρήγμα διεύθυνσης ΒΔ–ΝΑ με συνιστώσα οριζόντια ολίσθησης, οπότε χαρακτηρίζεται ως πλαγιονάστροφο ρήγμα (Lekkas, et al., 2001). Το ρήγμα της Αγίας Ευφημίας μαζί με άλλες τεκτονικές δομές οριζόντιας ολίσθησης διεύθυνσης ΒΑ–ΝΔ και ΒΔ–ΝΑ που εντοπίζονται στην περιοχή, κατατέμνουν την παραλία του Μύρτου δημιουργώντας μια γεωτεχνικά πολύ ασταθή περιοχή (Lekkas & Mavroulis, 2016).



Εικόνα 4.13: Γεωτεκτονικός χάρτης της Κεφαλονιάς με σημειωμένα τα επίκεντρα των δύο σεισμών του 2014. Στο βόρειο τμήμα του νησιού εντοπίζεται το ρήγμα Αγίας Ευφημίας (AEF), που τέμνει την παραλία του Μύρτου (Lekkas & Mavroulis, 2016).

Μετά τον πρώτο σεισμό της Κεφαλονιάς στις 26 Ιανουαρίου 2014 εκδηλώθηκαν αστοχίες πρανών στην παραλία του Μύρτου και καταστροφές σε πέντε σημεία του οδικού δικτύου (Εικόνα 4.14-γ)

που οδηγεί σε αυτή (Lekkas & Manroulis, 2016). Οι κατολισθήσεις, μορφής δεβριτικής ροής στα βόρεια και νότια πρανή (Εικόνα 4.14-β,δ) και καταπτώσεων βράχων στα ανατολικά πρανή, προέκυψαν στους Κρητιδικούς – Κάτω Μειοκαινικούς ασβεστόλιθους της ενότητας Παξών. Οι ασβεστόλιθοι στις πλαγιές του Μύρτου είναι λευκοί, τοπικά καρστικοποιημένοι και σε ορισμένες θέσεις μετατρέπονται σε τεκτονικά λατυποπαγή, λόγω του έντονου τεκτονισμού από το ρήγμα. Τα πρανή καλύπτονται από πλευρικά κορήματα (Εικόνα 4.14-α), τα οποία προέρχονται από τη διάβρωση των απότομων πλαγιών και αποτελούνται από άμμο, χαλίκια και ακανόνιστα τεμάχια ασβεστόλιθου (Saroglou, et al., 2017).



Εικόνα 4.14: Στο κέντρο φαίνεται η παραλία του Μύρτου (πηγή: Google Earth) με σημειωμένες τις γωνίες που έχουν τραβηχτεί οι εικόνες β και δ. (α) πλευρικά κορήματα στο βόρειο πρανές, (β) τα βόρεια πρανή και οι κατολισθήσεις, (γ) καταστροφή του δρόμου από τη διέλευση του βράχου, (δ) τα νότια πρανή και οι κατολισθήσεις μορφής δεβριτικής ροής (φωτογραφίες Ε. Λέκκας, 2014).

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάει την κατάπτωση του ασβετολιθικού βράχου (Εικόνα 4.15 –1), όγκου 180 m^3 ($\sim 7 \times 5.5 \times 5 \text{ m}$), που αποκολλήθηκε από το ανατολικό πρανές σε ύψος περίπου 280 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Εικόνα 4.16 –1), κύλησε στην απότομη πλαγιά καταστρέφοντας το δρόμο σε τρία σημεία και σταμάτησε στο πόδι του πρανούς σε απόσταση 100

m από την ακτογραμμή και σε ύψος περίπου 10 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Εικόνα 4.17). Ταυτόχρονα, ένα δεύτερο μικρότερο όγκο βραχοτεμάχιο (Εικόνα 4.15 –2) αποσπάστηκε από το ίδιο πρανές στο ίδιο περίπου υψόμετρο (Εικόνα 4.16 –2), κύλησε κατά μήκος της πλαγιάς και σταμάτησε λίγο πιο ψηλά σε ύψος περίπου 50 m (Εικόνα 4.18) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Saroglou, et al., 2017).



Εικόνα 4.15: Αποψη του ανατολικού πρανούς της παραλίας του Μύρτου από νότια, στο οποίο διακρίνονται οι καταπτώσεις των δύο βράχων. Με τον αριθμό 1 σημειώνεται ο μεγάλος βράχος όγκου 180 m^3 και με τον αριθμό 2 ο μικρότερος (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16, οι ασβεστόλιθοι είναι έντονα κατακερματισμένοι με μεγάλες και ανοιχτές ρωγμές. Επομένως, είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε αποκολλήσεις μεγάλων βραχοτεμαχίων ακόμα και μετά από μικρές σεισμικές δονήσεις ή ακόμα και έντονη βροχόπτωση.

Οι τροχιές της κατάπτωσης των δύο βραχοτεμαχίων είναι εμφανείς στην πλαγιά του Μύρτου ακόμα και σήμερα, όπως φαίνεται στο Google Earth (Εικόνα 4.19). Με κόκκινη γραμμή σημειώνεται η τροχιά της κατάπτωσης του βράχου (1), στο τέλος της οποίας διακρίνεται ο βράχος (Εικόνα Google Earth από 03/2016), και με πορτοκαλί γραμμή του μικρότερου βράχου (2).



Εικόνα 4.16: Οι θέσεις αποκόλλησης των βραχοτεμαχίων (1) και (2), σε υψόμετρο περίπου 280 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).



Εικόνα 4.17: Ο βράχος (1), όγκου 180 m^3 έφτασε στο πόδι του πρανούς σε ύψος περίπου 10 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).



Εικόνα 4.18: Ο μικρότερου όγκου βράχος (2) έφτασε σε ύψος 50 m πάνω από τη θάλασσα (GEER/EERI/ATC, 2014).



Εικόνα 4.19: Η παραλία του Μύρτου το Μάρτιο του 2016 (πηγή: Google Earth). Είναι εμφανές το αποτύπωμα των τροχιών της κατάπτωσης των δύο βράχων πάνω στην πλαγιά. Σημειώνεται με κόκκινη γραμμή η τροχιά του βράχου (1) και με πορτοκαλί γραμμή του βράχου (2). Στο τέλος της κόκκινης γραμμής διακρίνεται ο βράχος (1).



4.3.2 ΠΟΝΤΙ – ΛΕΥΚΑΔΑ

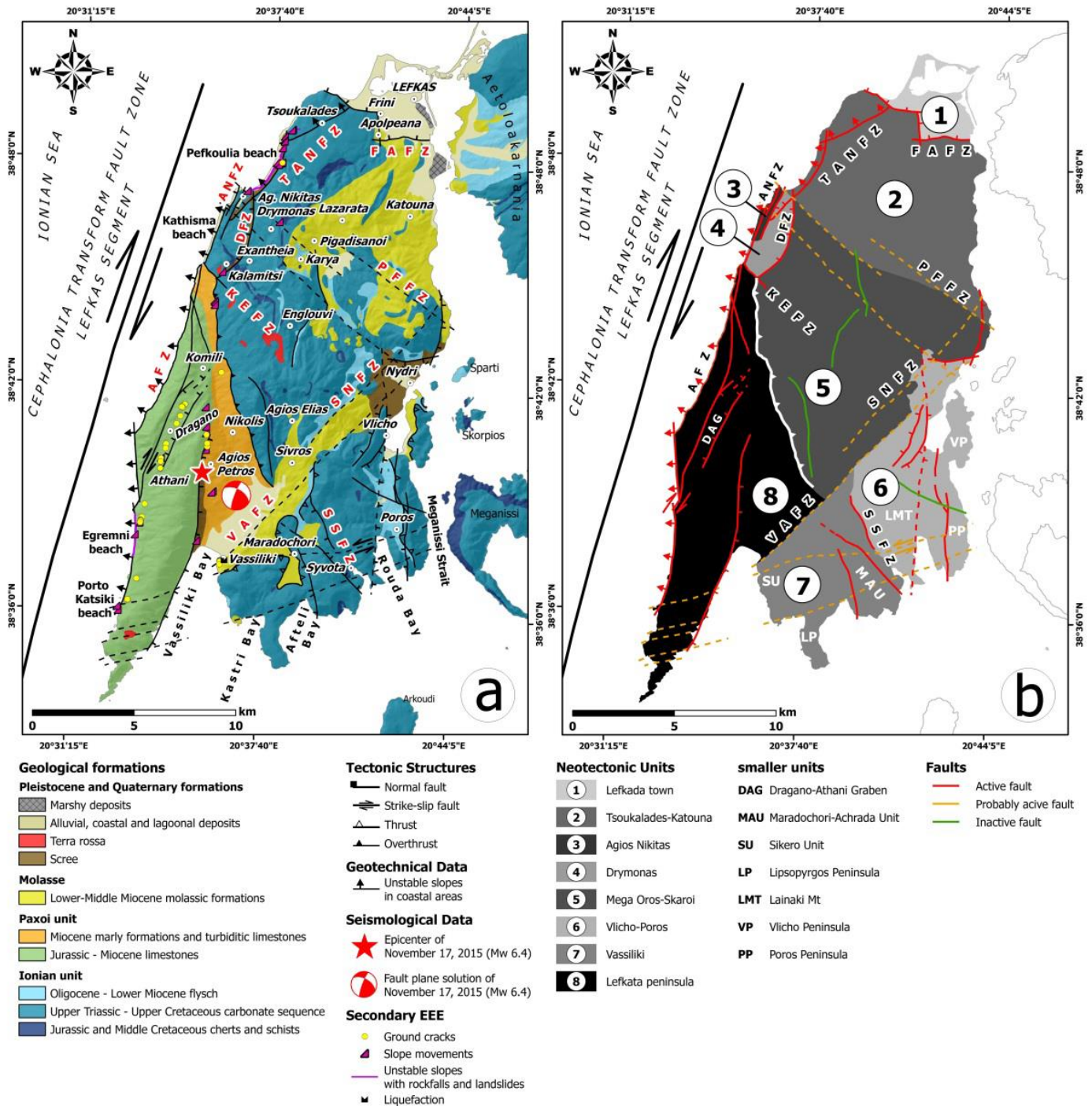
Το χωριό Πόντι βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Λευκάτας στον κόλπο της Βασιλικής. Η νεοτεκτονική ενότητα Λευκάτα (Εικόνα 4.21.b), που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιού αποτελείται από Κάτω Κρητιδικούς – Μειοκαινικούς ασβεστόλιθους και Μειοκαινικές μάργες και τουρβιδιτικούς ασβεστόλιθους της ενότητας Παξών καθώς και Πλειστοκαινικά κορήματα πάχους μερικών μέτρων. Οριοθετείται από τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης KEFZ (Kalamitsi Exantheia Fault Zone) στα βόρεια, Βασιλικής (VAFZ) στα ανατολικά και Αθάνι (AFZ) στα δυτικά. Επίσης, εντοπίζονται εντός αυτής και μικρότερες ενότητες, όπως η τάφρος Δράγανο-Αθάνι, που οριοθετείται ανατολικά και δυτικά από δύο ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (Lekkas, et al., 2016).

Το ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Λευκάτας χαρακτηρίζεται από ένα πιθανά ενεργό ρήγμα (Lekkas, et al., 2016). Το ρήγμα φέρνει σε επαφή τους άνω Κρητιδικούς ασβεστόλιθους της ενότητας Παξών με τις Μειοκαινικές μάργες του μη τυπικού φλύσχη της ίδιας ενότητας, δημιουργώντας έναν εκτεταμένο σχηματισμό πλευρικών κορημάτων (Εικόνα 4.21.a). Αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα σχηματισμού της BBA-NNΔ διεύθυνσης, γραμμικής, ανατολικής ακτογραμμής της χερσονήσου της Λευκάτας. Επίσης, ευθύνεται για τη ρωγμάτωση και κατάτμηση των αλπικών σχηματισμών της ενότητας Παξών της περιοχής. Κατά μήκος αυτού του ενεργού ρήγματος εκδηλώθηκαν πολλές μετακινήσεις πρανά μετά το σεισμό στις 17 Νοεμβρίου 2015, με τη μορφή κατολισθήσεων και καταπτώσεων. Προκλήθηκε μερική καταστροφή του οδικού δικτύου, όπως ρωγμές και κρατήρες στο οδόστρωμα και παραμόρφωση της προστατευτικής μπάρας στα σημεία που τα βραχοτεμάχια αναπήδησαν σε αυτό (Lekkas, et al., 2016).

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάται μία από αυτές τις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων, η οποία προκάλεσε το θάνατο μιας γυναίκας στο χωριό Πόντι. Ένας ασβεστολιθικός βράχος, όγκου 2 m³ αποκολλήθηκε από την παρακείμενη ασβεστολιθική πλαγιά, κύλησε κατά μήκος αυτής, διαπέρασε τους δύο τούβλινους τοίχους ενός σπιτιού (Εικόνα 4.20), προκαλώντας το θάνατο της γυναίκας, βγήκε από το πίσω μέρος του σπιτιού και σταμάτησε την πορεία του στην πίσω αυλή.

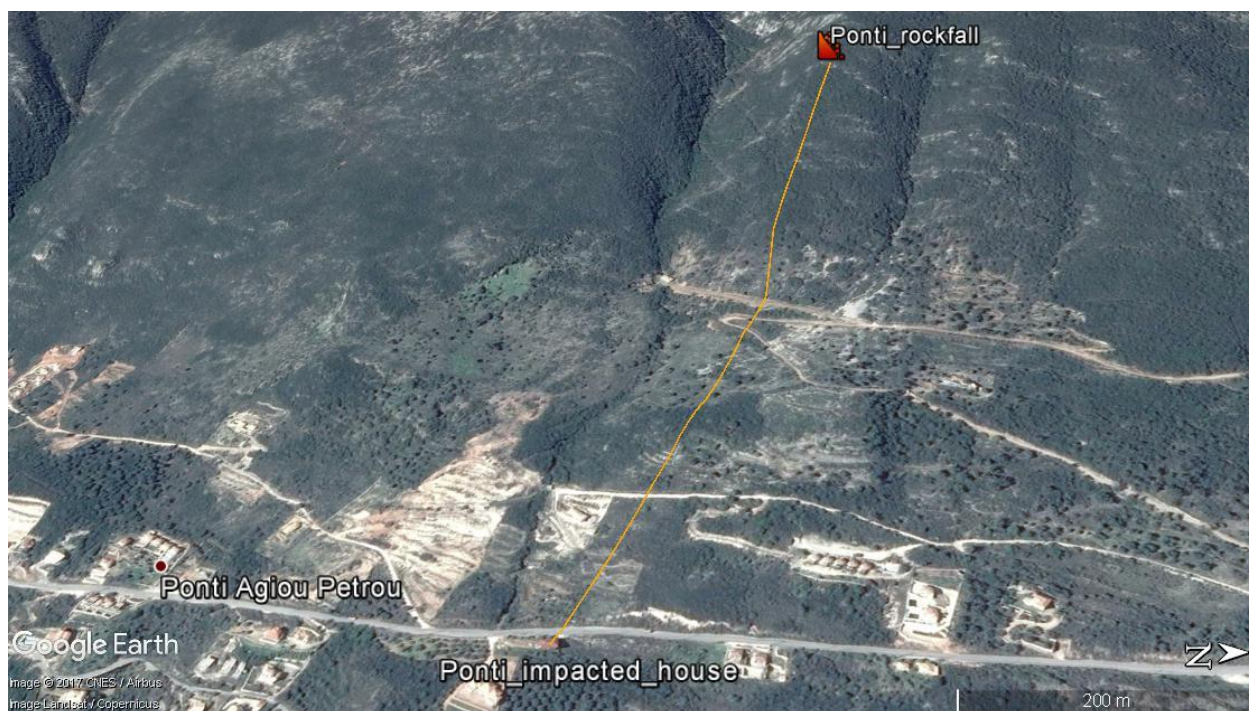


Εικόνα 4.20: Ο τοίχος του σπιτιού που διαπέρασε ο βράχος, παρασύροντας στο θάνατο τη γυναίκα (Saroglou, et al., 2017).



Εικόνα 4.21: (a) Γεωτεκτονικός χάρτης της Λευκάδας. Σημειώνεται το επίκεντρο του σεισμού στις 17 Νοεμβρίου 2015, στο ανατολικό ρήγμα της χερσονήσου της Λευκάδας. Διακρίνεται ο εκτεταμένος σχηματισμός πλευρικών κορημάτων κατά μήκος του ρήγματος και σημειώνεται η θέση της κατολίθησης στο Πόντι. (b) Νεοτεκτονικός χάρτης της Λευκάδας. Η ενότητα Λευκάδα (8) δομείται από τους σχηματισμούς της ενότητας Παξών (Lekkas, et al., 2016).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεγάλη μήκους τροχιά κατάπτωσης του βραχοτεμαχίου (Εικόνα 4.22), περίπου 800 m σε κάτοψη, από το σημείο αποκόλλησης μέχρι την τελική του θέση. Η ασβεστολιθική πλαγιά έχει ύψος περίπου 600 m και κλίση 35° – 40° (Saroglou, et al., 2017).



Εικόνα 4.22: Ένας βράχος ασβεστολιθικής σύστασης αποκολλήθηκε από την παρακείμενη πλαγιά (σημείο `Ponti_rockfall` στην εικόνα) και κατέληξε στην πίσω αυλή ενός σπιτιού (πηγή: Google Earth), διαγράφοντας μια τροχιά μήκους περίπου 800 m .



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΥΡΤΟΣ «ROCKFALL ANALYSIS»

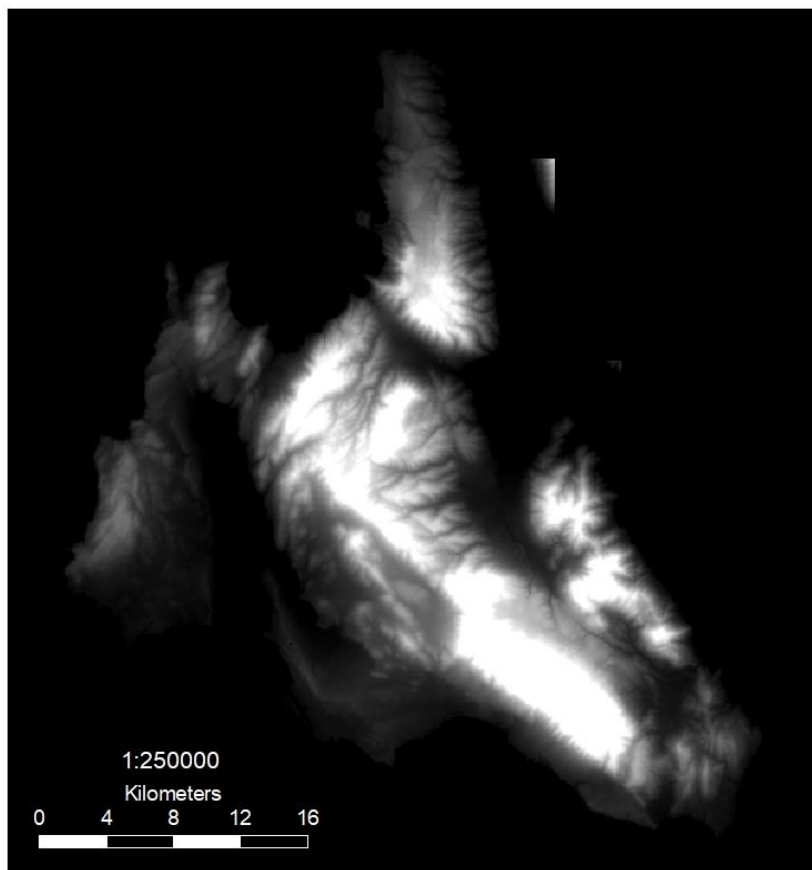
Στο Κεφάλαιο αυτό της Διπλωματικής Εργασίας γίνεται ανάστροφη ανάλυση των δύο καταπτώσεων βράχων που εκδηλώθηκαν στην παραλία του Μύρτου (βλ. Κεφ. 4.3.1) μετά το σεισμό της Κεφαλονιάς στις 26 Ιανουαρίου 2014. Γίνεται προσπάθεια ακριβούς προσομοίωσης της τροχιάς και της τελικής θέσης των βραχοτεμαχίων μέσω της εφαρμογής τρισδιάστατης ανάλυσης καταπτώσεων βράχων «ROCKFALL ANALYSIS». Η προσπάθεια έγκειται στην εύρεση και επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων (γωνία εσωτερικής τριβής, συντελεστές ανάκλασης, αρχική ταχύτητα), καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων για τους σχηματισμούς στην περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα αυτά αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και επιλέχθηκαν τα καταλληλότερα για την περιοχή. Επιπλέον, εκτελείται προσομοίωση καταπτώσεων βραχοτεμαχίων και από άλλα σημεία του πρανούς προκειμένου να εντοπιστούν άλλες πιθανές τροχιές και σημεία επί της ακτής που μπορεί να πληγούν από αυτές. Τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν για την περιοχή στην εργασία των (Saroglou, et al., 2017) με χρήση δισδιάστατου μοντέλου, ώστε να αναδειχθεί το συγκριτικό πλεονέκτημα του τρισδιάστατου μοντέλου «ROCKFALL ANALYSIS». Επίσης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς η παραλία του Μύρτου στην Κεφαλονιά είναι δημοφιλής τουριστικός προορισμός και συγκεντρώνει χιλιάδες επισκέπτες κάθε χρόνο, κυρίως κατά τους μήνες Μάιο – Σεπτέμβριο. Συνεπώς, είναι κρίσιμο να παρθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας αφού η εκδήλωση ενός τέτοιου φαινομένου τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να προκαλέσει πολλούς τραυματισμούς ή ακόμα και θανάτους.

5.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Τα πρωτογενή δεδομένα της περιοχής μελέτης προέρχονται από Φορείς του Δημοσίου, το Google Earth και τη βιβλιογραφία. Προκειμένου να εισαχθούν στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» ήταν απαραίτητος ο μετασχηματισμός τους στην κατάλληλη μορφή. Η επεξεργασία τους έγινε στο λογισμικό ArcMap.

5.1.1 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (ΨΜΕ) ΜΟΡΦΗΣ TIN

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) παραχωρήθηκε από την εταιρεία «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.) για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Το ΨΜΕ της νήσου Κεφαλονιάς αποτελείται από 106 αρχεία εικόνων μορφής GeoTIFF ανάλυσης 5 m. Απεικονίζεται στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 1987 (Greek Grid). Αρχικά οι εικόνες εισήχθησαν στο ArcMap σε μια γεωβάση και με το εργαλείο Create Raster Dataset ενώθηκαν σε μία εικόνα (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Το ΨΜΕ της νήσου Κεφαλονιάς ανάλυσης 5 m, της «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το ΨΜΕ μορφής TIN για την ευρύτερη περιοχή της παραλίας του Μύρτου (Εικόνα 5.2), με το εργαλείο Raster to TIN, προκειμένου να εισαχθεί στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS». Επιλέχθηκε z-tolerance=1, ώστε να αναπαρασταθεί ακριβέστερα η γεωμετρία του αναγλύφου.

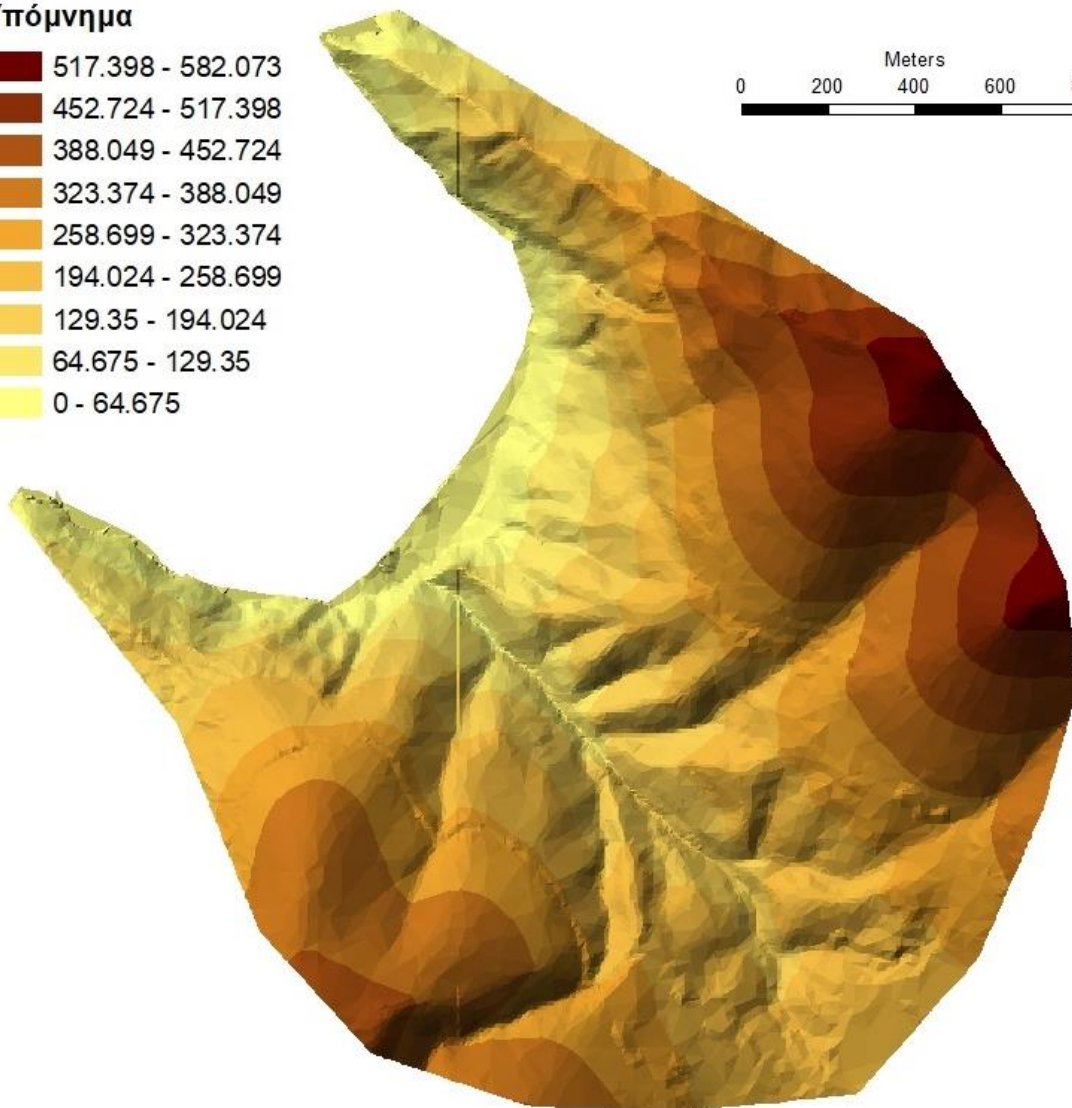
5.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Ο γεωλογικός χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς κλίμακας 1:50.000 (Φύλλο Νήσος Κεφαλληνία, Βόρειο Τμήμα) παραχωρήθηκε από το «Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών» (Ι.Γ.Μ.Ε.) για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Ψηφιοποιήθηκαν τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών (Εικόνα 5.3) που απαντώνται στην ευρύτερη περιοχή της παραλίας του Μύρτου και αποθηκεύτηκαν σε αρχείο shapfile. Η παραλία του Μύρτου και οι παράκτιες αποθέσεις αυτής δεν αποτυπώνονται στο γεωλογικό χάρτη, λόγω της μικρής κλίμακας, αλλά διακρίνονται εμφανώς στο ΨΜΕ, που έχει ανάλυση έως 5 m. Έτσι, δημιουργήθηκε το πολύγωνο των παράκτιων αποθέσεων (Beach), με οδηγό το ΨΜΕ. Πραγματοποιήθηκε τοπολογικός έλεγχος, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν επικαλύψεις ή κενά μεταξύ των πολυγώνων.

Υπόμνημα

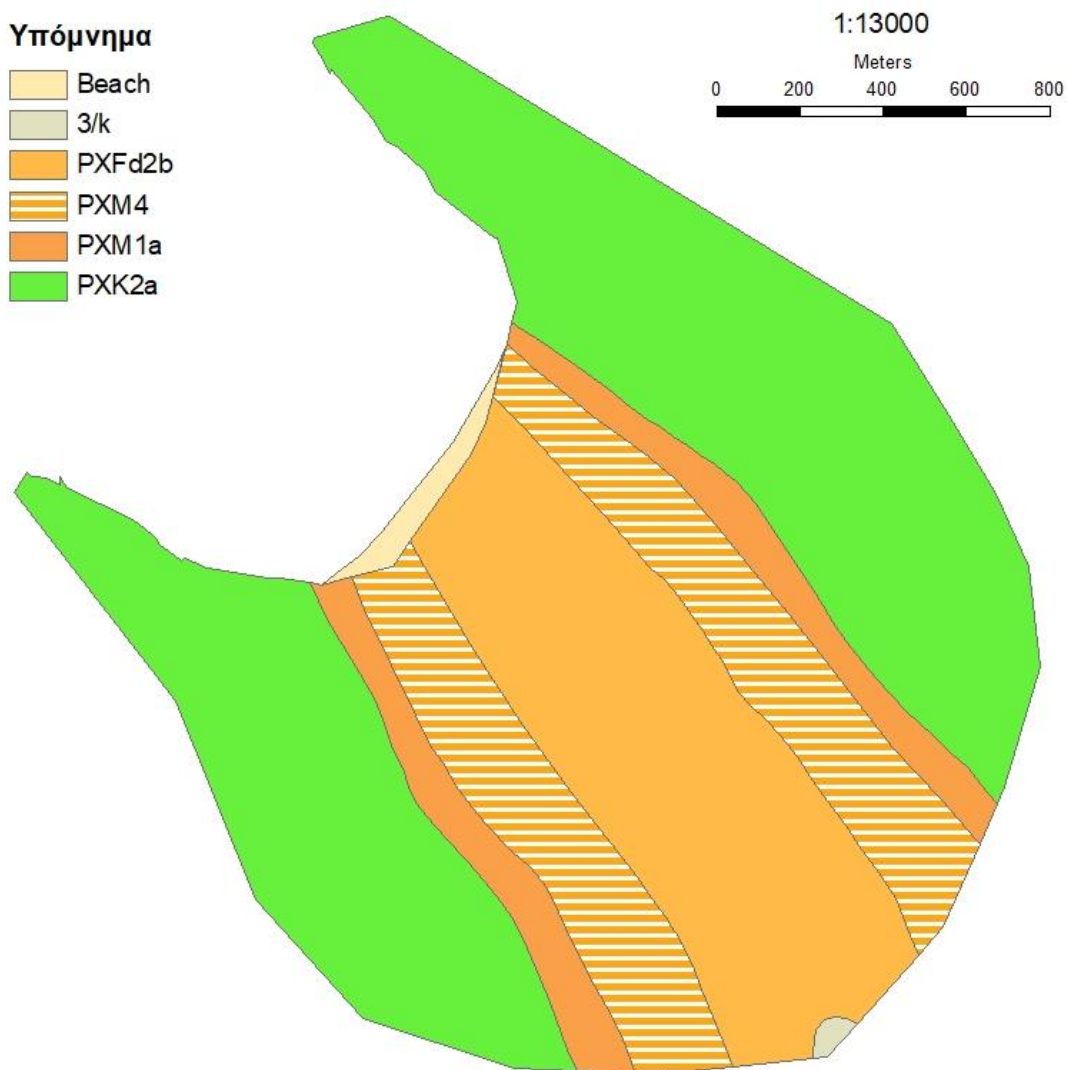
	517.398 - 582.073
	452.724 - 517.398
	388.049 - 452.724
	323.374 - 388.049
	258.699 - 323.374
	194.024 - 258.699
	129.35 - 194.024
	64.675 - 129.35
	0 - 64.675

Meters
0 200 400 600 800



Εικόνα 5.2: Το ΨΜΕ μορφής TIN (με z-tolerance=1) της ευρύτερης περιοχής της παραλίας του Μύρτου, που δημιουργήθηκε για να εισαχθεί στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS».

Στη συνέχεια, συμπληρώθηκε για κάθε σχηματισμό το πεδίο «Phi» του πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών του επιπέδου της γεωλογίας. Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει την τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) σε rad κάθε σχηματισμού και βρέθηκε από βιβλιογραφικά δεδομένα (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011). Οι αρχικές εκτιμήσεις της γωνίας εσωτερικής τριβής μειώθηκαν σημαντικά κατά τη μελέτη και μοντελοποίηση της κατάπτωσης. Στον Πίνακα 5.1 δίνονται οι τιμές της ϕ σε κάθε δοκιμή.



Εικόνα 5.3: Τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στην παραλία του Μύρτου, (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Νήσος Κεφαλληνία, Βόρειο Τμήμα).

Πίνακας 5.1: Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ – Αρχικές εκτιμήσεις (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011) και τιμές δοκιμών για τη μοντελοποίηση της κατάπτωσης.

Σχηματισμός	Περιγραφή	Γωνία Εσωτερικής Τριβής (ϕ) – Δοκιμές					
		P0 – Αρχικές εκτιμήσεις		P1		P2	
		Μοίρες	rad	Μοίρες	rad	Μοίρες	rad
Beach	Παράκτιες αποθέσεις	30	0.52	30	0.52	27.5	0.48
3/k	Αλλουβιακές προσχώσεις	32	0.56	32	0.56	30	0.52
PXFd2b	Κροκαλοπαγές και ασβεστόλιθος	37	0.65	35.5	0.62	33	0.58
PXM4	Ασβεστόλιθοι άστρωτοι	38	0.66	36	0.63	33.8	0.59
PXM1a	Ασβεστόλιθοι με παρεμβαλλόμενα στρώματα μαργών	36	0.63	34	0.60	34	0.60
PXK2a	Κλαστικός αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος	35	0.61	33	0.58	33	0.58



5.1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

Το πολυγωνικό shapefile που περιέχει τους συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης προέκυψε από την ένωση (εργαλείο “Union” του ArcMap) των γεωλογικών πολυγώνων και του οδικού δικτύου. Το οδικό δίκτυο ψηφιοποιήθηκε ως πολύγωνο στους χάρτες Google Earth. Σε κάθε πολύγωνο καταχωρήθηκε ο εφαπτομενικός (R_t) και ο κάθετος (R_n) συντελεστής ανάκλασης, σύμφωνα με τον Hoek (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Οι συντελεστές ανάκλασης επιφανειών κατά Hoek (Hoek, n.d.)

Surface	Coefficient of Restitution	
	R_t (tangential)	R_n (normal)
Clean hard bedrock	0.99	0.53
Asphalt roadway	0.90	0.40
Bedrock outcrops with hard surface, large boulders	0.85	0.35
Talus cover	0.82	0.32
Talus cover with vegetation	0.80	0.32
Soft soil, some vegetation	0.80	0.30

Στην επιφάνεια που καταλαμβάνει ο σχηματισμός PXM4 φαίνεται να εμφανίζονται μεγάλα τεμάχια βράχων και αρχικά οι συντελεστές ανάκλασης ορίστηκαν σε $R_t = 0.85$ και $R_n = 0.35$. Η επιφάνεια που καταλαμβάνει ο σχηματισμός PXFd2b καλύπτεται από κορήματα και χαμηλή βλάστηση και αρχικά οι συντελεστές ανάκλασης ορίστηκαν σε $R_t = 0.80$ και $R_n = 0.32$. Στην πορεία της αναστροφής ανάλυσης των υπό μελέτη καταπτώσεων διαπιστώθηκε ότι έπρεπε να πάρουν μεγαλύτερες τιμές, δηλαδή αυτές της καθαρής επιφάνειας βράχου και της επιφάνειας με εμφανίσεις βράχων αντίστοιχα, προκειμένου να προσομοιωθεί η τροχιά τους. Έτσι, στον Πίνακα 5.3 δίνονται οι τελικές τιμές των συντελεστών ανάκλασης που χρησιμοποιήθηκαν για τις επιφάνειες της περιοχής μελέτης.

**Πίνακας 5.3:** Οι συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης κατά Hoek (Hoek, n.d.)

Επιφάνεια	Συντελεστές Ανάκλασης	
	Rt (εφαπτομενικός)	Rn (κάθετος)
PXK2a – Καθαρή σκληρή επιφάνεια βράχου	0.99	0.53
PXM1a – Καθαρή σκληρή επιφάνεια βράχου	0.99	0.53
PXM4 – Εμφανίσεις σκληρών βράχων, μεγάλα τεμάχια	0.85	0.35
PXFd2b – Κάλυμμα κορημάτων με φυτοκάλυψη	0.80	0.32
3/k – Κάλυμμα κορημάτων με φυτοκάλυψη	0.82	0.32
Beach – Μαλακό έδαφος	0.82	0.32
Δρόμος	0.90	0.40

5.1.4 ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Δεδομένου ότι το έναυσμα των καταπτώσεων στην παραλία του Μύρτου ήταν ο σεισμός της 26^{ης} Ιανουαρίου 2014 στην Κεφαλονιά, ορίστηκε αρχική ταχύτητα V_0 . Στην περιοχή δεν είναι εγκατεστημένα όργανα καταγραφής της ισχυρής σεισμικής κίνησης. Επομένως, η αρχική ταχύτητα προσδιορίστηκε μέσω της εμπειρικής σχέσης εκτίμησης μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής ταχύτητας των (Skarlatoudis, et al., 2007), η οποία είναι η εξής:

$$\log PGV = -1.66 + 0.65 * M_w - 1.224 * \log[(R^2 + h^2)^{1/2}] + 0.03 * F + 0.15 * S \pm 0.321 \text{ (cm/sec)}$$

όπου:

- $\log PGV$: ο δεκαδικός λογάριθμος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε cm/sec
- M_w : το μέγεθος σεισμικής ροπής του σεισμού
- R : η επικεντρική απόσταση σε km
- h : το εστιακό βάθος σε km
- F : αναφέρεται στο μηχανισμό γένεσης του ρήγματος, με τιμές 0 (κανονικό ρήγμα) και 1 (ανάστροφο και οριζόντιας ολίσθησης ρήγμα)
- S : αναφέρεται στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, με τιμές 0, 1 και 2 για τις κατηγορίες εδαφών (UBC) B, C και D αντίστοιχα.



Στον Πίνακα 5.4 δίνονται οι τιμές των μεταβλητών και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα, που υπολογίζεται (σε m/sec) μέσω της παραπάνω σχέσης, στο πρηνές της παραλίας του Μύρτου που εκδηλώθηκαν οι καταπτώσεις των υπό μελέτη βραχοτεμαχίων. Τα σεισμολογικά δεδομένα προέρχονται από την ανάλυση του σεισμού των (Sokos, et al., 2015). Η μέτρηση της επικεντρικής απόστασης έγινε στο Google Earth με βάση τη θέση του κεντροειδούς (βλ. Εικόνα 4.7) καθώς η παραλία του Μύρτου βρίσκεται στο κοντινό πεδίο, δηλαδή σε απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος του ρήγματος (βλ. Κεφάλαιο 4.2.1). Η μεταβλητή S εκτιμήθηκε από βιβλιογραφικά περιγραφικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 5.4: Τα δεδομένα και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα που προέκυψε από τη σχέση (Skarlatoudis, et al., 2007) για την περιοχή μελέτης.

Σεισμός	Περιοχή μελέτης	M_w	R	h	F	S
Κεφαλονιά 26/01/2014	Μύρτος	6.1	20	10.5	1	2

logPGV cm/sec	+0.321	-0.321	PGV cm/sec	+0.321	-0.321	PGV m/sec	+0.321	-0.321
0.978	1.299	0.657	9.502	19.899	4.538	0.095	0.199	0.045

Για την εκτέλεση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε αρχικά η μέγιστη PGV (0.199 m/sec που στρογγυλοποιήθηκε σε 0.2 m/sec) που προέκυψε από τη σχέση, θεωρώντας ότι η σεισμική κίνηση στο πρηνές είναι σημαντικά ενισχυμένη λόγω των τοπικών γεωλογικών συνθηκών και της έντονης τοπογραφίας. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές και για ταχύτητα $V_0 = 1.0$ m/sec, η οποία αναφέρεται ότι προέκυψε στην περιοχή στην εργασία των (Saroglou, et al., 2017).

Σχετικά με τη γωνία α_0 (βλ. Κεφ. 3.3.1 – Step 3), εκτελέστηκαν δοκιμές για 0° , 5° και 10° . Διαπιστώθηκε ότι δεν είχε ιδιαίτερη επίδραση στη μοντελοποίηση της τροχιάς της κατάπτωσης. Αντίστοιχα εκτελέστηκαν δοκιμές για διαφορετική ελάχιστη ταχύτητα V_{\min} κάτω από την οποία η κατάπτωση μετατρέπεται σε κύλιση ή ολίσθηση αλλά διαπιστώθηκε ότι δεν προκάλεσε σημαντικές μεταβολές στις τροχιές των βραχοτεμαχίων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στο ακόλουθο Κεφάλαιο.

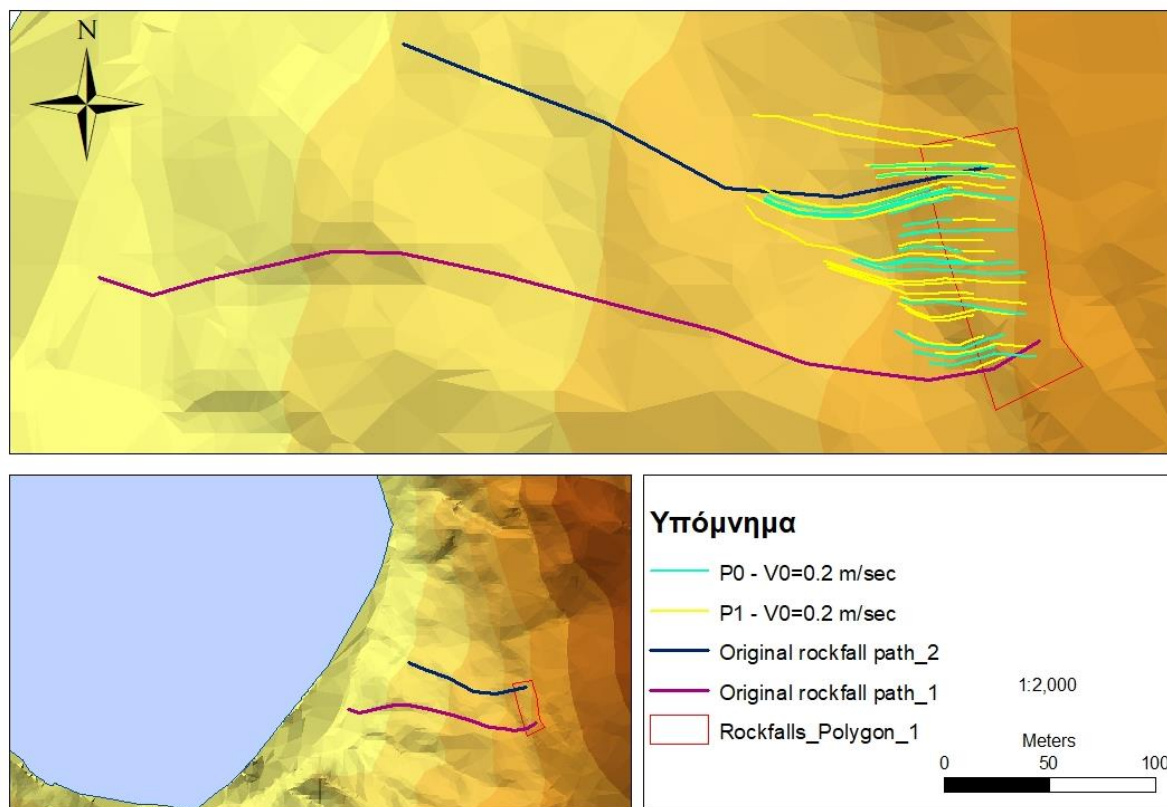
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Την ολοκλήρωση της συλλογής και επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων ακολούθησε η εισαγωγή τους στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS», όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.3.1. Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που θα προσεγγίζει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τις δύο πραγματικές καταπτώσεις βραχοτεμαχίων που εκδηλώθηκαν στην παραλία του Μύρτου εκτελέστηκαν δοκιμές μεταβάλλοντας τις αρχικές παραμέτρους (βλ. Κεφ. 5.1).

Επιλέχθηκε ως περιοχή εκκίνησης των καταπτώσεων ένα πολύγωνο που περικλείει τις δύο πραγματικές θέσεις εκκίνησης των βραχοπτώσεων (Εικόνα 5.4 – Rockfalls_Polygon_1). Για το πολύγωνο ορίστηκε ανάλυση 2 m και επιλέχθηκε να προσομοιωθούν 20 καταπτώσεις από τυχαίες θέσεις εντός αυτού, εισάγοντας τις αρχικές εκτιμήσεις της γωνίας εσωτερικής τριβής (P_0) και των

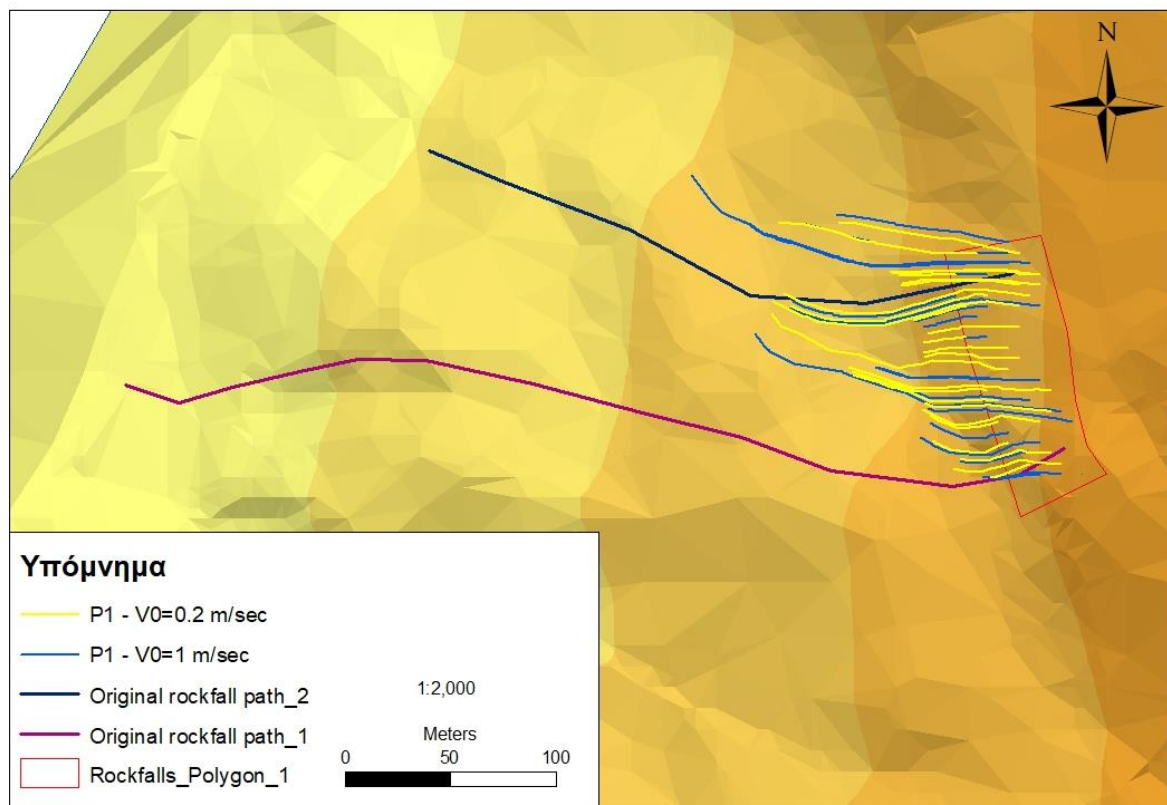


συντελεστών ανάκλασης και αρχική ταχύτητα $V_0 = 0.2$ m/sec. Η μετακίνηση των βράχων που προέκυψε ήταν μικρή σε σχέση με το μήκος των πραγματικών τροχιών, με μέγιστη τροχιά 155 m (Εικόνα 5.4 – κυανές γραμμές). Στη συνέχεια μειώθηκαν οι γωνίες εσωτερικής τριβής των πετρωμάτων (P1) και εκτελέστηκαν δοκιμές για την ίδια αρχική ταχύτητα, αλλά το μήκος των τροχιών δεν αυξήθηκε σημαντικά (Εικόνα 5.4 – κίτρινες γραμμές).



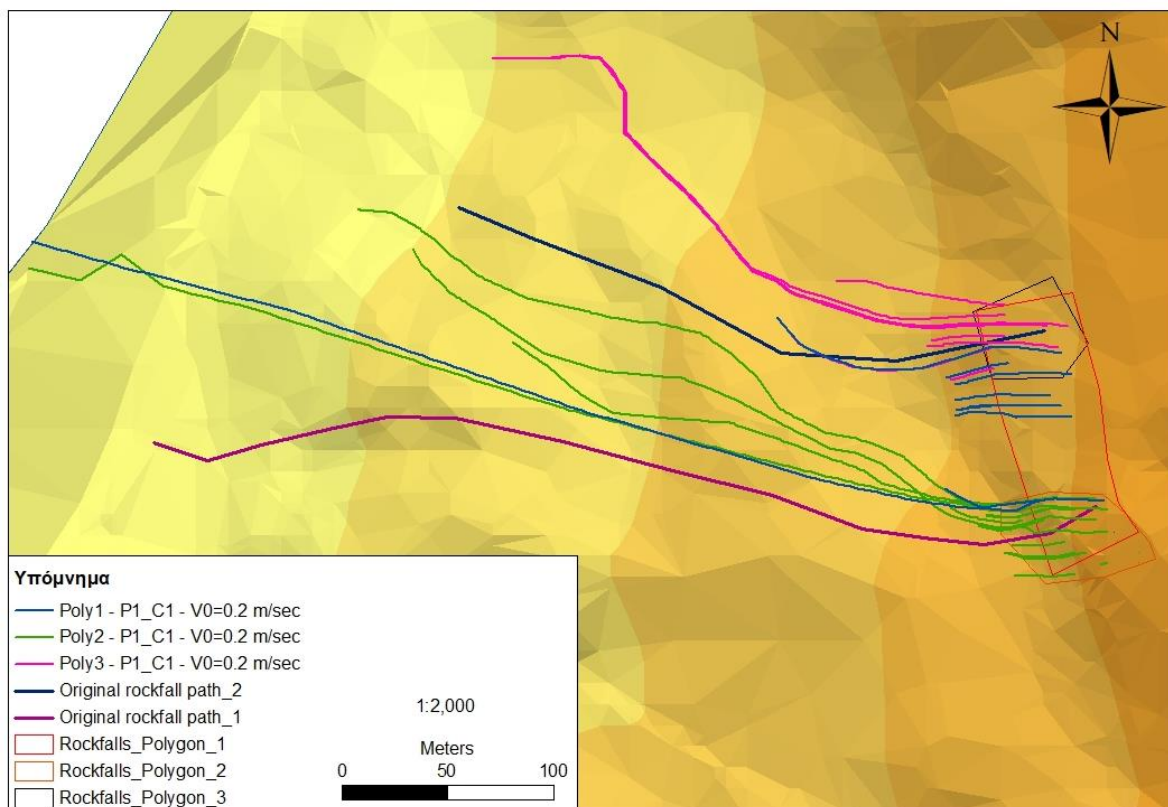
Εικόνα 5.4: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες P0 - $V_0 = 0.2$ m/sec (κυανές γραμμές) και P1 - $V_0 = 0.2$ m/sec (κίτρινες γραμμές). Οι μωβ και μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν τις υπό μελέτη τροχιές των βραχοτεμαχίων (1) και (2) αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, αυξήθηκε η αρχική ταχύτητα από 0.2 m/sec σε 1 m/sec, διατηρώντας τις γωνίες εσωτερικής τριβής (P1). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5, το μήκος των τροχιών δεν μεταβλήθηκε σημαντικά. Εξαιρείται μία κατάπτωση που ξεκίνησε περίπου 6 m πάνω από το σημείο εκκίνησης της βραχόπτωσης (2) και έφτασε σε απόσταση 215 m, δηλαδή περίπου στο μισό της πραγματικής τροχιάς.



Εικόνα 5.5: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P1 - V_0 = 0.2$ m/sec (κίτρινες γραμμές) και $P1 - V_0 = 1$ m/sec (κυανές γραμμές).

Ακολούθως, εξετάστηκε η επίδραση των συντελεστών ανάκλασης στις προβλεπόμενες τροχιές του μοντέλου (βλ. Κεφ. 5.1.3). Εκτός από το αρχικό πολύγωνο (Poly1) εκκίνησης των καταπτώσεων, επιλέχθηκαν άλλα δύο μικρότερα σε έκταση (Poly2 και Poly3) που περικλείουν τις θέσεις εκκίνησης των βραχοπτώσεων (1) και (2) αντίστοιχα. Έτσι, για γωνίες εσωτερικής τριβής (P1), τους τελικούς συντελεστές ανάκλασης (C1) και $V_0 = 0.2$ m/sec οι τροχιές των καταπτώσεων μεταβλήθηκαν σημαντικά, τόσο ως προς το μήκος όσο και ως προς την πορεία που ακολούθησαν (Εικόνα 5.6). Παρατηρείται ότι οι προσομοιωμένες τροχιές δεν ταυτίστηκαν με τις πραγματικές, αλλά προσέγγισαν με αρκετή ακρίβεια κάποια χαρακτηριστικά τους. Πέντε από τις καταπτώσεις που ξεκίνησαν γύρω από τη βραχοπτώση (1), δηλαδή οι πράσινες (Poly2) και κάποιες από τις μπλε (Poly1), ακολούθησαν τροχιές μεγάλου μήκους βορειότερα από αυτή. Δύο από αυτές έφτασαν μέχρι τη θάλασσα ακολουθώντας τροχιά σχεδόν παράλληλη με την πραγματική. Τρεις από τις καταπτώσεις που ξεκίνησαν γύρω από τη βραχοπτώση (2), δηλαδή οι φούξια (Poly3) και κάποιες μπλε (Poly1), κινήθηκαν αρχικά παράλληλα προς αυτή, στη συνέχεια ακολούθησαν τη δική τους πορεία συγκλίνοντας στο τέλος και σταμάτησαν στο ίδιο υψόμετρο με αυτή. Κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό το αποτέλεσμα αυτών των προσομοιώσεων, καθώς οι δύο από τις τροχιές που ξεπέρασαν τα σημεία που σταμάτησαν οι πραγματικές καταπτώσεις και έφτασαν μέχρι τη θάλασσα θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρούς τραυματισμούς σε ανθρώπους στην παραλία. Όπως αναφέρθηκε, η παραλία του Μύρτου συγκεντρώνει χιλιάδες επισκέπτες και μια τέτοια κατάπτωση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να αποβεί ακόμα και θανατηφόρα.



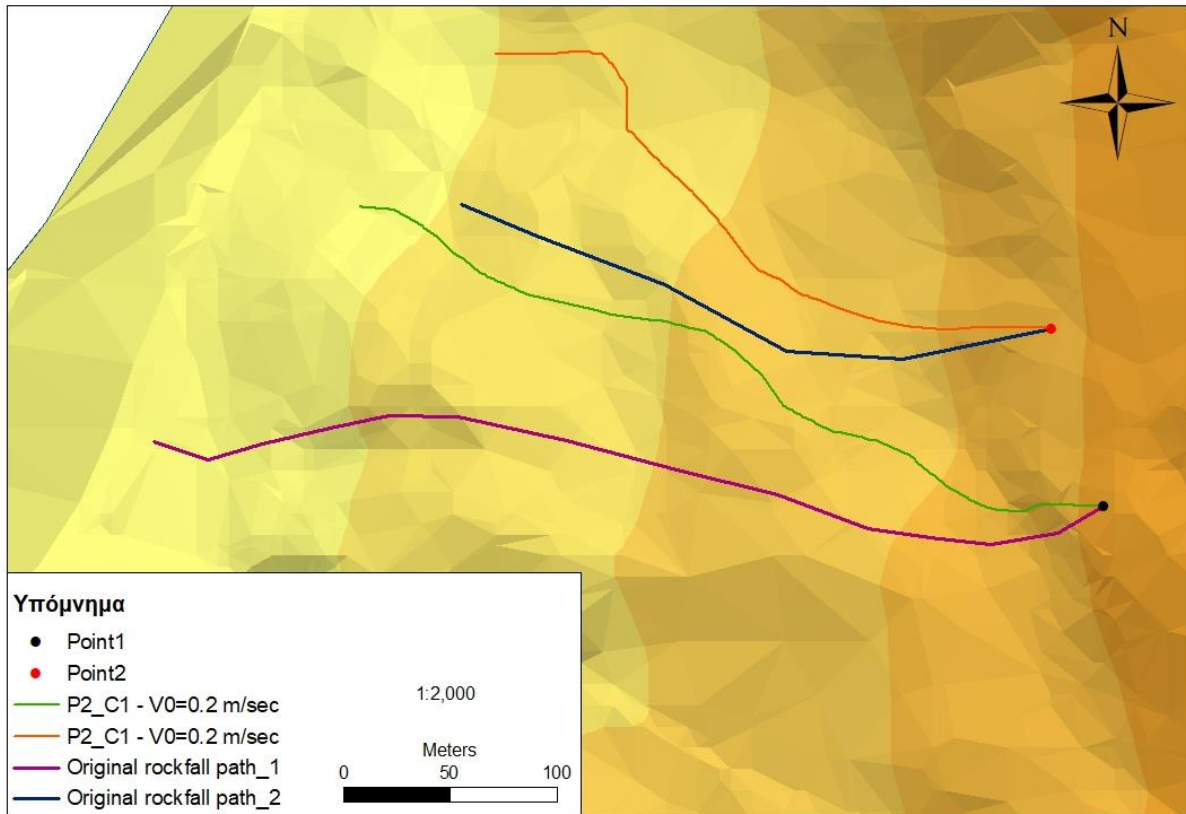
Εικόνα 5.6: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες P1, C1, $V_0 = 0.2$ m/sec.

Με δεδομένους τους νέους συντελεστές ανάκλασης μειώθηκε ξανά η γωνία εσωτερικής τριβής (P2), προκειμένου να εξεταστεί αν θα υπάρξει επίδραση στην πορεία των καταπτώσεων ώστε να προσεγγίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές τροχιές. Λόγω συνεχόμενων προβλημάτων της εφαρμογής δεν εκτελέστηκαν καταπτώσεις από τα πολύγωνα που δημιουργήθηκαν αλλά από τις θέσεις των δύο γνωστών καταπτώσεων. Προέκυψε ότι η περαιτέρω μείωση των γωνιών εσωτερικής τριβής δεν διαφοροποιεί τις τροχιές των καταπτώσεων (Εικόνα 5.7).

Κατά την εκτέλεση των διαφόρων δοκιμών μελετήθηκε και η επίδραση της μεταβολής της ελάχιστης ταχύτητας V_{min} , αλλά δεν προκάλεσε σημαντική μεταβολή στις τροχιές των καταπτώσεων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η προσέγγιση του βραχοτεμαχίου στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» είναι σημειακή (βλ. Κεφάλαιο 3.3). Αυτό σημαίνει ότι δεν λαμβάνεται υπόψιν ο όγκος και το σχήμα του βράχου καθώς και οι συνθήκες που επηρεάζουν τη βολή του σώματος στον αέρα. Το βραχοτεμάχιο (1) που αποκολλήθηκε από την πλαγιά του Μύρτου είχε όγκο περίπου 180 m^3 . Συνεπώς, η σημειακή προσέγγιση δεν μπορεί να αποτυπώσει ακόμα και με ακραίες συνθήκες ταχύτητας/γωνίας εσωτερικής τριβής/συντελεστών ανάκλασης την πραγματική βραχόπτωση λόγω της αντοχής του βράχου και του εδάφους. Επομένως, η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί ακραία συνθήκη για προσομοίωση στο «ROCKFALL ANALYSIS». Στην εργασία των (Χαραλάμπους, et al., 2010) έγινε προσπάθεια ολοκληρωμένης τρισδιάστατης προσομοίωσης των καταπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθος και το σχήμα του βραχοτεμαχίου, αλλά δεν εντάχθηκε αυτή η δυνατότητα στην τελική έκδοση της εφαρμογής που χρησιμοποιεί η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Παρά την αδυναμία ακριβούς προσέγγισης της πραγματικής τροχιάς των βραχοτεμαχίων λόγω των ανωτέρω, προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα για τις συνθήκες P1, C1 και $V_0 = 0.2$ m/sec (που υπολογίστηκε από τη σχέση), καθώς προσομοιώθηκαν καταπτώσεις που μπορεί να φτάσουν μέχρι τη θάλασσα, αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας.



Εικόνα 5.7: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες P2, C1, $V_0 = 0.2$ m/sec.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΟΝΤΙ «ROCKFALL ANALYSIS»

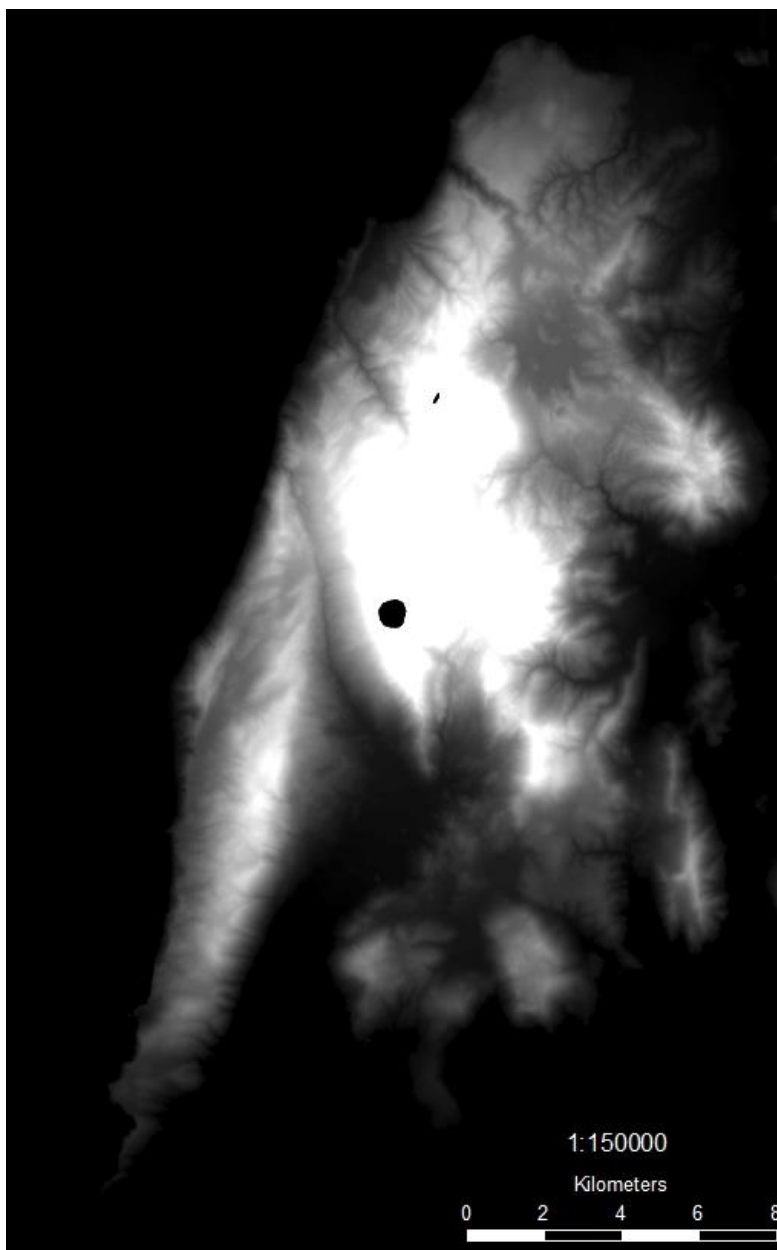
Στο Κεφάλαιο αυτό της Διπλωματικής Εργασίας γίνεται ανάστροφη ανάλυση της κατάπτωσης βράχου που εκδηλώθηκε στο χωριό Πόντι στον κόλπο της Βασιλικής (βλ. Κεφ. 4.3.2) μετά το σεισμό της Λευκάδας στις 17 Νοεμβρίου 2015. Γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της τροχιάς και της τελικής θέσης του βραχοτεμαχίου μέσω της εφαρμογής τρισδιάστατης ανάλυσης καταπτώσεων βράχων «ROCKFALL ANALYSIS». Η προσπάθεια έγκειται στην εύρεση και επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων (γωνία εσωτερικής τριβής, συντελεστές ανάκλασης, αρχική ταχύτητα), καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων για τους σχηματισμούς στην περιοχή μελέτης. Εργασίες που έχουν δημοσιευτεί για την περιοχή, όπως των (Saroglou, et al., 2017), και χρησιμοποιούν δισδιάστατα μοντέλα δεν έχουν καταφέρει να προσεγγίσουν την τροχιά του βραχοτεμαχίου εισάγοντας στο μοντέλο ρεαλιστικές παραμέτρους. Τα αρχικά δεδομένα των παραμέτρων αυτών αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και επιλέχθηκαν τα καταλληλότερα για την περιοχή. Η αρχή της κατάπτωσης προσομοιώθηκε ως σημείο (το πραγματικό σημείο αποκόλλησης) και πολύγωνο προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές τροχιές βραχοτεμαχίων που μπορεί να πλήξουν γειτονικά σπίτια από αυτό που διαπέρασε το υπό μελέτη βραχοτεμάχιο και προκάλεσε το θάνατο της γυναίκας.

6.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Τα πρωτογενή δεδομένα της περιοχής μελέτης προέρχονται από Φορείς του Δημοσίου, το Google Earth και τη βιβλιογραφία. Προκειμένου να εισαχθούν στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» ήταν απαραίτητος ο μετασχηματισμός τους στην κατάλληλη μορφή. Η επεξεργασία τους έγινε στο λογισμικό ArcMap.

6.1.1 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (ΨΜΕ) ΜΟΡΦΗΣ TIN

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) παραχωρήθηκε από την εταιρεία «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.) για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Το ΨΜΕ της νήσου Λευκάδας αποτελείται από 40 αρχεία εικόνων μορφής GeoTIFF ανάλυσης 5 m. Απεικονίζεται στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 1987 (Greek Grid). Αρχικά οι εικόνες εισήχθησαν στο ArcMap σε μια γεωβάση και με το εργαλείο “Create Raster Dataset” ενώθηκαν σε μία εικόνα (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Το ΨΜΕ της νήσου Λευκάδας ανάλυσης 5 m, της «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.).

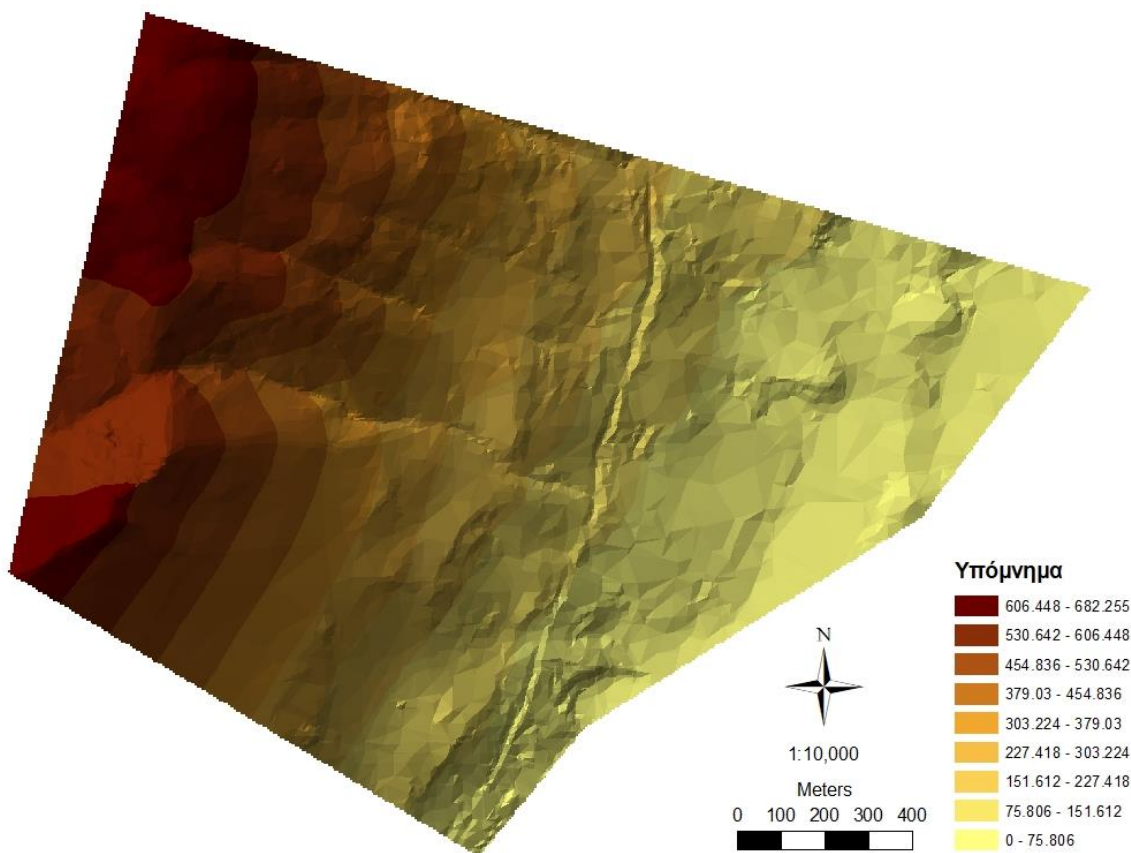
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το ΨΜΕ μορφής TIN για το πρανές κοντά στο χωριό Πόντι (Εικόνα 6.2), με το εργαλείο “Raster to TIN”, προκειμένου να εισαχθεί στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS». Επιλέχθηκε z-tolerance=1, ώστε να αναπαρασταθεί ακριβέστερα η γεωμετρία του αναγλύφου.

6.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Ο γεωλογικός χάρτης της νήσου Λευκάδας κλίμακας 1:50.000 (Φύλλο Λευκάς) παραχωρήθηκε από το «Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών» (Ι.Γ.Μ.Ε.) για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Ψηφιοποιήθηκαν τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών (Εικόνα 6.3) που απαντώνται στα πρανή κοντά στο χωριό Πόντι και αποθηκεύτηκαν σε αρχείο

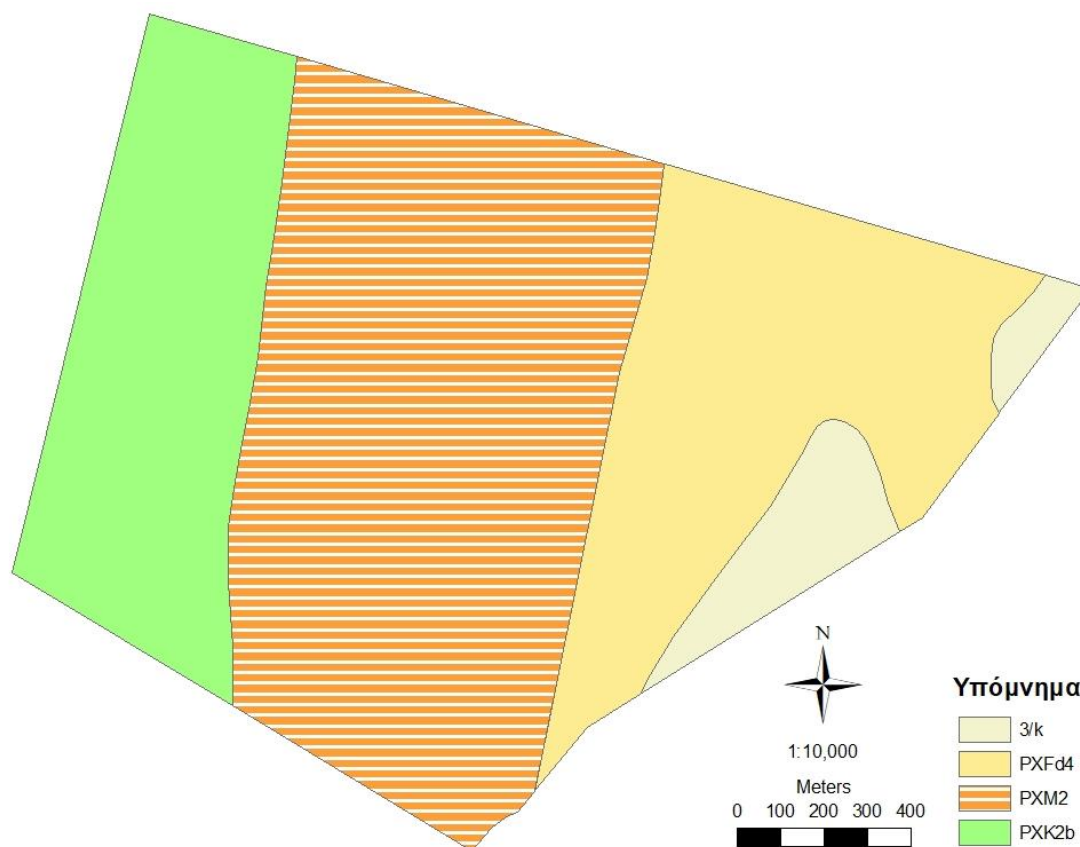


shaperefile. Πραγματοποιήθηκε τοπολογικός έλεγχος, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν επικαλύψεις ή κενά μεταξύ των πολυγώνων.



Εικόνα 6.2: Το ΨΜΕ μορφής TIN (με z-tolerance=1) του πρανούς στο χωριό Πόντι, που δημιουργήθηκε για να εισαχθεί στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS».

Στη συνέχεια, συμπληρώθηκε για κάθε σχηματισμό το πεδίο «Phi» του πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών του επιπέδου της γεωλογίας. Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει την τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) σε rad κάθε σχηματισμού και βρέθηκε από βιβλιογραφικά δεδομένα (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011). Οι αρχικές εκτιμήσεις της γωνίας εσωτερικής τριβής μειώθηκαν σημαντικά κατά τη μελέτη και μοντελοποίηση της κατάπτωσης. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι τιμές της ϕ σε κάθε δοκιμή.



Εικόνα 6.3: Τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στα πρανή κοντά στο χωριό Πόντι, (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Λευκάς).

Πίνακας 6.1: Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ – Αρχικές εκτιμήσεις (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011) και τιμές δοκιμών για τη μοντελοποίηση της κατάπτωσης.

Σχηματισμός	Περιγραφή	Γωνία Εσωτερικής Τριβής ϕ – Δοκιμές							
		P0 – Αρχικές εκτιμήσεις		P1		P2		P3	
		Μοίρες	rad	Μοίρες	rad	Μοίρες	rad	Μοίρες	rad
3/k	Σύγχρονες προσχώσεις	31	0.55	30	0.52	23	0.40	23	0.40
PXFd4	Μάργες	36	0.62	32	0.56	28	0.48	28	0.48
PXM2	Ασβεστόλιθοι με θραύσματα εξελισσόμενοι προς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους	37	0.64	33	0.58	29	0.50	26	0.45
PXX2b	Ασβεστόλιθοι λεπτοστρωματώδεις στιφροί	38	0.66	34	0.60	30	0.52	30	0.52



6.1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

Το πολυγωνικό shapefile που περιέχει τους συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης προέκυψε από την ένωση (εργαλείο “Union” του ArcMap) των γεωλογικών πολυγώνων και του οδικού δικτύου. Το οδικό δίκτυο ψηφιοποιήθηκε ως πολύγωνο στους χάρτες Google Earth. Σε κάθε πολύγωνο καταχωρήθηκε ο εφαπτομενικός (R_t) και ο κάθετος (R_n) συντελεστής ανάκλασης, σύμφωνα με τον Hoek (βλ. Πίνακας 5.2). Η επιφάνεια που καταλαμβάνει ο σχηματισμός ΡΧΜ2, δηλαδή το μεγαλύτερο τμήμα του πρανούς, καλύπτεται από κορήματα και χαμηλή φυτοκάλυψη (θάμνους και μικρά δένδρα) και αρχικά οι συντελεστές ανάκλασης ορίστηκαν σε $R_t = 0.85$ και $R_n = 0.35$. Στην πορεία της ανάστροφης ανάλυσης της υπό μελέτη κατάπτωσης διαπιστώθηκε ότι έπρεπε να πάρουν μεγαλύτερες τιμές, αντίστοιχες με αυτές της καθαρής επιφάνειας βράχου, προκειμένου να προσομοιωθεί η τροχιά της. Έτσι, στον Πίνακα 6.2 δίνονται οι τελικές τιμές των συντελεστών ανάκλασης που χρησιμοποιήθηκαν για τις επιφάνειες της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 6.2: Οι συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης κατά Hoek (Hoek, n.d.)

Επιφάνεια	Συντελεστές Ανάκλασης	
	R_t (εφαπτομενικός)	R_n (κάθετος)
ΡΧΚ2b – Καθαρή σκληρή επιφάνεια βράχου	0.99	0.53
ΡΧΜ2 – Εμφανίσεις σκληρών βράχων, μεγάλα τεμάχια	0.99	0.53
ΡΧFd4 – Κάλυμμα κορημάτων με φυτοκάλυψη	0.80	0.32
3/k – Κάλυμμα κορημάτων με φυτοκάλυψη	0.80	0.32
Δρόμος	0.90	0.40

6.1.4 ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Δεδομένου ότι το έναυσμα της κατάπτωσης στο χωριό Πόντι ήταν ο σεισμός της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015 στη Λευκάδα, ορίστηκε αρχική ταχύτητα V_0 . Στην περιοχή δεν είναι εγκατεστημένα όργανα καταγραφής της ισχυρής σεισμικής κίνησης. Επομένως, η αρχική ταχύτητα προσδιορίστηκε μέσω της εμπειρικής σχέσης εκτίμησης μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας της εδαφικής ταχύτητας των (Skarlatoudis, et al., 2007), η οποία είναι η εξής:

$$\log PGV = -1.66 + 0.65 * M_w - 1.224 * \log[(R^2 + h^2)^{1/2}] + 0.03 * F + 0.15 * S \pm 0.321 \text{ (cm/sec)}$$



όπου:

- $\log PGV$: ο δεκαδικός λογάριθμος της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας σε cm/sec
- M_w : το μέγεθος σεισμικής ροπής του σεισμού
- R : η επικεντρική απόσταση σε km
- h : το εστιακό βάθος σε km
- F : αναφέρεται στο μηχανισμό γένεσης του ρήγματος, με τιμές 0 (κανονικό ρήγμα) και 1 (ανάστροφο και οριζόντιας ολίσθησης ρήγμα)
- S : αναφέρεται στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, με τιμές 0, 1 και 2 για τις κατηγορίες εδαφών (UBC) B, C και D αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 6.3 δίνονται οι τιμές των μεταβλητών και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα, που υπολογίζεται (σε m/sec) μέσω της παραπάνω σχέσης, στο πρυνές κοντά στο χωριό Πόντι που εκδηλώθηκε η κατάπτωση του υπό μελέτη βράχου. Τα σεισμολογικά δεδομένα προέρχονται από την ανάλυση του σεισμού των (Sokos, et al., 2016). Η μέτρηση της επικεντρικής απόστασης έγινε στο Google Earth με βάση τη θέση του κεντροειδούς (βλ. Εικόνα 4.9) καθώς το Πόντι βρίσκεται στο κοντινό πεδίο, δηλαδή σε απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος του ρήγματος (βλ. Κεφάλαιο 4.2.2). Η μεταβλητή S εκτιμήθηκε από βιβλιογραφικά περιγραφικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 6.3: Τα δεδομένα και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα που προέκυψε από τη σχέση (Skarlatoudis, et al., 2007) για την περιοχή μελέτης.

Σεισμός	Περιοχή μελέτης	M_w	R	h	F	S
Λευκάδα 17/11/2015	Πόντι	6.4	8	5	1	1

$\log PGV$ cm/sec	+0.321	-0.321	PGV cm/sec	+0.321	-0.321	PGV m/sec	+0.321	-0.321
1.487	1.808	1.166	30.688	64.265	14.655	0.307	0.643	0.147

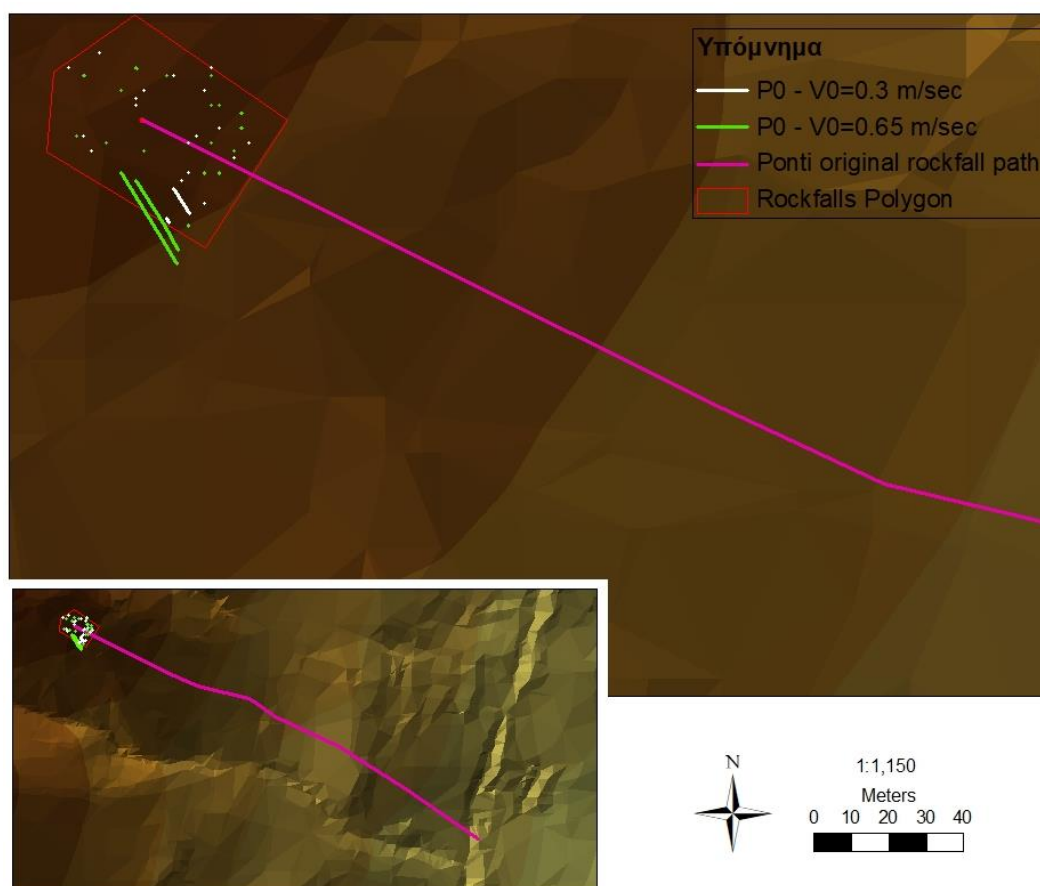
Για την εκτέλεση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε αρχικά η $PGV=0.3$ m/sec που προέκυψε από τη σχέση. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές με τη μέγιστη $PGV=0.65$ m/sec (στρογγυλοποιήθηκε η ταχύτητα 0.643 m/sec για λόγους ευκολίας κατά την εισαγωγή στην εφαρμογή) που προέκυψε από τη σχέση, θεωρώντας ότι η σεισμική κίνηση στο πρυνές είναι σημαντικά ενισχυμένη λόγω της έντονης τοπογραφίας. Μάλιστα στην εργασία των (Saroglou, et al., 2017) αναφέρεται ότι προέκυψε στην περιοχή ταχύτητα $V_0 = 0.67$ m/sec.

Σχετικά με τη γωνία α_0 (βλ. Κεφ. 3.3.1 – Step 3), εκτελέστηκαν δοκιμές για 0° , 5° και 10° . Διαπιστώθηκε ότι δεν είχε ιδιαίτερη επίδραση στη μοντελοποίηση της τροχιάς της κατάπτωσης. Αντιθέτως, η ελάχιστη ταχύτητα V_{\min} κάτω από την οποία η κατάπτωση μετατρέπεται σε κύλιση ή ολίσθηση παίζει σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση, κυρίως στην τελική θέση του βραχοτεμαχίου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στο ακόλουθο Κεφάλαιο.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

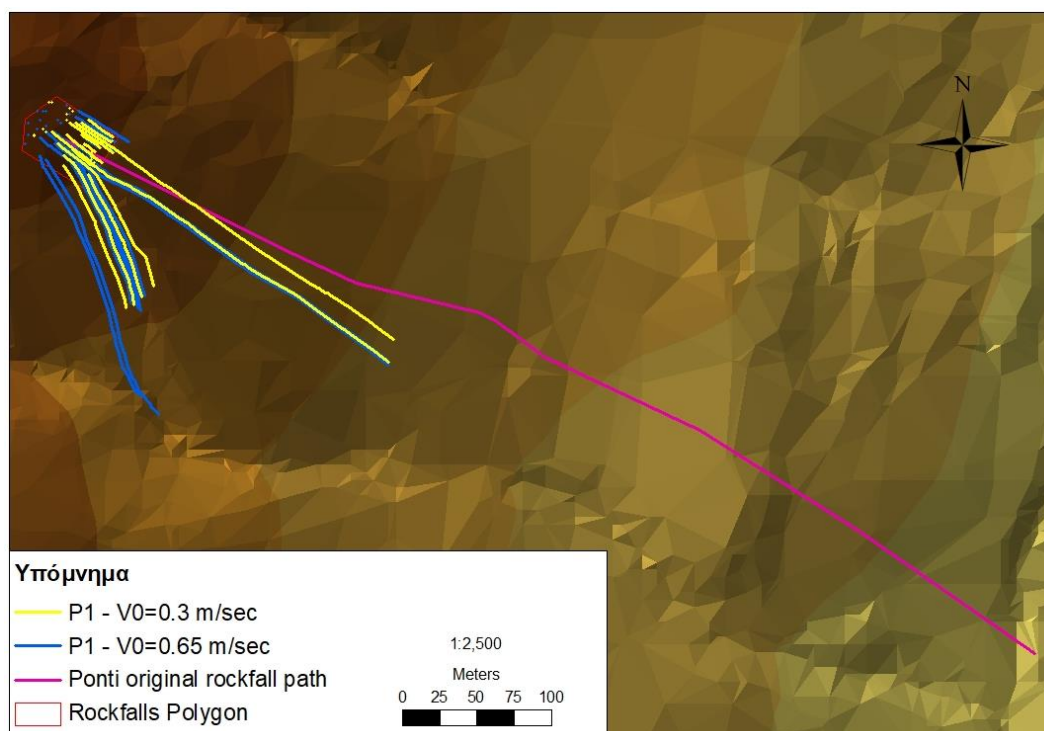
Την ολοκλήρωση της συλλογής και επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων ακολούθησε η εισαγωγή τους στην εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS», όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.3.1. Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που θα προσεγγίζει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική κατάπτωση που εκδηλώθηκε στο Πόντι εκτελέστηκαν δοκιμές μεταβάλλοντας τις αρχικές παραμέτρους (βλ. Κεφ. 6.1).

Αρχικά μοντελοποιήθηκαν τα δεδομένα των αρχικών εκτιμήσεων (P0). Επιλέχθηκε ως περιοχή εκκίνησης των προσομοιώσεων ένα πολύγωνο (Εικόνα 6.4 – Rockfalls Polygon) που περιβάλλει τη θέση εκκίνησης της πραγματικής κατάπτωσης (Εικόνα 6.4 – “Ponti original rockfall path”). Για το πολύγωνο ορίστηκε ανάλυση 2 m και επιλέχθηκε να προσομοιωθούν 20 καταπτώσεις από τυχαίες θέσεις εντός αυτού. Διατηρώντας σταθερή τη γωνία εσωτερικής τριβής (P0) και τους συντελεστές ανάκλασης μεταβλήθηκε η αρχική ταχύτητα V_0 από 0.3 m/sec σε 0.65 m/sec. Παρά την αύξηση της ταχύτητας η μετακίνηση των βράχων ήταν απειροελάχιστη, με μέγιστη τροχιά 36 m για $V_0 = 0.65$ m/sec όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4 (πράσινες γραμμές).



Εικόνα 6.4: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες P0 - $V_0 = 0.3$ m/sec (άσπρες γραμμές) και P0 - $V_0 = 0.65$ m/sec (πράσινες γραμμές). Η φούδια γραμμή αντιπροσωπεύει την πραγματική τροχιά της υπό μελέτης κατάπτωσης.

Στη συνέχεια μειώθηκαν οι γωνίες εσωτερικής τριβής των πετρωμάτων (P1) και εκτελέστηκαν δοκιμές για τις ίδιες αρχικές ταχύτητες. Το μήκος των τροχιών αυξήθηκε σημαντικά, με μέγιστη τροχιά 335 m για $V_0 = 0.3$ m/sec και 341 m για $V_0 = 0.65$ m/sec, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.5 (μπλε γραμμές). Όμως το μήκος αυτό αντιστοιχεί μόλις στο 1/3 της πραγματικής τροχιάς.



Εικόνα 6.5: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες P1 - $V_0 = 0.3$ m/sec (κίτρινες γραμμές) και P1 - $V_0 = 0.65$ m/sec (μπλε γραμμές). Η φούξια γραμμή αντιπροσωπεύει την πραγματική τροχιά της υπό μελέτης κατάπτωσης.

Αφότου παρατηρήθηκε ότι η γωνία εσωτερικής τριβής επηρεάζει σημαντικά τη μοντελοποίηση, μειώθηκε περαιτέρω (P2) και εκτελέστηκαν ξανά δοκιμές για τις ίδιες αρχικές ταχύτητες. Στην Εικόνα 6.6 φαίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου, όπου οι περισσότεροι βράχοι φτάνουν στο μισό περίπου της πραγματικής τροχιάς. Η μέγιστη παρατηρούμενη απόσταση είναι 513 m για $V_0 = 0.3$ m/sec και 430 m για $V_0 = 0.65$ m/sec.

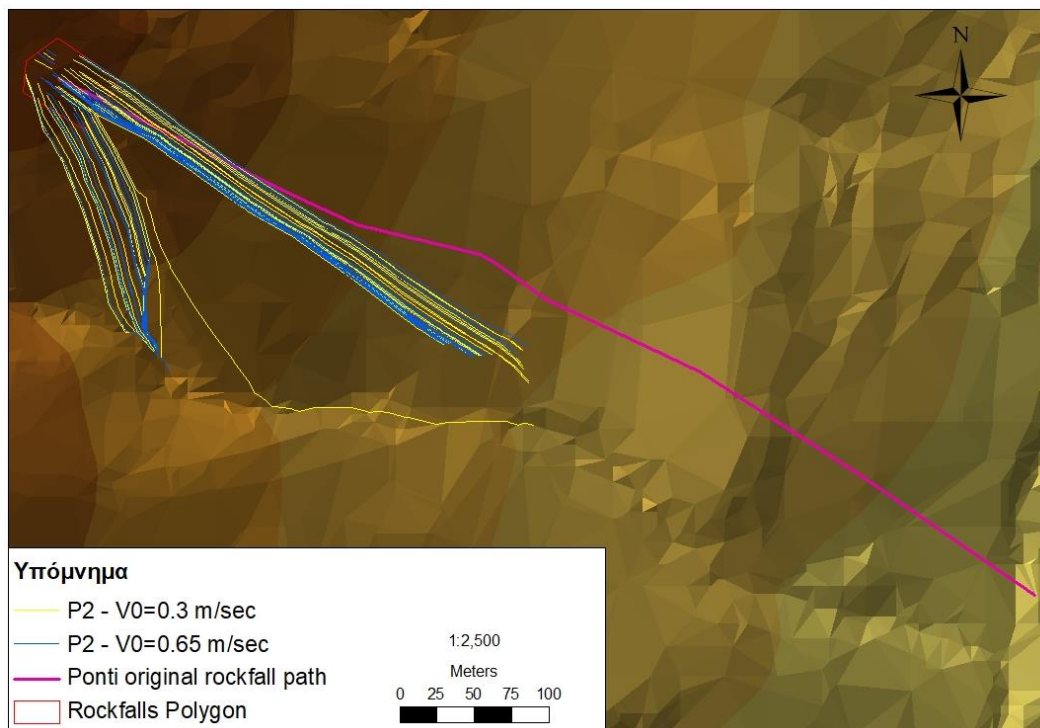
Ακολούθως, εξετάστηκε η επίδραση των συντελεστών ανάκλασης στις προβλεπόμενες τροχιές του μοντέλου, παίρνοντας τις τιμές C1 (βλ. Κεφ. 6.1.3). Τα βραχοτεμάχια έφτασαν περίπου 100 m πιο μακριά από την προηγούμενη δοκιμή, με μέγιστη παρατηρούμενη απόσταση 642 m για $V_0 = 0.3$ m/sec και 583 m για $V_0 = 0.65$ m/sec (Εικόνα 6.7).

Με δεδομένους τους νέους συντελεστές ανάκλασης μειώθηκε ξανά η γωνία εσωτερικής τριβής (P3). Εκτελέστηκε δοκιμή για τις δύο αρχικές ταχύτητες με ελάχιστη ταχύτητα $V_{\min} = 4$ m/sec (Εικόνα 6.8). Παρατηρείται ότι οι τροχιές μεταξύ των δύο αρχικών ταχυτήτων δεν διαφοροποιούνται σημαντικά, αλλά κάποια βραχοτεμάχια έφτασαν σε απόσταση έως και 700 m από το σημείο εκκίνησης. Επομένως, οι νέες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής των σχηματισμών (P3) επέφεραν σημαντικές μεταβολές στις τροχιές των καταπτώσεων. Σε αυτό το σημείο θεωρήθηκε ότι δεν πρέπει να μειωθούν περαιτέρω, καθώς ήδη είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τους τύπους πετρωμάτων που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ο σχηματισμός ΡΧΜ2 (ασβεστόλιθοι προς μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) είχε $\phi=37^\circ$ και πλέον έχει $\phi=26^\circ$.

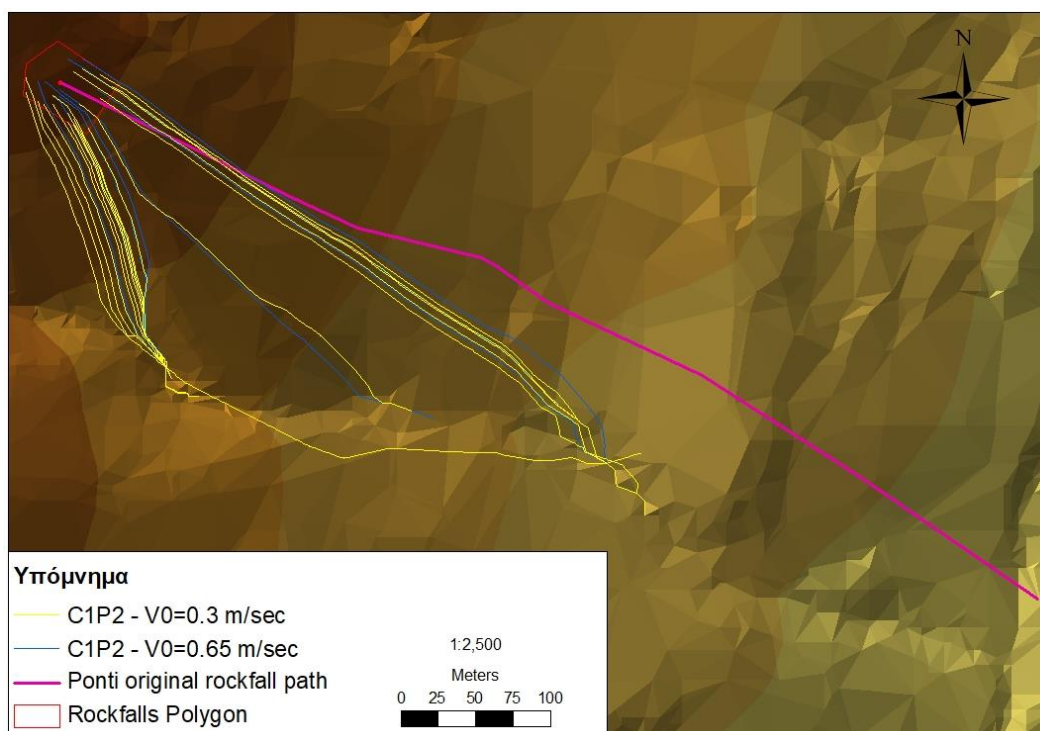
Συνεπώς, αποφασίστηκε να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής της ελάχιστης ταχύτητας V_{\min} . Στην Εικόνα 6.9 απεικονίζονται οι μοντελοποιημένες τροχιές των καταπτώσεων για $V_{\min} = 2$ m/sec για τις δύο V_0 (0.3 m/sec και 0.65 m/sec). Οι περισσότερες τροχιές ξεπέρασαν το μήκος της πραγματικής κατάπτωσης, με μέγιστο μήκος 1370 m για $V_0 = 0.3$ m/sec και 1323 m για $V_0 = 0.65$ m/sec. Επίσης, προκύπτει από τα αποτελέσματα ότι η $V_0 = 0.3$ m/sec (που υπολογίστηκε από τη σχέση) είναι ικανή να προκαλέσει καταπτώσεις μεγάλου μήκους, αν και είναι η μισή από τη



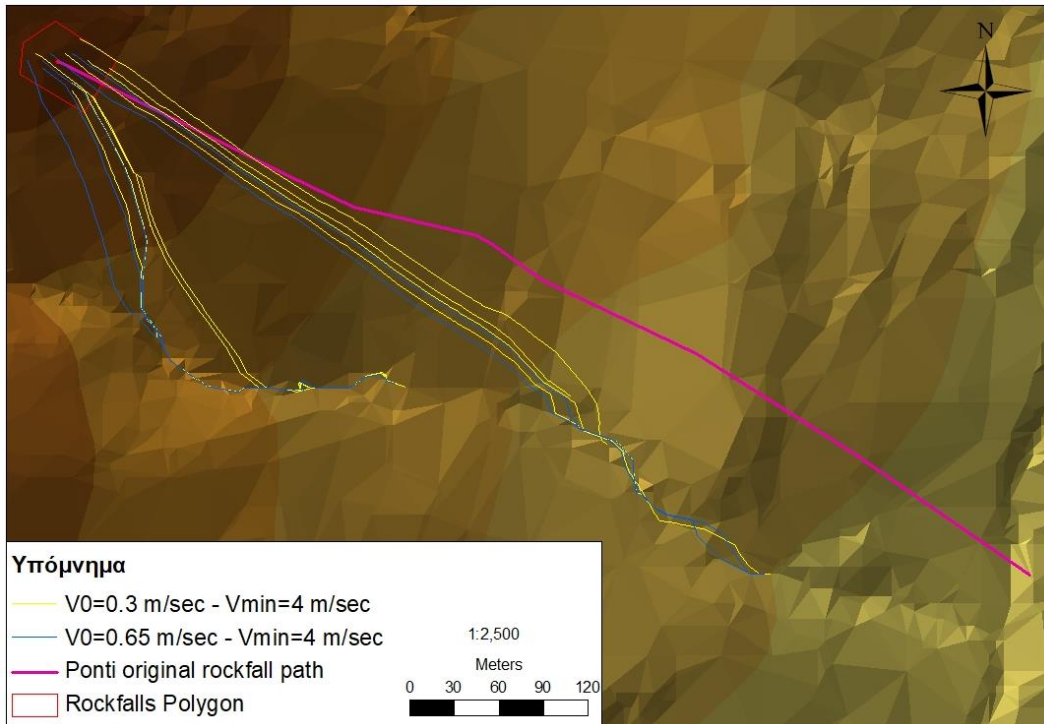
μέγιστη PGV που υπολογίστηκε (0.65 m/sec). Άρα θα μπορούσαν και σεισμοί μικρότερου μεγέθους να προκαλέσουν μεγάλες καταπτώσεις στην περιοχή.



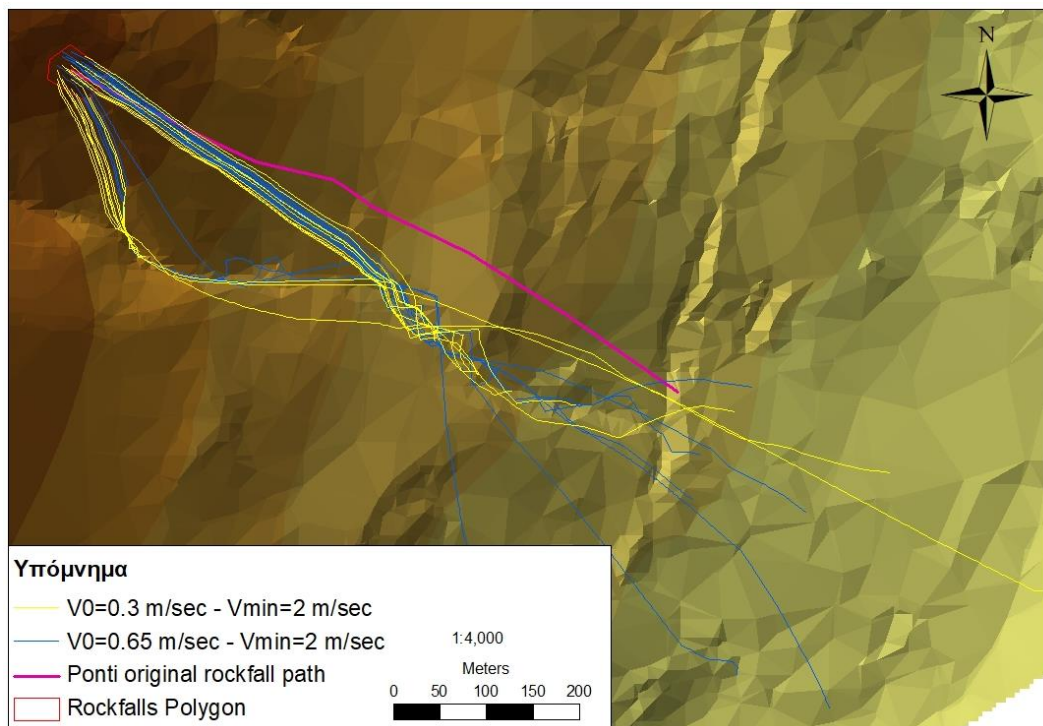
Εικόνα 6.6: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες P2 - $V_0 = 0.3$ m/sec (κίτρινες γραμμές) και P2 - $V_0 = 0.65$ m/sec (μπλε γραμμές).



Εικόνα 6.7: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις με τους νέους συντελεστές ανάκλασης (C1) για $V_0 = 0.3$ m/sec (κίτρινες γραμμές) και $V_0 = 0.65$ m/sec (μπλε γραμμές).



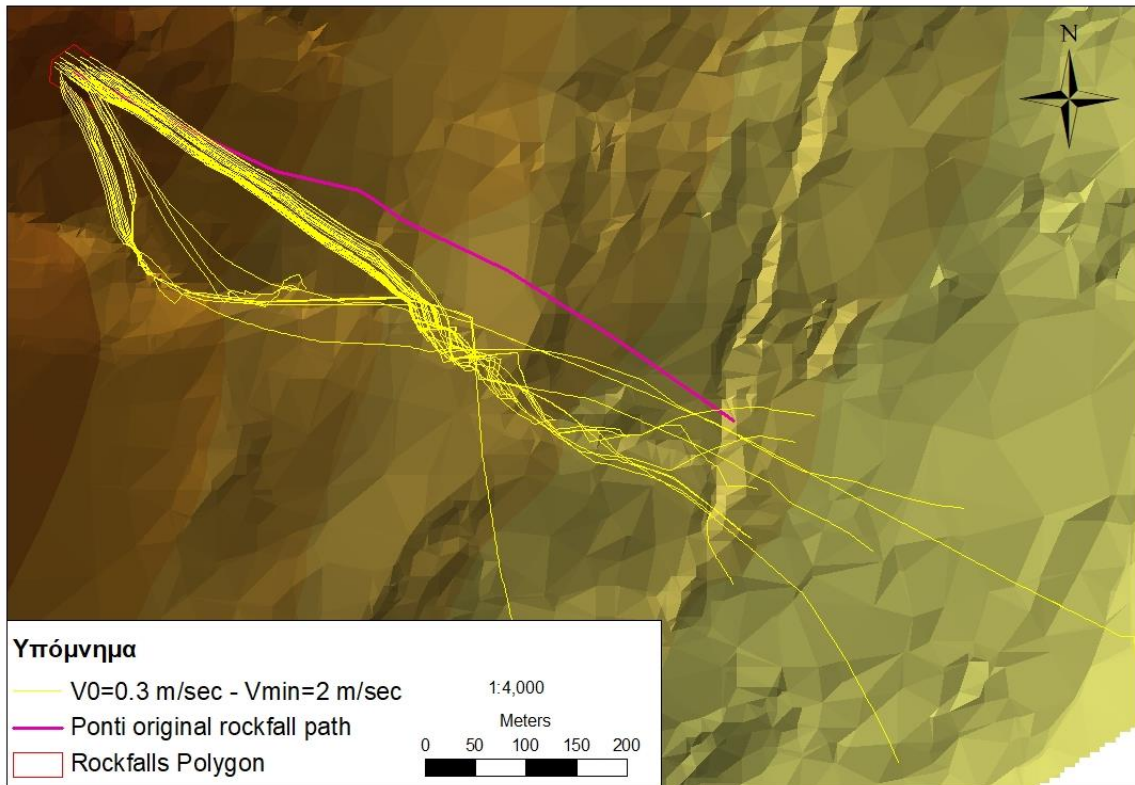
Εικόνα 6.8: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες P3, $V_{\min} = 4$ m/sec και $V_0 = 0.3$ m/sec (κίτρινες γραμμές) $V_0 = 0.65$ m/sec (μπλε γραμμές).



Εικόνα 6.9: Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες P3, $V_{\min} = 2$ m/sec και $V_0 = 0.3$ m/sec (κυανές γραμμές) $V_0 = 0.67$ m/sec (κίτρινες γραμμές).

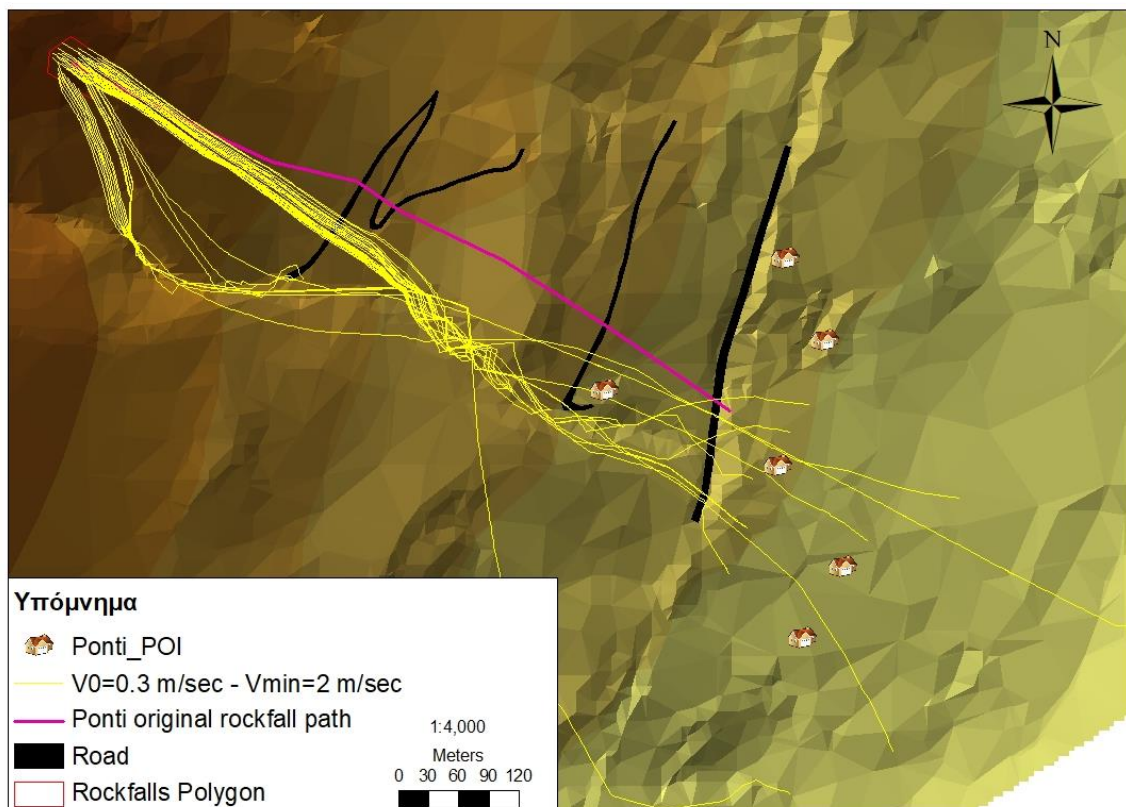
Στη συνέχεια, μοντελοποιήθηκαν 75 καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για αρχικές συνθήκες $V_0 = 0.3$ m/sec, $V_{\min} = 2$ m/sec και $\alpha_0 = 0^\circ$ (Εικόνα 6.10). Φαίνεται ότι το σύνολο των τροχιών που προέκυψαν χωρίζεται σε δύο ομάδες κατά την εκκίνηση της κατάπτωσης. Οι τροχιές των καταπτώσεων της μιας ομάδας κατευθύνονται νότια, εισέρχονται στο ρέμα σε υψόμετρο περίπου 350 m και ακολουθούν τη γεωμετρία του. Οι τροχιές της άλλης ομάδας κατευθύνονται

νοτιοανατολικά παράλληλα με την πραγματική κατάπτωση για περίπου 200 m, στη συνέχεια απομακρύνονται από αυτή και εισέρχονται στο ρέμα σε υψόμετρο περίπου 180 m ακολουθώντας από εκεί και πέρα τη μορφολογία του. Στο σημείο όπου οι τροχιές αποκλίνουν και δεν ακολουθεί καμία την πραγματική τροχιά ίσως υπάρχει κάποιο χαρακτηριστικό στη μορφολογία που δεν μπορεί να αποτυπωθεί στο TIN λόγω της ανάλυσης, που τις εξαναγκάζει να οδηγηθούν στο ρέμα. Επίσης, οι τριγωνικές επιφάνειες του TIN δεν μπορούν να αναπαραστήσουν την πραγματική μορφολογία και τις συνθήκες που επικρατούν στα πρανή. Άρα, πιθανώς η αδυναμία των μοντελοποιημένων καταπτώσεων να ακολουθήσουν την πραγματική τροχιά οφείλεται στο ΨΜΕ μορφής TIN.



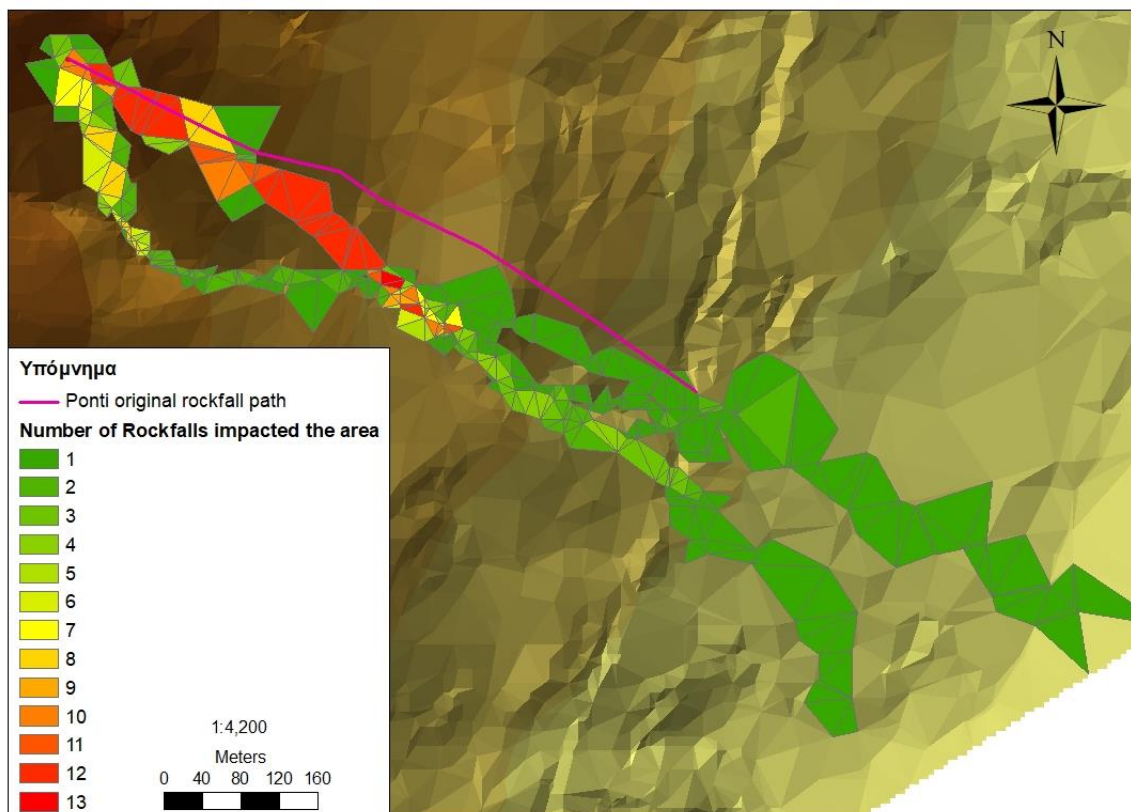
Εικόνα 6.10: Οι τροχιές των 75 καταπτώσεων που προσομοιώθηκαν για αρχικές συνθήκες $V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$, $V_{\min} = 2 \text{ m/sec}$ και $\alpha_0 = 0^\circ$.

Παρά την αποτυχία αυτή στην ακριβή ανάστροφη ανάλυση της βραχόπτωσης, το μοντέλο προσομοίωσε έναν σημαντικό αριθμό καταπτώσεων που μπορεί να έχουν μήκος τροχιάς 800 m ή και περισσότερο και άρα να πλήξουν το οδικό δίκτυο, κατοικίες και άλλες κατασκευές. Ψηφιοποιήθηκαν στο Google Earth κάποια σημεία ενδιαφέροντος της περιοχής (Εικόνα 6.11), δύο από τα οποία φαίνεται να βρίσκονται στην πορεία μίας εκ των μοντελοποιημένων τροχιών. Τα δύο βορειότερα σημεία ενδιαφέροντος μπορεί να επηρεαστούν από βραχοτεμάχια που θα αποκολληθούν από άλλα σημεία του πρανούς.

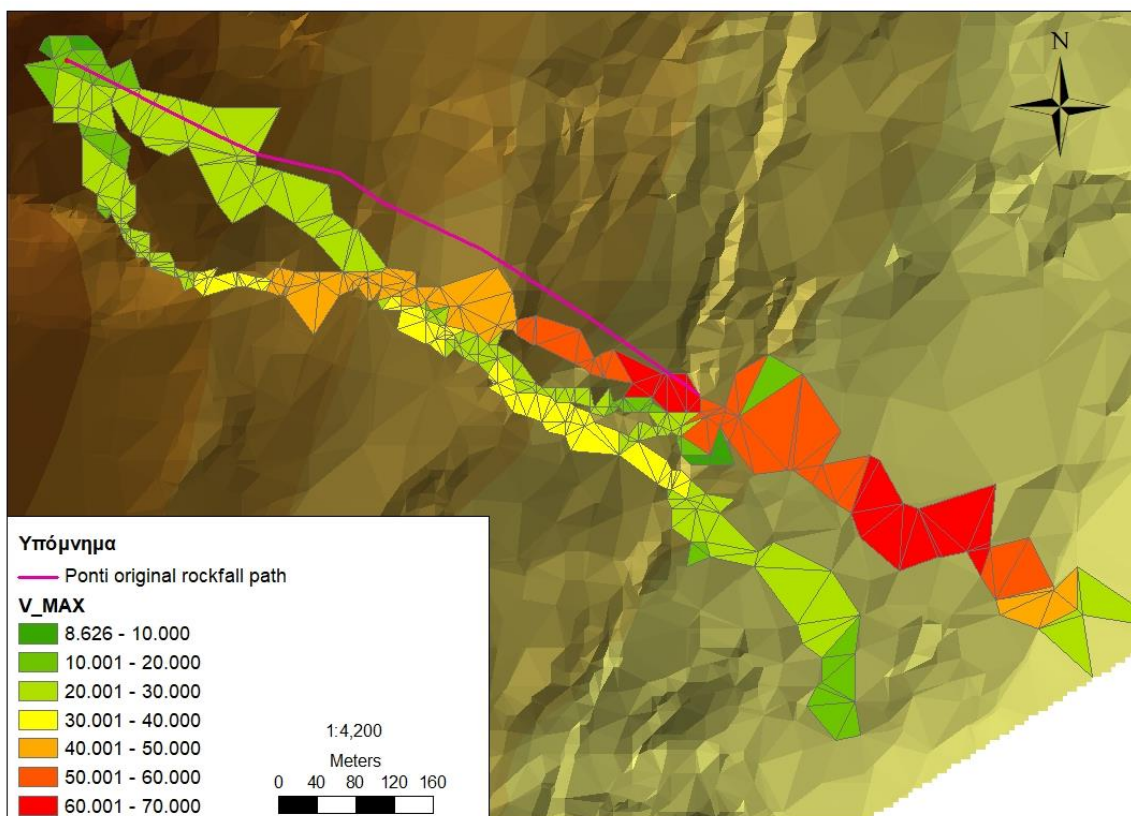


Εικόνα 6.11: Οι πιθανές καταπτώσεις μπορεί να πλήξουν σημαντικό μέρος του οδικού δικτύου της περιοχής αλλά και αρκετές κατοικίες ή άλλες κατασκευές (POI = σημεία ενδιαφέροντος).

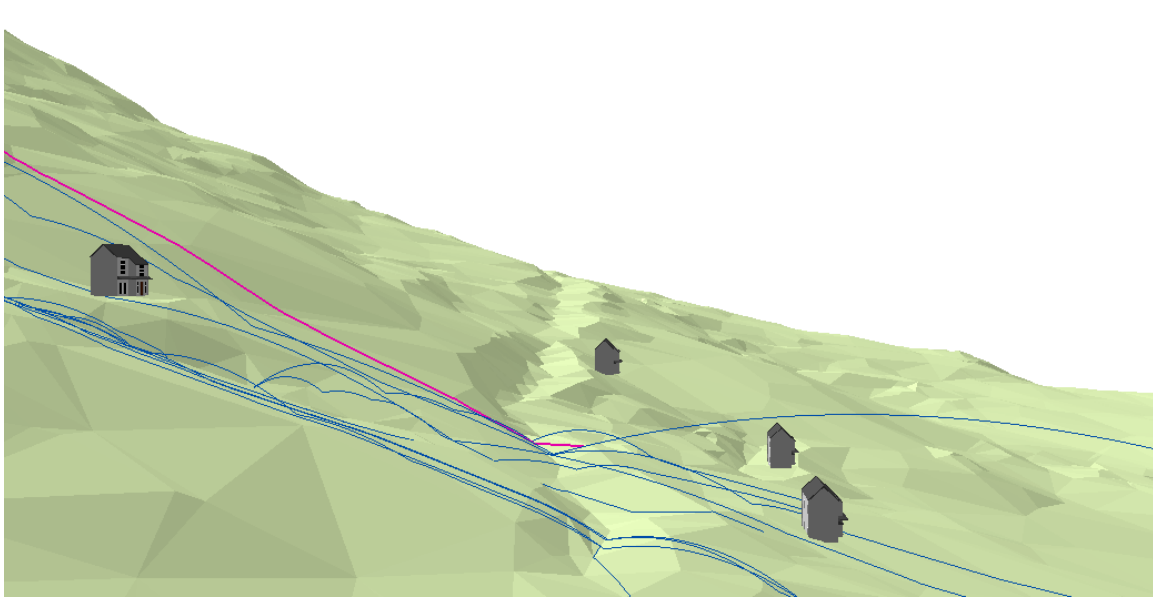
Τέλος, δημιουργήθηκε ένας χάρτης με τα δεδομένα των τελευταίων 20 από τις 75 καταπτώσεις που απεικονίζει το άθροισμα των βράχων που «χτύπησαν» πάνω σε κάποια από τις τριγωνικές επιφάνειες του TIN (Εικόνα 6.12). Παρατηρείται αυξημένος αριθμός επαφών με το έδαφος στην ομάδα που κατευθύνθηκε αρχικά νοτιοανατολικά και παράλληλα με την πραγματική κατάπτωση, το οποίο συμφωνεί με παρατηρήσεις που έγιναν στην περιοχή (Saroglou, et al., 2017). Μετά το υψόμετρο των 180 m οι περισσότερες βραχοπτώσεις σταματούν την πορεία τους. Τα υπόλοιπα βραχοτεμάχια που συνεχίζουν την πτώση τους, αν και λίγα σε αριθμό έρχονται σε επαφή με πολλά σημεία του πρσανούς με ιδιαίτερα αυξημένες ταχύτητες της τάξης των 50 – 70 m/sec (Εικόνα 6.13). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή γύρω από την τελική θέση της πραγματικής βραχοπτώσεως στο Πόντι. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των Εικόνων 6.10, 6.12 και 6.13, τρεις τροχιές των προσομοιωμένων καταπτώσεων πλησιάζουν τη θέση αυτή για αυτό και τα σημεία επαφής με το έδαφος περιορίζονται σε 1–3, αλλά ταυτόχρονα αποκτούν τη μέγιστη ταχύτητά τους (60 – 70 m/sec). Στην Εικόνα 6.14, εστιάζεται η περιοχή γύρω από την τελική θέση της πραγματικής κατάπτωσης και απεικονίζεται στις τρεις διαστάσεις στο ArcScene. Παρατηρείται ότι λόγω της τοπογραφίας τα βραχοτεμάχια των προσομοιωμένων τροχιών εκτοξεύονται, διαγράφοντας μεγάλη καμπύλη με μεγάλες ταχύτητες. Πιθανώς αυτό συντέλεσε στο να διαπεράσει ο βράχος της πραγματικής κατάπτωσης τους τρεις τοίχους του σπιτιού που βρίσκεται στο σημείο. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι κάποια από αυτές τις προσομοιωμένες καταπτώσεις θα μπορούσε να επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα με την πραγματική.



Εικόνα 6.12: Χάρτης με τα δεδομένα των τελευταίων 20 από τις 75 καταπτώσεις, που απεικονίζει το άθροισμα των βράχων που «χτύπησαν» πάνω σε κάποια από τις τριγωνικές επιφάνειες του TIN.



Εικόνα 6.13: Χάρτης με τα δεδομένα των τελευταίων 20 από τις 75 καταπτώσεις, που απεικονίζει τη μέγιστη ταχύτητα που παρατηρήθηκε στις τριγωνικές επιφάνειες του TIN.



Εικόνα 6.14: Εστιάζεται η περιοχή γύρω από την τελική θέση της πραγματικής κατάπτωσης (το τέλος της φούξια γραμμής) στις τρεις διαστάσεις. Οι προσομοιωμένες τροχιές εκτοξεύονται αποκτώντας μεγάλες ταχύτητες.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τελευταίο Κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αξιολογείται συνολικά η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με άλλα μοντέλα προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίου, την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητά της, δεδομένου των προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν, και προτείνονται βελτιώσεις.

Η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» δοκιμάστηκε σε δύο περιοχές, στις οποίες είχαν συμβεί καταπτώσεις βραχοτεμαχίων. Γνωρίζοντας τις τροχιές και τις τελικές θέσεις αυτών, εκτελέστηκε ανάστροφη ανάλυση. Δηλαδή, έγινε προσπάθεια ακριβούς προσομοίωσης των καταπτώσεων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους που τις επηρεάζουν, προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προηγήθηκε στα Κεφάλαια 5 και 6, δεν προέκυψε καμία τροχιά που να ταυτίζεται σε όλο το μήκος της με τις πραγματικές. Αυτό δεν αποδεικνύει αναποτελεσματικότητα του μοντέλου, αλλά πιθανώς οφείλεται στην ακρίβεια των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα (η οποία μπορεί να βελτιωθεί με γεωλογικούς χάρτες μεγάλης κλίμακας, έρευνα πεδίου στην περιοχή μελέτης και άλλης μορφής ΨΜΕ) και στην πολυπλοκότητα του φαινομένου.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου «ROCKFALL ANALYSIS» συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν στην εργασία των (Saroglou, et al., 2017), η οποία χρησιμοποιεί δισδιάστατο μοντέλο για την ανάλυση των ίδιων καταπτώσεων. Δεύτερη βασική διαφορά των δύο μοντελοποιήσεων είναι η χρήση γωνίας εσωτερικής τριβής ίση με μηδέν, η οποία δεν μπορεί να υφίσταται, στην εργασία των (Saroglou, et al., 2017) προκειμένου να φτάσουν τα βραχοτεμάχια στην τελική τους θέση. Επομένως, τα αποτελέσματα του μοντέλου «ROCKFALL ANALYSIS» είναι πιο ακριβή, παρά το ότι μειώθηκαν σημαντικά οι γωνίες εσωτερικής τριβής και αυξήθηκαν οι συντελεστές ανάκλασης των σχηματισμών. Συνοπτικά, συμπεραίνεται για κάθε περιοχή ότι:

- Οι βραχοπτώσεις που προσομοιώθηκαν στην παραλία του Μύρτου ακολούθησαν γενικά διαφορετική πορεία από τις πραγματικές, πιθανώς λόγω των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν στην πραγματικότητα, την ακρίβεια του TIN και κυρίως της σημειακής προσέγγισης βραχοτεμαχίων πολύ μεγάλου όγκου. Όμως, κάποιες από αυτές έφτασαν στο ίδιο υψόμετρο με τις πραγματικές ενώ δύο τις ξεπέρασαν φτάνοντας μέχρι τη θάλασσα. Αυτές οι τροχιές που ανάδειξε το τρισδιάστατο μοντέλο είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για το σχεδιασμό κατάλληλων προστατευτικών μέτρων.
- Οι βραχοπτώσεις που προσομοιώθηκαν στο πρανές στο χωριό Πόντι δημιούργησαν δύο ομάδες τροχιών με διαφορετική αρχική κατεύθυνση. Η μία εκ των δύο (οι τροχιές που κατευθύνθηκαν νοτιοανατολικά) ταυτίστηκε για αρκετά μέτρα με την πραγματική τροχιά της κατάπτωσης και στη συνέχεια άλλαξε πορεία. Πιθανώς αυτό οφείλεται στην ανάλυση και στη μορφή TIN του ΨΜΕ, καθώς οι τριγωνικές επιφάνειες δεν αναπαριστούν με ακρίβεια τη μορφολογία του εδάφους. Παρά τις διαφορετικές τροχιές, πολλές καταπτώσεις έφτασαν στο ίδιο υψόμετρο με το σπίτι που διαπέρασε ο βράχος και αρκετές κατέληξαν ακόμα πιο μακριά. Επομένως, το



τρισδιάστατο μοντέλο ανάδειξε και σε αυτή την περιοχή πιθανές θέσεις που κινδυνεύουν από βραχοπτώσεις.

Η εφαρμογή «ROCKFALL ANALYSIS» εκτός από το συγκριτικό πλεονέκτημα που έχει έναντι των δισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης κατάπτωσης βραχοτεμαχίων, που αναδείχθηκε στις περιοχές μελέτης, έχει και γενικότερα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα

- Λαμβάνεται υπόψιν η τρισδιάστατη επίδραση της τοπογραφίας και η εγκάρσια διασπορά των καταπτώσεων, σε αντίθεση με τα δισδιάστατα μοντέλα.
- Υπολογίζονται με ακρίβεια τροχιές βραχοτεμαχίων χωρίς να εισάγονται μη ρεαλιστικά δεδομένα για τη μοντελοποίηση.
- Ο Πίνακας Περιγραφικών Χαρακτηριστικών του σημειακού αρχείου που προκύπτει από την κατάπτωση παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη θέση και την κατάσταση του βραχοτεμαχίου σε κάθε στιγμή συμβάλλοντας στο σχεδιασμό προστατευτικών μέτρων.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος έχει μειωθεί σημαντικά από την τελευταία έκδοση.
- Η υλοποίηση της εφαρμογής στο περιβάλλον του λογισμικού ArcGIS παρέχει πρόσθετα πλεονεκτήματα επεξεργασίας και ανάλυσης.

Μειονεκτήματα

- Το μοντέλο χρησιμοποιεί ΨΜΕ μορφής TIN.
- Η προσέγγιση του βραχοτεμαχίου είναι σημειακή και δεν λαμβάνεται υπόψιν ο όγκος και το σχήμα του.
- Δεν υπολογίζεται η θραύση του βραχοτεμαχίου κατά την πτώση και άλλες συνθήκες που μπορεί να επηρεάζουν τη βολή.
- Μόλις υπολογιστεί η κατάπτωση πρέπει να αποθηκευτεί το αρχείο (γραμμικό και σημειακό) με τα αποτελέσματά της καθώς και όποια άλλα συμπληρωματικά αρχεία (π.χ. Area's susceptibility to rockfalls). Ιδιαίτερα τα συμπληρωματικά αποτελέσματα πρέπει να αποθηκευτούν αφού αν υπολογιστεί νέα κατάπτωση χάνονται και δεν υπάρχει δυνατότητα φόρτωσης στο μοντέλο της προηγούμενης κατάπτωσης.
- Η εφαρμογή λειτουργεί μόνο μέσα στην έκδοση 9 του λογισμικού ArcGIS της ESRI. Αυτό αποτελεί σημαντικό πρόβλημα καθώς η έκδοση αυτή έχει καταργηθεί, δεν πωλείται και δεν υποστηρίζεται από την εταιρεία.

Τα ανωτέρω μειονεκτήματα είναι σημαντικά αλλά όχι τόσο ώστε να δημιουργούν πρόβλημα στην εκτέλεση του προγράμματος ή να αμφισβητείται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όμως, κατά την εκτέλεση της εφαρμογής για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάστηκαν πολλά και ποικίλα σφάλματα που αφορούσαν αδυναμία της εφαρμογής να εκτελέσει πολλές καταπτώσεις από μια περιοχή (πολύγωνο ή γραμμή) και σφάλματα στον κώδικα του προγράμματος. Αυτά τα προβλήματα είτε δεν εμφανίζονταν σε όλες τις δοκιμές είτε σταματούσαν να εμφανίζονται μετά από πολλές επαναλαμβανόμενες προσπάθειες εκτέλεσης του προγράμματος (με τα ίδια δεδομένα). Επίσης, σημαντικό πρόβλημα προέκυψε στην προσπάθεια τρισδιάστατης αναπαράστασης (3D animation) των καταπτώσεων των βραχοτεμαχίων, όπως θα συνέβαινε σε πραγματικό χρόνο. Δυστυχώς το πρόβλημα αυτό δεν λύθηκε. Τα ανωτέρω προβλήματα ήταν τα σημαντικότερα που παρουσιάστηκαν, τα οποία μειώνουν την αποδοτικότητα της εφαρμογής, καθώς ένας χρήστης χρειάζεται περισσότερο χρόνο προκειμένου να προσομοιώσει πολλές καταπτώσεις.



Επομένως, πρέπει να γίνουν εκτενείς βελτιώσεις και αλλαγές στην εφαρμογή όπως:

- Χρήση ΨΜΕ μορφής κανονικού καννάβου (regular Grid) ώστε να διατηρείται η πληροφορία του αναγλύφου και να μην παραμορφώνεται από τις τριγωνικές επιφάνειες του TIN ή επεξεργασία του TIN με άλλα λογισμικά ώστε να ομαλοποιηθεί η επιφάνειά του.
- Να λαμβάνονται υπόψιν οι επιδράσεις του μεγέθους, του σχήματος και της ροπής του βραχοτεμαχίου στην τροχιά της κατάπτωσης.
- Αναβάθμιση της εφαρμογής ώστε να λειτουργεί στην έκδοση 10 του ArcGIS ή ακόμα και μέσω του ArcGIS Online.
- Μείωση των σφαλμάτων του κώδικα του προγράμματος προκειμένου να γίνει η εφαρμογή πιο αποδοτική.

Συνοψίζοντας, ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας ήταν να αναδείξει το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο προσομοίωσης κατάπτωσης βράχου «ROCKFALL ANALYSIS» ως εργαλείο χωρικής ανάλυσης και σχεδιασμού για τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της πολιτικής προστασίας από φυσικές καταστροφές. Σε ότι αφορά την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματά του έναντι των δισδιάστατων μοντέλων, καθώς προσομοιώθηκαν καταπτώσεις με πιο ρεαλιστικές παραμέτρους από αυτές που εισάγονται στα δισδιάστατα μοντέλα. Ιδιαίτερα αναδεικνύεται η διασπορά των τροχιών και η πιο ρεαλιστική εκτίμηση της διαδρομής των βραχοτεμαχίων στην τρισδιάστατη προσομοίωση λόγω της επιρροής του αναγλύφου. Όμως, πρέπει να γίνουν διορθώσεις προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της εφαρμογής και να αυξηθεί το ανταγωνιστικό της πλεονέκτημα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από δημόσιους φορείς και επαγγελματίες.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Azzoni, A., La Barbera, G. & Zaninetti, A., 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics*, 32(7), pp. 709-724.

Charalambous, S. & Sakellariou, M., 2007. *Estimation of Rockfall Hazard using a GIS-based Three Dimensional Rockfall Simulation Model*. Athens, Bulletin of the Geological Society of Greece.

Charalambous, S. & Sakellariou, M., 2007. *GIS-Based Rockfall Hazard Assessment in Support of Decision Making*. Athens: National Technical University of Athens.

Crosta, G. B. & Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 3, p. 407–422.

Ganas, A., Elias, P., Bozionelos, G. & Papathanassiou, G., 2016. Coseismic deformation, field observations and seismic fault of the 17 November 2015 $M = 6.5$, Lefkada Island, Greece earthquake. *Tectonophysics*, Τόμος 687, pp. 210-222.

GEER/EERI/ATC, 2014. *Earthquake Reconnaissance January 26th/February 2nd 2014 Cephalonia, Greece events*, Athens: GEER/EERI/ATC.

Hoek, E., n.d. *Rocscience*. [Online]
Available at: https://www.rocscience.com/help/rockfall/webhelp/baggage/rn_rt_table.htm
[Accessed 10 August 2017].

Institute of Geodynamics, N., 2017. *List of REVISED LOCATIONS using HL/HT/HP/HA/GE/MN/IV stations*. [Online]
Available at: <http://bbnet.gein.noa.gr/HL/seismicity/catalogues/manual-alerts>
[Accessed 17 August 2017].

Karastathis, V. K., Mouzakiotis, E., Ganas, A. & Papadopoulos, G. A., 2015. High-precision relocation of seismic sequences above a dipping Moho: the case of the January–February 2014 seismic sequence on Cephalonia island (Greece). *Solid Earth*, 6(1), pp. 173-184.

Koukis, G., Tsiambaos, G. & Sabatakakis, N., 1997. *Landslide movements in Greece: engineering geological characteristics and environmental consequences*. Balkema, Rotterdam, Proceedings of International Symposium of Eng. Geol. and the Environ, IAEG, p. 789–792.

Koukis, G. & Ziourkas, C., 1991. Slope instability phenomena in Greece: A Statistical Analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, p. 51.

Lan, H., Martin, D. & Lim, C., 2007. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2), pp. 262-279.

Lekkas, E., Danamos, G. & Mavrikas, G., 2001. *Geological structure and evolution of Cefallonia and Ithaki Islands*. Athens, Bulletin of the Geological Society of Greece, pp. 11-17.



- Lekkas, E. & Mavroulis, S., 2016. Fault zones ruptured during the early 2014 Cephalonia Island (Ionian Sea, Western Greece) earthquakes (January 26 and February 3, Mw 6.0) based on the associated co-seismic surface ruptures. *Journal of Seismology*, 20(1), pp. 63-78.
- Lekkas, E., Mavroulis, S. & Alexoudi, V., 2016. *Field Observations of the 2015 (November 17, Mw 6.4) Lefkas (Ionian Sea, Western Greece) earthquake impact on natural environment and buildings stock of Lefkas Island*. Thessaloniki, Bulletin of the Geological Society of Greece.
- Louvari, E., Kiratzi, A. A. & Papazachos, B. C., 1999. The Cephalonia Transform Fault and its extension to western Lefkada Island (Greece). *Tectonophysics*, Volume 308, pp. 223-236.
- Papadopoulos, G. & Plessa, A., 2000. Magnitude–distance relations for earthquake-induced landslides in Greece. *Engineering Geology*, 58(3), pp. 377-386.
- Papathanassiou, G., Ganas, A., Moshou, A. & Valkaniotis, S., 2016. *Geoenvironmental effects of the M=6.4 17 November 2015 Earthquake on South Lefkada, Ionian Sea, Greece*. Thessaloniki, Bulletin of the Geological Society of Greece.
- Papathanassiou, G., Valkaniotis, S., Ganas, A. & Pavlides, S., 2013. GIS-based statistical analysis of the spatial distribution of earthquake-induced landslides in the island of Lefkada, Ionian Islands, Greece. *Landslides*, Τόμος 10, pp. 771-783.
- Papazachos, B. C. et al., 1998. Fault plane solutions in the Aegean Sea and the surrounding area and their tectonic implication. *BOLLETTINO DI GEOFISICA TEORICA ED APPLICATA*, 39(3), pp. 199-218.
- Saroglou, C. και συν., 2017. *Investigation of Two Co-Seismic Rockfalls During the 2015 Lefkada and 2014 Cephalonia Earthquakes in Greece*. Virginia, USA, 3rd NASL.
- Saroglou, C., Asteriou, P., Zekkos, D. & Tsiambaos, G., 2017. UAV-enabled reconnaissance and trajectory modeling of a co-seismic rockfall in Lefkada. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion*.
- Saroglou, H., 2016. *Rockfall susceptibility in Greece and study of coseismic events*. Belgrade, Proc. of 15th Symposium on Engineering Geology & Geotechnics, p. 19 - 35.
- Sboras, S. et al., 2016. *Earthquake triggering effect scenarios during th 2014 sequence in Cephalonia and 2015 earthquake in Lefkada broader areas, Ionian Sea, Greece*. Thessaloniki, Bulletin of the Geological Society of Greece.
- Skarlatoudis, A. A. και συν., 2007. Erratum to Empirical Peak Ground-Motion Predictive Relations for Shallow Earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(6), pp. 2219-2221.
- Skarlatoudis, A. A. et al., 2003. Empirical Peak Ground-Motion Predictive Relations for Shallow Earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), p. 2591–2603.
- Sokos, E. et al., 2015. Rupture process of the 2014 Cephalonia, Greece, earthquake doublet (Mw6) as inferred from regional and local seismic data. *Tectonophysics*, Volume 656, pp. 131-141.
- Sokos, E. et al., 2016. Asperity break after 12years: The Mw6.4 2015 Lefkada (Greece) earthquake. *Geophysical Research Letters*, Volume 43, p. 6137–6145.



Terzaghi, K., 1950. Mechanics of landslides. Applications of geology and engineering practice. *Geological Society of America*, Volume Berkley.

Varnes, D. J., 1978. *Slope movement types and processes, in special report 176: landslides: analysis and control (R.L. Schuster and R. Kreizek)*, Washington D.C.: TRB, National Research Council.

Ζιούρκας, Κ., 1989. *Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο*, s.l.: s.n.

Κούκης, Γ., 1980. Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο και η σημασία τους στην οδοποιία. *Δελτίο ΚΕΔΕ*, Issue 2, pp. 106-149.

Κούκης, Γ. & Ρόζος, Δ., 1982. Γεωτεχνικές συνθήκες και κατολισθητικές κινήσεις στον Ελληνικό χώρο σε σχέση με τη γεωλογική δομή και γεωτεκτονική εξέλιξη. *Ορυκτός Πλούτος*, Issue 16, pp. 53-97.

Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2007. *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*. 1η επιμ. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Παπαδόπουλος, Γ. Π., Σαχπάζη, Μ., Καραστάθης, Β. & Γκανάς, Α., 2014. *Οι σεισμοί του Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου στην Κεφαλονιά: Μια πρώτη έκθεση*, Αθήνα: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Παπανικολάου, Δ., 1986. *Γεωλογία της Ελλάδας*. 1η επιμ. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Παπανικολάου, Δ. Ι. & Σίδερης, Χ. Ι., 2012. *Γεωλογία. Η επιστήμη της Γης*. 5η επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Πατάκη.

Σαμπατακάκης Ν, n.d. *Σημειώσεις μαθήματος: "Επικινδυνότητα έναντι κατολισθήσεων - Οι κατολισθήσεις στην Ελλάδα"*, Πάτρα: Τμήμα Γεωλογίας, Παν. Πατρών.

Στουρνάρας, Γ. & Σταυροπούλου, Μ., 2011. *Τεχνική Γεωλογία*. 1η επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

Φερεντίνου, Μ., 2004. *Διδακτορική Διατριβή: "Εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων"*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χαραλάμπους, Σ., 2006. *Μεταπτυχιακή Εργασία: "Προγραμματισμός ελέγχου αστοχίας έναντι σφήνας και κατάπτωσης βραχοτεμαχίου σε περιβάλλον ΓΣΠ"*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χαραλάμπους, Σ., Μάτζιαρης, Β., Φερεντίνου, Μ. & Σακελλαρίου, Μ., 2010. *Τριδιάστατη Ανάλυση και Προσομοίωση Βραχοπτώσεων σε περιβάλλον GIS, για το Σχεδιασμό Προστατευτικών Μέτρων*. Βόλος, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1	Ταξινόμηση κατά Varnes (1978), σχηματική αναπαράσταση και κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης κατολισθήσεων (WP/WLI 1995).	10
Εικόνα 2.2	Θέσεις 1635 σημαντικών καταγεγραμμένων κατολισθήσεων μέχρι το 2010 (Σαμπατακάκης Ν, n.d.).	11
Εικόνα 2.3	Χάρτης επιδεκτικότητας προς κατολίσθηση της Ελλάδας (Σαμπατακάκης Ν, n.d.).	11
Εικόνα 3.1	Διαφορετικής επικινδυνότητας προβλήματα ανάλογα με τη μορφή των χωρικών στοιχείων (Crosta & Agliardi, 2003).	15
Εικόνα 3.2	Η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL Utilities”, με την επιλογή “Load R.A.”	17
Εικόνα 3.3	Η μπάρα εργαλείων “LHA-ROCKFALL”.	17
Εικόνα 3.4	Step 1 – Εισαγωγή δεδομένων περιοχής μελέτης.	19
Εικόνα 3.5	Step 2 – Εισαγωγή σημείου/γραμμής/επιφάνειας εκκίνησης κατάπτωσης.	20
Εικόνα 3.6	Step 3 – Εισαγωγή χαρακτηριστικών έναρξης της κατάπτωσης.	21
Εικόνα 3.7	Το διάνυσμα αρχικής ταχύτητας V_0 στο Καθολικό Τρισδιάστατο Σύστημα Συντεταγμένων XYZ (Χαραλάμπους, 2006).	21
Εικόνα 4.1	Οι γεωτεκτονικές ενότητες της Ελλάδας (www.orykta.gr).	23
Εικόνα 4.2	Η στρωματογραφική στήλη της ενότητας Παξών, όπως εμφανίζεται στη Λευκάδα (Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο Λευκάς).	24
Εικόνα 4.3	Η στρωματογραφική στήλη της Ιόνιας ενότητας, όπως εμφανίζεται στη Λευκάδα (Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο Λευκάς).	25
Εικόνα 4.4	Οι κυριότερες τεκτονικές δομές της Ανατολικής Μεσογείου (Papazachos, et al., 1998).	26
Εικόνα 4.5	Το ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (Cephalonia Transform Fault). Το τμήμα της Κεφαλονιάς σημειώνεται ως C και της Λευκάδας ως L. Φαίνεται η κατανομή της σεισμικότητας και οι μηχανισμοί γένεσης μεγάλων σεισμών (Louvari, et al., 1999)	27
Εικόνα 4.6	Επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των δύο μεγάλων σεισμών: Το μαύρο αστέρι αντιπροσωπεύει το επίκεντρο του κύριου σεισμού της 26 ^{ης} Ιανουαρίου 2014 και το μαύρο διαμάντι το επίκεντρο του σεισμού της 3 ^{ης} Φεβρουαρίου 2014 (Sokos, et al., 2015). Το γκρι αστέρι και διαμάντι αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των (Karastathis, et al., 2015). Επίσης, φαίνονται οι θέσεις και οι λύσεις CMT (Centroid Moment Tensor) για τους δύο σεισμούς και τα επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των μετασεισμών (Sokos, et al., 2015).	28



Εικόνα 4.7	Προβολή στην επιφάνεια της κατανομής της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος, σύμφωνα με την κλίμακα. Το αστέρι αντιπροσωπεύει το επίκεντρο του κύριου σεισμού και ο μαύρος κύκλος τη θέση του κεντροειδούς μαζί με τη λύση CMT. Το μήκος του ρήγματος είναι περίπου 25 km (Sokos, et al., 2015).	29
Εικόνα 4.8	Το επαναπροσδιορισμένο επίκεντρο του σεισμού της Λευκάδας (17/11/2015) και των 1038 μετασεισμών της περιόδου 17 Νοεμβρίου – 17 Δεκεμβρίου, 2015 (Parathanassiou, et al., 2016).	30
Εικόνα 4.9	Η θέση του επικέντρου (άσπρο αστέρι) και του κεντροειδούς (μπλε κύκλος) σύμφωνα με τους (Sokos, et al., 2016).	31
Εικόνα 4.10	Κατολισθήσεις προκαλούμενες από το σεισμό στην κοιλάδα Δράγανο – Αθάνι, στη νοτιοδυτική Λευκάδα (Ganas, et al., 2016).	32
Εικόνα 4.11	(α) Γεωγραφική κατανομή των φαινομένων που προκλήθηκαν από τους σεισμούς της Κεφαλονιάς στις 26/01 και 03/02, 2014 (Παπαδόπουλος, et al., 2014) και (β) κατολισθήσεις και καταπτώσεις που καταγράφηκαν στις 8–23 Φεβρουαρίου 2014 (GEER/EERI/ATC, 2014) AT: Mt. Ainos Thrust, AEF: Aghia Ephyimia Fault.	33
Εικόνα 4.12	Γεωγραφική κατανομή των συνοδών φαινομένων του σεισμού της Λευκάδας στις 17 Νοεμβρίου 2015 και αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν στις 19–22 Νοεμβρίου 2015 (Ganas, et al., 2016).	34
Εικόνα 4.13	Γεωτεκτονικός χάρτης της Κεφαλονιάς με σημειωμένα τα επίκεντρα των δύο σεισμών του 2014. Στο βόρειο τμήμα του νησιού εντοπίζεται το ρήγμα Αγίας Ευφημίας (AEF), που τέμνει την παραλία του Μύρτου (Lekkas & Mavroulis, 2016).	35
Εικόνα 4.14	Στο κέντρο φαίνεται η παραλία του Μύρτου (πηγή: Google Earth) με σημειωμένες τις γωνίες που έχουν τραβηχτεί οι εικόνες β και δ. (α) πλευρικά κορήματα στο βόρειο πρηνές, (β) τα βόρεια πρηνή και οι κατολισθήσεις, (γ) καταστροφή του δρόμου από τη διέλευση του βράχου, (δ) τα νότια πρηνή και οι κατολισθήσεις μορφής δεβριτικής ροής (φωτογραφίες Ε. Λέκκας, 2014).	36
Εικόνα 4.15	Άποψη του ανατολικού πρηνούς της παραλίας του Μύρτου από νότια, στο οποίο διακρίνονται οι καταπτώσεις των δύο βράχων. Με τον αριθμό 1 σημειώνεται ο μεγάλος βράχος όγκου 180 m ³ και με τον αριθμό 2 ο μικρότερος (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).	37
Εικόνα 4.16	Οι θέσεις αποκόλλησης των βραχοτεμαχίων (1) και (2), σε υψόμετρο περίπου 280 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).	38
Εικόνα 4.17	Ο βράχος (1), όγκου 180 m ³ έφτασε στο πόδι του πρηνούς σε ύψος περίπου 10 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (φωτογραφία Ε. Λέκκας, 2014).	38
Εικόνα 4.18	Ο μικρότερου όγκου βράχος (2) έφτασε σε ύψος 50 m πάνω από τη θάλασσα (GEER/EERI/ATC, 2014).	39
Εικόνα 4.19	Η παραλία του Μύρτου το Μάρτιο του 2016 (πηγή: Google Earth). Είναι εμφανές το αποτύπωμα των τροχιών της κατάπτωσης των δύο βράχων πάνω στην πλαγιά. Σημειώνεται με κόκκινη γραμμή η τροχιά του βράχου (1) και με πορτοκαλί γραμμή του βράχου (2). Στο τέλος της κόκκινης γραμμής διακρίνεται και ο βράχος (1).	39
Εικόνα 4.20	Ο τοίχος του σπιτιού που διαπέρασε ο βράχος, παρασύροντας στο θάνατο τη γυναίκα (Saroglou, et al., 2017).	40
Εικόνα 4.21	(α) Γεωτεκτονικός χάρτης της Λευκάδας. Σημειώνεται το επίκεντρο του σεισμού στις 17 Νοεμβρίου 2015, στο ανατολικό ρήγμα της χερσονήσου της Λευκάδας. Διακρίνεται ο εκτεταμένος σχηματισμός πλευρικών κορημάτων κατά μήκος του ρήγματος και	41



σημειώνεται η θέση της κατολίσθησης στο Πόντι. (b) Νεοτεκτονικός χάρτης της Λευκάδας. Η ενότητα Λευκάτα (8) δομείται από τους σχηματισμούς της ενότητας Παξών (Lekkas, et al., 2016).

Εικόνα 4.22	Ένας βράχος ασβεστολιθικής σύστασης αποκολλήθηκε από την παρακείμενη πλαγιά (σημείο Ponti_rockfall στην εικόνα) και κατέληξε στην πίσω αυλή ενός σπιτιού (πηγή: Google Earth), διαγράφοντας μια τροχιά μήκους περίπου 800 m .	42
Εικόνα 5.1	Το ΨΜΕ της νήσου Κεφαλονιάς ανάλυσης 5 m, της «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.).	44
Εικόνα 5.2	Το ΨΜΕ μορφής TIN (με z-tolerance=1) της ευρύτερης περιοχής της παραλίας του Μύρτου, που δημιουργήθηκε για να εισαχθεί στην εφαρμογή ROCKFALL ANALYSIS.	45
Εικόνα 5.3	Τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στην παραλία του Μύρτου, (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Νήσος Κεφαλληνία, Βόρειο Τμήμα).	46
Εικόνα 5.4	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P0 - V_0 = 0.2 \text{ m/sec}$ (κυανές γραμμές) και $P1 - V_0 = 0.2 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές). Οι μωβ και μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν τις υπό μελέτη τροχιές των βραχοτεμαχίων (1) και (2) αντίστοιχα.	50
Εικόνα 5.5	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P1 - V_0 = 0.2 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) και $P1 - V_0 = 1 \text{ m/sec}$ (κυανές γραμμές).	51
Εικόνα 5.6	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P1, C1, V_0 = 0.2 \text{ m/sec}$.	52
Εικόνα 5.7	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P2, C1, V_0 = 0.2 \text{ m/sec}$.	53
Εικόνα 6.1	Το ΨΜΕ της νήσου Λευκάδας ανάλυσης 5 m, της «Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.» (ΕΚΧΑ Α.Ε.).	55
Εικόνα 6.2	Το ΨΜΕ μορφής TIN (με z-tolerance=1) του πρανού στο χωριό Πόντι, που δημιουργήθηκε για να εισαχθεί στην εφαρμογή ROCKFALL ANALYSIS.	56
Εικόνα 6.3	Τα πολύγωνα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στα πρανή κοντά στο χωριό Πόντι, (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλλο Λευκάς).	57
Εικόνα 6.4	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P0 - V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (άσπρες γραμμές) και $P0 - V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (πράσινες γραμμές). Η φούξια γραμμή αντιπροσωπεύει την τροχιά της υπο μελέτης κατάπτωσης.	60
Εικόνα 6.5	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για συνθήκες $P1 - V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) και $P1 - V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (μπλε γραμμές). Η φούξια γραμμή αντιπροσωπεύει την τροχιά της υπο μελέτης κατάπτωσης.	61
Εικόνα 6.6	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες $P2 - V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) και $P2 - V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (μπλε γραμμές).	62
Εικόνα 6.7	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις με τους νέους συντελεστές ανάκλασης (C1) για $V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) και $V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (μπλε γραμμές).	62
Εικόνα 6.8	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες $P3, V_{\min} = 4 \text{ m/sec}$ και $V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) $V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (μπλε γραμμές).	63
Εικόνα 6.9	Μοντελοποιημένες καταπτώσεις για αρχικές συνθήκες $P3, V_{\min} = 2 \text{ m/sec}$ και $V_0 = 0.3 \text{ m/sec}$ (κίτρινες γραμμές) $V_0 = 0.65 \text{ m/sec}$ (μπλε γραμμές).	63



Εικόνα 6.10	Οι τροχιές των 75 καταπτώσεων που προσομοιώθηκαν για αρχικές συνθήκες $V_0 = 0.3$ m/sec, $V_{\min} = 2$ m/sec και $\alpha_0 = 0^\circ$.	64
Εικόνα 6.11	Οι πιθανές καταπτώσεις μπορεί να πλήξουν σημαντικό μέρος του οδικού δικτύου της περιοχής αλλά και αρκετές κατοικίες ή άλλες κατασκευές (POI = σημεία ενδιαφέροντος).	65
Εικόνα 6.12	Χάρτης με τα δεδομένα των τελευταίων 20 από τις 75 καταπτώσεις, που απεικονίζει το άθροισμα των βράχων που «χτύπησαν» πάνω σε κάποια από τις τριγωνικές επιφάνειες του TIN.	66
Εικόνα 6.13	Χάρτης με τα δεδομένα των τελευταίων 20 από τις 75 καταπτώσεις, που απεικονίζει τη μέγιστη ταχύτητα που παρατηρήθηκε στις τριγωνικές επιφάνειες του TIN.	66
Εικόνα 6.14	Εστιάζεται η περιοχή γύρω από την τελική θέση της πραγματικής κατάπτωσης (το τέλος της φούξια γραμμής) στις τρεις διαστάσεις. Οι προσομοιωμένες τροχιές εκτοξεύονται αποκτώντας μεγάλες ταχυτητες.	67



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).	9
Πίνακας 2.2	Πιθανές βλάβες ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης (WP/WLI 1995)..	12
Πίνακας 3.1	Οι επιλογές της μπάρας εργαλείων “LHA-ROCKFALL”.	18
Πίνακας 5.1	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ – Αρχικές εκτιμήσεις (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011) και τιμές δοκιμών για τη μοντελοποίηση της κατάπτωσης.	46
Πίνακας 5.2	Οι συντελεστές ανάκλασης επιφανειών κατά Hoek (Hoek, n.d.)	47
Πίνακας 5.3	Οι συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης κατά Hoek (Hoek, n.d.)	48
Πίνακας 5.4	Τα δεδομένα και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα που προέκυψε από τη σχέση (Skarlatoudis, et al., 2003) για την περιοχή μελέτης.	49
Πίνακας 6.1	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ – Αρχικές εκτιμήσεις (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011) και τιμές δοκιμών για τη μοντελοποίηση της κατάπτωσης.	57
Πίνακας 6.2	Οι συντελεστές ανάκλασης των επιφανειών της περιοχής μελέτης κατά Hoek (Hoek, n.d.)	58
Πίνακας 6.3	Τα δεδομένα και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα που προέκυψε από τη σχέση (Skarlatoudis, et al., 2003) για την περιοχή μελέτης.	59

