



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**“ ΑΝΑΣΧΕΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΛΟΦΟ ΚΑΣΤΕΛΙΟΥ ΤΗΣ
ΧΩΡΑΣ ΣΦΑΚΙΩΝ ”**



ΕΡΕΥΝΑ : Γεώργιος Ν. Κοκολάκης
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Νοέμβριος 2015

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Γεώργιος Τσιαμπάος
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ. Χ. Σαρόγλου, ΕΔΙΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**“ ΑΝΑΣΧΕΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΛΟΦΟ ΚΑΣΤΕΛΙΟΥ ΤΗΣ
ΧΩΡΑΣ ΣΦΑΚΙΩΝ ”**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Γεώργιος Ν. Κοκολάκης
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.**

Επιβλέπων Καθηγητής : Γεώργιος Τσιαμπάος

Συνπιβλέπων: Δρ. Χ. Σαρόγλου, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Αθήνα, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών κ. Γ. Τσιαμπάο για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρακάτω έρευνα.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα κ. Χ. Σαρόγλου μέλος Ε.Δ.Ι.Π. Ε.Μ.Π. για την ουσιαστική καθοδήγηση που μου προσέφερε όσον αφορά το τεχνικό τμήμα της έρευνας. Επίσης, να εκφράσω τον σεβασμό που τρέφω στο πρόσωπό του και να τον ευχαριστήσω για την υπομονή που έδειξε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην παρακάτω έρευνα.

Περίληψη

Το φαινόμενο της κατάπτωσης των βραχοτεμαχίων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες αστοχιών πρανών. Οι καταπτώσεις αφορούν κυρίως βραχώδεις σχηματισμούς και αναφέρονται στην αποκόλληση τμημάτων βραχομάζας. Δια να αποφευχθούν οι συνέπειες του φαινομένου κρίνεται απαραίτητη η συστηματική μελέτη του καθώς επίσης και η κατασκευή αποτελεσματικών μέτρων ανάσχεσης, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση για τις αποκολλήσεις-καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Χώρα Σφακίων, νομού Χανίων, και τα αίτια που τις προκαλούν. Για την ακριβή πρόβλεψη των καταπτώσεων πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε υπολογιστικό περιβάλλον. Για την ακρίβεια της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές, οι οποίοι εξαρτώνται από παράγοντες όπως είναι τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή κ.α.), την κινηματική του (μεταφορική ή γωνιακή ταχύτητα πρόσκρουσης, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας της πλαγιάς (κλίση, τραχύτητα, αντοχή κ.α.). Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση επικινδυνότητας για την υπό έρευνα περιοχή. Η περιοχή, σύμφωνα με τις αναλύσεις, είναι επικίνδυνη για καταπτώσεις, επομένως πρέπει να σχεδιαστούν και να ληφθούν μέτρα προστασίας. Η επικινδυνότητα στο εν λόγω πρανές κειμένεται από χαμηλή έως υψηλή. Στα τμήματα που η επικινδυνότητα είναι υψηλή οφείλεται κυρίως στο μεγάλο όγκο των βραχοτεμαχίων που κείτονται στην επιφάνεια του πρανούς και στην μεγάλη κλίση του. Για τη μείωση της επικινδυνότητας θα πρέπει να ληφθούν μέτρα προστασίας. Πιο αποτελεσματικό μέτρο προστασίας κρίνεται, ανάλογα με την ζώνη έρευνας, οι βραχοπαγίδες για τα τμήματα υψηλής επικινδυνότητας και μεταλλικά πλέγματα συγκρατησης για τα τμήματα μέσης επικινδυνότητας.

Abstract

The rock falling phenomena constitutes one of the most important categories in slope failure. These falls concern primarily rocky formations and account for the abruption of parts of the rock mass. For the consequences of the phenomena to be avoided it is deemed necessary its systematic research and the construction of effective measures of containment, which is achieved with the use of the suitable software. In this research it was conducted an analysis for the abruption-fall of rocky parts in Chora Sfakion, municipality of Chania, and the causes that creates them. For the precise prediction of the rock falling a simulation in a computing environment has taken place. For the accuracy of the analysis certain coefficients has been used, which are depended from factors such as the characteristics of the fragment (weight, size, shape, strength, etc.), the dynamics (angular velocity of impact, impact angle, fragment orientation), or the plane's rocky surface characteristics (gradient, roughness, strength etc.). Furthermore, it was conducted a hazard evaluation for the region under study. The region, according to analysis it is risky for falls, therefore need to be designed and placed protective measures. The risk in the slope is from low to high. In the sections that the risk is high, mainly due to the large volume of rock, that lie on the surface, and the height of the slope. To reduce the risk should take protective measures. More effective protection measure is, depending on the research area, rock traps for high risk parts and metal mesh for medium risk parts.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	4
Abstract	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1. Γενικά στοιχεία για τα κατολισθητικά φαινόμενα	8
1.2. Καταπτώσεις βράχων	8
1.3. Σκοπός της έρευνας	8
2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	10
2.1 Καταπτώσεις (Falls).....	10
2.2 Αίτια καταπτώσεων.....	11
2.2.1 Γεωλογικές διεργασίες.....	11
2.2.2 Σεισμική δραστηριότητα.....	12
2.2.3 Ανθρώπινη δραστηριότητα.....	12
2.3 Τροχιά κίνησης βραχοτεμαχίων.....	13
2.4 Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοπτώσεων.....	15
3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ- ΧΩΡΑ ΣΦΑΚΙΩΝ	20
3.1 Γεωλογία περιοχής.....	20
3.1.1 Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έρευνας, λόφου Καστελίου.....	24
3.2 Σεισμικότητα περιοχής.....	25
3.3 Υδρογεωλογία περιοχής.....	27
3.4 Κλιματολογικά –Μετεωρολογικά στοιχεία.....	27
3.5 Αποτύπωση περιοχής.....	28
3.6 Ιστορικό καταπτώσεων στο λόφο Καστελίου	31
3.6.1. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη Ι	31
3.6.2. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη ΙΙ	33
3.6.3. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη ΙΙΙ	34
3.6.4. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη ΙV	35
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ	37
4.1 Το πρόγραμμα Rocfall (Rocscience).....	37
4.1.1 Γωνία τριβής διεπιφάνειας πρσανούς – βραχοτεμαχίου (Friction Angle)	38
4.1.2 Παράγοντες κρούσης (Coefficient of Restitution)	38
4.1.3 Γωνιακή ταχύτητα (Angular Velocity)	40
4.1.4 Παράγοντας κλίμακας κρούσης (Scaling Factor)	40

4.1.5	Τραχύτητα πρανούς (Slope Roughness)	40
4.2	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη I.....	42
4.3	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη II.....	48
4.4	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη III.....	56
4.5	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη IV.....	61
4.5.1	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη IV _a	63
4.5.2	Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη IV _b	67
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ	72
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά στοιχεία για τα κατολισθητικά φαινόμενα

Οι κατολισθήσεις είναι γεωλογικοί κίνδυνοι που επιφέρουν στο διεθνή χώρο αρκετές απώλειες ανθρώπινων ζωνών και καταστροφές σε κατασκευές. Όσον αφορά τη βιβλιογραφία έχουν αποδοθεί πολλοί ορισμοί για τον όρο κατολισθητικά φαινόμενα. Σύμφωνα με το Ρόζο (2007) ο όρος «κατολισθητικά φαινόμενα» είναι ο πλέον αποδεκτός για να περιλάβει όλο το εύρος των αστοχιών πρανών, δηλαδή, ερπυσμούς, ολισθήσεις, ροές, ανατροπές, καταπτώσεις που μπορούν να συμβούν στη ξηρά και υποθαλάσσια. Επιπλέον, έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για το φαινόμενο, όπως είναι των Κούκη (1993), Terzaghi (1950), Zaruba Mencl (1969) και Coates (1977). Το 1978 ο Varnes πρότεινε την ομαδοποίηση των κατολισθητικών φαινομένων ανάλογα με το είδος της κίνησης τους. Δημιούργησε έξι κατηγορίες κατολισθητικών φαινομένων όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- Καταπτώσεις (falls)
- Ανατροπές (topplings)
- Ολισθήσεις (slides)
- Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- Ροές (flows)
- Σύνθετες κινήσεις (complex)

Οι καταπτώσεις βράχων ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των κατολισθητικών φαινομένων. Η παρούσα εργασία αφορά στην διερεύνηση των καταπτώσεων βραχοτεμαχίων.

1.2. Καταπτώσεις βράχων

Ως βραχόπτωση χαρακτηρίζεται η αποκόλληση βράχου ή τμήματος απότομου πρανούς και κατά συνέπεια η κίνησή του προς τα κάτω λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Οι καταπτώσεις αφορούν κυρίως βραχώδεις σχηματισμούς και αναφέρονται στην αποκόλληση τμημάτων βραχομάζας. Η αποκόλληση γίνεται σε απότομο πρανές (με κλίση μεγαλύτερη των 30° και συνήθως της τάξεως των 70° με 90°) και κατά μήκος μίας επιφάνειας όπου δεν εκδηλώνεται διατμητική κίνηση. Ακολουθεί η ελεύθερη πτώση του αποσπασθέντος τμήματος της βραχομάζας με κύλιση ή αναπήδηση, δηλαδή με κατάπτωση.

1.3. Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση για τις αποκολλήσεις-καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Χώρα Σφακίων και τα αίτια που τις προκαλούν. Για την

ακριβή πρόβλεψη των καταπτώσεων πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε υπολογιστικό περιβάλλον. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το RocFall, το οποίο χαράσσει την τροχιά των βραχοτεμαχίων κατά την πτώση τους, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του πρανούς καθώς και την απορρόφηση ενέργειας κατά την κρούση. Παρουσιάζονται οι τομές για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις με βάση το τοπογραφικό που συντάχθηκε. Περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή των παραμέτρων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα και η ευαισθησία του RocFall σε κάποιους από αυτούς.

Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση επικινδυνότητας για την υπό μελέτη περιοχή, με χρήση κατάλληλων εργαλείων (Rocfall hazard and risk assessment), από τα οποία και προέκυψε ζωνοποίηση της επικινδυνότητας, λόγω κατολισθητικών φαινομένων.

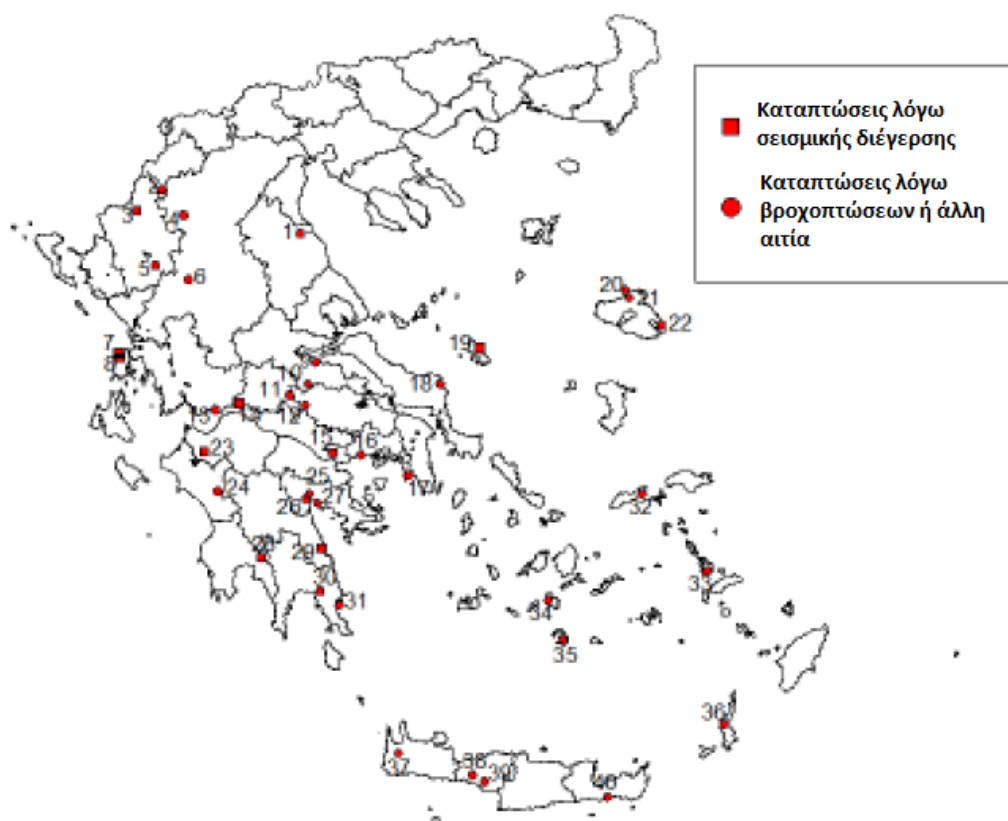
Τέλος, με βάση τα μέτρα αναχαίτισης των βραχοπτώσεων και βελτίωσης του επιπέδου ασφαλείας του λόφου, θα παρουσιαστούν ορισμένα συμπεράσματα και παρατηρήσεις για το τμήμα αυτό της Χώρας Σφακίων.

2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Στην Ελλάδα, τα κατολισθητικά φαινόμενα αποτελούν μια από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας στα οδικά δίκτυα, λόγω του πυκνού και έντονου ορεινού ανάγλυφου, σε συνδυασμό με την υψηλή σεισμικότητα που εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή.

2.1 Καταπτώσεις (Falls)

Παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένα καταγεγραμμένα φαινόμενα σημαντικών καταπτώσεων που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο..



Εικόνα 2.1.Καταγεγραμμένα περιστατικά βραχοπτώσεων στην Ελλάδα.(Rocfall Hazzard in Greece, Saroglou 2013)

Σύμφωνα με το Hoek (2000), οι καταπτώσεις βράχων σχετίζονται με αύξηση της πίεσης νερού των πόρων λόγω διείσδυσης του βρόχινου νερού, τη διάβρωση, την αποσάθρωση, τον παγετό, την υποσκαφή λόγω εναλλαγής συνεκτικών και χαλαρών σχηματισμών, τη διαταραχή από υπερκείμενους βράχους, τη δράση του ριζικού συστήματος, τη θερμική διαστολή-συστολή και τους σεισμούς. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια από τις πιο συνήθεις μορφές αστοχιών των βραχωδών πρανών και συναντάται κυρίως σε περιοχές με έντονο ορεινό ανάγλυφο. Ο Varnes (1978) όρισε την κατάπτωση ως την κίνηση ενός βραχώδους

όγκου οποιουδήποτε μεγέθους, λόγω βαρύτητας με τη μορφή ελεύθερης πτώσης, κύλισης ή αναπήδησης του τεμάχους, η οποία προκαλείται από την απότομη αποκόλλησή του από πρηνή με μεγάλη κλίση, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία δεν εκδηλώνεται σημαντική κίνηση. Η κίνηση είναι γρήγορη και συνήθως αυξάνει προς τα κάτω λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Από τα παραπάνω, κρίνεται σκόπιμη η συστηματική μελέτη του φαινομένου από μηχανικούς, έτσι ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν τα κατάλληλα έργα ανάσχεσης ή πρόληψης του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων.

Οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν πριν την κατασκευή οποιουδήποτε μέτρου προστασίας είναι η μέγιστη αναμενόμενη απόσταση του βράχου από το σημείο εκκίνησής του, το ύψος της τροχιάς που δυνητικά θα ακολουθήσει, η ταχύτητα και η ενέργειά του.

2.2 Αίτια καταπτώσεων

Είναι αρκετές οι αναφορές, σε παγκόσμιο επίπεδο, ανθρώπων οι οποίοι τραυματίστηκαν ή σκοτώθηκαν από καταπτώσεις βράχων. Επιπλέον, είναι πολλές οι αναφορές για τα αίτια που προκαλούν τις καταπτώσεις. Για παράδειγμα οι καταπτώσεις βράχων κατά τον Hoek (2000), σχετίζονται με κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα τα οποία μπορούν να επιφέρουν αλλαγή στις δυνάμεις που ενεργούν στον βράχο. Παράλληλα, κατά τον Chester F. Watts (Radford University, 2001) οι καταπτώσεις συνδέονται με το γεωλογικό περιβάλλον και τις διαρθρωτικές συνθήκες της περιοχής. Επίσης, κατά τους Luqing Zhang και Yang Zhifa (Beijing China, 2004) οι καταπτώσεις οφείλονται σε γεωλογικές συνθήκες της περιοχής και στην ανθρώπινη δραστηριότητα.

Συγκεντρωτικά, τα αίτια έναρξης της καθοδικής κίνησης ενός βραχοτεμαχίου μπορούν να αποδοθούν σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες γεγονότων.

- Γεωλογικές διεργασίες.
- Σεισμική δραστηριότητα.
- Ανθρώπινη δραστηριότητα.

2.2.1 Γεωλογικές διεργασίες

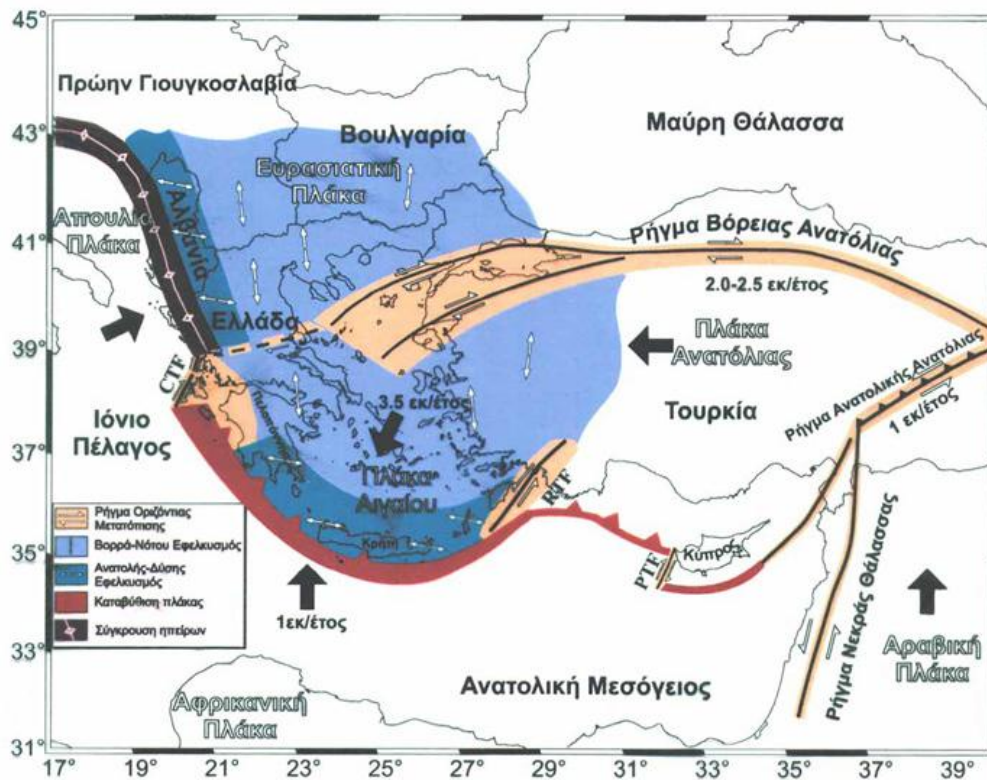
Το μητρικό πρηνές από το οποίο ξεκινά την κίνησή του το βραχοτέμαχος αποτελείται από πετρώματα με διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

Η λιθολογία γεωυλικού, η αντοχή του βραχοτεμάχους και των ασυνεχειών του, η δομή του πετρώματος, η κλίση και το ύψος του πρηνούς καθώς και άλλοι παράγοντες αποτελούν τις γεωλογικές διεργασίες που προκαλούν τις καταπτώσεις.

Τα υπόγεια νερά και οι βροχοπτώσεις έχουν και αυτές σημαντική επίδραση στην ποιότητα της βραχώμαζας. Το επιφανειακό νερό εισέρχεται στις ανοιχτές ρωγμές-ασυνέχειες που αναπτύσσονται συνήθως στην επιφανειακή ζώνη της βραχώμαζας των πρανών με αποτέλεσμα την σταδιακή αποσάθρωσή του και τελικώς την αποκόλλησή του.

2.2.2 Σεισμική δραστηριότητα

Κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης σε μία περιοχή το πρανές, ταλαντώνεται, αναπτύσσοντας επιταχύνσεις σε διάφορες διευθύνσεις. Όταν αυτή η επιτάχυνση, στην υπό μελέτη κατεύθυνση, ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, τότε αποκολλούνται τα τεμάχια του βράχου και έχουμε το φαινόμενο των καταπτώσεων. Η Ελλάδα έχει έντονη σεισμική δραστηριότητα αφού την κυκλώνουν ρήγματα και συναντώνται τεκτονικές πλάκες, όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 2.2. Παρουσίαση ρηγμάτων – τεκτονικών πλακών.(Περιφέρεια Κρήτης 2010)

2.2.3 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Η αποκόλληση τεμαχών βράχου μπορεί να προκαλείται και από ανθρώπινη παρέμβαση. Η συνεχή επέμβαση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον με την προοπτική κατασκευής

έργων που θα διευκολύνουν τις ανάγκες του (γέφυρες, οδικά δίκτυα, σήραγγες, κτίσματα κτλ.), οδηγούν τελικώς, στις καταπτώσεις βραχοτεμάχων.

Παραδείγματος χάριν, κατά την διάρκεια εργασιών ανατίναξης για την εκσκαφή τεχνητών πρηνών ή την διάνοιξη σηράγγων μπορούν να δημιουργηθούν δονήσεις, οι οποίες και να προκαλέσουν καταπτώσεις.. Επίσης, ακόμα και στις προγραμματισμένες εργασίες καθαίρεσης ενός μικρού τμήματος βράχου, μπορεί να προκληθεί αποκόλληση ενός μεγαλύτερου τμήματος.

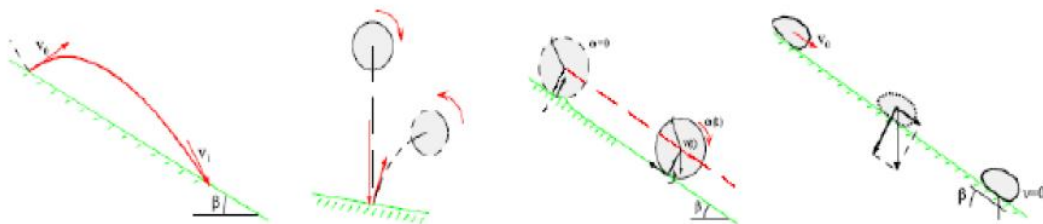
2.3 Τροχιά κίνησης βραχοτεμαχίων

Η τροχιά που θα ακολουθήσει το βραχώδες τεμάχιο από την στιγμή που θα αρχίσει η αποκόλλησή του αποτελείται από τις παρακάτω τέσσερις κινήσεις :

- Ελεύθερη πορεία στον αέρα (free flight)
- Ολίσθηση (sliding)
- Κύλιση (rolling)
- Αναπήδηση (bouncing)

Το στιγμιότυπο της κρούσης είναι η πιο δύσκολη διαδικασία για να προσδιοριστεί δια το λόγω ότι η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται κυρίως από τις μηχανικές ιδιότητες του βράχου και του υλικού στο οποίο προσκρούει, την γωνία κρούσης, τη μάζα του βράχου και φυσικά την ταχύτητα κρούσης.

Παρακάτω, παρατίθενται σκαριφηματικά οι τέσσερις κινήσεις που θα ακολουθήσει το βραχοτέμαχος κατά την κίνηση του.



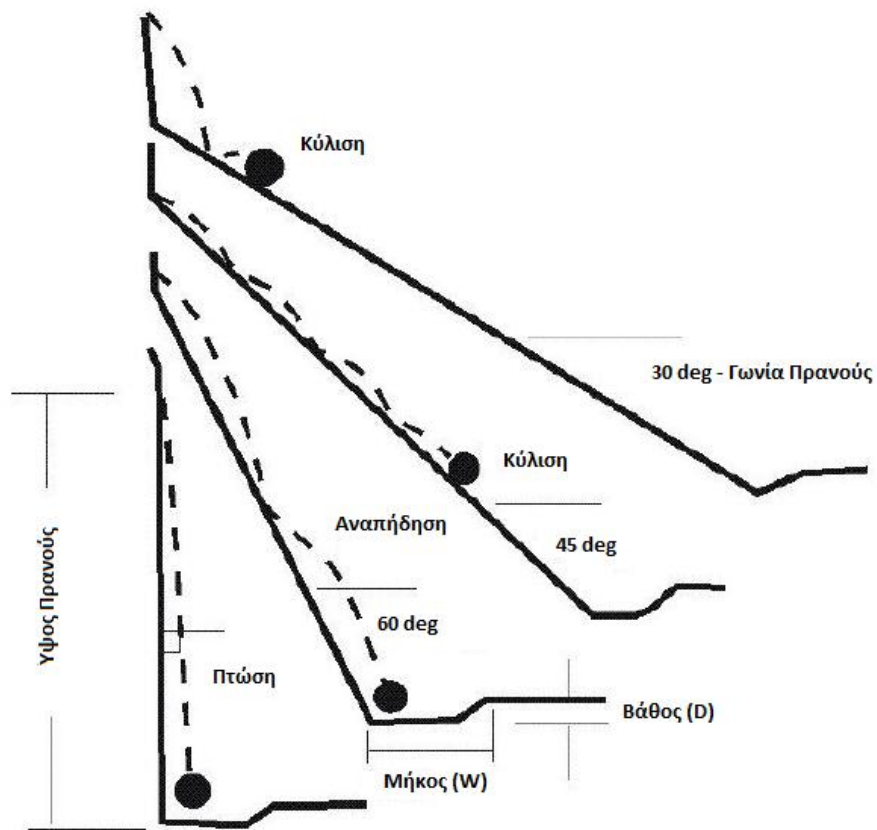
Εικόνα 2.3. Κινήσεις βραχοτεμαχίων. (Descoedres & Zimmermann, 1987)

Κατά την ελεύθερη πορεία στον αέρα (free flight), λαμβάνοντας υπόψιν την παραδοχή ότι η αντίσταση του αέρα δεν έχει επίδραση στην κίνηση του βραχοτεμάχους και αμελώντας τις κρούσεις που παρεμβάλλονται στην κίνησή του, η τροχιά του, μπορεί να θεωρηθεί παραβολική (Ritchie, 1963). Εκτελώντας επί τόπου δοκιμές, παρατήρησε ότι το κύριο είδος της κίνησης ανά κατηγορία είναι:

- Κύλιση σε πλαγιές με κλίση μέχρι 45° .

- Αναπήδηση για γωνίες κλίσης μεταξύ 46° και 63°.
- Ελεύθερη πτώση για γωνίες κλίσης μεγαλύτερες από 64°.

Για ένα βραχοτεμάχιο που κινείται επί ενός πρανού, το τελευταίο τμήμα της διαδρομής παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της τροχιάς που θα ακολουθήσει. Σε περίπτωση που το πρανές σχηματίζει απότομη αύξηση κλίσης (φρύδι πρανού), το βραχοτεμάχιο απλά θα πέσει από το φρύδι, καταλήγοντας πιθανότατα στο πόδι του πρανού. Αντίθετα, αν η κλίση του πρανού ήταν πιο ομαλή, τότε το βραχοτεμάχιο θα εκτελέσει μια εκτίναξη για να προσγειωθεί μακρύτερα από το πόδι του πρανού. Ακριβώς αυτή η τελευταία περίπτωση είναι σημαντικό να μελετηθεί γιατί τέτοιου είδους τροχιές που ακολουθούν τα βραχοτεμάχια είναι δυνατόν να υπερπηδήσουν τα υπάρχοντα επιχώματα και τις υπάρχουσες ταφρους.



Εικόνα 2.4. Κινήσεις βραχοτεμαχίων. (Ritchie, 1963)

Όσον αφορά την ολίσθηση (sliding) του βραχοτεμάχους ίσχυει ο νόμος Coulomb για την ολίσθηση τεμάχους μάζας M σε επιφάνεια γωνίας με το οριζόντιο επίπεδο ϕ° μέχρι να προσεγγίσει την θέση ηρεμίας του. Τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής μ κυμαίνονται από 0,6 έως 1. Η ολίσθηση του βραχοτεμάχους μπορεί εν συνεχεία να μετατραπεί σε περιστροφή μέχρι τη νέα θέση ισορροπίας του. Η σχέση που προκύπτει από το νόμο Coulomb είναι :

$$T = \mu * N = \mu * M * g * \cos\phi$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ολίσθηση του βραχοτεμάχου μπορεί να μετατραπεί σε περιστροφική κίνηση. Πολλές φορές η κύλιση (rolling) συνδυάζεται με την ολίσθηση με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα πιο πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο κάθε φορά θα πρέπει να αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb, με τον συντελεστή ολίσθησης να εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πρανούς γωνίας ϕ , από την παρακάτω σχέση.

$$T = \mu * N = \mu * M * g * \cos\phi$$

$$\mu = \mu_0 * k * \frac{d'}{d}$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής ολίσθησης με σταθερές $\mu_0 = (0,37 \sim 0,67)$ και $k = (0,17 \sim 0,26)$. Το d' είναι το μήκος επαφής του εδάφους με το βραχοτέμαχος και d η διάμετρος του.

Όπως παρουσιάζεται στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το είδος της κίνησης βραχοτεμάχων στο υπό μελέτη πρανές είναι η αναπήδηση (bouncing). Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται με τη πρόσκρουση του βραχοτεμάχου στην επιφάνεια του πρανούς, σε δέντρα, σε προεξέχοντα τμήματα βράχου ανάλογα με το υπό μελέτη πρανές. Λαμβάνοντας υπόψιν την πολυπλοκότητά της κίνησής της, έχει κατανοηθεί λιγότερο από τους υπόλοιπους τύπους κίνησης και επομένως είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ακριβή πορεία κίνησης του τεμάχου.

Το φαινόμενο της αναπήδησης εξαρτάται από πάρα πολλές παραμέτρους, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του πρανούς, του τεμάχου και των κινηματικών χαρακτηριστικών της τροχιάς του. Η κίνηση του βραχοτεμάχου επηρεάζεται από την αντοχή, την σκληρότητα, την τραχύτητα και την κλίση του πρανούς, το βάρος, το μέγεθος και το σχήμα του τεμάχου και την μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα και την γωνία πρόσπτωσης στο πρανές (Labrousse and Heidenreich, 2009).

Οι περισσότερες μέθοδοι που αναπαριστούν το φαινόμενο της αναπήδησης όπως αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία (Rocfall της Rocscience, 1998-2002) με έναν απλοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα, εκτός της μορφολογίας του πρανούς, τους παράγοντες κρούσεις (coefficients of restitution), την γωνιακή ταχύτητα, την τραχύτητα του πρανούς (slope roughness), τη γωνία τριβής της διεπιφάνειας πρανούς – βραχοτεμάχου και τον παράγοντα κλίμακας κρούσης ώστε να περιγράψουν την απώλεια ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται εξ αιτίας της κρούσης στην επιφάνεια του πρανούς. Οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την προσομοίωση της τροχιάς και τον έλεγχο της απώλειας ταχύτητας και κινητικής ενέργειας κατά την κρούση.

2.4 Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοπτώσεων

Οι καταπτώσεις βράχων θέτουν σε σημαντικό κίνδυνο τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τις υποδομές. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας έχει ιδιαίτερη σημασία. Με κατάλληλη

γεωλογική αξιολόγηση είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι επισφαλείς θέσεις έναντι καταπτώσεων, να εξηγηθεί ο μηχανισμός ενεργοποίησης του φαινομένου και να καταστεί αποτελεσματικότερος ο σχεδιασμός των μέτρων προστασίας. Η τροχιά ενός τεμάχου είναι σχετικά δύσκολο να προβλεφθεί, λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που πρέπει να δωθούν. Ως άλλο εργαλείο μελέτης έχουν δημιουργηθεί διάφορα συστήματα εκτίμησης του κινδύνου. Σε κάθε ένα από τα συστήματα εκτίμησης κινδύνου της βιβλιογραφίας έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός της υπό μελέτη περιοχής σε ζώνες επικινδυνότητας με σκοπό την ομαδοποίησή τους και την λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας. Αναλυτικότερα, λαμβάνονται υπόψιν ένα πλήθος παραμέτρων, οι οποίες είναι συχνά διαφορετικές μεταξύ των συστημάτων, ώστε τελικά προκύπτει η επικινδυνότητα καταπτώσεων στο υπό μελέτη τμήμα .

Στην βιβλιογραφία συναντώνται διάφορα συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης σε βραχώδη πρανή. Ορισμένα από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

- Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System
- WSDOT's Unstable Slope Management Program
- Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area
- The RTA Guide to Slope Risk Analysis
- Slope Hazard Index (RSHI)
- Quantitative Risk Assessment (QRA)
- Rockfall Hazard Rating System (RHRS)

Το πιο αξιόπιστο από τα υπάρχουσα συστήματα είναι το Rockfall Hazard Rating System (RHRS). Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από τους Pierson et al. (1990) για λογαριασμό της υπηρεσίας αυτοκινητοδρόμων του Oregon (ODOT-Oregon Department of Transportation).

Ορισμένες παράμετροι που χρησιμοποιούν τα περισσότερα συστήματα είναι :

- Το ύψος του πρανούς
- Η κλίση του πρανούς
- Η αποτελεσματικότητα της τάφρου της οδού
- Η τραχύτητα του πρανούς
- Η διαπερατότητα
- Η παρουσία βλάστησης στο πρανές
- Ο βαθμός και ο ρυθμός αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων
- Η κατάσταση των ασυνεχειών, δηλαδή η τραχύτητα και ο προσανατολισμός τους
- Το κλίμα και η παρουσία νερού στο πρανές
- Το μέγεθος και η ποσότητα των τεμαχών
- Η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή
- Η αξία των κατασκευών στην υπό μελέτη περιοχή
- Το ιστορικό των καταπτώσεων στην περιοχή που μελετάται.

Τα συστήματα αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι επαρκώς τεκμηριωμένα. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας το οποίο προτείνεται κυρίως στην

εκτίμηση κατολισθήσεων σε φυσικά και τεχνητά πρηνή και περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους, οι οποίες θεωρούνται χρήσιμες δια το σκοπό αυτό. Παράλληλα, έχει χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση της πόλης της Μονεμβάσιας (H. Saroglou, V. Marinou, P. Marinou, G. Tsiambaos, 2012).

Αναλυτικότερα, το σύστημα ορίζει είκοσι παραμέτρους, οι οποίες εντάσσονται σε τέσσερις ευρύτερες κατηγορίες διακινδύνευσης (A,B,C,D) με διαφορετικό συνολικό ποσοστό εμπλοκής της κάθε μίας (25%, 10%, 10% και 40% αντίστοιχα). Η πρώτη κατηγορία (A) περιλαμβάνει παραμέτρους που σχετίζονται με τη γεωμετρία του πρηνούς. Η δεύτερη κατηγορία (B) αναφέρεται στις γεωλογικές συνθήκες του πρηνούς και της βραχώμαζας, από την οποία αποτελείται. Η Τρίτη κατηγορία (C) αφορά τους δυνητικούς παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν τις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων και τέλος η τέταρτη κατηγορία (D) αναφέρεται στις συνέπειες που θα προκαλέσουν οι καταπτώσεις στις δομές που κείτονται στην ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Αυτό το σύστημα αξιολόγησης έχει σχεδιαστεί με έμφαση στην αξιολόγηση των φυσικών πετρωμάτων, τα οποία θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες δομές και δραστηριότητες.

Παρακάτω, παρατίθεται αναλυτικά ο πίνακας με τις παραμέτρους για την εκτίμηση κινδύνου καταπτώσεων.

Πίνακας 2.1. Εκτίμησης επικινδυνότητας βραχοπτώσεων (Risk Rating System). (Saroglou, et. al, 2012)

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING			
		25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60 Overhanging
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60 Overhanging
Rating		10	30	60	100
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60	>60
Rating		10	30	60	100
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfall from whole slope (H)
Rating		10	30	60	100
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches,(helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches
Rating		10	30	60	100
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation	No vegetation
Rating		10	30	60	100
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm
Rating		10	15	30	60

7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability	Moderate	Adverse	Very adverse	
Rating		10	15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high > 10m
Rating		10	15	30	60	100
9. Joint compressive strength (JCS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20	<5, weathered	
Rating		10	30	60	100	
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60	>60MPa	
Rating		10	30	60	100	
11. Rock mass blockiness / Block volume (m³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0
Rating		10	15	30	60	100
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10	>10	
Rating		10	30	60	100	
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions	Frequent Undermined conditions	
Rating		10	30	60	100	
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year
Rating		10	15	30	60	100
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low
Rating		10	15	30	60	100
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36	
Rating		10	30	60	100	
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No
Rating		10	15	30	60	100
18. Rocfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous
Rating		10	15	30	60	100
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult
Rating		10	15	30	60	100
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas
Rating		10	15	30	60	100

Η κατηγορία κινδύνου (I,II,III,IV) που εντάσσεται το υπό μελέτη τμήμα προκύπτει, τελικώς, από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.2. Βαθμονόμησης επικινδυνότητας & προσδιορισμός μέτρων. (Saroglou, et al, 2012)

RISK CLASS	TOTAL WEIGHTED SCORE 1-100	RISK	INDICATIVE PROTECTION MEASURES (THE CHOICE IS SITE SPECIFIC)
I	<20	Very Low	Not necessary. May be sparse spot interventions.
II	21-40	Low	In limited extent.
III	41-60	Medium	Light measures (such as bolt, annets removal of unstable blockssimple light fences).
IV	61-80	High	Combination of active (such as bolts, anchors) and passive (such as nets, wire rope cables, buttress walls, fences removal of unstable blocks) measures.
V	81-100	Very High	Critical state of stability, combination of generalized or/and strong active and passive measures. Residual risk to be accepted.

3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ- ΧΩΡΑ ΣΦΑΚΙΩΝ

Στην περιοχή υπάρχει μεγάλο ιστορικό καταπτώσεων βραχοτεμάχων, η εκδήλωση των οποίων, έχει σαν αποτέλεσμα τον τραυματισμό διερχομένων ανθρώπων αλλά και υλικές ζημιές στα σταθμευμένα οχήματα και στα τουριστικά μαγαζιά που βρίσκονται κατάντη του λόφου. Ο δρόμος, κυρίως την τουριστική περίοδο, χρησιμοποιείται σαν χώρος στάθμευσης για τους επιβάτες του караβιού και για τους επισκέπτες της ευρύτερης περιοχής.

Τα τεμάχια βράχου που έχουν, κατά καιρούς, αποκολληθεί ήταν σχετικά μικρών διαστάσεων ενώ σε λίγες περιπτώσεις παρατηρήθηκε κατολίσθηση μεγάλων διαστάσεων, κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες (σε περίοδο έντονων βροχοπτώσεων). Ανθρώπινες παρεμβάσεις στο μορφολογικό ανάγλυφο του πρανούς δεν έχουν πραγματοποιηθεί, σε βαθμό που να ευθύνονται για τις κατολισθήσεις.

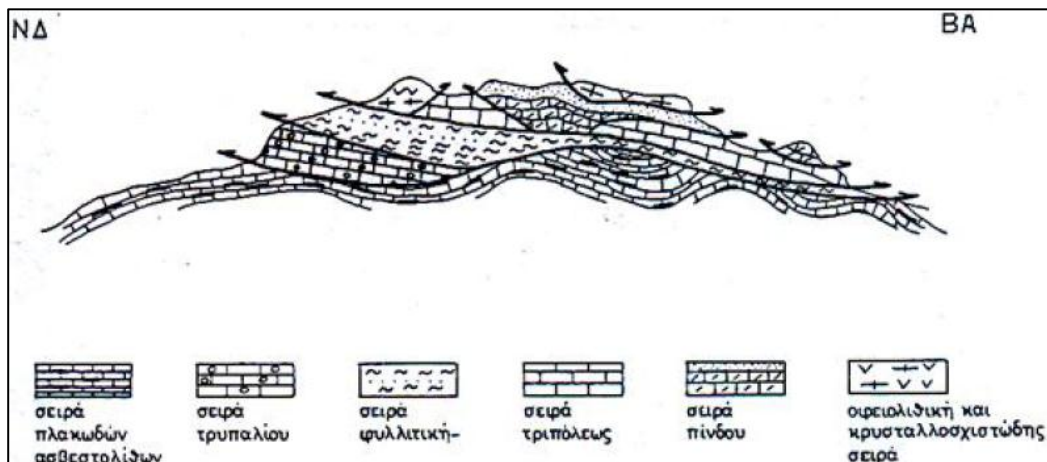


Εικόνα 3.1. Φωτογραφία λόφου Καστελίου, Χώρας Σφακιών.

3.1 Γεωλογία περιοχής

Η γεωλογική δομή των Σφακιών, του νομού Χανίων συνδέεται άμεσα με τη συνολική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο ΒΔ – ΝΑ. Η ευρύτερη περιοχή έχει μία πολύπλοκη γεωλογική δομή και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με τη δομή της, αυτό οφείλεται στη γεωτεκτονική θέση που κατέχει σε σχέση με τις δυο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες, την

Αφρικάνικη και την Ευρασιατική. Χαρακτηριστικό στοιχείο της δομής της είναι τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα των διαφόρων ζωνών, τα οποία αναπτύσσονται στην ενότητα Ταλέα Όρη – των πλακωδών ασβεστολίθων.



Εικόνα 3.2. Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα. (Περιφέρεια Κρήτης, 2010)

Η ευρύτερη περιοχή Σφακιών αποτελείται από ένα αυτόχθονο ή σχετικά αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστολίθων και τους υποκείμενους ασβεστολίθους, δολομίτες, με παρεμβολές σχιστόλιθων (Αδριατικοϊόνιος ή Ιόνιος Ζώνη) και από ένα αλλόχθονο σύστημα, με επιμέρους καλύμματα το οποίο είναι επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και τέλος από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Το αλλόχθονο σύστημα αποτελείται από αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο.

- Ανθρακικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου (Omalos tect. Nappe).

Αποτελείται από μεταμορφωμένους δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, λατυποπαγείς ασβεστόλιθους έως γραουβάκες, σκούρους κυψελώδεις δολομίτες, άσπρα ζαχαρόκοκκα μάρμαρα και εμφανίσεις γύψου στη βάση. Η ηλικία τους καθορίστηκε με τη βοήθεια απολιθωμάτων μεταξύ Άνω Τριαδικού – Κάτω Ιουρασικού.

- Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών (Phyl.-Quartz. Ser.).

Περιλαμβάνει φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους, κροκαλοπαγή, ποικίλης σύστασης. Η ηλικία της είναι μεταξύ Περμίου-Τριαδικού.

- Ζώνη Τριπόλεως (Tripolis zone).

Περιλαμβάνει τους σχηματισμούς του φλύσχη, μεσο-παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους και δολομίτες. Τα στρώματά της σχηματίζουν μεγάλα ανοικτά σύγκλινα και αντίκλινα και είναι επωθημένη δυτικά πάνω στην Ιόνιο ζώνη.

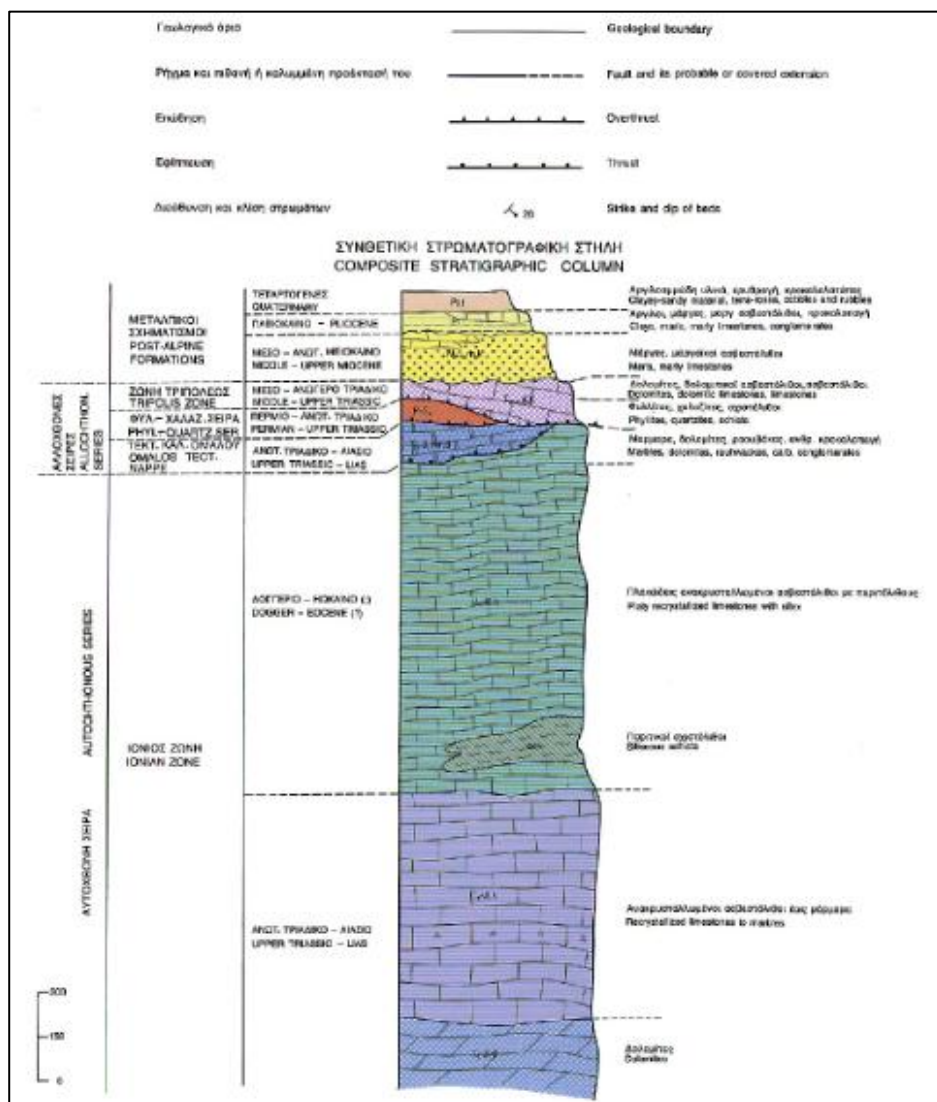
- Ιόνιος ζώνη (Αδριατικοϊόνιος, Ionian zone).

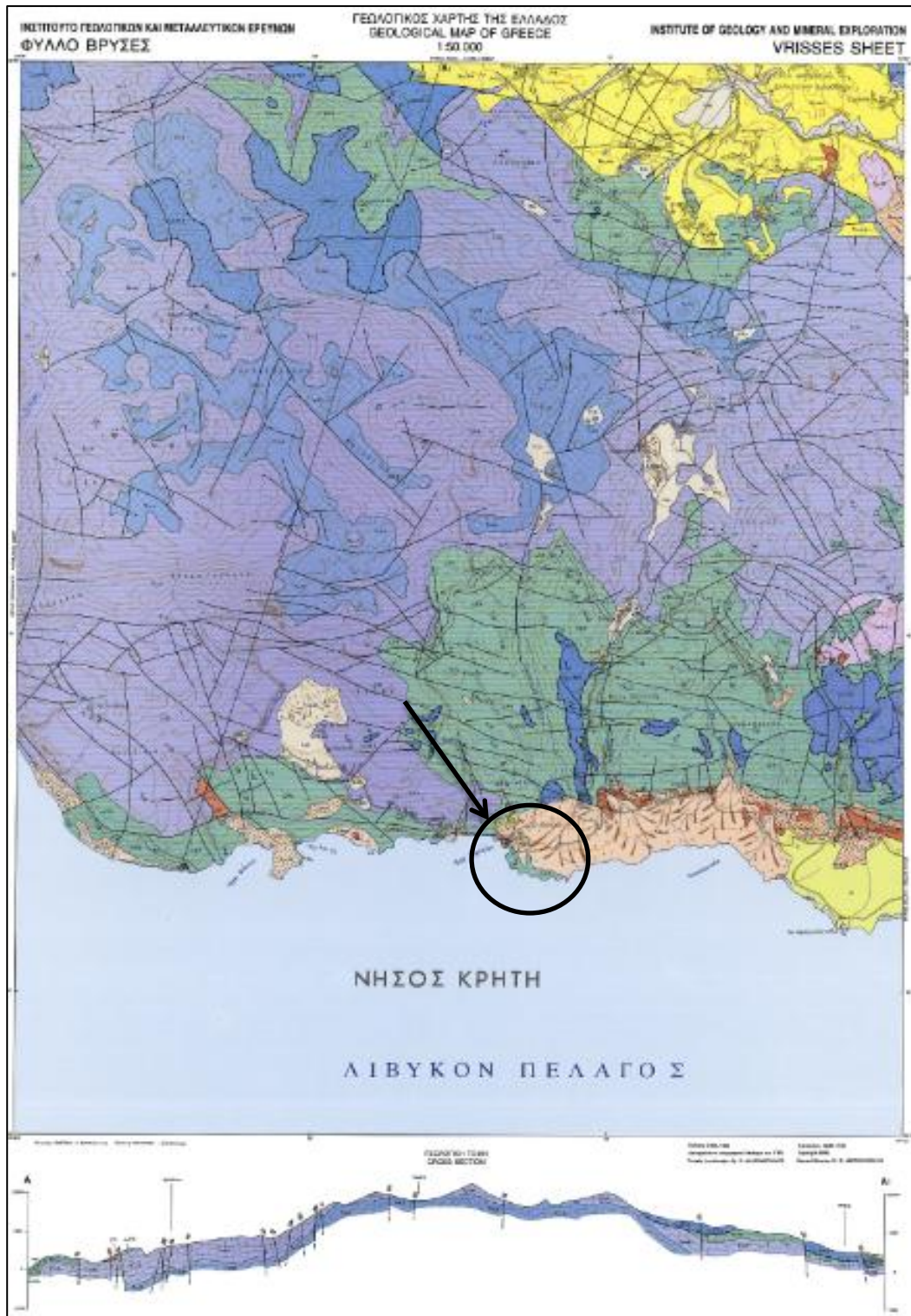
Χαρακτηρίζεται από την παρουσία εβαποριτών, κυρίως γύψου και ορυκτού άλατος, στη βάση της αλλά και σε ανώτερα στρώματα, όπου ανήλθαν λόγω διαφυρισμού. Ακολουθεί μια

σχεδόν συνεχής ιζηματογένεση όπου επικρατούν οι ασβεστόλιθοι, πελαγικοί και νηριτικοί, δολομίτες, αργιλικό σχιστόλιθοι και κερατόλιθοι. Με την Ιόνιο ζώνη σχετίζεται μια σειρά πλακωδών μαρμάρων με διαστρώσεις πυριτολίθων, γνωστή ως σειρά των Plattenkalk (Πλακώδεις ασβεστόλιθοι).

➤ Μεταλλικοί σχηματισμοί (Post-Alpine formations).

Τα μεταλλικά ιζήματα είναι τόσο θαλάσσιας προέλευσης όσο και ηπειρωτικής (λιμναία και ποταμοχειμάρρια) και πληρούν κατά κανόνα διάφορες νεοτεκτονικές λεκάνες. Γενικά, τα πιο συνηθισμένα ιζηματογενή πετρώματα του Ανώτερου Νεογενούς είναι ασβεστόλιθοι, δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι, τραβερτίνες, άμμοι, χαλαρά και συνεκτικά κροκαλοπαγή και λατυποπαγή καθώς και οι εβαπορίτες (αλάτι και γύψος). Οι στρωματογραφικές ενότητες και τα τεκτονικά καλύμματα που χαρακτηρίζουν τη γεωλογική και τη γεωτεχνική δομή της ευρύτερης περιοχής παρουσιάζονται, σκαριφηματικά, στον παρακάτω γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε..





Εικόνα 3.3. Γεωλογικός Χάρτης ευρύτερης περιοχής (ΙΓΜΕ).

3.1.1 Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έρευνας, λόφου Καστελίου.

Περιοχή έρευνας της παρούσας εργασίας αποτελεί ο λόφος Καστελίου, πάνω στον οποίο κείται το φρούριο της Χώρας Σφακίων.



Εικόνα 3.4. Φωτογραφία λόφου Καστελίου, Χώρας Σφακίων.

Στην περιοχή έρευνας, όπως φαίνεται και στο απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., σε συνδιασμό με την επιτόπου παρατήρηση της περιοχής, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τεταρτογενείς Αποθέσεις (Quaternary, Q_{1,t}).

Αποτελούνται από χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, πηλούς, ψαμμίτες, κροκάλες λατύπες ποικίλης σύστασης, ασύνδετες, έως συνεκτικά συνδεδεμένες, και από υλικά του αλλουβιακού μανδύα. Εμφανίζονται κυρίως σε απολήξεις λεκανών ανοικτών προς τη θάλασσα, στις μείζονες κοίτες των ποταμών, σε μικρές εσωτερικές λεκάνες, καθώς και σε μορφή πλευρικών κορημάτων, κώνων κορημάτων και σε αναβαθμίδες χειμάρρων.

- Πλειόκαινο (Pliocene, P₁).

Αποτελούνται από άργιλους, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή. Πρόκειται για θαλάσσιες αποθέσεις, τα κατώτερα μέλη των οποίων αποτελούνται από ανθρακικά κροκαλοπαγή, που εξελίσσονται προς τα πάνω σε φυλλώδεις άργιλους και σε αργιλομαργαϊκούς σχηματισμούς. Μέσα σε αυτά απαντούν διαστρώσεις από οργανογενείς ασβεστόλιθους, αμμώδεις φακοί και ανθρακικές κροκάλες.

- Πέρμιο – Ανώτερο Τριαδικό (Permian – Upper Triassic, P-T_s).

Αποτελούνται από φυλλίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους. Είναι επωθημένες επάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιουνίου ζώνης.

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από πετρώματα πολύ χαμηλού μέρι χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (πρασινοςχιστολιθική φάση), όπου επικρατούν φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθοι ποικίλης σύστασης (σερικιτικοί-χλωριτικοί, ανθρακομιγείς με χλωριτοειδή, μαρμαρυγιοκοί και μαρμαρυγιοκοί-χλωριτικοί, χαλαζιακοί με σερική και αιματιτη, ανθρακομιγείς-μαρμαρυγιοκοί, γραφιτικοί-μαρμαρυγιοκοί). Μερικές φορές, μέσα στα πετρώματα αυτά παρεμβάλλονται μαύροι, λεπτοστρωματώδεις και κατακερματισμένοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι.

➤ Δογγέριο-Ηωκαινο (Dogger-Eocene, J_m -E,k)

Αποτελούνται από πλακώδεις ανακρυσταλλωμένοι ασβεστολίθους έως μάρμαρα με πυριτόλιθους. Είναι μεσοκρυσταλλικοί, τέφρη, τεφρομαύροι και μαύροι, καλά στρωμένοι σε πάγκους με πάχος που ποικίλει. Παρουσιάζουν ενστρώσεις, φακούς και κονδύλους πυριτόλιθων, των οποίων η συχνότητα εμφάνισης δεν είναι σταθερή. Το πυριτικό υλικό είναι κυρίως χαλαζίας.

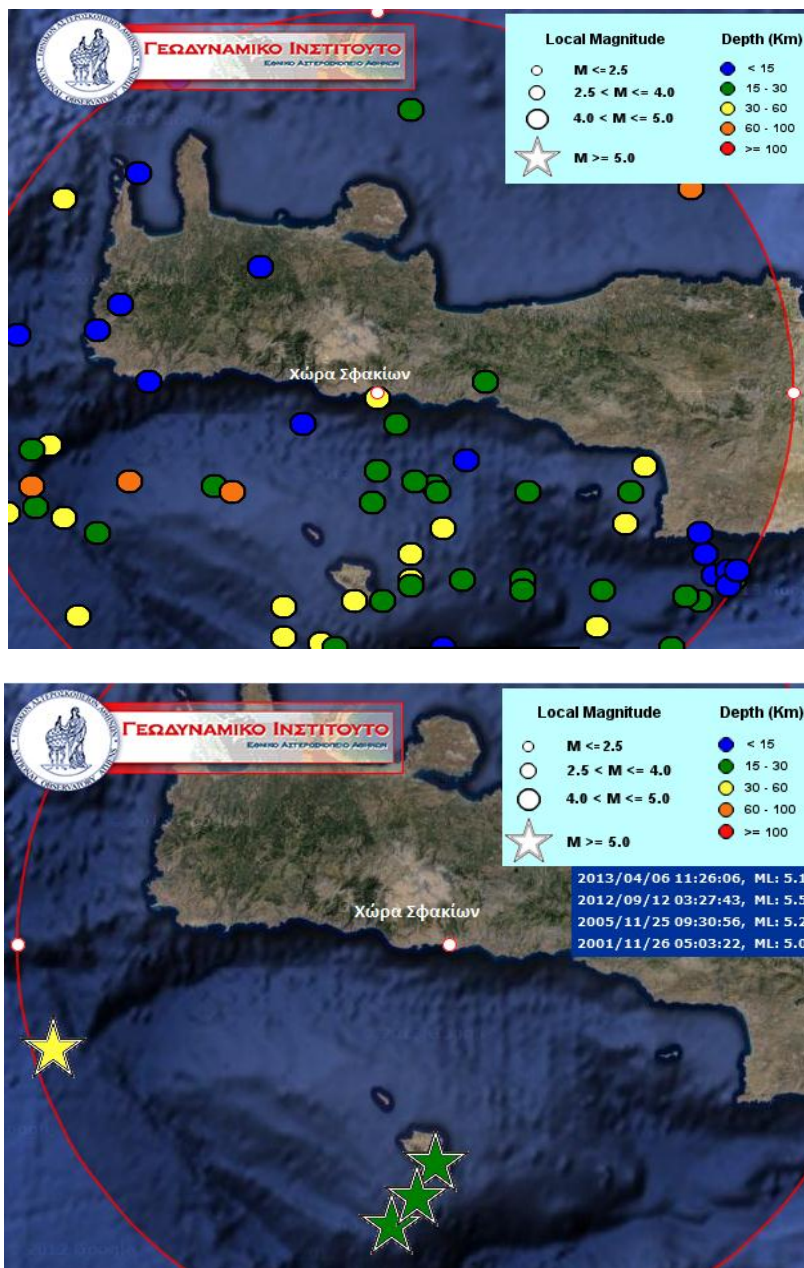


Εικόνα 3.5. Φωτογραφία βραχομάζας λόφου Καστελίου.

3.2 Σεισμικότητα περιοχής

Όπως είναι γνωστό, η Κρήτη βρίσκεται πάνω στην καμπή του «Ελληνικού Τόξου», που εκτείνεται από τη Δυτική Ηπειρωτική Ελλάδα, τη δυτική Πελοπόννησο, τα Κύθηρα, την Κρήτη, την Κάσο, την Κάρπαθο μέχρι τη Ρόδο. Οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών αποτελούν τη βασική αιτία του έντονου τεκτονικού τεμαχισμού με τα τεράστια ρήγματα και της σεισμικότητας που παρατηρούνται στο νησί και στη γύρω θαλάσσια περιοχή.

Παράλληλα με τις κινήσεις αυτές, ολόκληρο το υπόβαθρο της Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής ωθείται από το εσωτερικό του Τόξου (περιοχή Αιγαίου) προς τα έξω, από ΒΑ προς ΝΔ. Η Κρήτη κατά τη διάρκεια των παραπάνω σύγχρονων τεκτονικών κινήσεων, δεν συμπεριφέρεται ως μια ενιαία συμπαγής και άκαμπτη πλάκα, αλλά ως ένα σύστημα τεκτονικών τμημάτων που χωρίζονται από μεγάλα ρήγματα. Κάθε τμήμα αποκτά διαφορετικά μεγέθη κίνησης. Ένα σημαντικό μέρος της σεισμικής δραστηριότητας που παρατηρείται στην Κρήτη, οφείλεται σε αυτές τις επιφανειακές τεκτονικές κινήσεις. Τα παραπάνω, καθώς και η ύπαρξη πλήθους ενεργών ρηγμάτων σε ολόκληρη την περιοχή σε συνδυασμό με την υδροφορία της Δυτικής Κρήτης, αποτελούν παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη επικίνδυνων, για καταπτώσεις βράχων, περιοχών.



Εικόνα 3.6. Σεισμικά συμβάντα στην ευρύτερη περιοχή (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο).

Στις παραπάνω εικόνες, από το γεωδυναμικό ιστοιτούτο, παρουσιάζονται σεισμικά συμβάντα (1999-2014), μεγέθους $4,0 < M \leq 5,0$ και $M > 5,0$ αντίστοιχα. Γίνεται αντιληπτόν, ότι στην περιοχή μελέτης έχομεν σεισμικά συμβάντα, στοιχείο που επαληθεύεται από το ιστορικό των καταπτώσεων στην περιοχή.

3.3 Υδρογεωλογία περιοχής

Στη περιοχή της Χώρας Σφακίων δεν εμφανίζονται επιφανειακές χειμάρριες απορροές, αντίθετα οι σχηματισμοί, οι οποίοι την αποτελούν έχουν έντονο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Σύμφωνα με τον υδρολιθολογικό χάρτη της Κρήτης (Περιφέρεια Κρήτης, 2009) στη Χώρα Σφακίων συναντάμε σχηματισμούς δύο κατηγορίες σχηματισμών που επηρεάζονται από την υδροφορία, κοκκώδεις και καρστικοί.

- Κοκκώδεις σχηματισμοί. Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2).

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαίκοι ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

- Καρστικοί σχηματισμοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Κ2)

Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

3.4 Κλιματολογικά –Μετεωρολογικά στοιχεία

Ο Νομός Χανίων, όπως και η Κρήτη γενικότερα, ανήκει κλιματικά στη λεγόμενη χερσαία μεσογειακή ζώνη, όπου το κλίμα είναι εύκρατο, θαλάσσιο, με μικρό θερμοκρασιακό εύρος, ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα και εξαιρετική διαύγεια ατμόσφαιρας. Η μακρά ηλιοφάνεια, η σπανιότητα του χιονιού και των παγετών και η γλυκιά θερμοκρασία καθιστούν τις περιοχές του νομού πολύ ευνοϊκές από κλιματολογική άποψη. Η νέφωση γενικά είναι μικρή ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους $15,48^{\circ}\text{C}$, ενώ το ετήσιο ύψος βροχής, ανάλογα με την χρονιά μελέτης κυμαίνεται από 300mm, ενώ μπορεί να ξεπεράσει τα 1000mm. Οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι δυτικοί και βόρειοι και δεν υπερβαίνουν τα 9 Beaufort.

Οι βροχοπτώσεις στην Χώρα Σφακίων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους (σε ποσότητα) κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος-Μάρτιος), περίοδος που συμβαίνουν οι περισσότερες βροχοπτώσεις στο λόφο Καστελίου.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα δεδομένα που καταγράφησαν από το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (Ι.Ε.Π.Β.Α.) από το μετεωρολογικό σταθμό που έχει τοποθετηθεί στην περιοχή των Σφακίων (LGW4). Ο σταθμός άρχισε τη λειτουργία του το 2013.

Πίνακας 3.1. Συνολική βροχόπτωση και μέγιστες θερμοκρασίες στη Χώρα Σφακίων (ΙΕΠΒΑ).

YEAR	MAX MEAN TEMPERATURE (°C)	TOTAL RAIN (mm)
2013	23,10	249,60
2014	24,50	579,00
2015	23,20	926,80

3.5 Αποτύπωση περιοχής

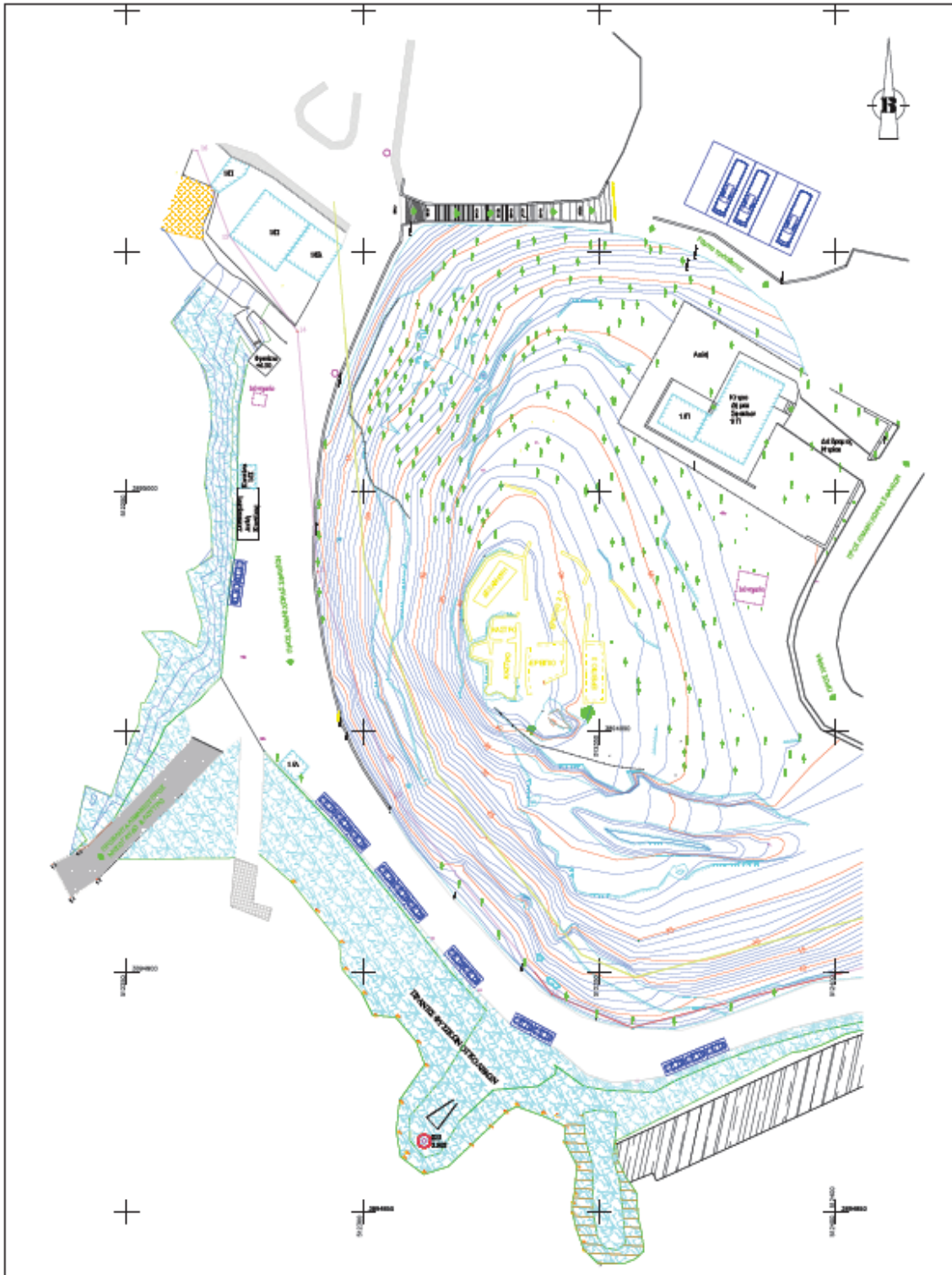
Δια την ορθότερη ανάλυση της υπό μελέτης περιοχής απαραίτητη είναι η ζωνοποίησή της, με βάση κοινά χαρακτηριστικά και ιδιότητες που εμφανίζονται στην κάθε ζώνη. Οι ζώνες που επιλέχθηκαν είναι τέσσερις. Η ζωνοποίηση πραγματοποιήθηκε με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

- Ύψος τμήματος πρηνούς
- Βραχομάζα
- Προσβασιμότητα
- Όγκους των επικίνδυνων προς κατάπτωση βραχοτεμαχίων

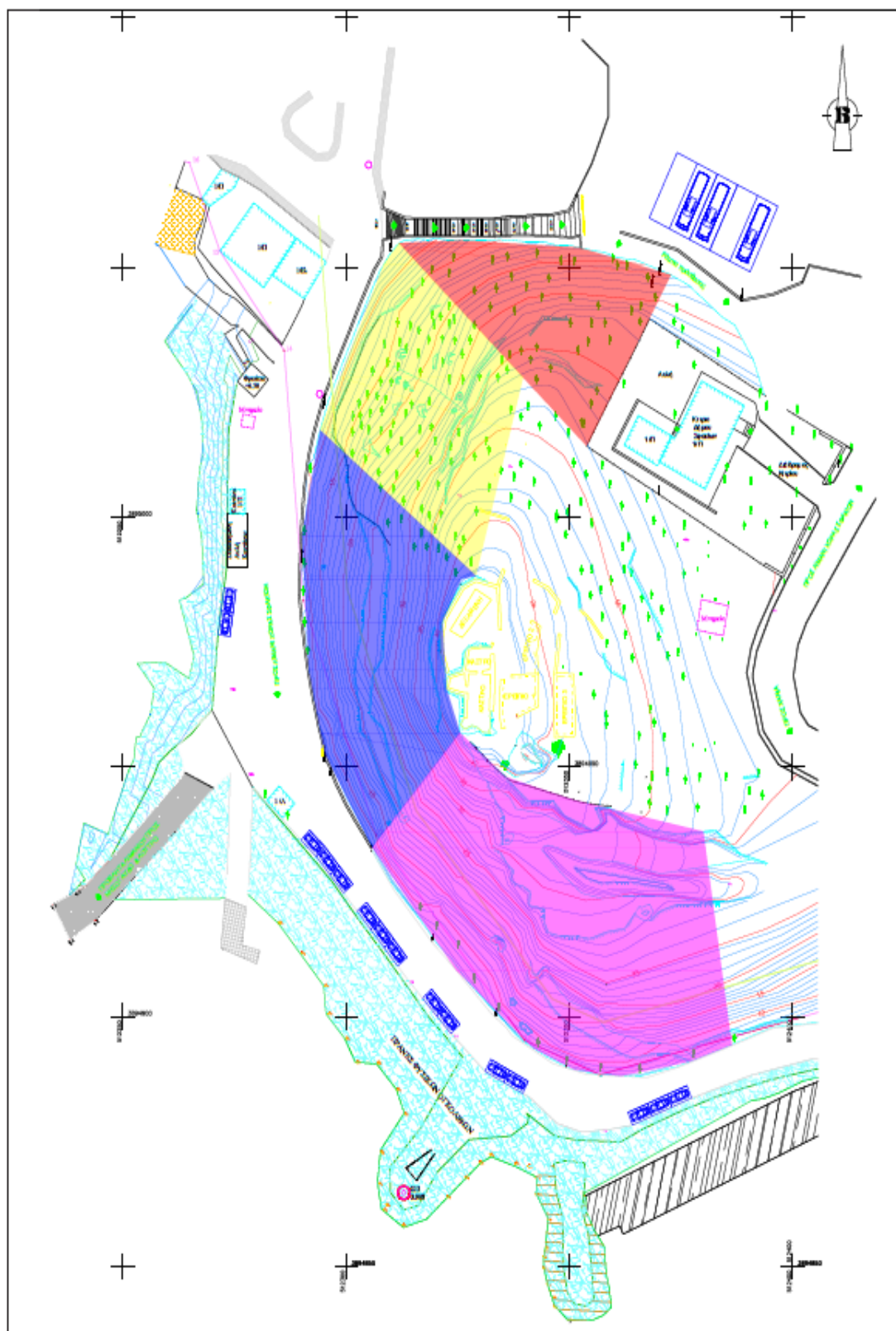
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της κάθε ζώνης .

Η αποτύπωση του τοπογραφικού διαγράμματος πραγματοποιήθηκε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ώστε κατά την ανάλυση με το Rocfall να εξαχθούν αποτελεσμάτα τα οποία θα ταυτίζονται με την υπάρχουσα κατάσταση της περιοχής.

Με βάση το τοπογραφικό διάγραμμα της υπό μελέτης περιοχής και την επί τόπου παρατήρηση του πρηνούς πραγματοποιήθηκε η ζωνοποίηση του πρηνούς.



Εικόνα 3.7. Τοπογραφικό διάγραμμα λόφου Καστελίου, Χώρας Σφακίων (Κοκολάκης Γ.,2015).



Εικόνα 3.8. Ζωνοποίηση περιοχής λόφου Καστελίου.

Η Ζώνη I (κόκκινη απόχρωση) περιλαμβάνει το τμήμα του πρανούς με μικρές κλισεις και ύψος. Η προσβασιμότητα σε αυτό το τμήμα του πρανούς είναι εύκολη και δεν παρουσιάζεται μεγάλη παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας στο τμήμα αυτό.

Ο διαχωρισμός της Ζώνης II (κιτρινη απόχρωση) πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την μεγάλη παρουσία πεύκων στο τμήμα αυτό.

Χαρακτηριστικό της Ζώνης III (μπλε απόχρωση) είναι η εμφάνιση μεγάλου τμήματος φυλλίτη στα κατάντη του πρανούς και η έντονη παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας στο τμήμα αυτό.

Τέλος, στη Ζώνη IV (μωβ απόχρωση) έντονο εμφανίζεται το ανάγλυφο με την παρουσία μεγάλων όγκων ασβεστολίθου. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες και η ανάλυση της κάθε ζώνης παρουσιάζεται παρακάτω.

3.6 Ιστορικό καταπτώσεων στο λόφο Καστελίου

Στην ευρύτερη περιοχή του λόφου Καστελίου έχει πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός καταπτώσεων βραχοτεμαχίων, οι οποίες έχουν προκαλέσει υλικές ζημιές σε σταθμευμένα αυτοκίνητα, σε τουριστικά μαγαζιά αλλά και μικροτραυματισμούς σε διερχομένους.

Το μέγεθος των βραχοτεμαχίων, που έχουν καταπέσει, ποικίλει ανάλογα με την ζώνη στην οποία ανήκουν. Παρακάτω, περιγράφεται αναλυτικά το μέγεθος βραχοτεμαχίων, που έχουν καταπέσει, ξεχωριστά σε κάθε ζώνη.

3.6.1. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη I

Η Ζώνη I τοποθετείται Βόρεια του λόφου Καστελίου και περιλαμβάνει το χώρο στάθμευσης των τουριστικών λεωφορείων και την περιοχή που βρίσκονται τα σκαλοπάτια, όπως φαίνεται στο τοπογραφικό διάγραμμα. Η ζώνη I αποτελείται, κυρίως, από μεγάλα τεμάχια άρρηκτου ασβεστολίθου στα κατάντη, περικυκλωμένα από πλευρικά κορήματα.

Στο κατάντη τμήμα δεν εντοπίζονται επικίνδυνες ασυνέχειες, οποίες και θα οδηγούσαν σε αποκόλληση των τεμάχων από το μητρικό πρανός. Το πέτρωμα τμηματικά έχει διαβρωθεί κατά τόπους, ώστε να θρυμματίζεται εύκολα. Επιπλέον, δεν έχει γίνει καταγραφή κατάπτωσης βράχου από το τμήμα αυτό.



Εικόνα 3.9. Φωτογραφία βραχομάζας, Ζώνης Ι.

Παρατηρείται η συνεχής πτώση κορημάτων ασβεστολίθου, κυρίως, από τα ανάντη. Η καταρροή των κορημάτων, έχει προκαλέσει τραυματισμούς διερχομένων, σύμφωνα με αναφορές από το Δήμο Σφακίων. Επίσης, παρουσιάζονται λίγες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων, μικρών διαστάσεων, χωρίς όμως να έχουν προκαλέσει τραυματισμούς. Η βραχομάζα είναι έντονα κερματισμένη για το λόγο αυτό πραγματοποιείται επίπεδη ολίσθηση, ως τύπος ολίσθησης. Σπανιότερα, συναντάμε σφηνοειδής ολίσθηση.



Εικόνα 3.10. Φωτογραφία βραχομάζας, Ζώνης Ι.

3.6.2. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη II

Στη Ζώνη II αποτελεί τη μοναδική περιοχή του πρανούς, η οποία εμφανίζει δενδροφύτευση με την παρουσία πεύκων μέσης διαμέτρου κορμών περί τα 130cm. Η Ζώνη II αποτελείται, κυρίως, από πλακώδεις ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους στα ανάντη και τμηματικά στα κατόντη. Η κλίση του τμήματος του πρανούς είναι πολλή έντονη και οι περισσότερες καταπτώσεις ξεκινούν από τα ανάντη.



Εικόνα 3.11. Φωτογραφία βραχομάζας, Ζώνης II.

Τα τεμάχια, τα οποία έχουν καταπέσει στο τμήμα αυτό, έχουν προκαλέσει ζημιές σε σταθμευμένα αυτοκίνητα και σε τουριστικό μαγαζί που βρίσκεται κατάντη, σύμφωνα με καταγραφές του Δήμου Σφακίων.

Οι ασυνέχεις, των πλακώδη ασβεστολίθων στα κατάντη δεν ευνοούν στην ασφάλεια έναντι καταπτώσεων, όπως εμφανίζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 3.12. Φωτογραφία βραχομάζας, Ζώνης II.

3.6.3. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη III

Στη Ζώνη III παρουσιάζεται σύμφωνα με τη χαρτογράφηση παρουσία, εκτός του ασβεστολίθου, μεγάλου τμήματος φυλλίτη στα κατάντη. Ο φυλλίτης εμφανίζεται ταλαιπωρημένος, με έντονα σημάδια καταπόνησης και με μικρές μηχανικές αντοχές.

Από το τμήμα αυτό του πρανούς, παρουσιάζεται έντονη καταρροή υλικού, λόγω της αποσάθρωσης που το χαρακτηρίζει. Στα ανάντη της Ζώνης III εντοπίζονται τμήματα ασβεστολίθου, αρκετά μεγάλων διαστάσεων, τα οποία είναι επικίνδυνα για καταπτώσεις. Στο τμήμα αυτό, εμφανίζονται οικογένειες ασυνεχειών, οι οποίες συντελούν στην κατάπτωση. Έχει πραγματοποιηθεί καταγραφή καταπτώσεων αρκετών τεμαχίων στο τμήμα αυτό, μονάχα με υλικές ζημιές σταθμευμένων οχημάτων. Ο διαχωρισμός του τμήματος του φυλλίτη και του ασβεστόλιθου πραγματοποιείται με την ύπαρξη φυσικού ομαλού τμήματος, όπως φαίνεται και στο τοπογραφικό διάγραμμα.

3.6.4. Καταπτώσεις βραχοτεμαχίων στη Ζώνη IV

Η τελευταία ζώνη που προκύπτει, αποτελεί και την πιο επισφαλή σε καταπτώσεις. Περιλαμβάνει το τμήμα κατάντη του κάστρου μέχρι και την περιοχή Νότια του πρικού. Οι περισσότερες αναφορές για καταπτώσεις αφορούν την Ζώνη IV με χαρακτηριστικό τους, το μεγάλο όγκο των τεμαχίων.



Εικόνα 3.13. Φωτογραφία Ζώνης IV.

Χαρακτηριστικό της Ζώνης IV είναι η απουσία οποιουδήποτε μέτρου ανάσχεσης, δηλαδή, η απόλυτη έκθεση στον κίνδυνο των καταπτώσεων. Στο τμήμα αυτό, έχουν παρατηρηθεί τραυματισμοί περαστικών, υλικές ζημιές σε αυτοκίνητα, στο οδόστρωμα του οδικού δικτύου και σε εγκαταστάσεις/πυλώνες της Δ.Ε.Η..

Η Ζώνη IV μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποζώνες IV_a, IV_b. Οι δύο υποζώνες ενώ έχουν ίδια γεωλογικά χαρακτηριστικά, διαφέρουν στην μορφολογία του εδάφους. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο παραπάνω τοπογραφικό διάγραμμα κατά μέρος υπάρχει επίπεδο τμήμα ομαλής κλίσης. Έχει παρατηρηθεί ότι τα τεμάχια που έχουν καταπέσει είναι από μικρών διατάσεων έως και μεγαλύτερων, τα οποία προσεγγίζουν ή ξεπερνούν τα 1~1,5m³, σε όγκο.



Εικόνα 3.14. Φωτογραφία Βραχοτεμάχους Ζώνης IV.

Από τις παραπάνω φωτογραφίες, φαίνεται χαρακτηριστικά, η επικινδυνότητα της Ζώνης IV σε καταπτώσεις μεγάλων σε όγκο βραχοτεμαχίων. Επομένως, κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό μέτρων ανάσχεση θα πρέπει να ληφθούν όλα τα παραπάνω υπόψιν.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

Για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένων αποτελεσμάτων και για τη βεβαιότητα ότι στις αναλύσεις λήφθηκε υπ' όψιν και η χειρότερη των περιπτώσεων επιλέχθηκαν για κάθε ζώνη μελέτης δύο κύριες τομές στις οποίες έγιναν προσομοιώσεις με το λογισμικό Rocfall. Σκοπός της επιλογής των συγκεκριμένων θέσεων είναι να καλυφτεί όλη η περιοχή με αυξημένη επικινδυνότητα. Η αντιστοίχιση των βραχοτεμαχίων σε κάθε τομή είναι ρεαλιστική.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι επειδή τα επικίνδυνα προς αποκόλληση βραχοτεμάχια δεν είναι χαρτογραφημένα, λήφθηκαν για τις απαιτήσεις της διατριβής αλληπάλληλες μετρήσεις με την χρήση GPS (N.P.).

4.1 Το πρόγραμμα Rocfall (Rocscience)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την αναπαράσταση του φαινομένου της αναπήδησης, θα χρησιμοποιηθεί, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας των πρανών σε πτώσεις βράχων της Rocscience, το Rocfall. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίζει, ύστερα από επεξεργασία την κινητική ενέργεια, την ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης των βραχοτεμαχίων καθώς και η θέση τερματισμού των τροχιών των βράχων.

Τα γενικότερα στοιχεία που απαιτούνται για την έναρξη της προσομοίωσης στο υπολογιστικό περιβάλλον της Rocfall, αναφέρονται παρακάτω :

- Καθορισμός του πρανούς με βάση το τοπογραφικό διάγραμμα που έχει συνταχθεί.
- Καθορισμός των υλικών που αποτελείται το πρανές.
- Αντιστοίχιση των υλικών στα αντίστοιχα τμήματα του πρανούς.
- Καθορισμός των σημείων εκκίνησης των βράχων (seeders).

Κατά την πρόσκρουση του στην επιφάνεια του πρανούς, το βαρχοτέμαχος ασκεί μια δύναμη σε αυτό και λόγω δράσης – αντίδρασης το πρανές ασκεί δύναμη στο τέμαχος, γεγονός που προκαλεί την αναπήδησή του προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα στοιχεία της αναπήδησης του τεμάχους όπως το ύψος αναπήδησης και η κατεύθυνση εξαρτώνται από τις συνθήκες πρόσκρουσης, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Για να μπορέσουν οι αναλύσεις να δώσουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα θα πρέπει να δοθούν από το χρήστη τιμές σε αυτές τις παραμέτρους. Οι τιμές των παραμέτρων των ιδιοτήτων κάθε τμήματος του πρανούς, μπορούν να αλλάξουν σε κάθε νέα ανάλυση. Παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών από αυτές.

Η κάθε παράμετρος επηρεάζει την ανάλυση, επομένως απαιτείται η σωστή επιλογή τους για την εξαγωγή αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι οι παρακάτω :

- Γωνιακή ταχύτητα (Angular Velocity)
- Παράγοντας κλίμακας κρούσης (Scaling Factor)
- Τραχύτητα πρανούς (Slope Roughness)
- Γωνία τριβής διεπιφάνειας πρανούς – βραχοτεμαχίου (Friction Angle)
- Παράγοντες κρούσης (Coefficient of Restitution)

Ύστερα από τις αναλύσεις που πραγματοποιεί το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, με τις πληροφορίες που παρέχονται σχετικά με την αναμενόμενη κινητική ενέργεια και τη θέση των μέτρων προστασίας, τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας, της ανθεκτικότητας, του μεγέθους και της θέσης των φραχτών συγκράτησης.

Από τις παραπάνω παραμέτρους ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η επιλογή των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών υλικών και συγκεκριμένα του κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, R_n και R_t , και της γωνίας τριβής τριβής της διεπιφάνειας πρανούς-βραχοτεμαχίου.

4.1.1 Γωνία τριβής διεπιφάνειας πρανούς – βραχοτεμαχίου (Friction Angle)

Η γωνία τριβής διεπιφάνειας πρανούς είναι η γωνία κλίσης (κρίσιμη) του πρανούς η οποία όταν ξεπεραστεί, αρχίζει η κίνηση των βραχώδων τεμαχίων. Επιλέγεται με βάση το σχήμα των σωματιδίων και τον τρόπο κυκλοφορίας τους. Οι χαμηλότερες τιμές δίνουν πιο συντηρητικές εκτιμήσεις και παρέχουν την «δυσμενέστερη περίπτωση» για την κατάπτωση.

Κατά την επιλογή της τιμής για την γωνία τριβής, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η βραχώμαζα έχει θεωρηθεί ως αδιάστατο σώμα για τους σκοπούς της ανάλυσης, και οποιαδήποτε επίπτωση από το σχήμα ή το μέγεθος τους θα πρέπει να υπολογιστεί προσεγγιστικά, μέσω των άλλων ιδιοτήτων.

4.1.2 Παράγοντες κρούσης (Coefficient of Restitution)

Η επιλογή της κατάλληλης τιμής των συντελεστών της κρούσης R_n , R_t , κάθετου και εφαπτομενικού αντίστοιχα, είναι σημαντική, διότι το αποτέλεσμα είναι συχνά πολύ ευαίσθητο στις τιμές που χρησιμοποιούνται. Ο υπολογισμός της διαχεόμενης ενέργειας κατά την αναπήδηση είναι απαραίτητος για την εκτίμηση της τροχιάς που θα ακολουθήσει το τέμαχος. Διά τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι δύο συντελεστές αναπήδησης. Το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution) ενώ αυτό παράλληλα στο επίπεδο του

πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution).

Κατά τους Pfeiffer & Bowen (1989) ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι ίσος με:

$$R_n = \frac{V_{nr}}{V_{ni}}$$

όπου V_{nr} είναι η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας αναπήδησης (μετά την κρούση) και V_{ni} η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας πρόσπτωσης (πριν την κρούση).

Για δοκιμές ελεύθερης πτώσης πάνω σε οριζόντιο επίπεδο η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$R_n = \sqrt{\frac{h_r}{h_d}}$$

όπου h_r το ύψος αναπήδησης και h_d το ύψος από το οποίο γίνεται η πτώση του τεμάχους.

Οι Azzoni & de Freitas (1995) χρησιμοποιούν ένα συνολικό συντελεστή αναπήδησης για την απώλεια ενέργειας κατά την αναπήδηση του τεμάχους, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$R = \frac{KE_r}{KE_i}$$

όπου KE_r και KE_i είναι η συνολική κινητική ενέργεια στην αναπήδηση και στην πρόσπτωση αντίστοιχα.

Όταν η πτώση του τεμάχους γίνεται υπό γωνία ή το επίπεδο του πρανούς είναι κεκλιμένο τότε εκτός από τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης υπολογίζεται και ο εφαπτομενικός ως εξής:

$$R_t = \frac{V_{tr}}{V_{ti}}$$

όπου V_{tr} είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας αναπήδησης (μετά την κρούση) και V_{ti} η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας πρόσπτωσης (πριν την κρούση).

Η απώλεια ενέργειας και συνεπώς οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης σχετίζονται άμεσα με τη σύσταση του γεωλογικού υλικού από το οποίο αποτελείται τόσο η πλαγιά όσο και το τεμάχος που αποκολλάται. Τα συμπαγή άρρηκτα πετρώματα έχουν μεγαλύτερες τιμές συντελεστών ενέργειας σε σχέση με τα μαλακότερα πετρώματα. Η εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης μπορεί να γίνει με βάση ανάδρομες αναλύσεις πτώσεων βράχων σε γνωστές τροχιές (φυσικές ή με επί τόπου δοκιμές) και με βάση εργαστηριακές δοκιμές όπου διερευνάται η τροχιά κατά την πτώση ενός τεμάχους υπό κλίμακα εργαστηρίου. Στο εργαστήριο, ο συντελεστής αναπήδησης μετράται συνήθως με την πτώση μιας μικρής σφαίρας συγκεκριμένου υλικού πάνω σε οριζόντια επιφάνεια του ίδιου υλικού και

κυμαίνεται μεταξύ της μονάδας για τέλεια ελαστικά υλικά και μηδέν για τέλεια μη ελαστικά υλικά.

4.1.3 Γωνιακή ταχύτητα (Angular Velocity)

Συνιστάται να εξετάζεται η γωνιακή ταχύτητα, καθώς παρέχει μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση της κίνησης. Η αρχική τιμή γενικά ορίζεται μηδενική, εφόσον δεν υπάρχει λόγος να γίνει αλλιώς. Είναι αναγκαία η κρίση του μηχανικού, για την επιλογή της ακριβούς τιμής που ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην κάθε περίπτωση.

4.1.4 Παράγοντας κλίμακας κρούσης (Scaling Factor)

Ο παράγοντας κλίμακας κρούσης αποτελεί μια μετάβαση από την σχεδόν ελαστική κρούση σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας, σε εξαιρετικά ανελαστικές συνθήκες που προκαλούν από θραύση των πετρωμάτων σε μικρότερα τεμάχια, ως δημιουργία κρατήρων στην επιφάνεια του πρανούς σε υψηλότερες ταχύτητες.

4.1.5 Τραχύτητα πρανούς (Slope Roughness)

Η τραχύτητα του πρανούς χρησιμοποιείται ως συντελεστής προσδιορισμού της διακύμανσης της κλίσης λόγω μεταβολών του ανάγλυφου. Το μέγεθος της τραχύτητας χρησιμοποιείται από το μοντέλο για τις τοπικές διακυμάνσεις στη γεωμετρία. Οι τυπικές τιμές της τραχύτητας είναι συνήθως πολύ μικρές.

Επομένως, Με βάση ανάδρομες αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί αλλά και από φυσικές ή επί τόπου δοκιμές δοκιμές έχουν συνταχθεί συγκεντρωτικοί πίνακες. Στους πίνακες αυτούς, αναφέρεται η βραχόμαζα στην οποία έγινε η μελέτη, βοηθώντας το μελετητή (βασιζόμενος στην κρίση του) στην επιλογή κατάλληλων τιμών για τους συντελεστές αναπήδησης.

Έχοντας καθορίσει τη γεωμετρία των τομών του πρανούς, σειρά παίρνει ο καθορισμός των υλικών. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά, ο φυλλίτης, ο ασβεστόλιθος, η άσφαλτος και οι εδαφικές αποθέσεις. Για κάθε ένα από τα υλικά καθορίστηκαν οι παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν.

Για τον φυλλίτη επιλέχτηκαν οι τιμές για το R_n 0.35, με τυπική απόκλιση 0.04 και για το R_t 0.7, με τυπική απόκλιση 0.04. Η γωνία τριβής υπολογίστηκε 30° , με τυπική απόκλιση 2° . Για τον Ασβεστόλιθο επιλέχτηκαν οι τιμές για το R_n 0.45, με τυπική απόκλιση 0.04 και για το R_t 0.8, με τυπική απόκλιση 0.04. Η γωνία τριβής υπολογίστηκε 35° , με τυπική απόκλιση 2° . Για

τις εδαφικές αποθέσεις επιλέχθηκαν επιλέχθηκαν οι τιμές για το Rn 0.32, με τυπική απόκλιση 0.04 και για το Rt 0.8, με τυπική απόκλιση 0.04. Στην τραχύτητα του πρανού δόθηκε η τυπική απόκλιση 2°. Τέλος, για την ασφάλτο στο συντελεστή Rn δίνεται η τιμή 0.4, με τυπική απόκλιση 0.04 και στο συντελεστή Rt η τιμή 0.92, με τυπική απόκλιση 0.04.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται χαρακτηριστικές τιμές όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικές τιμές Rn, Rt από τη βιβλιογραφία.

ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	Rn	Rt	ΥΛΙΚΟ
Heierli (1985)	0,95	~	Βράχος
Hoek (1987)	0,53	0,99	Συμπαγής βράχος
	0,40	0,90	Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
	0,32	0,80	Κορήματα με φυτοκάλυψη
	0,30	0,80	Εδαφικό υλικό με λίγη βλάστηση
Urciuoli (1988)	0,05-0,35	0,50-1,00	Βραχώδη τεμάχια ασβεστολίθου
	~	0,24	Κορήματα
Pfeiffer & Bowen (1989)	0,37-0,42	0,87-0,92	Λεία, σκληρή επιφάνεια σαν στρώσεις βράχου
	0,30-0,33	0,80-0,83	Κορήματα με βλάστηση
Gianni (1992), Barbieri et al. (1988)	0,50	0,95	Βράχος
	0,35	0,85	Βράχος με ογκόλιθους
Azzoni et al. (1992)	0,66	0,62	Ασβεστόλιθος
Gerber (1995)	0,17-0,43	0,45-0,88	Ασβεστόλιθος
Dorren et al. (2005)	0,77	0,36	Δασική περιοχή με μέση κλίση 38°
	0,70	0,26	Μη δασική περιοχή με μέση κλίση πρανών 38°
Antoniou & Lekkas (2008)	0,40	0,90	Άσφαλτος
Asteriou & Authimiou (2011)	0,22-0,52	0,77-0,97	Ασβεστόλιθος
Asteriou et al. (2013)	0,52	0,49	Μάρμαρο (Τύπος I)
	0,64	0,62	Μάρμαρο (Τύπος II)
	0,52	0,51	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος
	0,5	0,47	Ασβεστόλιθος

Ansari, Ahmad, Rajesh & Singh (2015)	0,41	0,59	Ασβεστόλιθος
	0,43	0,62	Μάρμαρο

Το επόμενο βήμα που πραγματοποιήθηκε ήταν ο καθορισμός των θέσεων εκκίνησης (seeders) και των αρχικών συνθηκών των καταπτώσεων. Οι θέσεις εκκίνησης των βραχοτεμαχίων καθορίστηκαν με βάση τις μετρήσεις από το G.P.S.. Οι όγκοι των βραχοτεμαχίων που κείτονται σε κάθε ζώνη μελέτης παρουσιάζονται με αντίστοιχα ιστογράμματα σε παρακάτω κεφάλαιο. Για τις προσομοιώσεις έγιναν οι παρακάτω ρυθμίσεις στο λογισμικό Rocfall.

- Οι αρχικές τιμές της γωνιακής και της γραμμικής ταχύτητας ήταν μηδενικές.
- Πραγματοποιήθηκαν στις διατομές προσομοιώσεις 50 ρίψεων.
- Για κάθε διατομή πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε 50 σημεία.
- Η γωνιακή ταχύτητα κατά την κίνηση υπολογίστηκε από το λογισμικό.

Για την ορθότερη παρουσίαση των συμπερασμάτων παρουσιάζεται για κάθε ζώνη, εκτός την ανάλυση με το πρόγραμμα και η ανάλυση επικινδυνότητας, καθώς και επιπλέον εργαλεία ανάλυσης για την Ζώνη II.

4.2 Ανάλυση Καταπτώσεων - Ζώνη I

Σύμφωνα με το τοπογραφικό διάγραμμα, το οποίο έχει παρουσιαστεί παραπάνω η ζώνη μελέτης I περιλαμβάνει το τμήμα του πρανούς που απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.1. Φωτογραφία Ζώνης I

Με βάση καταπτώσεις βραχοτεμαχίων που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, αλλά και σύμφωνα με την επί τόπου παρατήρηση των επικίνδυνων προς κατάπτωση, στο πεδίο, δημιουργήθηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας.

Ο πίνακας παρουσιάζει τους όγκους των βραχοτεμαχίων που εμφανίζονται στην Ζώνη Ι και ορισμένους εκ των οποίων χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του RockFall.

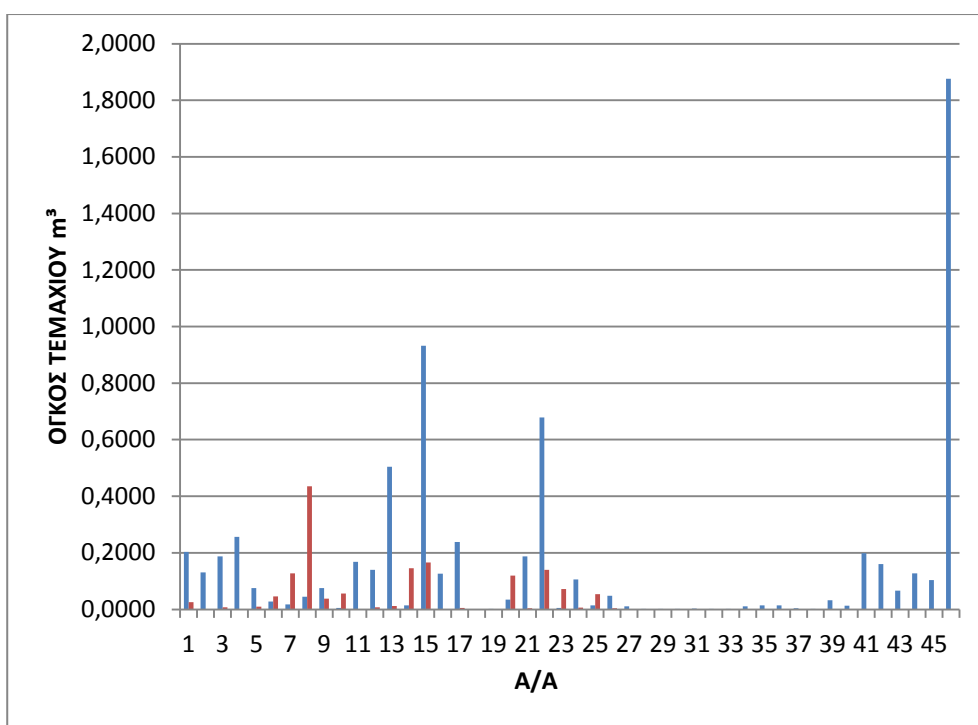
Αξίζει να σημειωθεί ότι καταπτώσεις, πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών και ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις.

Πίνακας 4.2. Πεσμένα και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης Ι.

ΖΩΝΗ Ι : ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ				ΖΩΝΗ Ι : ΠΕΣΜΕΝΑ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ	
A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³
1	0,2030	25	0,0336	1	0,0256
2	0,1303	26	0,1122	2	0,0006
3	0,1875	27	0,0147	3	0,0075
4	0,2564	28	0,0022	4	0,0008
5	0,0757	29	0,0109	5	0,0100
6	0,0280	30	0,0019	6	0,0457
7	0,0180	31	0,0014	7	0,1276
8	0,0442	32	0,0020	8	0,4357
9	0,0750	33	0,0007	9	0,0380
10	0,0056	34	0,0012	10	0,0565
11	0,1678	35	0,0019	11	0,0002
12	0,1400	36	0,0108	12	0,0076
13	0,5040	37	0,0142	13	0,0123
14	0,0147	38	0,0136	14	0,1454
15	0,9320	39	0,0042	15	0,1654
16	0,1267	40	0,0016	16	0,0001
17	0,2387	41	0,0321	17	0,0056
18	0,0009	42	0,0132	18	0,0007
19	0,0017	43	0,1985	19	0,0003
20	0,0348	44	0,1605	20	0,1200
21	0,1879	45	0,0664	21	0,0040
22	0,6784	46	0,1272	22	0,1400
23	0,0054			23	0,0720
24	0,1064			24	0,0064
				25	0,0542
				26	0,0043

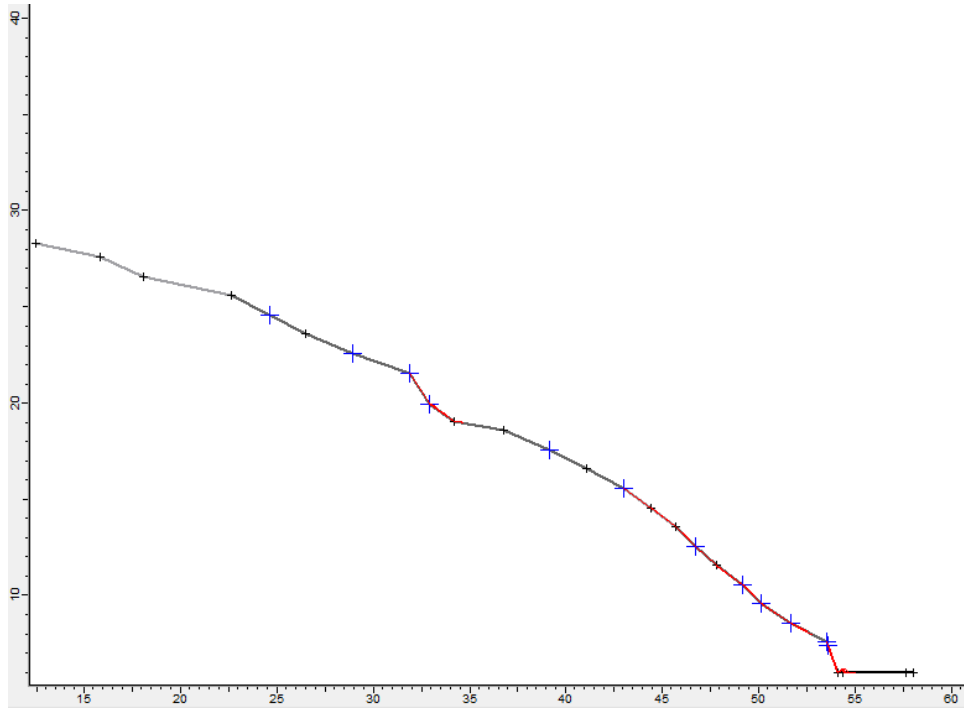
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο βραχοτεμάχος που έχει καταπέσει έχει όγκο περί τα $0,4\text{m}^3$, δηλαδή 1110kg περίπου. Τα υπόλοιπα τεμάχη είναι μικρών διαστάσεων και η κατάπτωσή τους δεν είχε κάποια σοβαρή συνέπεια. Αντίθετα, γίνεται αντιληπτόν ότι υπάρχουν τεμάχη αρκετά μεγάλων διαστάσεων, τα οποία και είναι επικίνδυνα δια να αποκολληθούν και να ολισθήσουν στα κατάντη. Επιπλέον, από την επί τόπου παρατήρηση, φαίνεται ότι τα επικίνδυνα τεμάχη κείτονται στην μέση περίπου του τμήματος του πρανούς. Η παρουσία των πεύκων δεν επηρεάζει την κίνηση των τεμαχίων.

Το ιστόγραμμα των καταπτώμενων βραχοτεμαχίων δίνει την εικόνα του μεγέθους των τεμαχίων που δύναται να καταπέσουν εκ νέου.



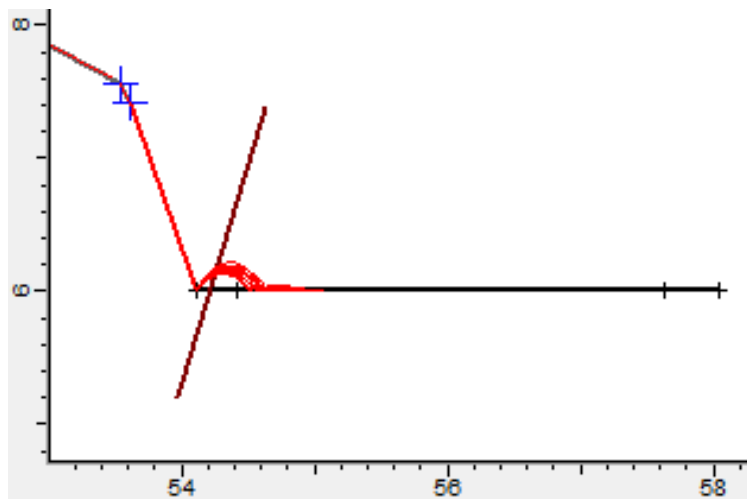
Διάγραμμα 4.1. Ιστόγραμμα πεσμένων και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης Ι.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα και με χρήση των μετρήσεων G.P.S. σχεδιάστηκαν οι δύο τομές, ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Παρακάτω, παρουσιάζεται η τομή με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Η δεύτερη τομή παρουσιάζεται στο παράρτημα. Η τομή που σχεδιασθηκε στο RockFall εμφανίζει την παρακάτω μορφή.



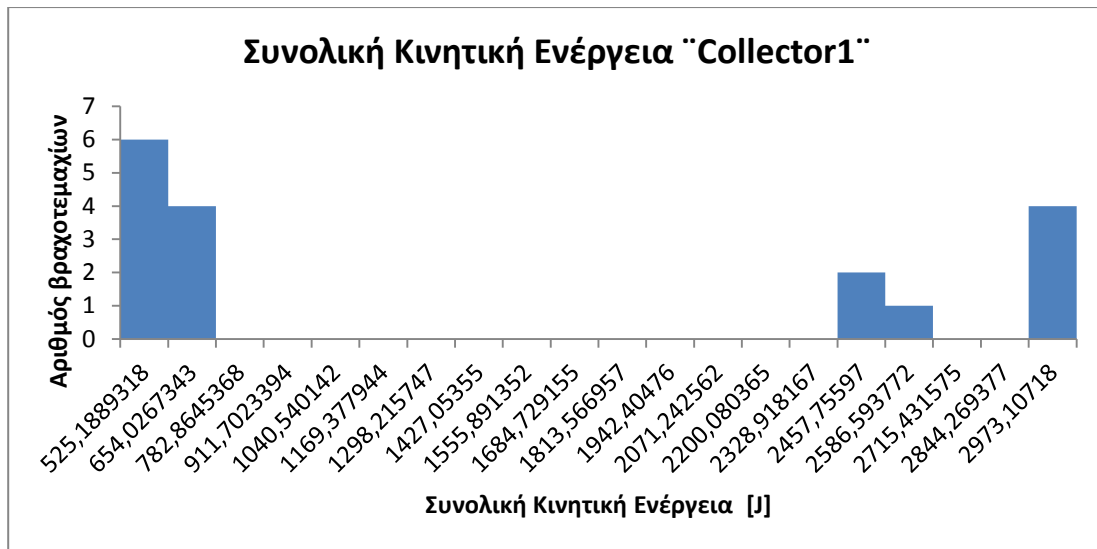
Εικόνα 4.2. Τομή ζώνης I (Rocfall).

Κατά την ανάλυση γίνεται αντιληπτόν, ότι εμφανίζονται τεμάχια στο δρόμο, μικρής όμως κινητικής ενέργειας.

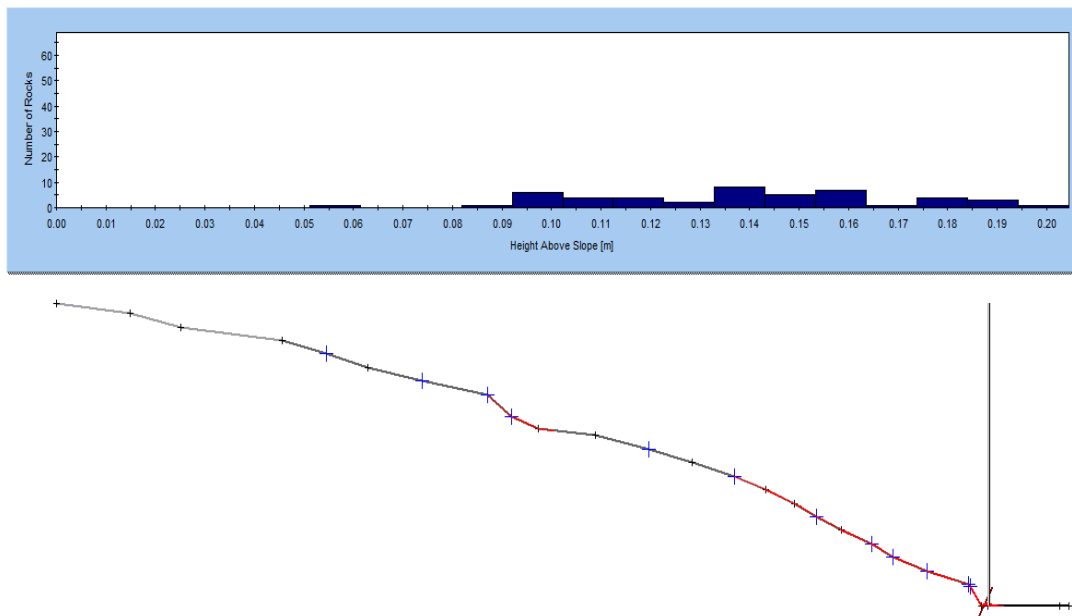


Εικόνα 4.3. Κατάντη Τομή ζώνης I (Rocfall).

Το παρακάτω διάγραμμα εμφανίζει τη συνολική κινητική ενέργεια κατάντη του τμήματος του πρανούς, δίπλα στο δρόμο.



Διάγραμμα 4.2. Ιστόγραμμα συνολικής κινητικής ενέργειας ζώνης I.



Εικόνα 4.4. Αναπήδηση βραχοτεμαχίων ζώνης I (Rocfall).

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η αναπήδηση των τεμαχίων, με τη μέγιστη αναπήδηση να εμφανίζεται στο πόδι του πρανούς. Το μέγιστο ύψος αναπήδησης βραχοτεμαχίου εμφανίζεται ανάντη του δρόμου και προσεγγίζει τα 25cm. Τα τεμάχια επομένως κατά την αστοχία εκτελούν κύλιση επί του πρανούς μέχρι να προσεγγίσουν το δρόμο. Σε όλο το υπόλοιπο μήκος του πρανούς η αναπήδηση των βραχοτεμαχίων είναι σχεδόν μηδενική. Το παραπάνω επιβεβαιώνει την ολίσθηση των τεμαχίων, όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή.

Πίνακας 4.3. Εκτίμηση επικινδυνότητας ζώνης Ι.

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING					SCORE (MULTIPLY RATING WITH WEIGHT FACTOR OF PARAMETER)
		25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60		
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60		0,7
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60	>60		1,2
Rating		10	30	60	100		
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfall from whole slope (H)		2,1
Rating		10	30	60	100		
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches,(helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches		0,9
Rating		10	30	60	100		
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation		No vegetation	4
Rating		10	30	60		100	
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm	Smooth planar or filling soft clay >5mm independent of roughness or extremely wide opening >100mm	0,9
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	0,75
Rating		10		15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high >10m	0,6
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (JCS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20		<5, weathered	0,3
Rating		10	30	60		100	
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60		>60MPa	1
Rating		10	30	60		100	
11. Rock mass blockiness / Block volume (m³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	0,6
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10		>10	0,6
Rating		10	30	60		100	
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions		Frequent Undermined conditions	0,2
Rating		10	30	60		100	
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36		2,4
Rating		10	30	60	100		
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No	1,5
Rating		10	15	30	60	100	
18. Rocfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous	0,75
Rating		10	15	30	60	100	
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult	3
Rating		10	15	30	60	100	
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas	6
Rating		10	15	30	60	100	
TOTAL SCORE (MAXIMUM 100)							31,1

Λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά του τμήματος του πρανούς, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επικινδυνότητας, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα. Το αποτέλεσμα που προέκυψε κατατάσει την Ζώνη Ι σε χαμηλής επικινδυνότητας (Low Risk). Το πρανές στο τμήμα αυτό έχει μικρό ύψος και η κλίση είναι 30° περίπου. Η επιφάνειά του είναι σχετικά εύκολα προσπελάσιμη. Η επέμβαση που πρέπει να γίνει στο τμήμα αυτό είναι περιορισμένη. Το πρανές στη Ζώνη Ι έχει χαμηλό υψόμετρο και η κλίση του είναι 30° περίπου.

4.3 Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη II

Σύμφωνα με το τοπογραφικό διάγραμμα, το οποίο έχει παρουσιαστεί παραπάνω η ζώνη μελέτης II περιλαμβάνει το τμήμα του πρανούς που απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.5. Φωτογραφία ζώνης II.

Οι αστοχίες τεμαχίων που έχουν προκληθεί στο τμήμα αυτό του πρανούς οφείλεται κυρίως σε επίπεδη ολίσθηση τους, από το μητρικό πρανές.

Όσον αφορά την κλίση του πρανούς λήφθηκε υπόψιν ότι στο τμήμα εμφάνισης των ασυνεχειών το πρανές σχηματίζει αναβαθμό με κλίση πιο έντονη από το υπολοιπο τμήμα του πρανούς.



Εικόνα 4.6. Φωτογραφία βραχομάζας ζώνης II.

Επιπλέον, από την επί τόπου παρατήρηση, φαίνεται ότι τα επικίνδυνα τεμάχια κείτονται στα ανάντη του τμήματος του πρανούς. Η παρουσία των πεύκων επηρεάζει την κίνηση των τεμαχίων και για το λόγο αυτό γίνεται παρακάτω ειδική ανάλυση.

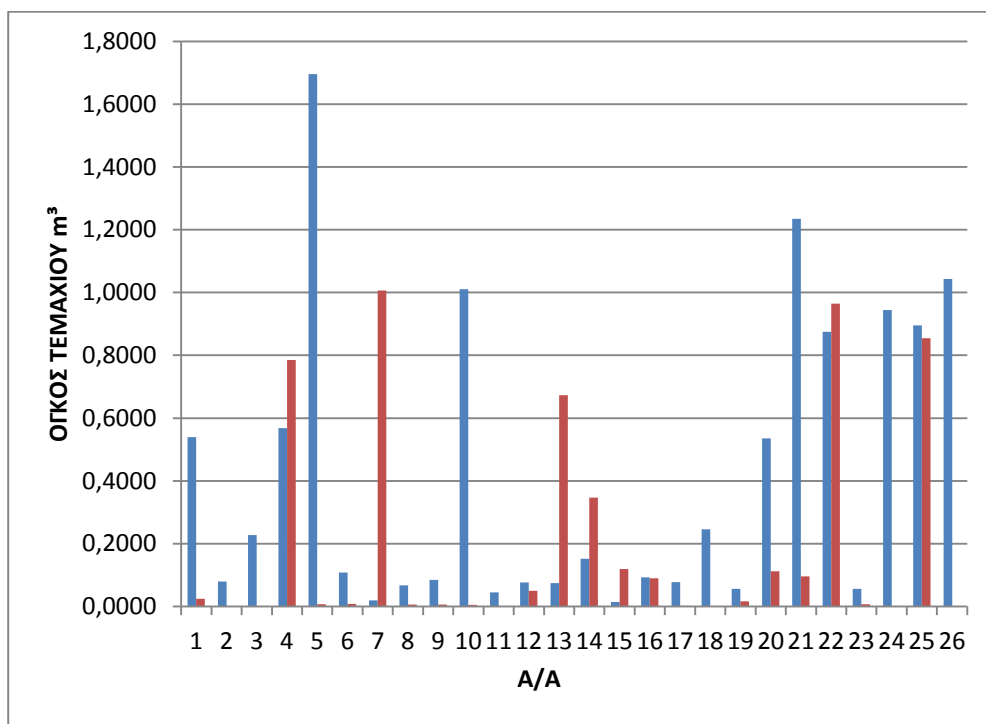
Πίνακας 4.4. Πεσμένα και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης II.

ΖΩΝΗ II : ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ		ΖΩΝΗ II : ΠΕΣΜΕΝΑ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ	
A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³
1	0,5398	1	0,0244
2	0,0800	2	0,0004
3	0,2280	3	0,0015
4	0,5684	4	0,7853
5	1,6960	5	0,0070
6	0,1080	6	0,0080
7	0,0196	7	1,0065
8	0,0678	8	0,0067
9	0,0845	9	0,0064
10	1,0100	10	0,0053
11	0,0456	11	0,0006
12	0,0763	12	0,0500
13	0,0745	13	0,6730
14	0,1520	14	0,3468
15	0,0147	15	0,1200
16	0,0927	16	0,0900
17	0,0782	17	0,0023

18	0,2457
19	0,0567
20	0,5350
21	1,2345
22	0,8750
23	0,0563
24	0,9438
25	0,8953
26	1,0433

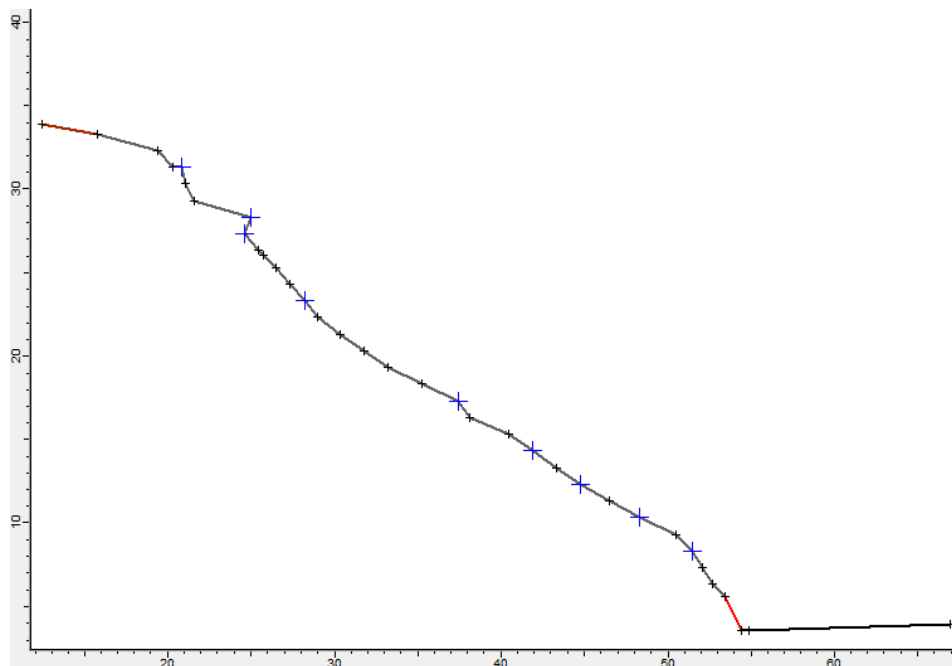
18	0,0005
19	0,0167
20	0,1123
21	0,0962
22	0,9643
23	0,0070
24	0,0009
25	0,8543

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο βραχοτεμάχος που έχει καταπέσει έχει όγκο περί τα $1,0\text{m}^3$, δηλαδή 2500kg περίπου. Τα υπόλοιπα τεμάχη φτάνουν σε όγκο το $1,0\text{m}^3$. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτόν ότι υπάρχουν τεμάχη αρκετά μεγάλων διαστάσεων, τα οποία είναι επικίνδυνα να προκαλέσουν κάποιο τραυματισμό ή υλική ζημιά στα σταθμευμένα οχήματα. Τέλος, το ιστόγραμμα των καταπτώμενων βραχοτεμαχίων δίνει την εικόνα του μεγέθους των τεμαχίων που δύναται να καταπέσουν εκ νέου.



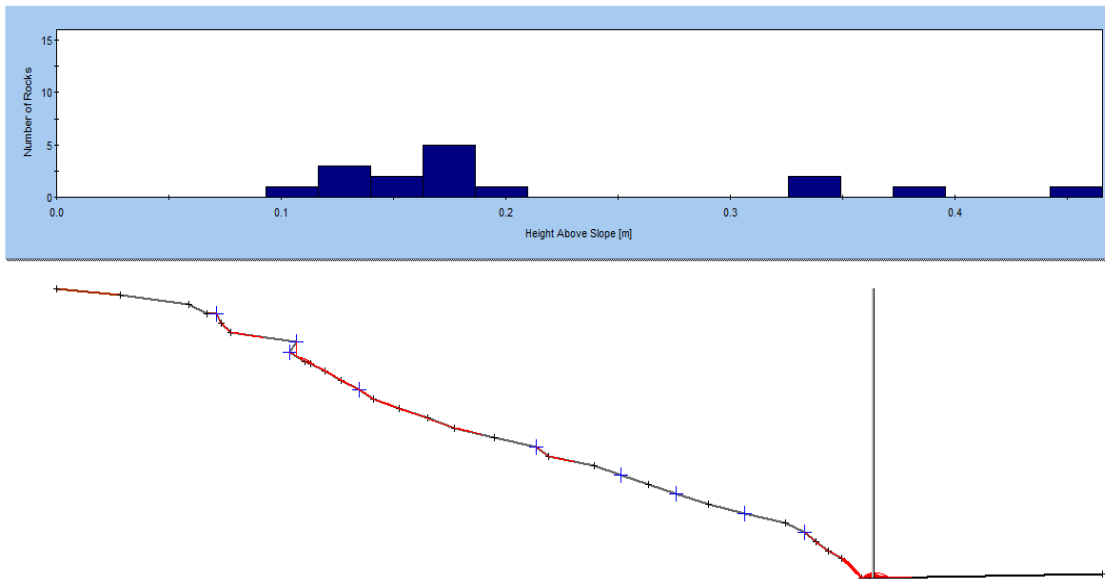
Διάγραμμα 4.3. Ιστόγραμμα πεσμένων και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης II.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα και με χρήση των μετρήσεων G.P.S. σχεδιάστηκαν οι δύο τομές, ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Παρακάτω, παρουσιάζεται η τομή με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Η δεύτερη τομή παρουσιάζεται στο παράρτημα. Η τομή που σχεδιαστηκε στο RockFall εμφανίζει την παρακάτω μορφή.



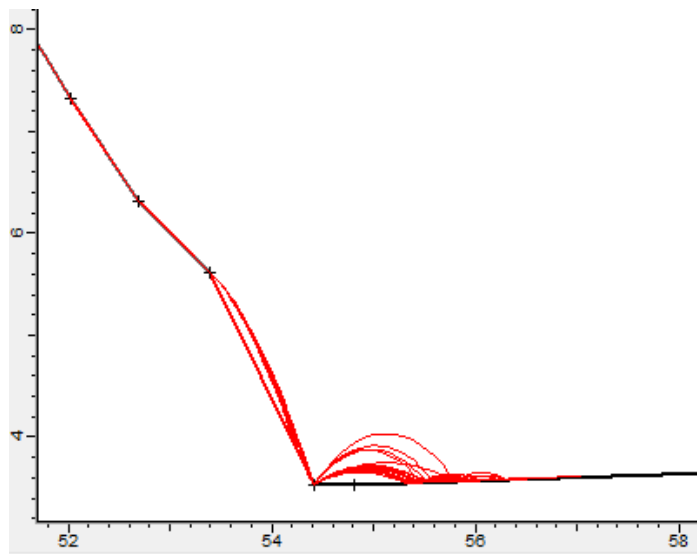
Εικόνα 4.7. Χαρακτηριστική τομή ζώνης II (Rocfall).

Από την ανάλυση φαίνεται ότι η μέγιστη αναπήδηση του βραχοτεμαχίου, πραγματοποιείται στα κατάντη του πρανούς. Η αναπήδηση φτάνει τα 55cm και καταλήγει εντός του οδικού δικτύου.



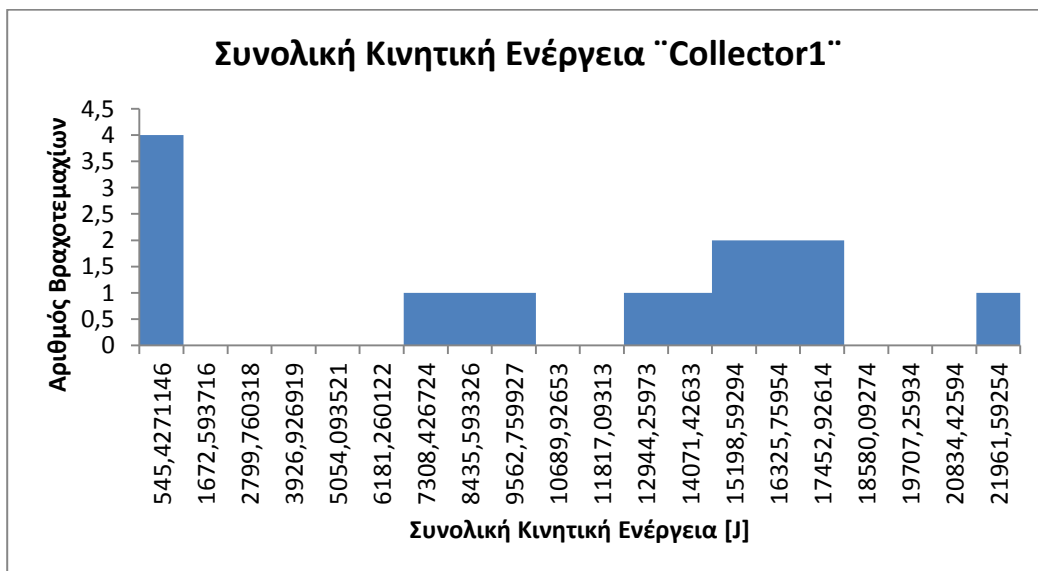
Εικόνα 4.8. Αναπήδηση βραχοτεμαχίων ζώνης II (Rocfall).

Παρακάτω, εμφανίζονται οι τροχιές των βραχοτεμαχίων στο πόδι του πρανούς.



Εικόνα 4.9. Χαρακτηριστική τομή αναπήδησης ζώνης II στα κατάντη (Rocfall).

Το παρακάτω διάγραμμα εμφανίζει τη συνολική κινητική ενέργεια κατάντη του τμήματος του πρανούς, δίπλα στο δρόμο.



Διάγραμμα 4.4. Ιστόγραμμα συνολικής κινητικής ενέργειας ζώνης II.

Παρατηρούμε, ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια προσεγγίζει τα 22 KJ. Τα τεμάχια φτάνουν στο όριο του δρόμου με τα αποτελέσματα των καταπτώσεων αυτών να είναι υλικές ζημιές και τραυματισμοί.

Δια την ορθότερη επεξεργασία των δεδομένων θα γίνει ξεχωριστή ανάλυση για την παρουσία των πεύκων που κείτονται στην Ζώνη αυτή. Οι κορμοί των πεύκων έχουν περίμετρο περί τα 140cm. Οι κορμοί αποτελούν φυσικά εμπόδια στην κύλιση-ολίσθηση των βραχοτεμαχίων και πολλές φορές ανακόπτουν την πορεία τους.

Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω, αρχικά εκτιμά το βαθμό προστασίας του δάσους από τις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων. Ο βαθμός προστασίας είναι το ποσοστό των βράχων που σταματάνε την καθοδική τους πορεία από την παρουσία των πεύκων που κείτονται στο πρανές.

Για να ξεκινήσει η ανάλυση, συμπληρώνονται τα παρακάτω στοιχεία. Οι διαστάσεις του βραχοτεμαχίου είναι ενδεικτικές και αφορούν ένα μέσο μέγεθος τεμάχους.

Πίνακας 4.5. Δεδομένα ανάλυσης για το βαθμό προστασίας του δάσους της ζώνης II.

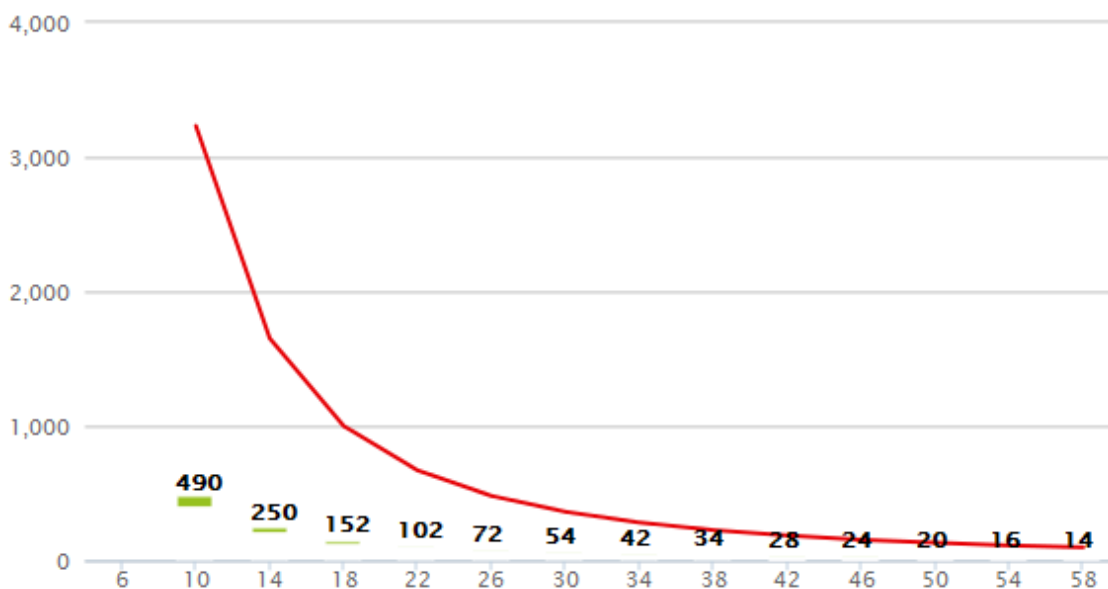
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	
Διαστάσεις Βραχοτεμαχίου (m)	1x1x1
Ειδικό Βάρος Βραχομάζας (kg/m ³)	2500
Σχήμα Βραχοτεμαχίου	Παραλληλόγραμμο
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΑΝΟΥΣ	
Μέση κλίση πρανούς (°)	34
Ύψος του γκρεμού (m)	20
Μήκος του πρανούς καλυμμένο με πεύκα (m)	29
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΑΣΟΥΣ	
Μέση πυκνότητα (1/ha)	90
Μέση διάμετρος στο ύψος του στήθους (cm)	40
% πεύκων	100

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνεται ότι η παρουσία πεύκων στη ζώνη II του πρανούς προσφέρουν 25% προστασία από τις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων.

Αναλυτικότερα προκύπτει ότι το πευκοδάσος καλύπτει μία έκταση 11m²/ha και το βραχοτεμάχιο έχει βάρος 2500kg. Η μέγιστη ενέργεια προς το δάσος είναι περί τα 500kJ. Η ιδανική κάλυψη των πεύκων στο πρανές πρέπει να είναι περί τα 50 m²/ha ενώ η ελάχιστη φτάνει τα 45 m²/ha.

Για να έχουμε προστασία σε απόλυτο βαθμό από τις καταπτώσεις των βραχοτεμαχίων το πευκοδάσος θα πρέπει να προσεγγίζει τα 330 m²/ha.

Τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν την προστασία του πρανούς από βραχοτεμάχιο όγκου περί τα 1m³. Για βραχοτεμάχια μικρότερου όγκου η κάλυψη του πευκοδάσους θα είναι μικρότερη.



Διάγραμμα 4.5. Αριθμός δέντρων ανά εκτάριο – διάμετρος δέντρων

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει για συγκεκριμένη διάμετρο των δέντρων τον αριθμό των απαιτούμενων δέντρων που χρειάζονται για να ανακοπεί η κίνηση των βραχοτεμαχίων.

Επομένως, ενδεχόμενη φύτευση πεύκων θα βοηθήσουν το τμήμα αυτό του πρανούς από τις καταπτώσεις βραχοτεμαχίων. Τα βραχοτεμάχια θα σταματάνε στους κορμούς των πεύκων.

Τέλος, όσον αφορά την ανάλυση της επικινδυνότητας, λαμβάνοντας υπ'όψιν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζώνης, προκύπτει ότι απαιτούνται ελαφριές επεμβάσεις για την ανατροπή των καταπτώσεων (Medium Risk). Το πρανές στο τμήμα αυτό έχει ύψος 30m περίπου και η κλίση του είναι 34°. Η προσβασιμότητα στο τμήμα αυτό είναι αρκετά δύσκολη και η καταρροή υλικού είναι συνεχή.

Πίνακας 4.5. Εκτίμηση επικινδυνότητας ζώνης II.

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING					SCORE (MULTIPLY RATING WITH WEIGHT FACTOR OF PARAMETER)
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60 Overhanging		2,1
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60		>60	2,4
Rating		10	30	60		100	
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)		Rockfall from whole slope (H)	4,2
Rating		10	30	60		100	
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches,(helps bouncing)		Very rough, presence of narrow benches	0,9
Rating		10	30	60		100	
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation		No vegetation	0,4
Rating		10	30	60		100	
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm	Smooth planar or filling soft clay >5mm independent of roughness or extremely wide opening >100mm	0,9
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	0,75
Rating		10		15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high > 10m	0,6
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (JCS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20		<5, weathered	0,3
Rating		10	30	60		100	
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60		>60MPa	1
Rating		10	30	60		100	
11. Rock mass blockiness / Block volume (m ³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	2,4
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10		>10	0,6
Rating		10	30	60		100	
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions		Frequent Undermined conditions	0,2
Rating		10	30	60		100	
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36		2,4
Rating		10	30	60	100		
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No	1,5
Rating		10	15	30	60	100	
18. Rocfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous	1,5
Rating		10	15	30	60	100	
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult	5
Rating		10	15	30	60	100	
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas	12
Rating		10	15	30	60	100	
TOTAL SCORE (MAXIMUM 100)							42,75

4.4 Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη III

Σύμφωνα με το τοπογραφικό διάγραμμα, το οποίο έχει παρουσιαστεί παραπάνω η Ζώνη Μελέτης III περιλαμβάνει το τμήμα του πρανούς που απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.10. Χαρακτηριστική φωτογραφία βραχομάζας ζώνης III.

Γίνεται αντιληπτό, ότι τα τεμάχια είναι μεγάλου όγκου και σε συνδιασμό με την μεγάλη κλίση του τμήματος του πρανούς πραγματοποιούνται πολλές καταπτώσεις προκαλώντας ζημιές σε αυτοκίνητα και σε μαγαζιά που βρίσκονται στα καταντη, όπως έγινε αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η βραχομάζα στο τμήμα αυτό είναι χαμηλότερης μηχανικής αντοχής και τμηματικά αποσαθρωμένη οδηγώντας τελικώς σε καταπτώσεις τεμαχίων.

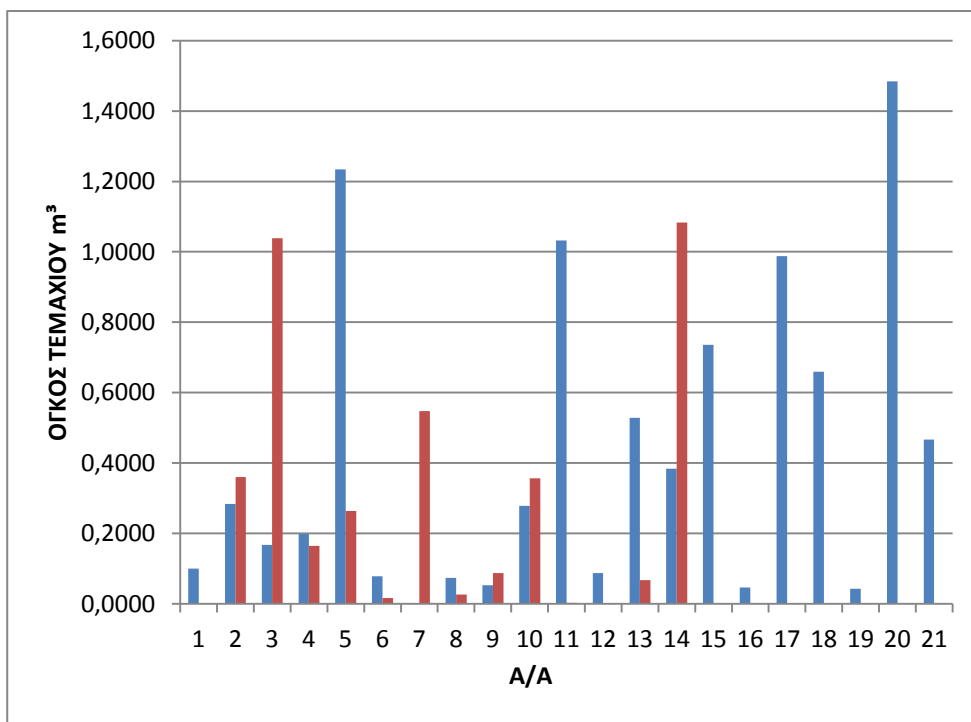
Πίνακας 4.6. Πεσμένα και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης III.

ΖΩΝΗ III : ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ		ΖΩΝΗ III : ΠΕΣΜΕΝΑ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ	
A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m ³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m ³
1	0,1000	1	0,0002
2	0,2840	2	0,3600
3	0,1678	3	1,0387
4	0,1987	4	0,1653

5	1,2344
6	0,0787
7	0,0024
8	0,0743
9	0,0534
10	0,2787
11	1,0323
12	0,0878
13	0,5288
14	0,3840
15	0,7357
16	0,0467
17	0,9874
18	0,6599
19	0,0428
20	1,4838
21	0,4667

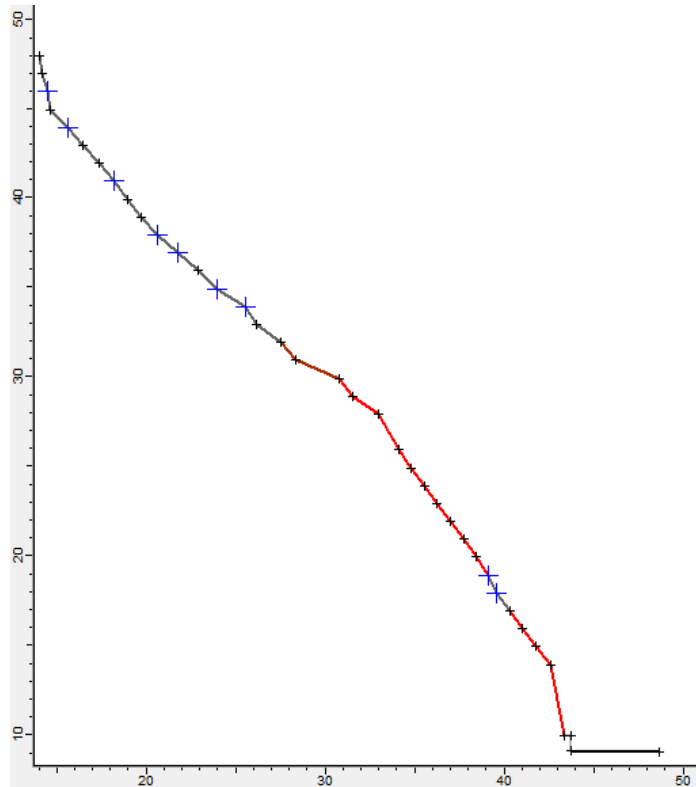
5	0,2644
6	0,0167
7	0,5473
8	0,0263
9	0,0877
10	0,3568
11	0,0034
12	0,0004
13	0,0675
14	1,0830

Στο ιστόγραμμα παρακάτω, εμφανίζονται οι διακυμάνσεις του όγκου στα βραχοτεμάχια. Ο όγκος των επικίνδυνων βραχοτεμαχίων ποικίλει. Ο μέγιστος όγκος τεμαχίου προσεγγίζει το 1,5m³.

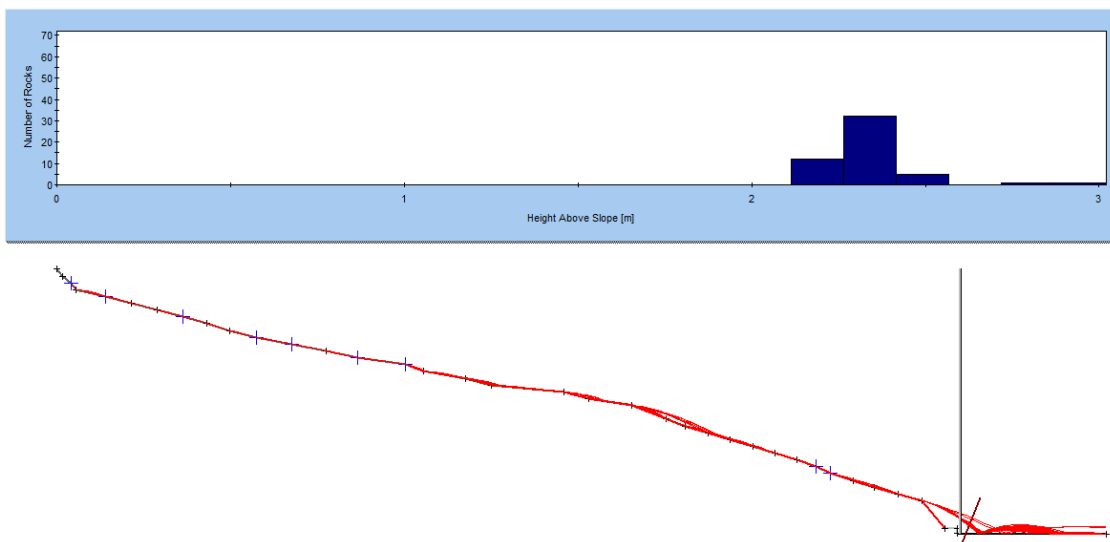


Διάγραμμα 4.5. Ιστόγραμμα πεσμένων και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης III.

Με βάση τα παραπάνω σε συνδιασμό με τις μετρήσεις G.P.S. σχεδιάστηκε η παρακάτω τομή στο RockFall. Τα περισσότερα βραχοτεμάχια αστοχούν από περιοχή ανάντη του πρανούς ενώ στα κατάντη εμφανίζονται στρώσεις αποσαθρωμένου φυλλίτη, που οδηγούν τα μεγάλα τεμάχια ασβεστολίθου σε αστοχία.



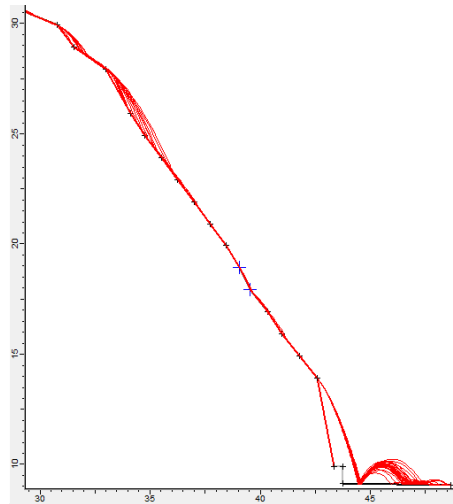
Εικόνα 4.11. Χαρακτηριστική τομή ζώνης II (Rocfall).



Εικόνα 4.12. Αναπήδηση βραχοτεμαχίων ζώνης III (Rocfall).

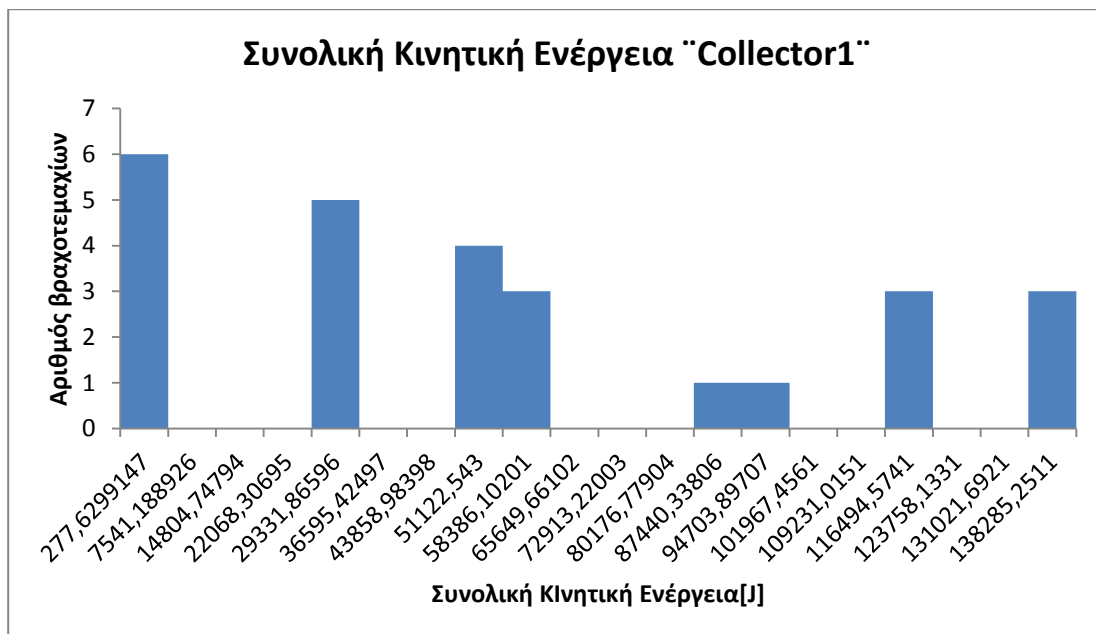
Σύμφωνα με την ανάλυση, η μέγιστη αναπήδηση που προκύπτει είναι περί τα 3m και εμφανίζεται στο πόδι του πρανούς. Παράλληλα, εμφανίζεται αναπήδηση τεμαχίων και στα ανάντη του πρανούς, αυξάνοντας το κίνδυνο περισσότερων καταπτώσεων.

Τα βραχοτεμάχια ξεπερνούν το προστατευτικό τοίχειο, το οποίο έχει κατασκευαστεί στο πόδι του πρανούς και καταλήγουν στο οδικό δίκτυο.



Εικόνα 4.13. Λεπτομέρεια Αναπήδησης κατάντη ζώνης III (Rocfall).

Οι τιμές της κινητικής ενέργειας των τεμαχίων που καταλήγουν στο δρόμο έχουν αυξηθεί σημαντικά σε σύγκριση με τις προηγούμενες αναλύσεις. Οι τιμές αυτές της κινητικής ενέργειας επαληθεύουν το μεγάλο αριθμό καταπτώσεων που έχει πραγματοποιηθεί στο τμήμα αυτό το πρανούς.



Διάγραμμα 4.6. Ιστόγραμμα συνολικής κινητικής ενέργειας ζώνης III.

Πίνακας 4.7. Εκτίμηση επικινδυνότητας ζώνης III.

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING					SCORE (MULTIPLY RATING WITH WEIGHT FACTOR OF PARAMETER)
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60 Overhanging		2,1
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60	>60		2,4
Rating		10	30	60	100		
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfall from whole slope (H)		7
Rating		10	30	60	100		
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches,(helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches		1,8
Rating		10	30	60	100		
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation	No vegetation		4
Rating		10	30	60	100		
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm	Smooth planar or filling soft clay >5mm independent of roughness or extremely wide opening >100mm	0,9
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	0,75
Rating		10		15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high >10m	1,2
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (JCS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20		<5, weathered	0,3
Rating		10	30	60		100	
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60		>60MPa	0,6
Rating		10	30	60		100	
11. Rock mass blockiness / Block volume (m³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	0,6
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10		>10	0,6
Rating		10	30	60		100	
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions		Frequent Undermined conditions	0,2
Rating		10	30	60		100	
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36		2,4
Rating		10	30	60	100		
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No	3
Rating		10	15	30	60	100	
18. Rocfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous	3
Rating		10	15	30	60	100	
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult	5
Rating		10	15	30	60	100	
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas	20
Rating		10	15	30	60	100	
TOTAL SCORE (MAXIMUM 100)							59,45

Παραπάνω, εμφανίζεται η ανάλυση επικινδυνότητας για την Ζώνη III του πρανούς. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης ήταν μεσαία προς μεγάλη επικινδυνότητα για βραχοπτώσεις (Medium- High Risk).

Η διαφορετικότητα της ζώνης III σε σύγκριση με τις προηγούμενες είναι η μεγαλύτερη παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας, επομένως αυξάνει ο κίνδυνος ατυχήματος, αλλά και η παρουσία του αποσαθρωμένου φυλλίτη πάνω στον οποίο κείτεται τα τεμάχια ασβεστολίθου.

Επιπροσθέτως, το ύψος του πρανούς προσεγγίζει τα 45m και η κλίση του τις 54°. Η προσβασιμότητα σε αυτό το τμήμα είναι αδύνατη, όπως φαίνεται και με το φωτογραφικό υλικό που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

4.5 Ανάλυση Καταπτώσεων – Ζώνη IV

Η Ζώνη IV, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να διαιρεθεί σε δύο υποζώνες IV_a, IV_b.

Με βάση καταγεγραμμένα περιστατικά καταπτώσεων αλλά και με την επί τόπου παρατήρηση, όπως και στις προηγούμενες ζώνες, δημιουργήθηκαν οι πίνακες με τα επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια και αυτά που έχουν ήδη πέσει.

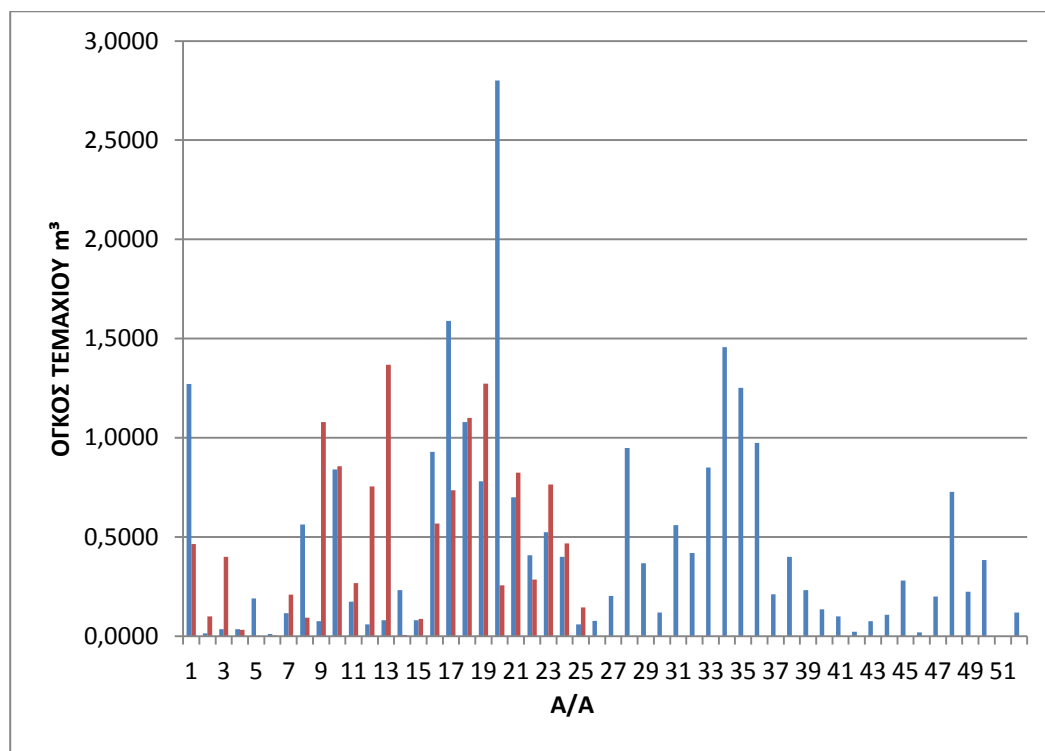
Πίνακας 4.8. Πεσμένα και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης IV.

ΖΩΝΗ IV : ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ				ΖΩΝΗ IV : ΠΕΣΜΕΝΑ ΒΡΑΧΟΤΕΜΑΧΙΑ	
A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³	A/A	ΟΓΚΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ m³
1	1,2720	27	0,2040	1	0,4650
2	0,0144	28	0,9480	2	0,1000
3	0,0350	29	0,3680	3	0,4000
4	0,0360	30	0,1200	4	0,0320
5	0,1900	31	0,5600	5	0,0024
6	0,0120	32	0,4200	6	0,0040
7	0,1160	33	0,8500	7	0,2100
8	0,5628	34	1,4570	8	0,0930
9	0,0760	35	1,2514	9	1,0800
10	0,8400	36	0,9743	10	0,8560
11	0,1750	37	0,2112	11	0,2679
12	0,0600	38	0,4000	12	0,7543
13	0,0800	39	0,2320	13	1,3678
14	0,2320	40	0,1360	14	0,0066

15	0,0800	41	0,1000	15	0,0875
16	0,9300	42	0,0225	16	0,5678
17	1,5890	43	0,0760	17	0,7355
18	1,0800	44	0,1080	18	1,1000
19	0,7805	45	0,2800	19	1,2735
20	2,8000	46	0,0200	20	0,2571
21	0,7000	47	0,2000	21	0,8237
22	0,4080	48	0,7280	22	0,2850
23	0,5250	49	0,2240	23	0,7654
24	0,4	50	0,3835	24	0,4678
25	0,0600	51	0,0020	25	0,1447
26	0,0775	52	0,1200		

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα η Ζώνη IV έχει επικίνδυνα τεμάχια μεγάλου όγκου με το μεγαλύτερο να ξεπερνάει τα 2,5m³.

Στο τμήμα αυτό κείτονται τεμάχια τα οποία δεν έχουν καταγραφεί εξαιτίας της δύσκολης προσβασης στα ανάντη.



Διάγραμμα 4.7. Ιστόγραμμα πεσμένων και επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια ζώνης IV.

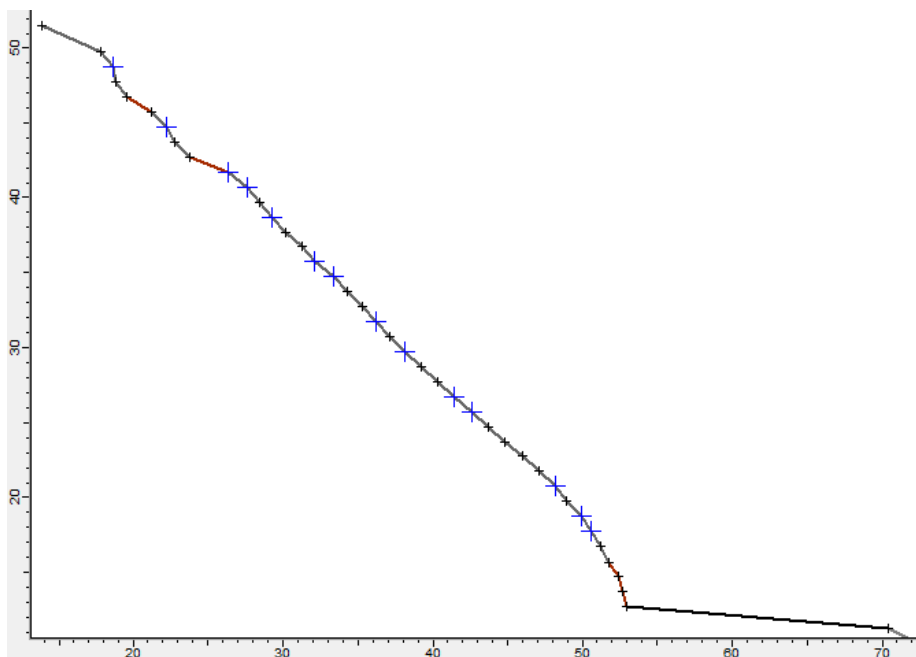
4.5.1 Ανάλυση Καταπτώσεων - Ζώνη IV_a

Η Ζώνη IV_a βρίσκεται πάνω από την προβλήτα του λιμανιού της Χώρας Σφακίων. Το ανάγλυφο του πρανούς παρουσιάζει ανομοιομορφίες με αλλαγές κλίσεων, εμφάνιση «πλατεό».

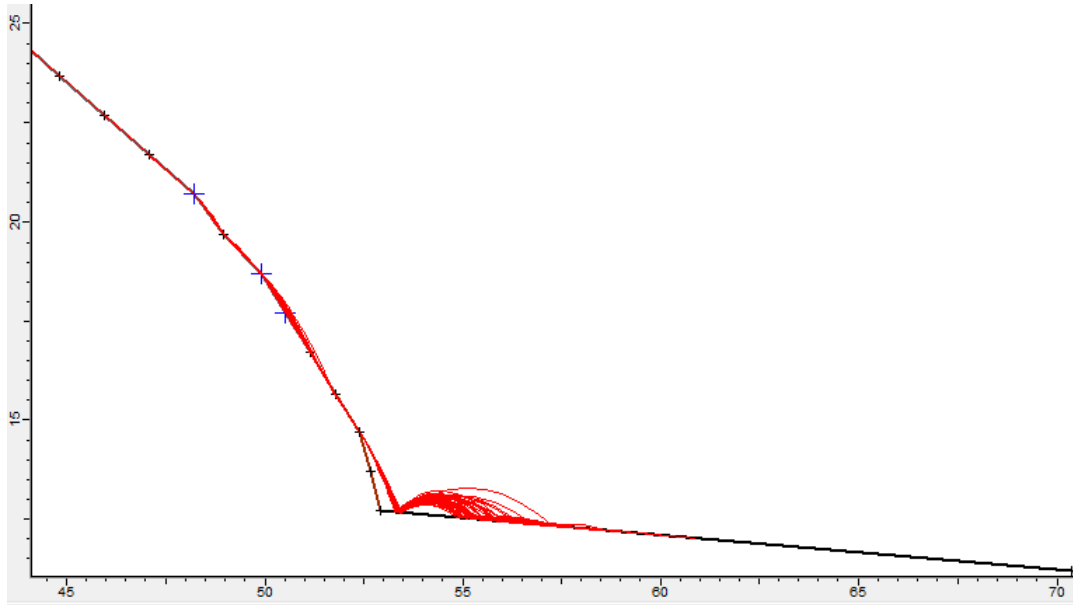


Εικόνα 4.14. Χαρακτηριστική φωτογραφία βραχομάζας ζώνης IV_a.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω και με χρήση του G.P.S. δημιουργήθηκε η παρακάτω χαρακτηριστική τομή στο RockFall.

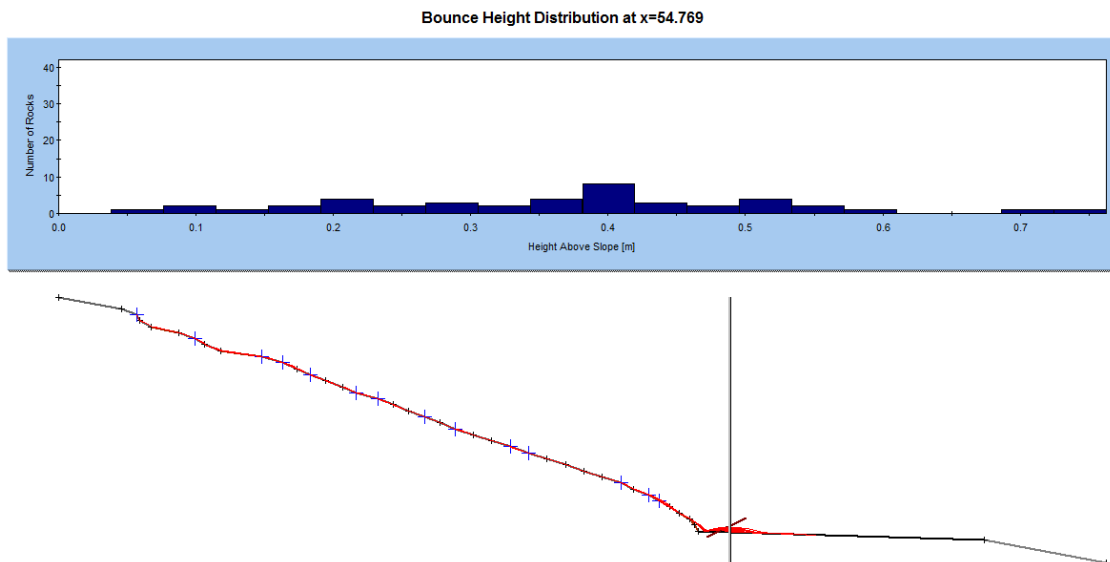


Εικόνα 4.15. Χαρακτηριστική τομή ζώνης IV_a (Rockfall).



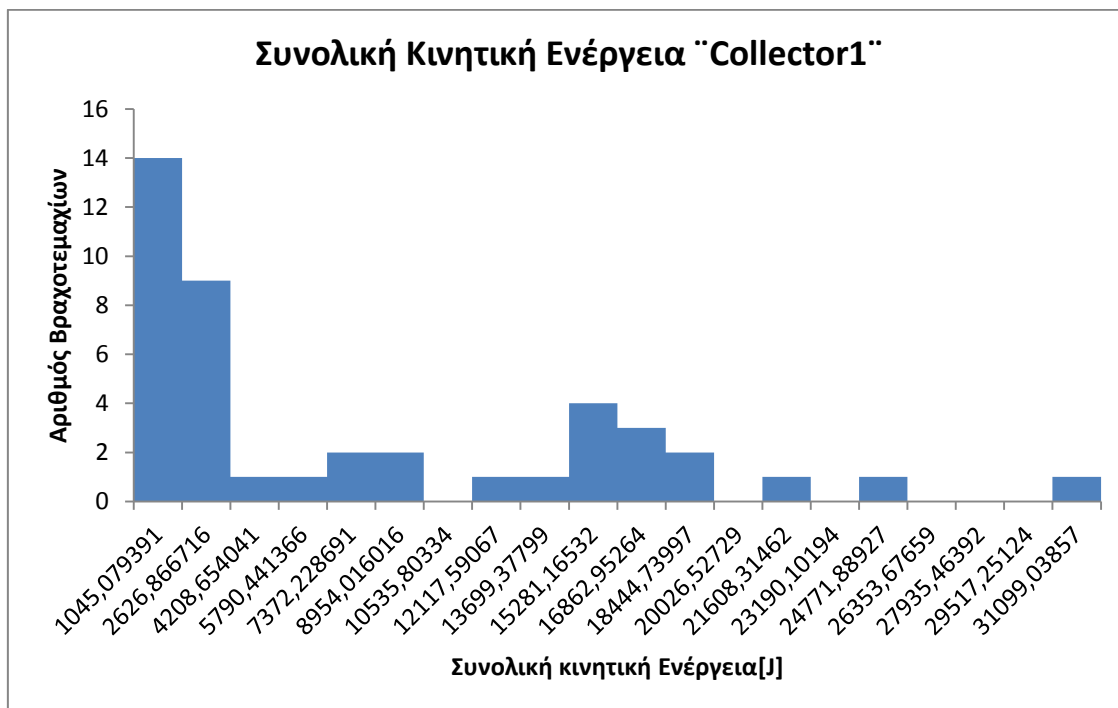
Εικόνα 4.16. Λεπτομέρεια αναπήδησης κατάντη ζώνης IVa (Rocfall).

Η μέγιστη αναπήδηση των βραχοτεμαχίων εμφανίζεται στο πόδι του πρανούς με τιμές στα 60cm. Η αναπήδηση εμφανίζεται στο οδικό δίκτυο.



Εικόνα 4.17. Ύψος αναπήδησης βραχοτεμαχίων ζώνης IVa (Rocfall).

Παρακάτω εμφανίζεται η συνολική κινητική ενέργεια των βραχοτεμαχίων στην περιοχή που έχουν μέγιστη αναπήδηση (πόδι πρανούς). Η ενέργεια που προκύπτει είναι αρκετά μεγάλη και επιβεβαιώνει τις καταπτώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί.



Εικόνα 4.8. Συνολική κινητική ενέργεια βραχοτεμαχίων ζώνης IVa (Rocfall).

Το πρανές στο τμήμα αυτό έχει κλίση περίπου 45° και το ύψος προσεγγίζει 40m. Η προσβασιμότητα στο πρανές είναι πρακτικά αδύνατη και οι συχνές βροχοπτώσεις διευκολύνουν στις καταπτώσεις. Κατάλη του πρανούς εμφανίζεται ανθρώπινη δραστηριότητα.

Σύμφωνα με την ανάλυση επικινδυνότητας προκύπτει υψηλός κίνδυνος για καταπτώσεις βραχοτεμαχίων (High Risk). Εξαιτίας της δυσκολίας πρόσβασης στο πρανές υπάρχουν αρκετά επικίνδυνα προς κατάπτωση βραχοτεμάχια τα οποία δεν ήταν δυνατή η χαρτογράφησή τους.

Επομένως, πρέπει να γίνουν ενέργειες ώστε να ληφθούν μέτρα ανάσχεσης. Αναλυτικά παρουσιάζονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

Πίνακας 4.9. Εκτίμηση επικινδυνότητας ζώνης ΙVa.

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING					SCORE (MULTIPLY RATING WITH WEIGHT FACTOR OF PARAMETER)
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60 Overhanging		2,1
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60	>60		2,4
Rating		10	30	60	100		
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfall from whole slope (H)		7
Rating		10	30	60	100		
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches, (helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches		1,8
Rating		10	30	60	100		
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation	No vegetation		4
Rating		10	30	60	100		
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm	Smooth planar or filling soft clay >5mm independent of roughness or extremely wide opening >100mm	0,9
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	0,75
Rating		10		15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high > 10m	1,2
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (ICS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20	<5, weathered		0,3
Rating		10	30	60	100		
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60	>60MPa		0,6
Rating		10	30	60	100		
11. Rock mass blockiness / Block volume (m³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	1,2
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10	>10		1,2
Rating		10	30	60	100		
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions	Frequent Undermined conditions		0,2
Rating		10	30	60	100		
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36		2,4
Rating		10	30	60	100		
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No	3
Rating		10	15	30	60	100	
18. Rockfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous	3
Rating		10	15	30	60	100	
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult	5
Rating		10	15	30	60	100	
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas	20
Rating		10	15	30	60	100	
TOTAL SCORE (MAXIMUM 100)							60,65

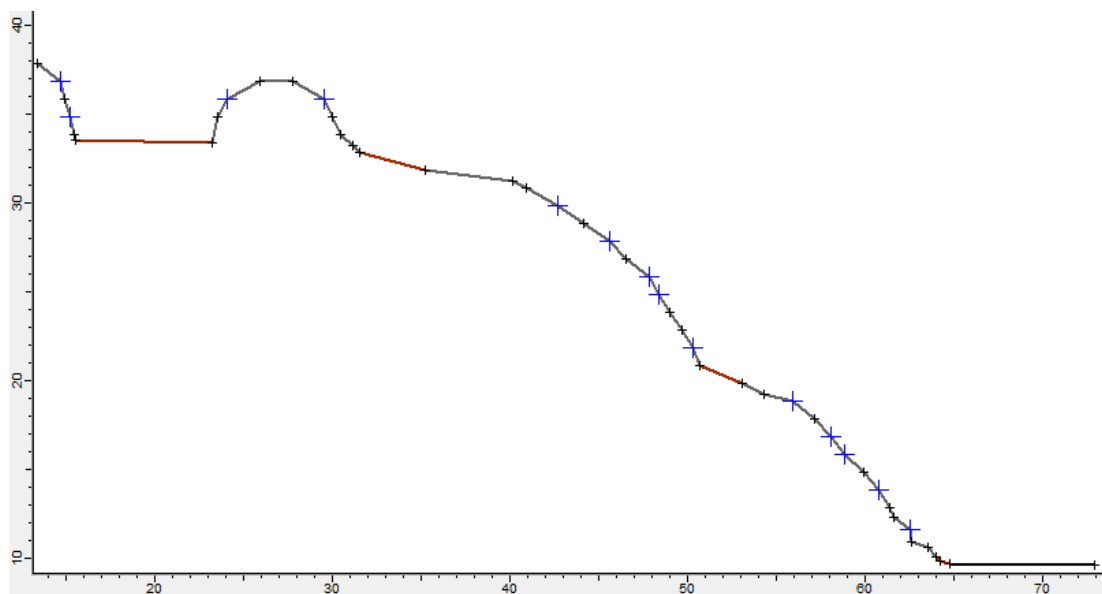
4.5.2 Ανάλυση Καταπτώσεων - Ζώνη IV_b

Η Ζώνη IV_b βρίσκεται αμέσως μετά την προβλήτα του λιμανιού της Χώρας Σφακίων. Το ανάγλυφο του πρανούς παρουσιάζει, όπως και στη Ζώνη IV_b, ανομοιομορφίες. Παρακάτω εμφανίζεται χαρακτηριστική φωτογραφία της υποζώνης.

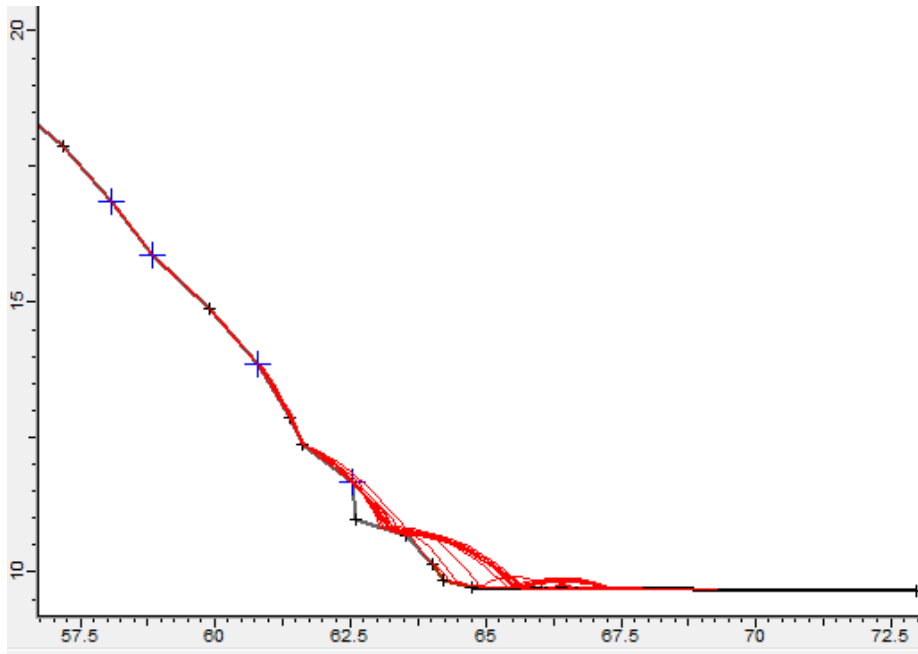


Εικόνα 4.18. Φωτογραφία Ζώνης IV_b

Όπως σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, με βάση το τοπογραφικό διάγραμμα και τα δεδομένα από το G.P.S. σχεδιάστηκε μία χαρακτηριστική τομή της ζώνης, όπως φαίνεται παρακάτω.

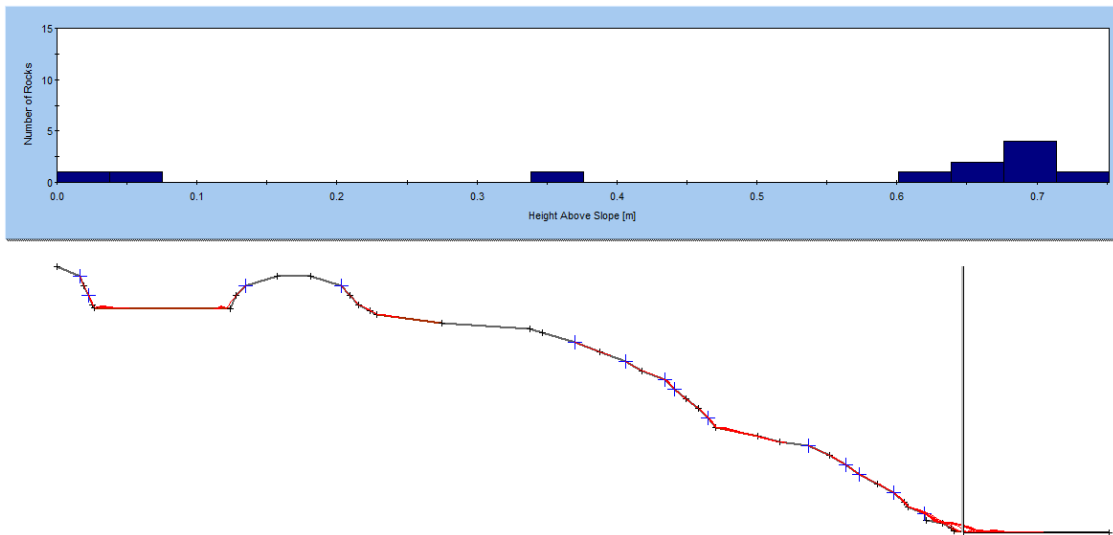


Εικόνα 4.19. Χαρακτηριστική τομή ζώνης IV_b (Rocfall).



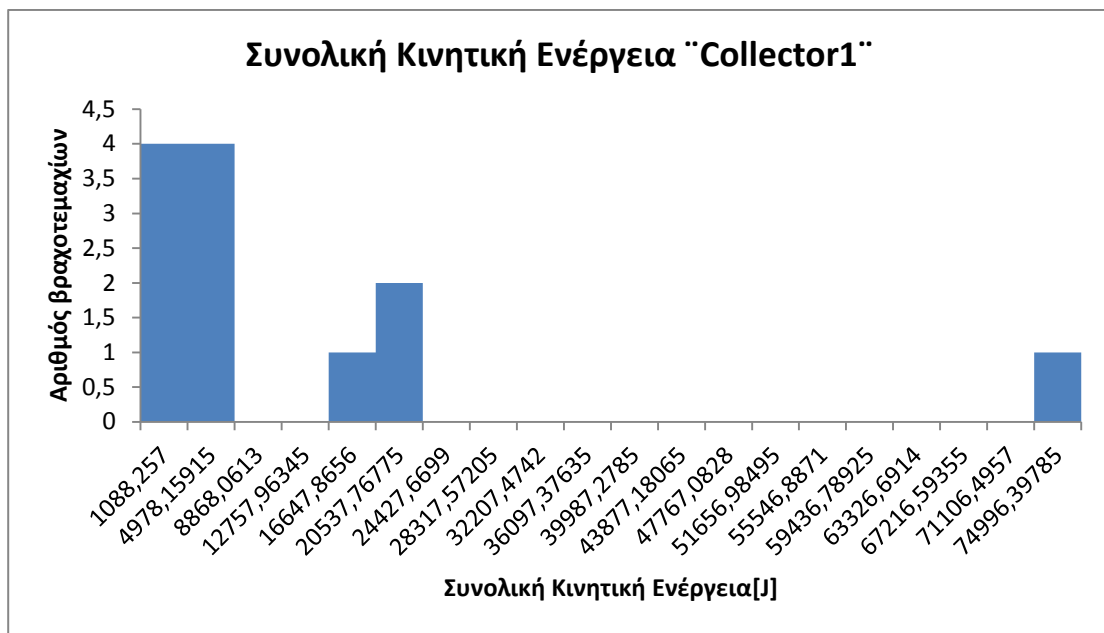
Εικόνα 4.20.Λεπτομέρεια αναπήδησης κατάντη ζώνης IVb (Rocfall).

Η μέγιστη αναπήδηση πραγματοποιείται στο πόδι του πρανούς και είναι 70cm. Οι ανομοιομορφίες στην κλίση του πρανούς διευκολύνουν την αναπήδηση. Στα υπόλοιπα σημεία του πρανούς υπάρχει ολίσθηση στα βραχοτεμάχια με μηδενική αναπήδηση.



Εικόνα 4.21. Ύψος αναπήδησης βραχοτεμαχίων ζώνης IVb (Rocfall).

Η συνολική κινητική ενέργεια λαμβάνει τιμές υψηλότερες από ότι η χαρακτηριστική τομή της ζώνης IV_b. Το παραπάνω οφείλεται στον μεγαλύτερο όγκο των βραχοτεμαχίων που κείτονται σε αυτή την τομή.



Εικόνα 4.9. Συνολική κινητική ενέργεια βραχοτεμαχίων ζώνης IVb (Rocfall).

Το πρανές στο τμήμα αυτό έχει κλίση περίπου 43° και το ύψος προσεγγίζει 30m. Σύμφωνα με την ανάλυση επικινδυνότητας, που παρουσιάζεται παρακάτω, προκύπτει οριακά υψηλός κίνδυνος για καταπτώσεις βραχοτεμαχίων (Medium Risk).

Πίνακας 4.10. Εκτίμηση επικινδυνότητας ζώνης IVb.

PARAMETER	CATEGORY / PARAMETER WEIGHT FACTOR	RATING					SCORE (MULTIPLY RATING WITH WEIGHT FACTOR OF PARAMETER)
1. Slope angle (°)	A/7 %	25-40	Medium 40-50	High 50-60	Very high >60	Overhanging	2,1
Rating		10	30	60	100		
2. Slope height (m)	A/4 %	<15	15-30	30-60	>60		2,4
Rating		10	30	60	100		
3. Release area height (H is total height of slope)	A/7 %	Rockfall from low slope areas (H/4)	Rockfall from middle slope areas (H/2)	Rockfall from middle to upper slope areas (3H/2)	Rockfall from whole slope (H)		7
Rating		10	30	60	100		
4. Slope roughness	A/3 %	Rough, planar, (friction reduces acceleration)	Planar smooth (helps acceleration)	Rough, presence of narrow benches,(helps bouncing)	Very rough, presence of narrow benches		1,8
Rating		10	30	60	100		
5. Vegetation of slope	A/4 %	Dense vegetation, occurrence of high trees	Low raised vegetation, bushes	Sparse vegetation	No vegetation		4
Rating		10	30	60	100		
6. Joint roughness / Filling material in joints / Joint Opening	B/6 %	Rough, stepped	Smooth, stepped	Undulating or filling material with angular fragments independent of roughness or moderate opening of joints 2.5 to 10mm	Slightly rough or filling with stiff clay >5mm independent of roughness or very wide opening of joints 10-100mm	Smooth planar or filling soft clay >5mm independent of roughness or extremely wide opening >100mm	0,9
Rating		10	15	30	60	100	
7. Joint Orientation (or combination of joints)	B/5 %	Favorable for stability		Moderate	Adverse	Very adverse	0,75
Rating		10		15	60	100	
8. Joint Persistence (m)	B/4 %	Very low <1m	Low 1-2m	Moderate 2-5m	High 5-10m	Very high >10m	1,2
Rating		10	15	30	60	100	
9. Joint compressive strength (JCS, Mpa, affects friction on joints)	B/1 %	>30	20-30	5-20	<5, weathered		0,3
Rating		10	30	60	100		
10. Strength of intact rock (Mpa, helps splitting of falling blocks if strength is low Facilitates bouncing if strength is high)	B/1 %	<10	10-30	30-60	>60MPa		0,6
Rating		10	30	60	100		
11. Rock mass blockiness / Block volume (m³)	B/4 %	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	1,2
Rating		10	15	30	60	100	
12. Estimated number of blocks (for the width of slope under assessments)	B/2 %	Null	1-5	5-10	>10		1,2
Rating		10	30	60	100		
13. Karstic features	B/2 %	No karst	Sparse	Moderate undermined conditions	Frequent Undermined conditions		0,2
Rating		10	30	60	100		
14. Rainfall conditions and intensity	C/3 %	Seldom	Sparsely	Seasonal	Often	Very often, during whole year	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
15. Permeability /Condition of slope drainage	C/3 %	Very high	High	Moderate	Low	Very low	1,8
Rating		10	15	30	60	100	
16. Seismic hazard (acceleration coefficient a)	C/4 %	a<0.16	0.16<a<0.24	0.24<a<0.36	a>0.36		2,4
Rating		10	30	60	100		
17. Width of catchment zone (m)	D/10 %	>20	10-20	5-10	2-5	No	3
Rating		10	15	30	60	100	
18. Rocfall history	D/5 %	Null to few	Occasional	Numerous	Often	Continuous	3
Rating		10	15	30	60	100	
19. Slope accessibility	D/5 %	All types of stabilization possible	Most types of stabilization possible	A number of types stabilization possible	Few types of stabilization possible	Access very difficult	3
Rating		10	15	30	60	100	
20. Potential result of impact and value of structures	D/20 %	Negligible, no human structures and permanent activities	Low, areas of little human activity	Moderate human presence; low frequency of houses	High; frequent human presence, numerous houses	Very high constant human presence, densely inhabited areas	20
Rating		10	15	30	60	100	
TOTAL SCORE (MAXIMUM 100)							58,65

Συγκεντρωτικά, από τα παραπάνω , παρατηρούμε ότι η ζώνη IV_b παρουσιάζει το μεγαλύτερο κίνδυνο καταπτώσεων. Αντίστοιχα οι ζώνες II,III,IV_a αντιμετωπίζουν μέσο κίνδυνο καταπτώσεων.

Πίνακας 4.11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ταξη επικινδυνότητας.

ΤΑΞΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ	ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ	ΖΩΝΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ
I	<20	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΟΣ	-
II	21-40	ΧΑΜΗΛΟΣ	ΖΩΝΗ I
III	41-60	ΜΕΣΟΣ	ΖΩΝΗ II,III,IV _b
IV	61-80	ΥΨΗΛΟΣ	ΖΩΝΗ IV _a
V	81-100	ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΟΣ	-

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, για τη έρευνα των καταπτώσεων της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν 4 ζώνες. Σε κάθε μία πραγματοποιήθηκαν 8 διαφορετικές προσομοιώσεις βραχοπτώσεων σε υπολογιστικό περιβάλλον της Rocscience, Rocfall.

Σε όλες τις τομές, αυτό που εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί είναι η δυσμενέστερη των περιπτώσεων, η οποία παρατηρείται όταν τα μεγάλα τεμάχια εκτελούν κύλιση. Η μηδενική γωνία τριβής που εισάγεται στην περίπτωση αυτή, αντικατοπτρίζεται στην προσομοίωση με τα τεμάχια να διανύουν τις μεγαλύτερες των αποστάσεων.

Όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το Rocfall, εντοπίστηκαν μία ζώνη υψηλής επικινδυνότητας και τρεις ζώνες μέσης επικινδυνότητας..

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ζώνης IV_a προτείνεται η εγκατάσταση ως μέτρων ανάσχεσης βραχοπαγίδες στα κατάντη του πρανούς.

Οι βραχοπαγίδες κατασκευάζονται κυρίως κατά μήκος συγκοινωνιακών αξόνων (οδικών ή σιδηροδρομικών) και κτηρίων με σκοπό την ανάσχεση και παγίδευση μικρών βραχωδών τεμαχίων που αποσπώνται και πέφτουν από το πρανές.

Για την επιλογή των βραχοπαγίδων βασική προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε αν τα κατολισθαίνοντα υλικά είναι βραχώδη ή εδαφικά. Επίσης βασική προϋπόθεση είναι τα καταπίπτοντα υλικά να έχουν μέγεθος και κινητική ενέργεια ικανή να συγκρατήσουν οι φράχτες που διατίθενται στην αγορά.



Εικόνα 5.1. Βραχοπαγίδα

Τα μέρη που συνθέτουν τις βραχοπαγίδες είναι:

- Στύλοι (ορθοστάτες) από γαλβανισμένο μορφοσίδηρο τύπου ΗΕΒ/ΗΕΑ με μεταλλική βάση.
- Γαλβανισμένο πλέγμα από συρματόσχοινα, ενισχυμένο με οριζόντια γαλβανισμένα συρματόσχοινα, που συγκρατούνται στους στύλους.
- Γαλβανισμένα συρματόσχοινα στήριξης της κορυφής των ορθοστατών.
- Δακτυλιωτά φρένα, αποσβεστήρες ενέργειας
- Αγκύρια της διάταξης στήριξης

Οι διαστάσεις, η ποιότητα των υλικών καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές τους είναι τυποποιημένες, και συνοδεύονται από σχετικά πιστοποιητικά. Οι φράκτες ανάσχεσης βραχοπτώσεων αποτελούν παθητικό σύστημα προστασίας και διατίθενται σε διάφορους τύπους ανάλογα με το ποσό ενέργειας που θα πρέπει να απορροφήσουν.

Συγκεντρωτικά τα μέτρα που προτείνεται να εφαρμοστούν για την προστασία της οδού από καταπτώσεις βράχων κατά μήκος του συγκεκριμένου πρानούς παρατίθενται παρακάτω.

- Προτείνεται το ξεσκάρωμα των επικρεμάμενων βράχων του πρानούς. Επίσης προτείνεται ο καθαρισμός της στέψης του πρानούς από τα τυχόν τεμάχια βράχου που είναι εγκλωβισμένα μέσα στην βλάστηση.
- Η μέγιστη αναμενόμενη κινητική ενέργεια που εμφανίστηκε στα βραχοτεμάχια είναι της τάξης των 200 kJ. Αυτή η κατάσταση θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με φράχτη αντοχής 500kJ.

Στη ζώνη III του πρानούς, η οποία είναι μέσης επικινδυνότητας προτείνεται η παρακάτω διαδικασία.

- Για την προστασία του δρόμου από την κάτω ζώνη κατάπτωσης βραχοτεμαχίων προτείνεται εγκατάσταση μεταλλικού πλέγματος προστασίας σε όλο το μέτωπο του πρανούς. Το πλέγμα προτείνεται να είναι ατσάλινο, μονοαξονικό, διπλής πλέξης. Το πλέγμα θα πρέπει να αγκυρωθεί 2.5 έως 3 m πίσω από την στέψη του πρανούς. Ως πρόσθετη προστασία της οδού προτείνεται στη βάση του πρανούς να κατασκευαστεί χαμηλό τοίχιο ανάσχεσης από οπλισμένο σκυρόδεμα ύψους 95 έως 120 cm, επάνω στο οποίο θα αγκυρωθεί η απόληξη του πλέγματος. Ο χώρος παγίδευσης των κατακρημνισμένων τεμαχίων στη βάση του πλέγματος θα πρέπει να καθαρίζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση βραχοτεμαχίων που μπορεί να προκαλέσει τη διάρρηξη του πλέγματος.
- Τέλος, προτείνεται η αποστράγγιση της βραχομάζας από εισροές νερού. Τα κατεισδύοντα ύδατα εφόσον απορροφηθούν από την επιφάνεια του πρανούς αναμένεται να μειώσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. υποβαθμίζοντας την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Γι' αυτό προτείνεται η κατασκευή αγωγών απαγωγής των όμβριων υδάτων στην περιοχή της στέψης του πρανούς.



Εικόνα 5.2. Μεταλλικό πλέγμα με προεντεταμένα αγκύρια

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chau K. T., Wonga R.H.C. Wu J.J. (2002), Coefficient of restitution nad rotational motions of rock fall impacts.

Luuk K.A. Dorrent et al (2003), Combining field and modeling techniques to asses rocfall dynamics in a protection forest hillslope in the European Alps.

RocFall, User's Guide., Rocscience, 1998-2002.

Agliardi, F. and G. B. Crosta. "High Resolution Three-Dimensional Numerical Modelling of Rockfalls." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40.

Ansari, M. K., M. Ahmad, R. Singh and T. N. Singh. (2013) "Rockfall Hazard Assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India." *Arabian Journal of Geosciences*,.

Asteriou, P., H. Saroglou and G. Tsiambaos. (2012) "Geotechnical and Kinematic Parameters Affecting the Coefficients of Restitution for Rock Fall Analysis." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 54, no. 0.

Azzoni, A. and M. H. de Freitas. "Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis (1995)." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28, no. 2.

Azzoni, A., P. P. Rossi, E. Drigo, G. P. Giani and A. Zaninetti. "In Situ Observation of Rockfall Analysis Parameters. (1992), " *Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch* 1.

Bolin, H., C. Lide, P. Xuanming, L. Guanning, C. Xiaoting, D. Haogang and L. Tianci (2010).. "Assessment of the Risk of Rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China." *Landslides* 7, no. 1.

Bourrier, Franck, Luuk Dorren, François Nicot, Frédéric Berger and Félix Darve. (2009), "Toward Objective Rockfall Trajectory Simulation Using a Stochastic Impact Model." *Geomorphology* 110, no. 3–4.

Bozzolo, D. and R. Pamini. "Simulation of Rock Falls Down a Valley Side." *Acta Mechanica* 63, no. 1-4 (1986).

Wyllie D.C., Mah C.W. (2004), *ROCK SLOPE ENGINEERING: CIVIL NAD MINDING 4TH EDITION*.

Π. Βατίστας (2014) Διερεύνηση της επίδρασης του εδαφικού καλύμματος βραχώδων πρανών στις καταπτώσεις βραχών.

Γ. Λάλος (2013). Ανάσχεση βραχοπτώσεων σε βραχώδη πρανή της ανατολικής Εύβοιας.

H. Saroglou, V. Marinos, P. Marinos, G. Tsiambaos. (2012). Rocfall hazard and risk assessment, An example from high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece.

www.rocscience.com.

www.geobruigg.com

www.ecorisq.org/rockfor-net-en