



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΣΕΣ ΣΧΟΛΕΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ  
ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ «ΑΙΜΟΥ» ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗΣ ΑΘΗΝΩΝ**



**ΜΙΚΡΟΥΤΣΙΚΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

*ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ*  
**ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΣΕΣ ΣΧΟΛΕΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ  
ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΛΑΤΟΜΕΙΟΥ «ΑΙΜΟΥ» ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ  
ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗΣ ΑΘΗΝΩΝ**

**Μικρούτσικος Αντώνιος – Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός**

*Επιβλέπων:*

Λουπασάκης Κωνσταντίνος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Τριμελής επιτροπή:*

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Μπενάρδος Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018



---

**Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ.: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», στον Τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή Κωνσταντίνου Λουπασάκη.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Λουπασάκη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος προς μελέτη με στόχο την εκπόνηση της διπλωματικής μου μεταπτυχιακής εργασίας, για την καθοδήγησή του, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο της Τεχνικής Γεωλογίας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να του εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα, και πάνω από όλα για την όρεξη και το ειλικρινές ενδιαφέρον που έδειξε στις πάσης φύσεως αναρίθμητες απορίες μου, σχετικές και μη με την εργασία.

Φυσικά, θα ήθελα να εκφράσω κι ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους όλους αυτούς τους μήνες. Πρωτίστως, στην Ανίτα Χυσάι με την οποία συνεργαστήκαμε στα πλαίσια των μετρήσεων πεδίου που πραγματοποιήσαμε για τις διπλωματικές μας εργασίες, και τέλος, στους φίλους μου από την πορεία του μεταπτυχιακού προγράμματος, την Αλίκη, τον Ναπολέον, το Γιάννη και την Αθηνά, με τους οποίους μοιραστήκαμε τόσες πολλές εμπειρίες.

## **Περιεχόμενα**

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1. Ο Δήμος Πετρούπολης και το Θέατρο Πέτρας	1
1.2. Σκοπός της παρούσας μελέτης	4
<b>2. Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>7</b>
2.1. Ευστάθεια πρανών	7
2.2. Κατολισθητικά φαινόμενα	9
2.2.1. Ταξινόμηση κατολισθήσεων	10
2.2.2. Αίτια πρόκλησης κατολισθήσεων	17
2.2.3. Το φαινόμενο της κατάπτωσης	19
2.3. Ασυνέχειες βραχώμαζας	23
2.4. Μορφές δυνητικής αστοχίας	26
2.5. Μέτρα προστασίας	31
<b>3. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης</b>	<b>35</b>
3.1. Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής	35
3.1.1. Γεωλογία λεκανοπεδίου Αττικής	35
3.1.1.1. Αλπικοί σχηματισμοί	37
3.1.1.2. Μεταλπικοί σχηματισμοί	39
3.1.2. Γεωλογία περιοχής μελέτης	40
3.2. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά πετρώματος	45
3.2.1. Θλιπτική αντοχή πετρώματος	45
3.2.1.1. Η δοκιμή σημειακής φόρτισης	45
3.2.1.2. Αποτελέσματα δοκιμής	48
3.2.2. Γωνία τριβής ασυνεχειών	55
3.2.2.1. Γενικά	55
3.2.2.2. Προσδιορισμός γωνίας τριβής ασυνεχειών	60
3.3. Μορφολογικά χαρακτηριστικά του λατομείου	61
3.3.1. Πρανές A1	62
3.3.2. Πρανές A2	63
3.3.3. Πρανές B1	64
3.3.4. Πρανές B2	64
3.3.5. Πρανές Γ	65
<b>4. Στερεογραφική ανάλυση ευστάθειας πρανών</b>	<b>67</b>
4.1. Στερεογραφική προβολή με το πρόγραμμα Dips	67
4.2. Προσδιορισμός των πιθανών μορφών αστοχίας	67
4.2.1. Πρανές A1	70
4.2.2. Πρανές A2	71

4.2.3.	Πρανές B1 -----	71
4.2.4.	Πρανές B2 -----	72
4.2.5.	Πρανές Γ -----	73
4.3.	Υπολογισμός όγκου βραχοτεμαχίων από ενδεχόμενη κατάπτωση -----	75
<b>5.</b>	<b>Προσομοίωση καταπτώσεων με το πρόγραμμα Rocfall -----</b>	<b>79</b>
5.1.	Διαδικασία ανάλυσης με τη χρήση του προγράμματος Rocfall -----	79
5.1.1.	Γεωμετρία και τραχύτητα πρανούς -----	79
5.1.2.	Υλικά που απαρτίζουν το πρανές και οι παράμετροι αυτών -----	83
5.1.3.	Θέσεις εκκίνησης βραχοτεμαχίων -----	84
5.1.4.	Εξαγωγή αποτελεσμάτων -----	85
5.2.	Προσομοίωση καταπτώσεων στα εξεταζόμενα πρανή -----	86
5.2.1.	Πρανές A1 -----	86
5.2.1.1.	Θέση A1α -----	86
5.2.1.2.	Θέση A1β -----	88
5.2.2.	Πρανές A2 -----	89
5.2.3.	Πρανές B1 -----	91
5.2.3.1.	Θέση B1α -----	91
5.2.3.2.	Θέση B1β -----	93
5.2.4.	Πρανές B2 -----	95
5.2.4.1.	Θέση B2α -----	95
5.2.4.2.	Θέση B2β -----	97
5.3.	Συμπέρασμα -----	99
<b>6.</b>	<b>Προτεινόμενα μέτρα προστασίας -----</b>	<b>101</b>
6.1.	Πρανές A1 -----	102
6.1.1.	Περιοχή A1α -----	102
6.1.2.	Περιοχή A1β -----	105
6.2.	Πρανές A2 -----	106
6.3.	Πρανές B1 -----	108
6.3.1.	Περιοχή B1α -----	108
6.3.2.	Περιοχή B1β -----	110
6.4.	Πρανές B2 -----	110
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα και προτάσεις -----</b>	<b>113</b>
<b>8.</b>	<b>Βιβλιογραφία -----</b>	<b>117</b>

Κατάλογος Σχημάτων

**Σχήμα 2.1:** Επίδραση της κλίσης του πρανού στο είδος κίνησης των τεμαχίων (Ritchie, 1963) ----- 21

**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα  $\log P-D_e^2$  για τον προσδιορισμό του  $I_{s(50)}$  στον Ανώτερο ασβεστόλιθο ----- 49

**Σχήμα 3.2:** Διάγραμμα  $\log P-D_e^2$  για τον προσδιορισμό του  $I_{s(50)}$  στον Κατώτερο ασβεστόλιθο ----- 50

**Σχήμα 3.3:** Νομόγραμμα υπολογισμού της μονοαξονικής αντοχής με τη χρήση των μετρήσεων του κρουσίμετρου Schmidt, τύπου L όπως δίνεται από τον κατασκευαστή ----- 57

**Σχήμα 3.4:** Νομόγραμμα υπολογισμού της μονοαξονικής αντοχής με τη χρήση των μετρήσεων του κρουσίμετρου Schmidt, τύπου N όπως δίνεται από τον κατασκευαστή ----- 58

**Σχήμα 3.5:** Τυπικά προφίλ των Barton & Choubey (1977) ----- 59

**Σχήμα 4.1:** Στερεογραφική προβολή των μετρήσεων για τον Ανώτερο ασβεστόλιθο στο πρόγραμμα Dips ----- 69

**Σχήμα 4.2:** Στερεογραφική προβολή των μετρήσεων για τον Κατώτερο ασβεστόλιθο στο πρόγραμμα Dips ----- 69

**Σχήμα 4.3:** Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές A1- 70

**Σχήμα 4.4:** Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές A2- 71

**Σχήμα 4.5:** Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές B1- 72

**Σχήμα 4.6:** Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές B2- 73

**Σχήμα 4.7:** Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές Γ--- 74

**Σχήμα 4.8:** Έλεγχος για την περίπτωση εμφάνισης φαινομένου ανατροπής για τον πρανές Γ ----- 74

**Σχήμα 4.9:** Οι σφήνες που προκύπτουν στο πρανές A1, από το πρόγραμμα Swedge ----- 76

**Σχήμα 4.10:** Η σφήνα που προκύπτει στο πρανές A2, από το πρόγραμμα Swedge ----- 77

**Σχήμα 4.11:** Οι σφήνες που προκύπτουν στο πρανές B1, από το πρόγραμμα Swedge -- 77

**Σχήμα 4.12:** Η σφήνα που προκύπτει στο πρανές B2, από το πρόγραμμα Swedge ----- 78

**Σχήμα 4.13:** Γραφική απεικόνιση του τεμάχους από αστοχία επιπέδου στο πρανές A1 --- 78

**Σχήμα 5.1:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1α. Το πόδι του πρανού βρίσκεται στη θέση 62 m ----- 87

**Σχήμα 5.2:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1α ----- 87

**Σχήμα 5.3:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1β. Το πόδι του πρανού βρίσκεται στη θέση 64 m ----- 88

**Σχήμα 5.4:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1β ----- 89

**Σχήμα 5.5:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A2. Το πόδι του πρανού βρίσκεται στη θέση 40,5 m ----- 90

**Σχήμα 5.6:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A2 ----- 91

**Σχήμα 5.7:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1α. Το πόδι του πρανού βρίσκεται στη θέση 32 m και το πέρας του αναβαθμού στα 43 m ----- 92

**Σχήμα 5.8:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1α ----- 93



<b>Σχήμα 5.9:</b> Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1β. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 21 m	94
<b>Σχήμα 5.10:</b> Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1β	95
<b>Σχήμα 5.11:</b> Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2α. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 11,5 m	96
<b>Σχήμα 5.12:</b> Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2α	97
<b>Σχήμα 5.13:</b> Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2β. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 14 m	98
<b>Σχήμα 5.14:</b> Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2β	99
<b>Σχήμα 6.1:</b> Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A1α (βάση φράχτη: -100)	103
<b>Σχήμα 6.2:</b> Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A1α	104
<b>Σχήμα 6.3:</b> Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A1β (βάση φράχτη: -81)	106
<b>Σχήμα 6.4:</b> Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A1β	106
<b>Σχήμα 6.5:</b> Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A2 (βάση φράχτη: -57)	107
<b>Σχήμα 6.6:</b> Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A2	108
<b>Σχήμα 6.7:</b> Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή B1α (βάση φράχτη: -50)	109
<b>Σχήμα 6.8:</b> Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή B1α	109

**Κατάλογος Πινάκων**

<b>Πίνακας 2.1:</b> Προτεινόμενη κλίμακα ταξινόμησης ταχύτητας κατολισθήσεων (Varnes (1978) και WP/WLP (1994)) .....	10
<b>Πίνακας 2.2:</b> Ταξινόμηση κατολισθητικών φαινομένων κατά Varnes (1978) .....	12
<b>Πίνακας 3.1:</b> Σταθερά συσχέτισης του δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για διάφορα πετρώματα (Νομικός 2015).....	48
<b>Πίνακας 3.2:</b> Δοκιμές σημειακής φόρτισης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του Ανώτερου ασβεστόλιθου .....	49
<b>Πίνακας 3.3:</b> Δοκιμές σημειακής φόρτισης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του Κατώτερου ασβεστόλιθου .....	50
<b>Πίνακας 3.4:</b> Προσδιορισμός της γωνίας τριβής ασυνεχειών στον Ανώτερο ασβεστόλιθο	60
<b>Πίνακας 3.5:</b> Προσδιορισμός της γωνίας τριβής ασυνεχειών στον Κατώτερο ασβεστόλιθο .....	61
<b>Πίνακας 4.1:</b> Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Swedge .....	76
<b>Πίνακας 5.1:</b> Τα υλικά εμφάνισης στο πρανές και οι παράμετροί τους .....	83
<b>Πίνακας 7.1:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας με τα στοιχεία των πρανών και των προτεινόμενων μέτρων προστασίας.....	115

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1.1:</b> Η θέση του Θεάτρου Πέτρας στο λεκανοπέδιο Αττικής (Google Maps) -----	1
<b>Εικόνα 1.2:</b> Η ασβεστοκάμιнос των παλιών λατομείων «Αίμου» διασώζεται μέχρι σήμερα κι αποτελεί ένα βιομηχανικό μνημείο -----	2
<b>Εικόνα 1.3:</b> Πανοραμική άποψη του Θεάτρου Πέτρας κατά τη διάρκεια παράστασης-----	3
<b>Εικόνα 1.4:</b> Σχέδιο της σκηνής «Μίνως Βολανάκης» από την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου -----	3
<b>Εικόνα 1.5:</b> Κάτοψη του χώρου του πρώην λατομείου, όπου με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η επιλεγμένη περιοχή μελέτης (Google Maps) -----	6
<b>Εικόνα 1.6:</b> Ο χώρος που περιβάλλει τη σκηνή «Μίνως Βολανάκης» (Google Earth)-----	6
<b>Εικόνα 2.1:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κατάπτωσης σε βραχώδες πρσανές -----	13
<b>Εικόνα 2.2:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ανατροπής σε βραχώδη σχηματισμό-----	13
<b>Εικόνα 2.3:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου περιστροφικής ολίσθησης σε εδαφικό σχηματισμό-----	14
<b>Εικόνα 2.4:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου στρωματοειδούς ολίσθησης σε εδαφικό σχηματισμό-----	15
<b>Εικόνα 2.5:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου πλευρικής εξάπλωσης -----	15
<b>Εικόνα 2.6:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ροής εδαφικού σχηματισμού -----	16
<b>Εικόνα 2.7:</b> Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ερπυσμού-----	16
<b>Εικόνα 2.8:</b> Κύριοι τύποι κατολισθητικών κινήσεων -----	17
<b>Εικόνα 2.9:</b> Διάφοροι τύποι δυνητικών αστοχιών (Hoek& Bray, 1981)-----	27
<b>Εικόνα 2.10:</b> Η πλέον αναγκαία συνθήκη για αστοχία σφήνας από Hoek& Bray, 1981 ----	28
<b>Εικόνα 2.11:</b> Αστοχία σφήνας με ολίσθηση μόνο κατά μήκος της γραμμής διατομής των δύο επιπέδων, και με ολίσθηση μόνο κατά μήκος του ενός επιπέδου εκ των δύο (Hoek& Bray, 1981)-----	28
<b>Εικόνα 2.12:</b> Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών για την εκδήλωση αστοχιών επιπέδου και σφήνας σε βραχώδη πρσανή (Hoek& Bray, 1981)-----	29
<b>Εικόνα 2.13:</b> Τύπος αστοχίας ανατροπής (toppling) από Goodman, 1980. -----	30
<b>Εικόνα 2.14:</b> Συνθήκη εκδήλωσης αστοχίας σε ανατροπή (Λουπασάκης 2014)-----	30
<b>Εικόνα 2.15:</b> Μεταλλικός φράκτης. -----	33
<b>Εικόνα 2.16:</b> Φράκτης ανάσχεσης -----	33
<b>Εικόνα 2.17:</b> Μεταλλικό πλέγμα συγκράτησης βραχοτεμαχίων -----	34
<b>Εικόνα 2.18:</b> Τάφρος και επίχωμα ανάσχεσης (Hoek, 2000) -----	34
<b>Εικόνα 3.1:</b> Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αττικής (1: μεταλλικοί σχηματισμοί Άνω Μειοκαινικής-Ολοκαινικής ηλικίας, 2 : μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 3 : μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 4 : κύρια ρήγματα, 5 : μεγάλης κλίμακα τεκτονική επαφή – αποκόλληση (Παπανικολάου et al. 2002)-----	35
<b>Εικόνα 3.2:</b> Ενοποιημένος γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (1. Νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις, 2. Πελαγονική ζώνη, 2.1. Φλύσχης, 2.2. Ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού, 2.3. Νεοπαλαιοζωικά- τριαδικοϊουρασικά μεταμορφωμένα πετρώματα, ασβεστόλιθοι και δολομίτες, 3. Αυτόχθονη ενότητα, 4. Αλλόχθονη ενότητα 5. Επώθηση (Katsikatsos et al. 1986))-----	36
<b>Εικόνα 3.3:</b> Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών κατά Παπανικολάου et al. 2004-----	36
<b>Εικόνα 3.4:</b> Παλαιά λατομεία Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων: η εσωτερική χασοκή δομή της Ενότητας Αθηνών με συνύπαρξη πελαγικών σχιστών, ψαμμιτών (Sch A) και νηρητικών ασβεστόλιθων του Άνω Κρητιδικού (CA1 ανοικτόχρωμοι, CA2 σκουρόχρωμοι) από Παπανικολάου et al. 2004. -----	38
<b>Εικόνα 3.5:</b> Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής της Δυτικής Αθήνας (Λέκκας 2010), όπου παρουσιάζεται η θέση του Θεάτρου Πέτρας -----	41

<b>Εικόνα 3.6:</b> Η τεκτονική επαφή των σχηματισμών και η επώθηση του Κατώτερου επί του Ανώτερου (F1- κόκκινη γραμμή, F2- κίτρινη γραμμή) (Google Earth)-----	43
<b>Εικόνα 3.7:</b> Η εμφάνιση του ρήγματος F1 στο αντιδιαμετρικό τμήμα του λατομείου-----	44
<b>Εικόνα 3.8:</b> (α) Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης, (β) λεπτομέρεια χαλύβδινου κώνου φόρτισης (Νομικός, 2015)-----	45
<b>Εικόνα 3.9:</b> Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης σε κυλινδρικά (α, β), πρισματικά (γ) και ακανόνιστης μορφής (δ) δοκίμια πετρώματος, με σημειωμένες τις απαιτούμενες διαστάσεις των δοκιμίων, σύμφωνα με την προδιαγραφή της ISRM (1985) (Νομικός, 2015)-----	46
<b>Εικόνα 3.10:</b> Αποδεκτές (α) και μη-αποδεκτή (β) μορφές της επιφάνειας της θραύσης κατά τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (Νομικός, 2015)-----	46
<b>Εικόνα 3.11:</b> Σφύρα αναπήδησης Schmidt (Λουπασάκης, 2015)-----	56
<b>Εικόνα 3.12:</b> Φωτογραφία μηχανικού προφιλόμετρου (Νομικός 2015)-----	59
<b>Εικόνα 3.13:</b> Επιμέρους τμήματα πρανών λατομείου «Αίμου», όπως ορίστηκαν για τις ανάγκες της μελέτης (Google Maps)-----	61
<b>Εικόνα 3.14:</b> Μεγέθυνση διαγράμματος πόλεως, κλίμακας 1:10.000, φύλλο 1 «Αθήναι - Πειραιεύς» (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού)-----	62
<b>Εικόνα 4.1:</b> Η γεωλογική πυξίδα Clar-----	68
<b>Εικόνα 5.1:</b> Οι θέσεις ανάλυσης στα πρανή-----	80
<b>Εικόνα 5.2:</b> Σκαρίφημα πρανούς A1 στη θέση A1α-----	80
<b>Εικόνα 5.3:</b> Σκαρίφημα πρανούς A1 στη θέση A1β-----	81
<b>Εικόνα 5.4:</b> Σκαρίφημα πρανούς A2-----	81
<b>Εικόνα 5.5:</b> Σκαρίφημα πρανούς B1 στη θέση B1α-----	81
<b>Εικόνα 5.6:</b> Σκαρίφημα πρανούς B1 στη θέση B1β-----	82
<b>Εικόνα 5.7:</b> Σκαρίφημα πρανούς B2 στη θέση B2α-----	82
<b>Εικόνα 5.8:</b> Σκαρίφημα πρανούς B2 στη θέση B2β-----	82
<b>Εικόνα 5.9:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A1α-----	86
<b>Εικόνα 5.10:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A1β-----	88
<b>Εικόνα 5.11:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A2-----	90
<b>Εικόνα 5.12:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B1α-----	92
<b>Εικόνα 5.13:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B1β-----	94
<b>Εικόνα 5.14:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B2α-----	96
<b>Εικόνα 5.15:</b> Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B2β-----	98
<b>Εικόνα 5.16:</b> Απεικόνιση των επικίνδυνων περιοχών του προσβάσιμου χώρου στην περιοχή μελέτης-----	100
<b>Εικόνα 6.1:</b> Απεικόνιση των διαφορετικών περιπτώσεων που απαιτούν λύση-----	102
<b>Εικόνα 6.2:</b> Προσομοίωση προσέγγισης 1- μεταλλικός φράχτης ανάσχεσης στην περιοχή A1α-----	103
<b>Εικόνα 6.3:</b> Προσομοίωση προσέγγισης 2- τάφρος και επίχωμα ανάσχεσης στην περιοχή A1α-----	104
<b>Εικόνα 6.4:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης και μεταλλικού πλέγματος στην περιοχή A1β-----	105
<b>Εικόνα 6.5:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στην περιοχή A2-----	107

<b>Εικόνα 6.6:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στην περιοχή B1α-----	109
<b>Εικόνα 6.7:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή B1β-----	110
<b>Εικόνα 6.8:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή B2α-----	111
<b>Εικόνα 6.9:</b> Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή B2β-----	111
<b>Εικόνα 7.1:</b> Απεικόνιση της τελικής λύσης για τα μέτρα προστασίας στο σύνολο του χώρου -----	116

## Κατάλογος Φωτογραφιών

Φωτογραφία 1.1: Το Θεατράκι του Μπρουκ-----	4
Φωτογραφία 1.2: Το Θεατράκι του Μπρουκ και τα πρανή που το περιστοιχίζουν -----	5
Φωτογραφία 3.1: Ανώτερος (επάνω) και Κατώτερος (κάτω) ασβεστόλιθος, όπως εμφανίζονται στα περιμετρικά πρανή-----	42
Φωτογραφία 3.2: Το νοτιότερο τμήμα του χώρου, όπου εμφανίζεται ο Κατώτερος ασβεστόλιθος-----	42
Φωτογραφία 3.3: Το βορειότερο τμήμα του χώρου, όπου εμφανίζεται ο Ανώτερος ασβεστόλιθος-----	43
Φωτογραφία 3.4: Το ρήγμα F1-----	44
Φωτογραφία 3.5: Ανώτερος Ασβεστόλιθος- Τα 7 δοκίμια πριν τη φόρτιση-----	51
Φωτογραφία 3.6: Ανώτερος Ασβεστόλιθος- Τα 7 δοκίμια μετά τη φόρτιση-----	52
Φωτογραφία 3.7: Κατώτερος Ασβεστόλιθος - Τα 8 δοκίμια πριν τη φόρτιση -----	53
Φωτογραφία 3.8: Κατώτερος Ασβεστόλιθος - Τα 8 δοκίμια μετά τη φόρτιση -----	54
Φωτογραφία 3.9: Πρανές A1 -----	63
Φωτογραφία 3.10: Πρανές A2-----	63
Φωτογραφία 3.11: Πρανές B1-----	64
Φωτογραφία 3.12: Πρανές B2-----	64
Φωτογραφία 3.13: Ο αναβαθμός που εμφανίζεται στις βάσεις των πρανών B1 και B2---	65
Φωτογραφία 3.14: Πρανές Γ-----	65
Φωτογραφία 4.1: Το μεγαλύτερο βραχοτεμάχιο που βρέθηκε στο χώρο του θεάτρου, με μέγιστη διάσταση 2,5 m (το όργανο είναι ανοιγμένο στην ένδειξη των 50 cm)-----	75
Φωτογραφία 5.1: Βραχοτεμάχια που βρέθηκαν στις βάσεις των πρανών-----	85

## Περίληψη

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ευστάθειας των βραχωδών πρηνών του λατομείου «Αίμου» στην περιοχή της Πετρούπολης Αθηνών. Στο χώρο αυτό πλέον στεγάζεται ένα από τα μεγαλύτερα υπαίθρια θέατρα της Αθήνας, το Θέατρο Πέτρας, και φιλοξενεί κάθε χρόνο χιλιάδες πολίτες, γεγονός που καθιστά τον έλεγχο της ασφάλειάς του απόλυτα αναγκαίο. Το λατομείο βρίσκεται στις ανατολικές παρυφές του Ποικίλου Όρους και εντάσσεται σε μια σειρά λατομείων που αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα κατά τα μεταπολεμικά χρόνια.

Αρχικά, μελετήθηκαν τα γεωλογικά, γεωτεχνικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής, με τη βοήθεια γεωλογικών χαρτών και επί τόπου παρατηρήσεων. Όσον αφορά στα γεωλογικά χαρακτηριστικά, το λατομείο δομείται από ασβεστόλιθους της Υποπελαγονικής ζώνης, ενώ πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του πετρώματος. Για την πληρέστερη μελέτη του χώρου, κρίθηκε απαραίτητος ο διαχωρισμός των πρηνών του λατομείου σε πέντε επιμέρους τμήματα. Εξαιτίας της λατομικής δραστηριότητας, τα πρηνή αυτά παρουσιάζουν μεταβλητό προσανατολισμό, κλίση και ύψος.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου μετρήσεις του βαθμού κατακερματισμού της βραχομάζας. Κατεγράφησαν δεδομένα όπως ο προσανατολισμός των επιμέρους τμημάτων των πρηνών, η κλίση τους, καθώς και η μέγιστη κλίση και η διεύθυνση μέγιστης κλίσης μεγάλου αριθμού ασυνεχειών. Με την εισαγωγή των δεδομένων αυτών στο πρόγραμμα Dips, προσδιορίστηκαν τα κυριότερα συστήματα ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχομάζα και εκτιμήθηκαν οι μορφές δυνητικής αστοχίας.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καταπτώσεων βραχοτεμαχίων με τη χρήση του προγράμματος Rocfall με σκοπό τον καθορισμό των απαιτούμενων μέτρων προστασίας των πρηνών που περιβάλλουν το χώρο μελέτης. Για κάθε επιμέρους τμήμα πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διαφορετικές θέσεις, στηριζόμενες στις μάζες των βραχοτεμαχίων που υπολογίστηκαν από τη στερεογραφική ανάλυση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Rocfall μέσω γραφικών παραστάσεων και διαγραμμάτων σχετικά με την αναμενόμενη κινητική ενέργεια, το ύψος αναπήδησης και τη θέση κατάληξης των βραχοτεμαχίων, κατέστησαν δυνατό τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας, του μεγέθους και της θέσης τοποθέτησης των απαραίτητων μέτρων προστασίας.

Αξιολογώντας τις ανωτέρω αναλύσεις, προέκυψε το συμπέρασμα πως στο Θέατρο Πέτρας υπάρχει κίνδυνος εκδήλωσης καταπτώσεων περιμετρικά του χώρου που στεγάζεται το μικρό θέατρο του Μπρουκ, θέτοντας σε κίνδυνο την κατασκευή, αλλά και τον κόσμο που μπορεί να βρίσκεται στον ευρύτερο χώρο. Με βάση όλα τα παραπάνω, συντάχθηκε μια ολοκληρωμένη πρόταση μέτρων προστασίας από καταπτώσεις βράχων, ώστε ο χώρος μελέτης να καταστεί απόλυτα ασφαλής.

## **Abstract**

The subject of this project is the study of slope stability of the quarry "Aimos" and the suggestion of appropriate measures for protection from potential rockfalls. At the place of the old quarry is now located one of the biggest outdoor theaters in Athens, Petras Theater, which hosts every year thousands of people. The quarry is located on the eastern foothills of "Poikilo" mountain and was built after the years of the second World War, along with several other quarries in this area.

Initially, the geological, geotechnical and morphological characteristics of the area have been considered, with the use of geological maps and on the spot observations. The slopes consist of limestones of "Sub-Pelagonian" zone. Point load tests and measurements with Profilometer and Schmidt Hammer have been implemented, in order to determine the geotechnical characteristics of the rocks.

Furthermore, outdoor measurements have been performed with the use of a geological compass. Data, such as the orientation of slopes, dip and dip direction of their discontinuities, have been registered, imported to the Dips program, and the forms of potential failures have been defined. Moreover, simulations of rockfalls have been carried out with the use of the program Rocfall, in order to determine the necessary safety measures of the slopes of the area in study.

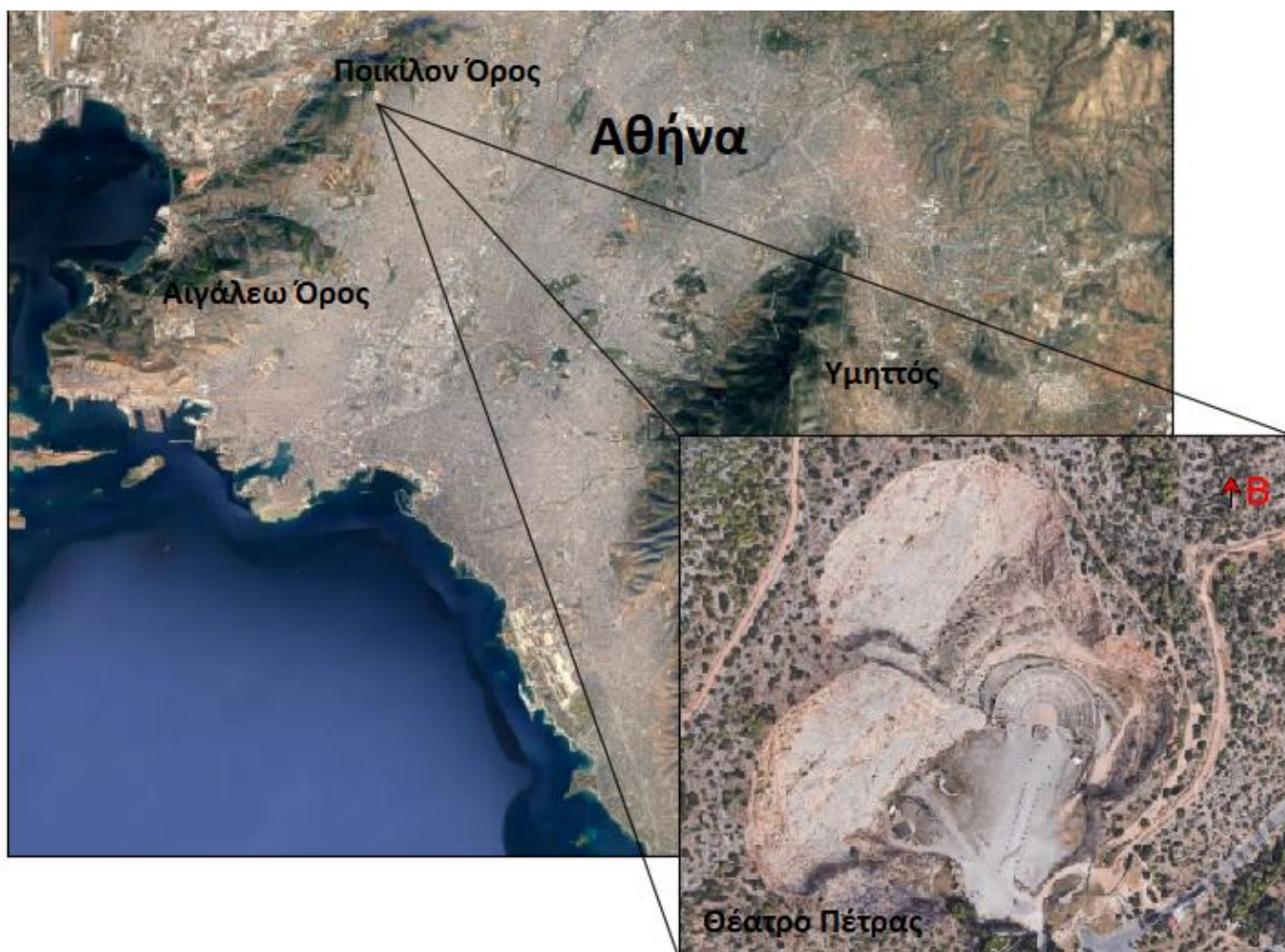
After evaluating the aforementioned measurements and data, the conclusion has been that the place that the quarry stands is not completely safe and there is a chance of potential rockfalls which would jeopardize the construction and possibly the lives of people. Thus, a thorough proposal of suitable measures has been compiled, in order to ensure the safety of the area.



## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Ο Δήμος Πετρούπολης και το Θέατρο Πέτρας

Η Πετρούπολη είναι δήμος του δυτικού τομέα Αθηνών στην Περιφέρεια Αττικής. Ο πληθυσμός της το 2011 υπολογίστηκε σε 58.979 άτομα και η έκτασή της σε 6,597 τ.χμ., με πυκνότητα της τάξεως των 8.940 κατοίκων ανά τ.χμ.. Ξεκινώντας να δομείται κατά τη δεκαετία του 1930, αναπτύχθηκε σε πόλη πια σήμερα, ενώ έχει συνδέσει το όνομά της με τον τόπο στον οποίο είναι κτισμένη, στην πέτρα των παρυφών του Ποικίλου Όρους. Σημείο αναφοράς πολιτιστικών γεγονότων, έγινε ιδιαίτερα γνωστή στο Λεκανοπέδιο από τη μετατροπή του γνωστού λατομικού χώρου στο Θέατρο Πέτρας.



Εικόνα 1.1: Η θέση του Θεάτρου Πέτρας στο λεκανοπέδιο Αττικής (Google Maps)

Το 1953 ξεκινά τη λειτουργία της η μεγάλη Ασβεστοποιία και Λατομείο αδρανών υλικών «Αίμος», των Τζεδάκη-Πατρικαλάκη & Σια Ο.Ε., γνωστό και ως Μαρασλή, από το επώνυμο του τρίτου εκ των συνεταιρίων της εταιρείας, στην Άνω Πετρούπολη. Το ασβεστοποιίο ήταν συνεχούς καύσεως και είχε παραγωγή 50 τόνους ασβέστη την ημέρα. Το μεγάλο καμίνι της εταιρείας (ύψους 72 m), ορατό από όλα τα σημεία του λεκανοπεδίου, χτίστηκε το 1958. Πρόκειται για ένα βιομηχανικό μνημείο, μοναδικό στο είδος του στη χώρα μας, που διασώζεται μέχρι σήμερα, ενώ αποτελεί το σήμα κατατεθέν της Πετρούπολης.

Ωστόσο, η λειτουργία του λατομείου και της ασβεστοκάμινου στο όριο του οικιστικού ιστού προξένησε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, ταλαιπώρησε την πόλη και υποβάθμισε ζωτικές λειτουργίες της, όπως η αγορά της. Η απομάκρυνσή του αποτέλεσε χρόνιο αίτημα των τοπικών αρχών, των αρμόδιων φορέων και των κατοίκων της περιοχής. Έτσι, το 1977 διακόπτεται η λειτουργία του και η κυβέρνηση εξετάζει τη δυνατότητα μετατροπής του σε χώρο εναπόθεσης μπαζών και μεταφόρτωσης απορριμμάτων. Όμως, η άμεση αντίδραση της Δημοτικής Αρχής οδηγεί στην απόφαση ο χώρος του λατομείου «Αίμος» και των μικρότερων λατομείων της ευρύτερης περιοχής να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά για πολιτιστικές και αθλητικές εγκαταστάσεις. Στη χοάνη του λατομείου δημιουργήθηκε τελικά, το 1983, το Θέατρο Πέτρας.



**Εικόνα 1.2:** Η ασβεστοκάμιнос των παλιών λατομείων «Αίμος» διασώζεται μέχρι σήμερα κι αποτελεί ένα βιομηχανικό μνημείο

## Θέατρο Πέτρας

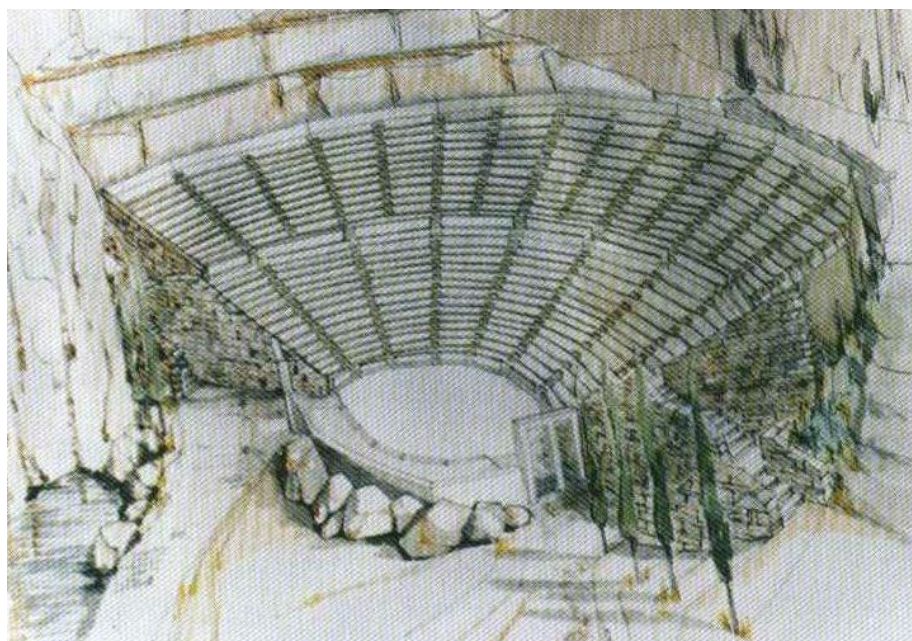
Το Θέατρο Πέτρας αποτελεί το μεγαλύτερο σύγχρονο περιφερειακό θέατρο της πρωτεύουσας. Κάθε χρόνο, το διάστημα Μάιο – Σεπτέμβριο, διοργανώνεται το Διεθνές Φεστιβάλ Πέτρας, στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιούνται συναυλίες, θεατρικές παραστάσεις και άλλα δρώμενα. Φέτος, το καλοκαίρι του 2018, το θέατρο κλείνει 35 χρόνια αδιάλειπτης παρουσίας.

Η απόφαση για τη δημιουργία του θεάτρου λήφθηκε από την Μελίνα Μερκούρη, τότε Υπουργός Πολιτισμού, στις αρχές του 1983. Το θέατρο εντάχθηκε σε μια σειρά έργων και παρεμβάσεων στο πλαίσιο της ανακήρυξης της Αθήνας ως Πολιτιστικής Πρωτεύουσας της Ευρώπης για το έτος 1985. Τα έργα αυτά είχαν ως στόχο να αναδείξουν την πλούσια πολιτιστική κληρονομιά της Ελλάδας και ταυτόχρονα να επιβεβαιώσουν την ενεργό παρουσία της στη σύγχρονη ευρωπαϊκή πολιτιστική πραγματικότητα. Δύο ακόμη άτομα συντέλεσαν στη δημιουργία του θεάτρου. Ο μεγάλος θεατράνθρωπος Μίνως Βολανάκης και ο Σπύρος Μερκούρης, υπεύθυνος του προγράμματος «Αθήνα Πολιτιστική Πρωτεύουσα της Ευρώπης». Συγκεκριμένα η δημιουργία θεατρικών χώρων στην περιφέρεια του Λεκανοπεδίου αποτέλεσε ιδέα του Μίνω Βολανάκη και μάλιστα ήταν ο ίδιος που ανακάλυψε τη φυσική μεγαλοπρέπεια και τη μοναδική ακουστική του παλιού λατομείου «Αίμος». Στο Θέατρο Πέτρας οργανώθηκαν οι «Γιορτές των Βράχων» από τον Μίνω Βολανάκη και την Μελίνα Μερκούρη.

Τα 12 πρώτα χρόνια της λειτουργίας του Θεάτρου οι θεατές χρησιμοποιούσαν μεταλλικά καθίσματα ή παρακολουθούσαν τις παραστάσεις όρθιοι στις βαθμίδες του παλιού λατομείου, που είχαν διαμορφωθεί από την Τεχνική Υπηρεσία και τα συνεργεία του Δήμου. Το 1995 ξεκίνησε η μελέτη για τη δημιουργία του σημερινού θεάτρου, που η κατασκευή του ολοκληρώθηκε στα μέσα του 1997, ενώ η συνολική δαπάνη του έργου έφτασε τα 200 εκατομμύρια δραχμές. Η σκηνή «Μίνως Βολανάκης», χωρητικότητας 4000 θεατών, με πολλούς βοηθητικούς χώρους για τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν τη λειτουργία της, αποτελεί πολιτιστική υποδομή πρώτου μεγέθους για την Αθήνα.



**Εικόνα 1.3:** Πανοραμική άποψη του Θεάτρου Πέτρας κατά τη διάρκεια παράστασης



**Εικόνα 1.4:** Σχέδιο της σκηνής «Μίνως Βολανάκης» από την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου

## Θεατράκι του Μπρουκ

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την πρώτη περίοδο της λειτουργίας του θεσμού «Γιορτές των Βράχων» κατασκευάστηκαν δύο ακόμα λυόμενα θέατρα, με μεταλλικό σκελετό και ξύλινες βαθμίδες, δυναμικότητας 2500 και 1000 θέσεων αντίστοιχα, για τις παραστάσεις που έδωσαν στο χώρο οι μεγάλοι σκηνοθέτες Πήτερ Στάιν και Πήτερ Μπρουκ. Το πρώτο θέατρο μεταφέρθηκε το 1986 στα νταμάρια του Βύρωνα, όπου και λειτουργεί μέχρι σήμερα, ενώ το δεύτερο παραμένει στο χώρο του Θεάτρου Πέτρας, στη νότια πλευρά της χοάνης του παλιού λατομείου, εξυπηρετώντας μικρότερης θέασης θεατρικές και μουσικοκαλλιτεχνικές παραστάσεις και είναι γνωστό ως θεατράκι του Μπρουκ.

Το θεατράκι του Μπρουκ αποτελεί πιστό αντίγραφο του θεάτρου Μπρουκ στην Αβινιόν της Γαλλίας.



Φωτογραφία 1.1: Το Θεατράκι του Μπρουκ

### 1.2. Σκοπός της παρούσας μελέτης

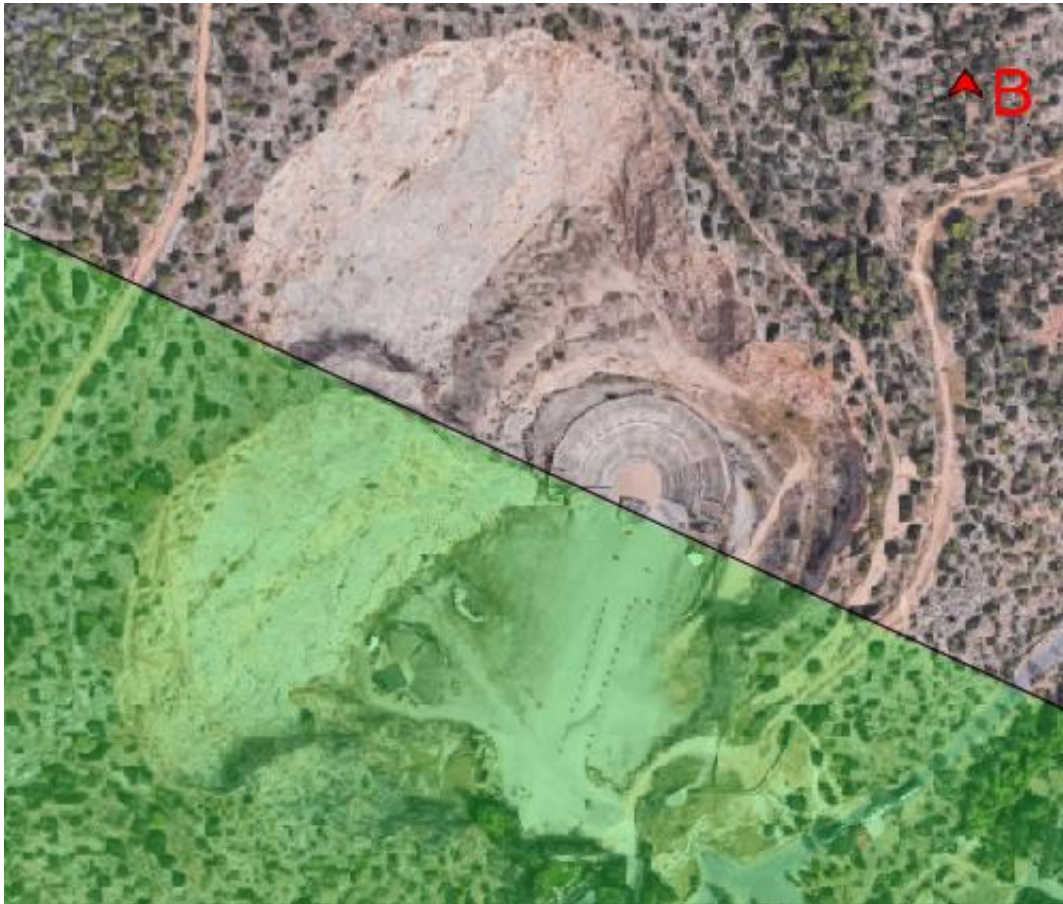
Ο χώρος του θεάτρου φιλοξενεί κάθε χρόνο χιλιάδες πολίτες, και συνεπώς οφείλει να είναι απόλυτα ασφαλής για το κοινό. Ωστόσο, τα πρηνή που συνθέτουν το τοπίο του χώρου αποτελούνται από βραχώμαζες με ασυνέχειες, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος κατάπτωσης βραχοτεμαχίων στη βάση τους. Λαμβάνοντας υπόψη μάλιστα τα μεγάλα τους ύψη και το γεγονός ότι κατά τόπους το πόδι τους βρίσκεται πλησίον πολυσύχναστων σημείων του χώρου, ο έλεγχος της ασφάλειας κρίνεται απολύτως απαραίτητος. Για παράδειγμα, το δυτικό τμήμα του θεάτρου Μπρουκ βρίσκεται μόλις 8 m από πόδι πρηνούς ύψους 95 m.



**Φωτογραφία 1.2:** Το Θεατράκι του Μπρουκ και τα πρανή που το περιστοιχίζουν

Ο στόχος λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η ασφάλεια του προσβάσιμου χώρου από το κοινό. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό της γεωλογικής κατάστασης των πρανών με στερεογραφική ανάλυση και την εκτίμηση των συνεπειών μιας ενδεχόμενης κατάπτωση βραχοτεμαχίων, μέσω μοντέλων προσομοίωσης. Στην περίπτωση που η παρούσα κατάσταση του χώρου δεν είναι ικανοποιητική, μπορούν να προταθούν μέτρα προστασίας, προκειμένου να εξλειφθεί ο κίνδυνος.

Στο χώρο του παλιού λατομείου, επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης το νότιο ήμισυ του χώρου (Εικόνα 1.5), καθώς ο χώρος που καταλαμβάνει η σκηνή «*Μίνως Βολανάκης*», εκτιμάται ότι εμφανίζει περιορισμένα προβλήματα ασφάλειας. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.6, περιμετρικά των κερκίδων υπάρχουν αναβαθμοί ικανοποιητικής έκτασης, που εικάζεται ότι δε θα επιτρέπουν την κίνηση βραχοτεμαχίων προς το χώρο των κερκίδων από μια ενδεχόμενη κατάπτωση.



Εικόνα 1.5: Κάτοψη του χώρου του πρώην λατομείου, όπου με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η επιλεγμένη περιοχή μελέτης (Google Maps)



Εικόνα 1.6: Ο χώρος που περιβάλλει τη σκηνή «Μίνως Βολανάκης» (Google Earth)

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1. Ευστάθεια πρανών

Ως πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που χαρακτηρίζουν ένα πρανές, δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα προκειμένου να εξομαλύνουν το ανάγλυφο. Στις διατμητικές αυτές τάσεις αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του υλικού και στην περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί, τότε προκαλείται θραύση του πρανούς και μετακίνηση της εδαφικής μάζας, η οποία ονομάζεται κατολίσθηση. (Turner & Schuster 1996)

Αστοχία πρανούς είναι η κατάρρευση μάζας της επιφάνειάς του. Αστοχία μπορεί να επέλθει είτε λόγω της ανθρώπινης επέμβασης στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (εκσκαφές ορυγμάτων, υποσκαφές, επιφορτίσεις, κ.α.) τα οποία διαταράσσουν την υφιστάμενη ισορροπία, είτε υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α., μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία ενός πρανούς. (Turner & Schuster 1996)

Τα τεχνητά πρανή κατασκευάζονται σε διάφορα τεχνικά έργα και προκύπτουν από την εκσκαφή του υπάρχοντος υλικού ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού. Έτσι διακρίνονται δύο κατηγορίες τεχνητών πρανών, τα πρανή ορυγμάτων και τα πρανή επιχωμάτων. Η ευστάθεια ενός τέτοιου τεχνητού πρανούς εξασφαλίζεται με τη χρησιμοποίηση έργων αντιστήριξης, όπως τοίχοι αντιστήριξης, διαφράγματα από πασσάλους, αγκυρώσεις καθώς και οπλισμένη γη και γεωυφάσματα.

Οι παράγοντες που επιδρούν κυρίως σε ένα φυσικό πρανές είναι εκείνοι της γεωλογικής δομής, των υδρογεωλογικών συνθηκών, των τεκτονικών συνθηκών καθώς και των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Γενικά, οι κατολισθήσεις στον ελληνικό χώρο αποτελούν από τα πιο σοβαρά και καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα. Τα αποτελέσματά τους έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, που διαδραματίζουν αξιόλογο ρόλο στη βιωσιμότητα πολλών οικισμών, στη διατήρηση επισφαλών συνθηκών θεμελίωσης των τεχνικών έργων, στη σωστή λειτουργία του οδικού δικτύου και στη καταλληλότητα ή μη πολλών περιοχών για διάφορες χρήσεις.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ευστάθειας πρανών, που διαμορφώνονται κατά την κατασκευή τεχνικών έργων, αλλά και φυσικών πρανών που παρουσιάζουν ενδείξεις πιθανής κατολίσθησης.

## Ανάλυση ευστάθειας πρανών

Οι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Συμβατικές μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Μεθόδους οριακής ισορροπίας
- Στερεογραφικές ή κινηματικές μεθόδους ανάλυσης
- Μεθόδους προσομοίωσης καταπτώσεων

2. Εμπειρικές μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Μεθόδους που συνδυάζονται με ταξινομήσεις βραχομάζας
- Μεθόδους που βασίζονται σε εμπειρικά νομοδιαγράμματα

3. Αριθμητικές μεθόδους, που περιλαμβάνουν αντίστοιχα:

- Μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών
- Μεθόδους διακριτών στοιχείων και αναλύσεις παραμόρφωσης ασυνεχούς μέσου

Τέλος, υπάρχουν και οι υβριδικές μέθοδοι, που συνδυάζουν κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών βασίζονται στην παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας. Στην περίπτωση που το υλικό μελέτης είναι βράχος, τότε οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται είναι: α) κατολίσθηση επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης, β) κατολίσθηση σφηνοειδούς μορφής (διεδρική), γ) κατάπτωση ανατροπής και δ) περιστροφή ολίσθηση (κυκλική). Η τελευταία παρατηρείται σε εδαφικά πρανή ή έντονα διαταραγμένους βράχους. Πιο αναλυτικά:

α) Επίπεδη ολίσθηση. Επίπεδη αστοχία προκύπτει όταν μια γεωλογική ασυνέχεια είναι παράλληλη στην επιφάνεια του πρανούς και η κλίση της επιφάνειας ολίσθησης είναι μικρότερη από τη κλίση του πρανούς και μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής.

β) Σφηνοειδής ολίσθηση. Αστοχία σφήνας προκύπτει όταν δημιουργηθεί μια επιφάνεια αστοχίας μεταξύ δύο ασυνεχειών, οι οποίες προκαλούν την μετακίνηση της μάζας που περικλείεται από αυτές προς τα κατόντη, κατά μήκος του ίχνους τομής τους, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια σφήνα.

γ) Κατάπτωση ανατροπής. Κατάπτωση με ανατροπή προκύπτει όταν η κλίση των ασυνεχειών είναι αρκετά μεγάλη και αντίθετη με την κλίση του πρανούς.



δ) Κυκλική αστοχία. Όταν τα υλικά είναι πολύ ασθενή, όπως σε ένα εδαφικό πρνανές, ή όταν η βραχώμαζα είναι έντονα ρηγματωμένη ή θρυμματισμένη, τότε η αστοχία ορίζεται από μια ασυνέχεια και τείνει να ακολουθήσει μια κυκλική επιφάνεια.

## 2.2. Κατολισθητικά φαινόμενα

Οι κατολισθήσεις, μαζί με τις πυρκαγιές, τους σεισμούς, τις ηφαιστειακές εκρήξεις και τις πλημμύρες, συνιστούν τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές, αποτελώντας βασική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζώων αλλά και περιουσιών, με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Η πλέον καταστροφική κατολίσθηση που αναφέρεται διεθνώς έλαβε χώρα στην Κίνα το 1920 μετά από σεισμό, και προκάλεσε το θάνατο 100.000 ανθρώπων, καθώς τα σπίτια τους υπερκαλύφθηκαν από μετακινημένες μάζες ασβεστούχων πηλών.

Σύμφωνα με το Ρόζο (2007), ο όρος «κατολισθητικά φαινόμενα» είναι ο πλέον αποδεκτός για να περιλάβει όλο το εύρος των αστοχιών πρνανών, δηλαδή, ερπυσμούς, ολισθήσεις, ροές, ανατροπές, και καταπτώσεις, που μπορούν να συμβούν στη ξηρά και υποθαλάσσια.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για το φαινόμενο της κατολίσθησης. Ακολουθούν ορισμένοι αντιπροσωπευτικοί ορισμοί:

- Οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρνανή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα, ορίζουν το φαινόμενο της κατολίσθησης. (Κουμαντάκης, 1984).
- Κατολίσθηση ορίζεται κάθε αλλαγή, μεγάλη ή μικρή, της επιφάνειας μιας κλιτύος, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού, με ρήξη ή όχι της συνέχειάς της, αργή ή ξαφνική, που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας και οφείλεται σε φυσικά ή τεχνητά αίτια. Η κατολίσθηση εκφράζει δηλαδή το αποτέλεσμα της αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους, που εκτός από την περίπτωση τεχνητών αιτιών, αποτελεί μια φυσική γεωμορφολογική εξέλιξη, αλλά με πολύ μεγαλύτερες γενικά ταχύτητες. Συνεπώς, είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου, με τη διαμόρφωση νέων εντατικών καταστάσεων, που δημιουργούν μια επιθυμητή νέα κατάσταση ισορροπίας. (Μαρίνος, ετος)
- Εναλλακτικά η κατολίσθηση ορίζεται ως την προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου, κορημάτων ή γαιών σε ένα πρνανές (Cruden 1991). Από αυτόν τον ορισμό εξαιρούνται οι καθιζήσεις, οι καταπτώσεις, οι θραύσεις εδάφους, καθώς και οι κατολισθήσεις, που έχουν τη μορφή και την ταχύτητα χιονοστιβάδας. Η χιονοστιβάδα χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο μεγάλης κλίμακας. Υλικά μιας τέτοιας αστοχίας μετακινούνται σε μεγάλες αποστάσεις και διαταράσσουν τη μορφολογία του τοπίου, την κατανομή της βλάστησης και το φυσικό δίκτυο στράγγισης της ευρύτερης περιοχής.

### 2.2.1. Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, οι οποίες στηρίζονται σε ποικίλα κριτήρια διαφορετικών παραμέτρων, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των συστημάτων ταξινόμησης. Ακολουθούν κάποια από αυτά παρακάτω.

1. Ανάλογα με την ενεργότητά τους, οι κατολισθήσεις χαρακτηρίζονται σε:
  - Ενεργές
    - ✓ Παροδικά ενεργές
  - Αδρανείς
    - ✓ Ενεργοποιήσιμες ή σε λανθάνουσα κατάσταση
    - ✓ Μη ενεργοποιήσιμες
    - ✓ Αρχαίες, παλιές, προϊστορικές ή απολιθωμένες
  
2. Ανάλογα με το υλικό, η μετακίνηση μπορεί να είναι κατά Zaruba-Mencl (1967,1970):
  - Επιφανειακών αποθέσεων
  - Αργιλικών εδαφών και πετρωμάτων
  - Συμπαγών πετρωμάτων
  - Ειδικού τύπου (όπως ροές λόγω παγετών ή ολισθήσεις ευαίσθητων αργίλων)
  
3. Ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης, υπάρχει ο διαχωρισμός που ακολουθεί στον Πίνακα 2.1 κατά Varnes (1978) και κατά WP/WLP (1994).

**Πίνακας 2.1:** Προτεινόμενη κλίμακα ταξινόμησης ταχύτητας κατολισθήσεων (Varnes (1978) και WP/WLP (1994)).

Περιγραφή	Ταχύτητα	
	Κατά Varnes (1978)	Κατά WP/WLP (1994)
Πάρα πολύ αργή	< 0,06 m/year	< 0,16 mm/year
πολύ αργή	0,06-1,5 m/year	0,16 mm/year-1,6 m/year
αργή	1,5 m/year - 1,5 m/month	1,6 m/year - 13 m/month
μέτρα	1,5 m/month - 1,5 m/day	13 m/month - 1,8 m/hour
γρήγορη	1,5 m/day - 0,3 m/min	1,8 m/hour - 0,3 m/min
πολύ γρήγορη	0,3 m/min - 3 m/sec	0,3 m/min - 5 m/sec
πάρα πολύ γρήγορη	> 3 m/sec	> 3 m/sec

4. Ο Varnes (1978) προτείνει μια ταξινόμηση, η οποία περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν εκτός των εδαφικών υποχωρήσεων και καταρρεύσεων, η οποία βασίζεται σε 2 βασικά κριτήρια :

✓ Ανάλογα με το είδος της κίνησης, οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται σε:

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

✓ Ανάλογα με τον τύπο του υλικού που μετακινείται διακρίνονται σε:

- Στο βραχώδες υπόβαθρο
- Στα επιφανειακά εδάφη

Σημειώνεται πως ως βραχώδες υπόβαθρο ορίζεται κάθε σκληρό συνεκτικό πέτρωμα. Ως εδάφη ορίζονται τα χαλαρά ή ασθενώς συνδεδεμένα συσσωματώματα ορυκτών και πετρωμάτων. Τα εδάφη διαχωρίζονται σε γαίες (ποσοστό μεγαλύτερο του 80% άμμου, ιλύος και αργίλου) και κορήματα (ποσοστό έως και 80% χαλίκια, κροκάλες, λατύπες ή ογκόλιθοι).

Βάσει αυτών των 2 βασικών κριτηρίων, τα κατολισθητικά φαινόμενα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2.

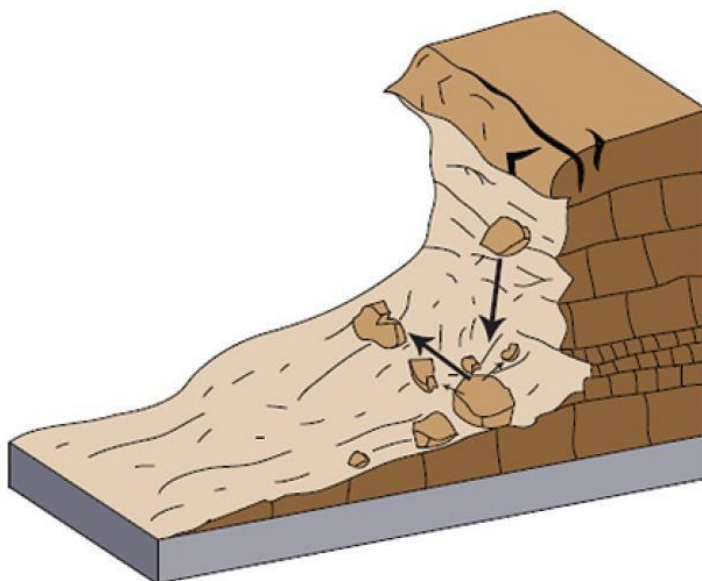
Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση κατολισθητικών φαινομένων κατά Varnes (1978)

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

Πιο συγκεκριμένα, οι μορφές των κατολισθήσεων όπως αναφέρεται από το Ρόζο (2007) είναι:

### ➤ Καταπτώσεις

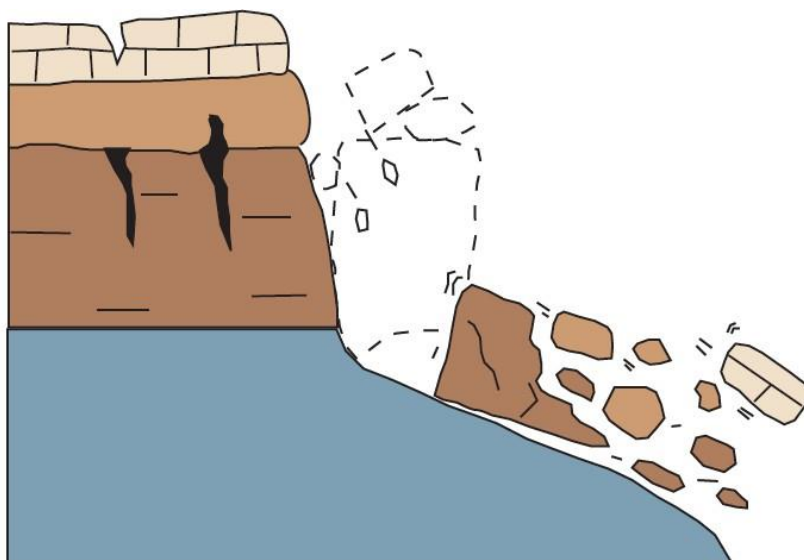
Ο όρος κατάπτωση αφορά κυρίως βραχώδεις σχηματισμούς και αναφέρεται στην αποκόλληση τμημάτων βραχομάζας ποικίλου μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή, η αποκόλληση γίνεται σε απότομο πρηνές και κατά μήκος μίας επιφάνειας όπου δεν εκδηλώνεται διατμητική κίνηση. Ακολουθεί η ελεύθερη πτώση του αποσπασθέντος τμήματος της βραχομάζας με κύλιση ή αναπήδηση, δηλαδή με κατάπτωση. Αποτελεί αρκετά σύνηθες φαινόμενο σε απότομα πρηνή από ανθρακικά πετρώματα.



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κατάπτωσης σε βραχώδες πρανές

### ➤ Ανατροπές

Σε ένα βραχώδη επίσης σχηματισμό, κάτω από τη δράση της βαρύτητας καθώς και άλλων παραγόντων, όπως η δράση του νερού που κινείται μέσα στις ασυνέχειες της βραχομάζας, είναι δυνατόν να εκδηλωθεί προς τα έξω ανατροπή και κατάπτωση τεμάχους, εφόσον αυτό οριοθετείται από ασυνέχειες που αποκλίνουν  $\pm 10^\circ$  από την κλίση του πρανούς (νεότερες απόψεις οριοθετούν την απόκλιση στις  $\pm 30^\circ$ ). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει πτώσεις ή ολισθήσεις, ανάλογα με τη γεωμετρία της επιφάνειας αποκόλλησης, τη γεωμετρία της μετακινούμενης μάζας και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Οι ανατροπές μπορεί να είναι εξαιρετικά αργές μέχρι και εξαιρετικά γρήγορες, ενώ πολλές φορές επιταχύνουν κατά τη κίνηση.



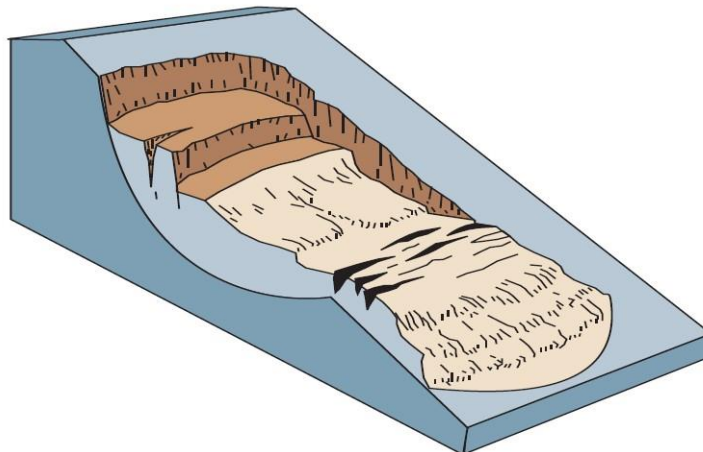
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ανατροπής σε βραχώδη σχηματισμό

### ➤ Ολισθήσεις

Στις ολισθήσεις, η ολισθαίνουσα μάζα εδαφικών υλικών οριοθετείται από τους υποκείμενους σταθερούς εδαφικούς ορίζοντες, με μια επιφάνεια μορφής συνήθως κουταλιού. Η επιφάνεια αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος μιας ή περισσοτέρων επιφανειών αδυναμίας του υλικού, κάτω από τη δράση διατμητικών δυνάμεων. Η κίνηση μπορεί να συμβεί εφ' άπαξ (και να αναφέρεται σε μια επιφάνεια ολίσθησης) ή να εξελιχθεί προοδευτικά από μια αρχική επιφάνεια προς τα ανάντη, ενσωματώνοντας περισσότερες ζώνες αδυναμίας του εδαφικού υλικού. Οι ολισθήσεις γενικά διακρίνονται στις περιστροφικές ολισθήσεις (rotational) και στις επίπεδες μετακινήσεις (translational).

#### ✓ Περιστροφικές ολισθήσεις

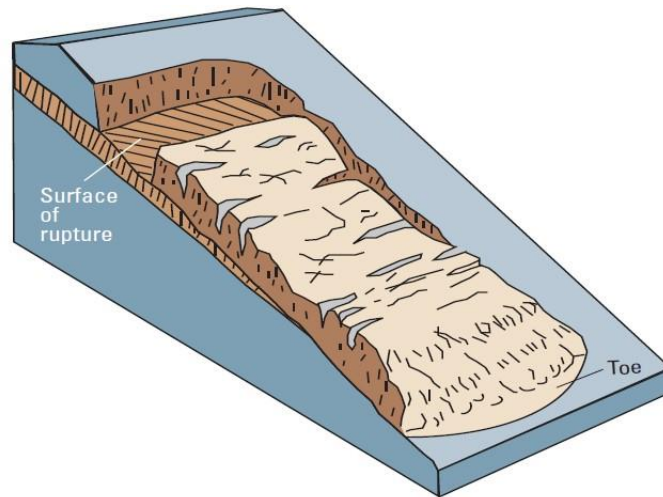
Η επιφάνεια ολίσθησης, στην περίπτωση αυτή, είναι κοίλη ή κυλινδρική, ακολουθώντας πάντως σε γενικές γραμμές προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνέχειας ή αδυναμίας, με μικρή παραμόρφωση του τεμάχου που ολισθαίνει.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου περιστροφικής ολίσθησης σε εδαφικό σχηματισμό

#### ✓ Μεταθετικές (Στρωματοειδείς) ολισθήσεις

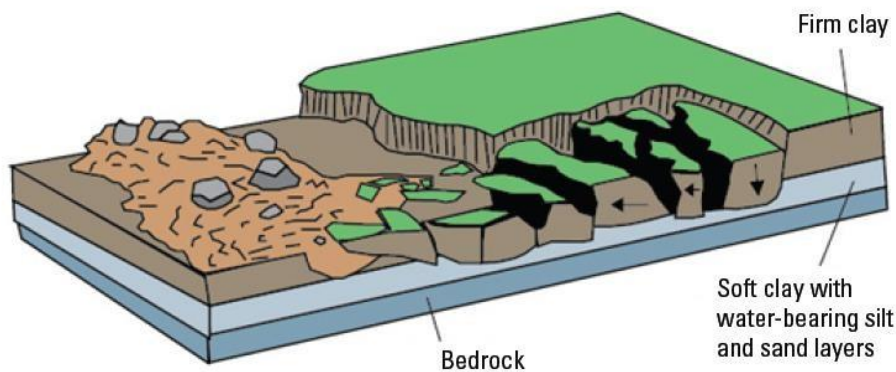
Η επιφάνεια ολίσθησης εδώ, είναι σχεδόν επίπεδη και το εδαφικό ή βραχώδες υλικό (ολίσθηση τεμάχους) κινείται κατά μήκος αυτής προς τα κάτω και προς τα έξω. Η κίνηση δηλαδή δεν περιλαμβάνει σημαντική ολική στροφή ή προς τα πίσω στροφή της κεφαλής και έτσι διακρίνεται εύκολα από την περιστροφική ολίσθηση. Κυρίως ελέγχεται από την ύπαρξη ασυνεχειών όπως στρώση, ρήγματα, διαρρήξεις κλπ.



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου στρωματοειδούς ολίσθησης σε εδαφικό σχηματισμό

### ➤ Πλευρικές (Υποοριζόντιες) εξαπλώσεις

Στις πλευρικές (υποοριζόντιες) εξαπλώσεις η κίνηση συνοδεύεται από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές. Γενικά, η κίνηση μπορεί να είναι επέκταση μάζας που ολισθαίνει, χωρίς να μπορεί να καθορισθεί με ακρίβεια το επίπεδο ολίσθησης ή η ζώνη πλαστικής ροής. Επίσης, πλευρικές εξαπλώσεις μπορεί να παρατηρηθούν με την ολίσθηση βραχωδών σχηματισμών ή συνεκτικών εδαφών πάνω σε μαλακά εδαφικά υλικά, όπως ρέουσες πλαστικές αργίλους ή λεπτόκοκκες άμμους και ιλύες που ρευστοποιούνται.

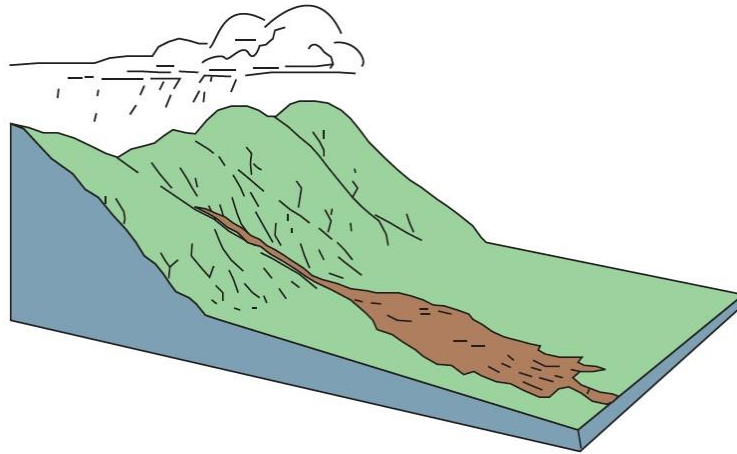


Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου πλευρικής εξάπλωσης

### ➤ Ροές

Με τον όρο αυτό αναφέρεται η σχετική κίνηση ρευστοποιημένων εδαφικών υλικών, που αποτελούν την κινούμενη μάζα, πάνω σε μία άλλη σταθερή. Δηλαδή, το εδαφικό υλικό που μετακινείται προσομοιάζει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, με ιξώδες ρευστό που ρέει (ροές εδαφών, ρεύματα γαιών, ρεύματα κορημάτων). Η κίνηση αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με ερπυσμό καθώς ο τελευταίος είναι πολύ αργή κίνηση. Η ροή στους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως η ροή γαιών (άμμου, ιλύος ή αργίλου) ή και στα πλευρικά

κορήματα των ορεινών περιοχών, μπορεί να γίνει κάτω από διάφορες συνθήκες περιεχόμενης υγρασίας και με ταχύτητα από μικρή μέχρι εξαιρετικά μεγάλη.



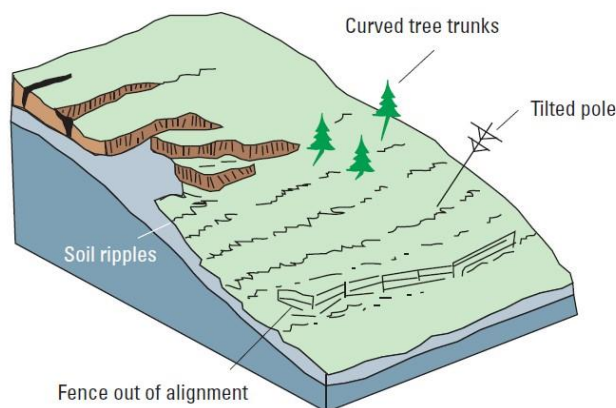
Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ροής εδαφικού σχηματισμού

### ➤ Σύνθετες κινήσεις

Περιλαμβάνουν περισσότερους του ενός τύπους κίνησης. Δηλαδή, ένας τύπος κίνησης μετατρέπεται τυπικά σε κάποιον άλλο τύπο, ή συμβάλλει στη δημιουργία κίνησης διαφορετικού τύπου.

### ➤ Ερπυσμοί

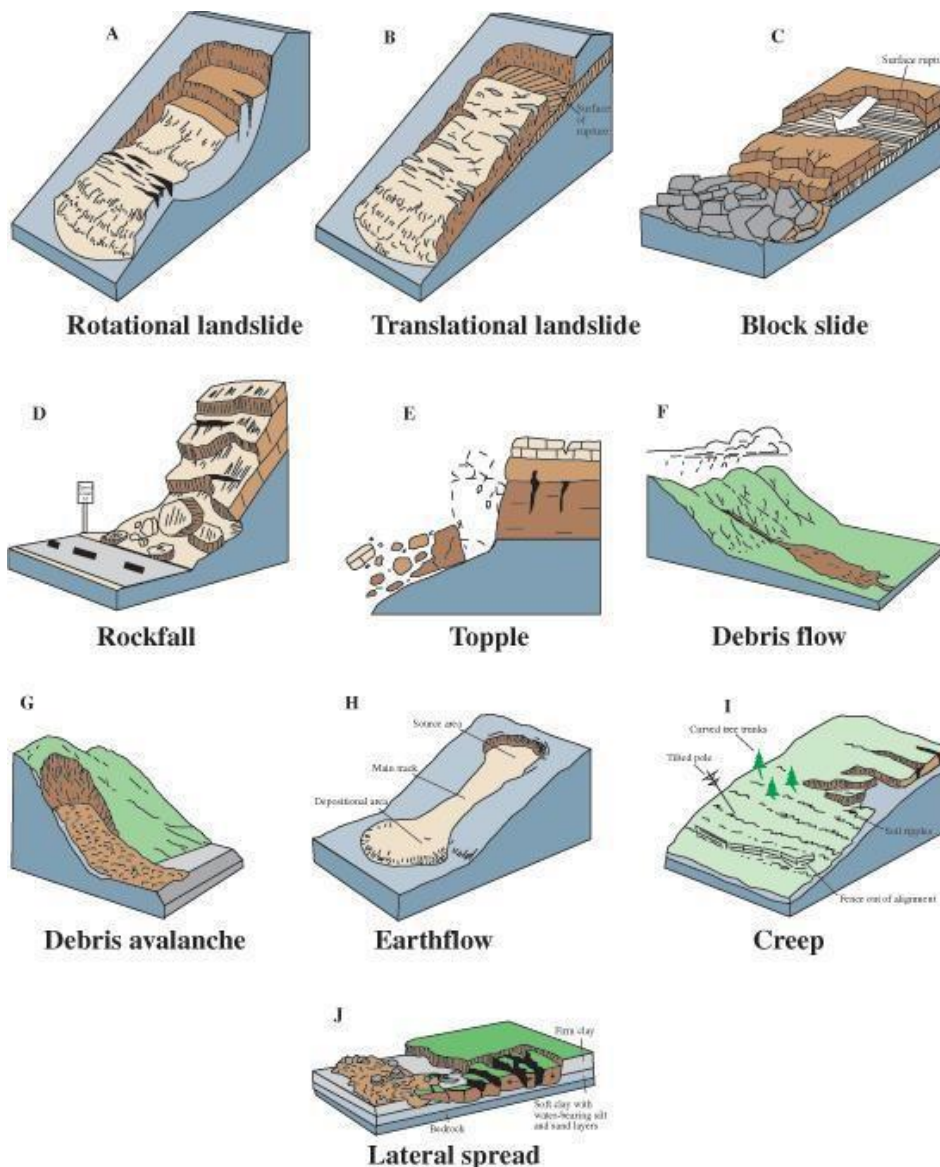
Πρόκειται για αργές έως πολύ αργές παραμορφώσεις στο χώρο (δηλαδή πολύ αργές ολισθήσεις εδαφικών μαζών), που δεν αναπτύσσουν εφελκυστικές ρωγμές και έτσι δεν είναι εύκολο να εντοπιστεί η ζώνη δράσης τους, ενώ αν δεν αντιμετωπισθούν έγκαιρα, εξελίσσονται συνήθως σε περιστροφικές ολισθήσεις.



Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ερπυσμού



Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κύριοι τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα με τον Varnes (1978).



Εικόνα 2.8: Κύριοι τύποι κατολισθητικών κινήσεων

### 2.2.2. Αίτια πρόκλησης κατολισθήσεων

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Μερικοί από τους παράγοντες επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι επιδρούν περιοδικά και αποτελούν το έναυσμα για την εκδήλωση του φαινομένου. Οι παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση μιας κατολίσθησης, διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς (προκαταρκτικοί) είναι εκείνοι οι παράγοντες που δημιουργούν την προδιάθεση ολίσθησης, ενώ οι δευτερογενείς (εναύσματος κατολίσθησης) προκαλούν άμεσα την κατολίσθηση. Όπως και ως προς την κατηγοριοποίησή τους, έτσι και ως προς τα αίτια που τις προκαλούν υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις στη διεθνή βιβλιογραφία.

Γενικά, οι βασικότεροι πρωτογενείς παράγοντες είναι:

- Η δομή του γεωλογικού υποβάθρου και η τεκτονική της περιοχής. Ένα έδαφος που αποτελείται από εναλλαγές πολλών ετερογενών στρωμάτων, είναι πιθανότερο να παρουσιάσει κατολισθητικά φαινόμενα, λόγω των πολλών πιθανών επιφανειών ολίσθησης, από ένα άλλο έδαφος το οποίο αποτελείται από ένα ενιαίο στρώμα.
- Το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της περιοχής. Υπάρχουν πετρώματα τα οποία είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθήσεις, όπως ο φλύσχης και τα αργιλικά εδάφη.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το ύψος του νερού με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης που πέφτει στην περιοχή, μπορεί να οδηγήσει σε κατολίσθηση.
- Η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς και η κινητικότητα του υποβάθρου. Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν πολλές φορές να αποτελέσουν την αφορμή για την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, προσθέτοντας στις ήδη ασταθείς μάζες την επιπλέον δυναμική φόρτιση, που τις ωθεί στην ολίσθηση. Ιδιαίτερα επικίνδυνες χαρακτηρίζονται οι περιοχές που επιδεικνύουν νεοτεκτονική δραστηριότητα.

Πιο συγκεκριμένα όμως, η πραγματοποίηση μιας κατολίσθησης επιτυγχάνεται είτε με τη με τη δράση εξωγενών παραγόντων που συντελούν στην αύξηση της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης του εδάφους, είτε των ενδογενών παραγόντων που συντελούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής του (Terzaghi, 1950). Τέτοιοι μηχανισμοί όσο αφορά τη πρώτη κατηγορία μπορεί να είναι οι ακόλουθοι:

- Αύξηση της κλίσεως των πρανών είτε από φυσικούς παράγοντες, είτε από ανθρώπινη επέμβαση. Παρουσιάζεται, δηλαδή, αστοχία στις περιπτώσεις εκσκαφών στη βάση των πρανών για την διάνοιξη οδών ή λόγω διάβρωσης των επιφανειακών υλικών του πρανούς.
- Ανθρώπινη επέμβαση μέσω της επιβολής φόρτισης στην κορυφή του πρανούς (π.χ. επιχώματα, κτίρια, κατασκευές κτλ.).
- Αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους, ή του βάρους του όγκου των υλικών, λόγω της βροχόπτωσης.

Αντίθετα, ενδογενείς παράγοντες που δρουν ως μηχανισμοί ενεργοποίησης του φαινομένου, μειώνοντας την συνοχή του εδάφους, αποτελούν:

- Η παρουσία υψηλής στάθμης υπογείου υδροφόρου ορίζοντα. Η μόνιμη στάθμη του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα που βρίσκεται μέσα στο πρανές ασκεί υδροστατικές πιέσεις που μειώνουν την ευστάθεια του πρανούς, ενώ στα βραχώδη πρανή η εναλλαγή των φάσεων του νερού (νερό, πάγος κτλ.) αυξάνει το εύρος των ασυνεχειών και ασκεί πιέσεις, ενώ παράλληλα διευκολύνει και την κυκλοφορία νερού σε βαθύτερα σημεία. Επιπλέον, όταν το νερό κινείται μεταξύ περατού και λιγότερο περατού στρώματος λειτουργεί ως μέσο που συντελεί στην αστοχία.

- Η σεισμική φόρτιση. Ιδιαίτερα σε πρηνή που αποτελούνται από χαλαρά ή χαμηλής συνεκτικότητας υλικά, κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού επέρχεται μείωση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των κόκκων, ή μείωση της συνοχής, και το πρηνές οδηγείται σε αστοχία.

Οι δευτερογενείς παράγοντες με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

- Εξωγενή αίτια, όπως είναι η αύξηση του φαινόμενου ειδικού βάρους, η αύξηση της κλίσεως των πρηνών και η αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου.
- Ενδογενή αίτια, όπως είναι η αύξηση της άνωσης, η αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων, η μείωση της συνοχής, η μείωση της τριβής και η αύξηση του ύψους και του πλάτους της τομής του εδάφους.

### 2.2.3. Το φαινόμενο της κατάπτωσης

Με τον όρο κατάπτωση βραχώμαζας ή βραχόπτωση, χαρακτηρίζεται η αποκόλληση τμήματος εδάφους ή βράχου από απότομο πρηνές (με κλίση μεγαλύτερη των 50° και συνήθως της τάξεως των 70°-90°) κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Το μέγεθος των βραχοτεμαχίων ποικίλει, από μικρές κροκάλες μέχρι και μεγάλους ογκόλιθους με όγκο εκατοντάδων κυβικών μέτρων, και ταχύτητα κίνησης κυμαινόμενη από λίγα έως και δεκάδες μέτρα το δευτερόλεπτο.

Ο Varnes (1978) όρισε την κατάπτωση ως την κίνηση ενός βραχώδη 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 κατόντη, λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Πρόκειται για συνήθη φαινόμενα σε απότομα βραχώδη πρηνή και ακτές, λόγω της δράσεως των κυμάτων ή σεισμικών κινήσεων. Οι καταπτώσεις βράχων κατά τον Hoek (2000) σχετίζονται με ορισμένα κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα τα οποία μπορούν να επιφέρουν αλλαγή στις δυνάμεις που ενεργούν στον βράχο. Αναλυτικότερα, οι καταπτώσεις βράχων σχετίζονται με την 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.

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχίων αποτελούν μια πολύ συνηθισμένη γεωμορφολογική διαδικασία με μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας κυρίως στις ορεινές περιοχές και κατά μήκος τεχνητών πρηνών, όπου μπορεί ενδεχομένως να απειλήσει συγκοινωνιακά δίκτυα, οικισμούς, εξοπλισμούς, εγκαταστάσεις ακόμη και ανθρώπινες ζωές.

Η μεγάλη καταστροφική ιδιότητα των καταπτώσεων οφείλεται στο ότι, παρόλο το γεγονός ότι αφορούν συνήθως μικρούς όγκους βραχοτεμαχίων, χαρακτηρίζονται από υψηλή ενέργεια και κινητικότητα. Επομένως, η εκτίμηση του κίνδυνου για μια κατάπτωση

βραχοτεμαχίων είναι απαραίτητη τόσο για την προφανή ανάγκη της ασφάλειας, όσο και για θέματα χωροθέτησης σε υπό ανάπτυξη περιοχές. Στις θέσεις όπου το φαινόμενο των κατακρημνίσεων είναι συχνό, δημιουργούνται απότομα μέτωπα πάνω στο βραχώδες πρηνές, ενώ στον πόδα του συγκεντρώνονται τεμάχια αποσαθρωμένων υλικών. Οι διαδρομές κατά μήκος των οποίων πραγματοποιούνται καταπτώσεις είναι ορατές από μεγάλο ύψος, λόγω της γραμμικής μορφής που παρουσιάζουν, η οποία χαρακτηρίζει και τη βλάστηση.

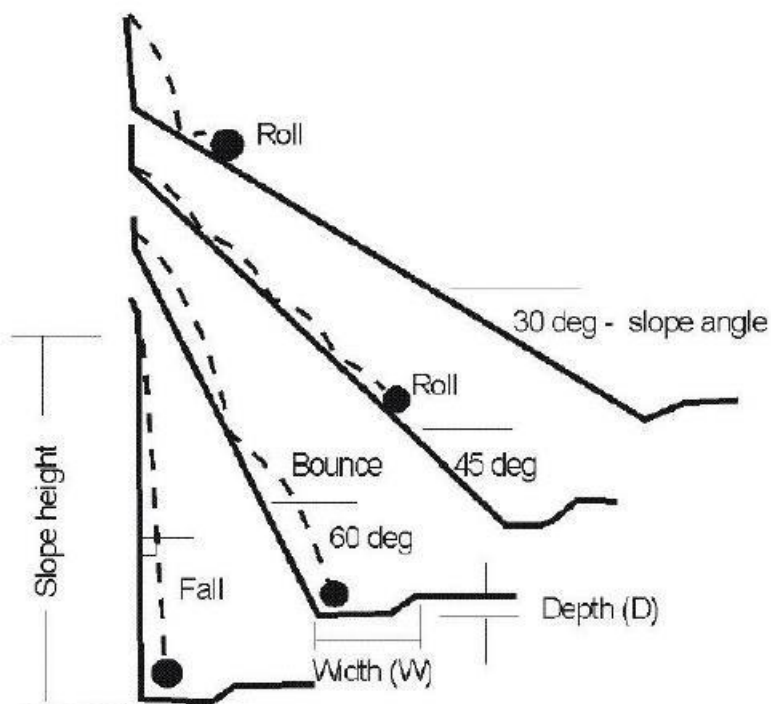
Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως σε ορεινές περιοχές, και είναι αρκετά διαδεδομένο στον ελλαδικό χώρο. Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί προκύπτει ότι στον ελλαδικό χώρο η αστοχία υπό την μορφή των καταπτώσεων βράχων αποτελεί τον συχνότερο τύπο κατολισθήσεων σε βραχώδεις σχηματισμούς με συχνότητα 56% . Οι Badger και Lowell (1983) από το Washington State Department of Highways, αναφέρουν ότι στις Η.Π.Α. έξι (6) θάνατοι οφείλονται σε καταπτώσεις βράχων τα τελευταία 30 χρόνια και ότι το 45% των ασταθών πρηνών σχετίζονται με φαινόμενα καταπτώσεων βράχων.

Το ζητούμενο για ένα μηχανικό είναι να προλάβει και να εμποδίσει με τεχνικά μέσα τιςπτώσεις αυτές, ώστε να ελαχιστοποιηθούν η επικινδυνότητα και οι επιπτώσεις τους. Ο σκοπός αυτός καθιστά απαραίτητα την πρόβλεψη της τροχιάς και της κινητικής ενέργειας της ασταθούς βραχομάζας όταν, και αν, αυτή αστοχήσει. 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.

### Γεωμετρία πρηνούς

Η γεωμετρία του πρηνούς είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει τις τροχιές των βραχοτεμαχίων (Hoek, 2000). Η διαδικασία της λεπτομερούς καταγραφής της γεωμετρίας μιας πλαγιάς για ένα μεγάλο μήκος, όπως για παράδειγμα κατά μήκος ενός αυτοκινητοδρόμου, είναι απαγορευτική από άποψη χρόνου και χρήματος, (Stevens Warren D.,1998). Η συνήθης τακτική που ακολουθείται είναι η μελέτη ορισμένων τομών που εμφανίζουν δυνητικά τον υψηλότερο κίνδυνο για κατάπτωση βραχοτεμαχίων.

Για ένα βραχοτεμάχιο που κινείται επί ενός πρηνούς (και αυξάνει την ταχύτητά του κατά την πτώση του), το τελευταίο τμήμα της διαδρομής διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της τροχιάς του. Αν η πλαγιά διακόπτεται απότομα, το βραχοτεμάχιο απλά θα πέσει από το χείλος, πιθανότατα σταματώντας πολύ κοντά μετά την άκρη. Αντίθετα αν αυτή καταλήγει σε μιας μορφής «ράμπα», τότε το βραχοτεμάχιο θα εκτελέσει μια εκτίναξη για να προσγειωθεί μακρύτερα από την άκρη της πλαγιάς. Οι περιπτώσεις αυτές διακρίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Επίδραση της κλίσης του πρανούς στο είδος κίνησης των τεμαχίων (Ritchie, 1963)

### Τροχιά των βραχοτεμαχίων

Από την στιγμή που το βραχώδες τεμάχιο αποκολληθεί από το μητρικό πέτρωμα, η τροχιά που θα ακολουθήσει αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστές κινήσεις:

- ολίσθηση
- ελεύθερη πτώση
- αναπήδηση (κρούση)
- και κύλιση.

Από τις τέσσερις αυτές κινήσεις, η φάση της κρούσης είναι η πιο πολύπλοκη για να προσδιοριστεί η εξέλιξή της. Η κρούση μπορεί να είναι από σχεδόν πλήρως πλαστική όταν η κίνηση του βράχου σταματά στο σημείο κρούσης, έως σε μεγάλο βαθμό ελαστική.

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.

### Ιδιότητες υλικών πρανούς

Σύμφωνα με τον Stevens (1998) το υλικό από το οποίο αποτελείται ένα πρανές μπορεί να διαφέρει σημαντικά είτε από την κορυφή μέχρι τη βάση της πλαγιάς, είτε από τομή σε τομή (κατά την οριζόντια έννοια). Καθαρές εμφανίσεις υγιούς πετρώματος αποτελούν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις, αφού δεν επιβραδύνουν την κίνηση των βραχοτεμαχίων.

Αντίθετα, επιφάνειες που καλύπτονται από υλικά αποσάθρωσης ή χαλίκια απορροφούν σημαντικό ποσοστό ενέργειας των κινούμενων βραχοτεμαχίων.

Για την προσομοίωση της απώλειας ενέργειας σε κάθε κρούση του βραχοτεμαχίου χρησιμοποιείται ένας συντελεστής (Coefficient of Restitution). Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής είναι 1,0 (καμία απώλεια ενέργειας) και οι τιμές που παίρνει μειώνονται σε αναλογία με την ενέργεια που μεταφέρεται από το βραχοτεμάχιο στο βράχο, με την τιμή 0 να σημαίνει ότι δε συμβαίνει αναπήδηση και το τέμαχος σταματά.

Στο μελετητή παρουσιάζεται σημαντική δυσκολία στο να προκαθοριστούν οι τιμές της παραμέτρου. Υπάρχουν δύο τρόποι να αξιολογηθεί αυτή η παράμετρος: είτε από απ' ευθείας καθορισμό μέσω πειραματικών δοκιμών, ή κατόπιν ανάστροφης ανάλυσης (Back analysis), δηλαδή μελέτη μετά την κατάπτωση (φυσική ή τεχνητή) των βράχων.

Ένας υπολογισμός του συντελεστή αυτού ( $e$ ) προκύπτει σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (A. Azzoni and M. H. de Freitas (1995)):

$$e = K_1 / K_0 \quad (2.1)$$

όπου,  $K_1$  είναι η ολική ενέργεια μετά την κρούση και  $K_0$  η ολική ενέργεια πριν την κρούση. Για το συντελεστή αυτόν έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί, χωρίς να υπάρχει ομοφωνία στο ποιος είναι ο καταλληλότερος για την προσομοίωση των καταπτώσεων. Οι πιο συνήθεις ορισμοί είναι αυτοί των δύο συνιστωσών  $R_n$  και  $R_t$  (normal και tangential). Ο συντελεστής  $R_n$  αντιπροσωπεύει τον παράγοντα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ ο  $R_t$  αντιπροσωπεύει τον παράγοντα κατά την εφαπτομενική (K.T. Chau, R.H.C. Wong, J.J. Wu (2002)).

$$R_n = v_{rn} / v_{in} \quad (2.2)$$

$$R_t = v_{rt} / v_{it} \quad (2.3)$$

όπου,  $V_m$  και  $V_{in}$  είναι τα μεγέθη της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας μετά και πριν την κρούση αντίστοιχα και  $V_{rt}$  και  $V_{it}$  τα μεγέθη της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας μετά και πριν την κρούση.

Τυπικές τιμές του  $R_n$  που χρησιμοποιούνται στις μελέτες κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 0,5, ενώ τυπικές τιμές για τον συντελεστή  $R_t$ , κυμαίνεται από 0,8 έως 0,95, (Stevens W., 1998). Έτσι οι φυτοκαλυμμένες περιοχές και μαλακά εδάφη ανταποκρίνονται στις κατώτερες τιμές, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για καθαρό σκληρό βράχο και οδόστρωμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δυστυχώς η πορεία της κίνησης ενός βράχου, μεταβάλλεται σημαντικά με την παραμικρή αλλαγή των παραπάνω παραμέτρων. Έτσι μια πλαγία που παρουσιάζει περιοχές με χαλαρά υλικά ( $R=0,35$ ) αλλά και εμφανίσεις του μητρικού πετρώματος ( $R=0,5$ ) θα έχει πολύπλοκη συμπεριφορά και τα βραχοτεμάχια θα

ακολουθήσουν διαφορετικές τροχιές ανάλογα με το αν θα χτυπήσουν το χαλαρό υλικό ή το μητρικό πέτρωμα.

### 2.3. Ασυνέχειες βραχομάζας

Η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την εμπλοκή της στη θεμελίωση ενός τεχνικού έργου, καθορίζεται κύρια από τις ασυνέχειες που τη διασχίζουν. Συνήθως ομαδοποιούνται σε συστήματα, τα μέλη των οποίων έχουν κοινό προσανατολισμό, ενώ η συμπεριφορά τους σχετίζεται και με μια σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η συνέχεια, το άνοιγμα και η απόστασή τους (Ρόζος, 2007).

Οι κυριότερες κατηγορίες ασυνεχειών είναι:

- Στρώση (bedding plane)
- Σχιστότητα (schistosity)
- Διαρρήξεις – διακλάσεις (joints)
- Ρήγματα (faults)
- Σχισμός (cleavage)
- Φύλλωση (foliation)

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια ασυνέχεια είναι:

#### 1. Προσανατολισμός (orientation)

Σημαντική παράμετρος στην εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας από πλευράς ευστάθειας. Οι ασυνέχειες πρακτικά θεωρούνται επίπεδες για την καταγραφή του προσανατολισμού τους στο χώρο. Καταγράφονται :

- Η διεύθυνση της ασυνέχειας (strike) , δηλαδή η τομή του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο, με μέτρο τη γωνία που σχηματίζει με το βορρά.
- Η μέγιστη κλίση (dip), δηλαδή η μέγιστη γωνία του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο.
- Η διεύθυνση (φορά) μέγιστης κλίσης (dip direction) , δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η τομή του επιπέδου της μέγιστης κλίσης με το οριζόντιο επίπεδο και ο βορράς.

Η μέτρηση γίνεται με γεωλογική πυξίδα και καταγράφονται η διεύθυνση μέγιστης κλίσης και η μέγιστη κλίση. Η στατιστική επεξεργασία των ασυνεχειών σε κάθε θέση απαιτεί τουλάχιστον 100 μετρήσεις και γίνεται με τη χρήση των σφαιρικών προβολών. Γενικά στη γεωτεχνική χρησιμοποιείται η ισοεμβαδική προβολή Lambert ή και το δίκτυο Schmidt.

## 2. Απόσταση (spacing)

Η απόσταση των ασυνεχειών αποτελεί σημαντική παράμετρο και από την πλευρά της περατότητας μιας βραχομάζας καθώς και από πλευράς τύπου αστοχίας, καθώς πολύ μικρή απόσταση ασυνεχειών μπορεί να προκαλέσει περιστροφική ολίσθηση.

## 3. Συνέχεια (continuity)

Σε μια βραχομάζα άλλες ασυνέχειες διατέμνουν τη μάζα της σε μεγάλο μήκος, ενώ άλλες περιορίζονται σε μήκος από άλλα συστήματα. Έτσι, σαν συνέχεια ενός συστήματος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η «επιμονή» (ή εμμονή) των ασυνεχειών στην επιφάνεια του πρσανούς μελέτης. Οι μεγάλης συνέχειας διαρρήξεις καθορίζουν συνήθως και τη συμπεριφορά της βραχομάζας από πλευράς αστοχίας, καθώς αν επιπρόσθετα συνηγορούν και άλλοι παράγοντες, μπορεί να εκδηλωθεί αστοχία επιπέδου σε μια από αυτές.

Από πλευράς συνέχειας η ταξινόμηση των ασυνεχειών έχει ως εξής:

- Πολύ μικρή (< 1m)
- Μικρή (1-2m)
- Μέτρια (3-10m)
- Μεγάλη (10-20m)
- Πολύ μεγάλη (>20m)

## 4. Άνοιγμα (aperture)

Άνοιγμα μιας ασυνέχειας θεωρείται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της. Μπορεί να προκύπτει είτε από φυσικά αίτια είτε από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως η χρήση εκρηκτικών.

Ανάλογα με το άνοιγμά τους, οι ασυνέχειες διακρίνονται σε :

- Πολύ κλειστές (< 0.1 mm)
- Κλειστές (0.1 – 0.25 mm)
- Μερικά ανοικτές (0.25 – 0.50 mm)
- Ανοικτές (0.50 – 2.5 mm)
- Μέτρια ευρείες (2.5 – 10 mm)
- Ευρείες (> 10 mm)
- Πολύ ευρείες (1 – 10 cm)
- Εξαιρετικά ευρείες (10 – 100 cm)
- Σπηλαιώδεις (> 100 cm)



## 5. Τραχύτητα (roughness)

Μια επιφάνεια ασυνέχειας πετρώματος συνήθως χαρακτηρίζεται από μια μεγάλου μήκους κυμάτωση, αλλά και μια μικρότερης έκτασης ανωμαλία, την τραχύτητα.

Η τραχύτητα σαν γενικός όρος που περιλαμβάνει και τους δύο τύπους ανωμαλίας της επιφάνειας της ασυνέχειας, είναι σημαντική για την αντοχή σε διάτμηση. Η γωνία τριβής της ασυνέχειας είναι ίση με το άθροισμα  $\varphi_b + i$ , όπου  $\varphi_b$  είναι η βασική γωνία τριβής του υλικού και  $i$  η γωνία της κύριας ανωμαλίας της ασυνέχειας.

Η διάκριση των ασυνεχειών από πλευράς τραχύτητας είναι ποιοτική, με όρους όπως :

- Πολύ τραχεία
- Τραχεία
- Ελαφρά τραχεία
- Ομαλή
- Λεία ή ολισθηρή

## 6. Υλικό πλήρωσης

Η παρουσία του υλικού πλήρωσης (πάχος, σύσταση κλπ) είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς σε συνδυασμό με την τραχύτητα της ασυνέχειας καθορίζουν την αντοχή της.

Όσο αυξάνει το πάχος του υλικού πλήρωσης, τόσο η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας «μετατίθεται» σε αυτό και επομένως μειώνεται.

Αν τελικά το πάχος του υλικού πλήρωσης ξεπεράσει το πλάτος της κυμάτωσης της ασυνέχειας τότε η αντοχή της ασυνέχειας είναι στην ουσία η αντοχή του υλικού πλήρωσης. Η σύστασή του είναι επίσης σημαντική, καθώς μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά την αντοχή της ασυνέχειας.

## 7. Νερό

Η κυκλοφορία νερού μέσα στις ασυνέχειες επιφέρει τη δράση χημικών–φυσικών διεργασιών, άρα μεταβολές στην αντοχή, την παραμορφωσιμότητα, την ανθεκτικότητα κ.ά. Ακόμα, προκαλεί διαβρωτικές δράσεις, δηλαδή αλλοίωση των τοιχωμάτων, όπως αποσάθρωση, καρστικοποίηση κλπ.

Οι ασυνέχειες ανάλογα με το νερό που κυκλοφορεί μέσα σε αυτές και σύμφωνα με απλές περιγραφές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, μπορεί να είναι :

- Στεγνές (dry)
- Σε υγρή κατάσταση (damp)
- Σε πολύ υγρή κατάσταση (wet)

- Ροή στάγδην (dripping)
- Συνεχής ροή (flowing)

#### 8. Αντοχή τοιχωμάτων

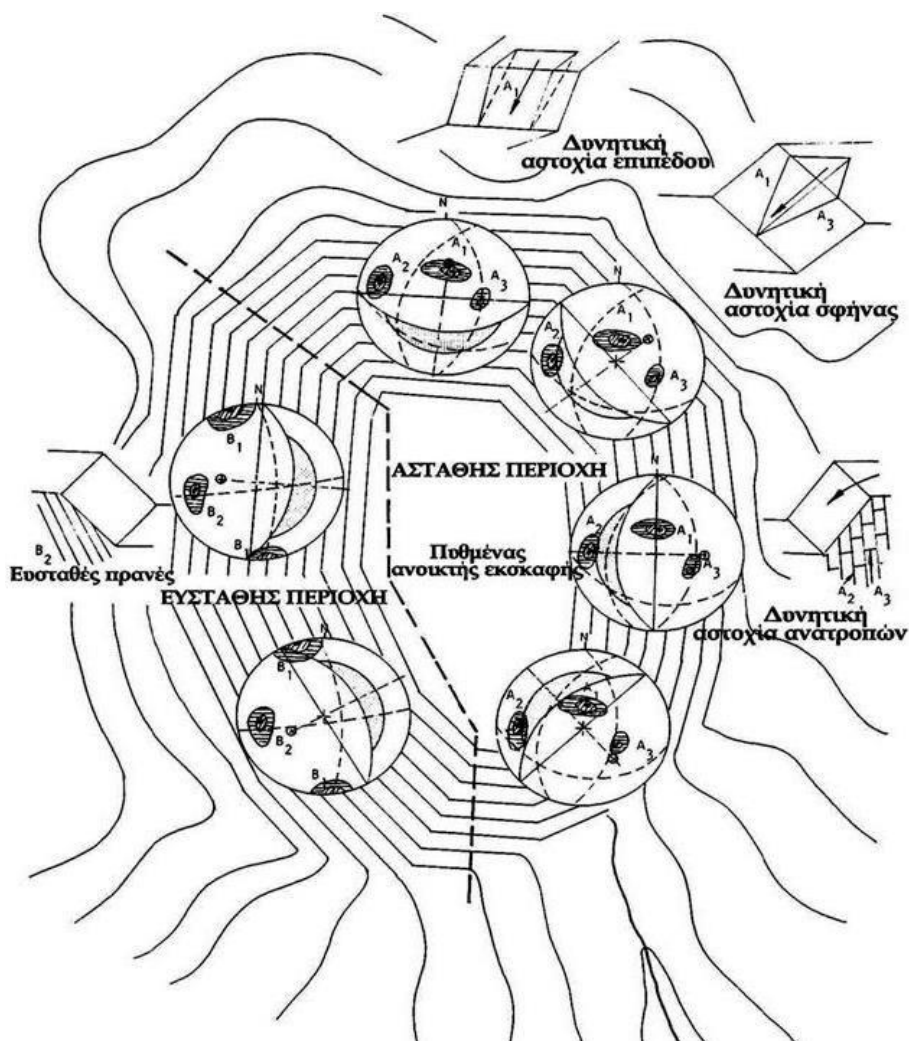
Οι κατηγορίες διάκρισης του υλικού των τοιχωμάτων από πλευράς αντοχής είναι οι ακόλουθες :

- Πολύ μαλακό (< 10 MPa)
- Μαλακό (10 – 20 MPa)
- Μέτριο (20 – 50 MPa)
- Σκληρό (50 – 60 MPa)
- Πολύ σκληρό (> 60 MPa)

### 2.4. Μορφές δυνητικής αστοχίας

Διάφοροι τύποι αστοχιών πρηνών συνδέονται με τις διάφορες γεωλογικές δομές και συνεπώς είναι πολύ σημαντικό για το μηχανικό που πρόκειται να σχεδιάσει ένα πρηνές να γνωρίζει σε προκαταρκτική φάση τα προβλήματα δυνητικής αστάθειας που μπορεί να αντιμετωπίσει, έτσι ώστε να προχωρήσει σε κατάλληλες τροποποιήσεις που θα ευνοούν την ευστάθεια του χώρου έρευνας, πριν οδηγηθεί με πληρέστερες μελέτες ανάλυσης στον προσδιορισμό του σωστού συντελεστή ασφαλείας.

Σε πρώτη ανάλυση και έχοντας τα γεωμετρικά στοιχεία των ασυνεχειών και των γεωμετρικών στοιχείων του πρηνούς (ή των πρηνών) προς εξέταση, καθώς και της γωνίας τριβής των ασυνεχειών, διαμορφώνεται η στερεογραφική παρουσίαση των τεκτονικών συνθηκών και η εκτίμηση των πιθανών τύπων δυνητικής αστοχίας που μπορεί να εκδηλωθούν με τη μορφή επιπέδου, σφήνας ή ανατροπής. Έτσι, είναι δυνατόν να γίνουν οι σχετικοί σχολιασμοί για τις ασφαλείς κλίσεις που μπορεί να διαμορφωθούν στα πρηνή των υπόψη θέσεων ή και η αλλαγή προσανατολισμού της χάραξης. Στο Σχήμα 2.10 δίνονται σχηματικά χαρακτηριστικοί τύποι αστοχιών στα πρηνή ανοικτής εκσκαφής.



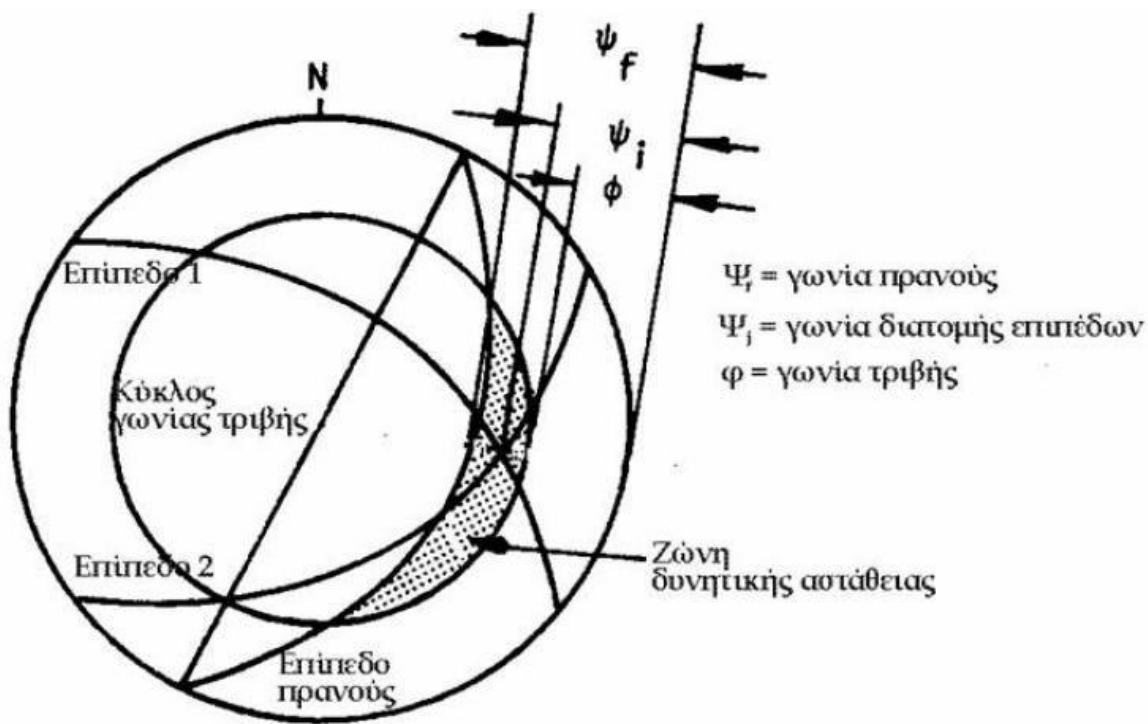
Εικόνα 2.9: Διάφοροι τύποι δυνητικών αστοχιών (Hoek & Bray, 1981)

### Αστοχία τύπου σφήνας

Σύμφωνα με τον Ρόζο (2007), αστοχία σφήνας (wedge failure) διαμορφώνεται από δύο επίπεδα που τέμνουν την επιφάνεια του πρηνούς και αλληλοτέμνονται σε κάποια θέση, δίνοντας μια γραμμή διατομής εσωτερικά της επιφάνειας του πρηνούς.

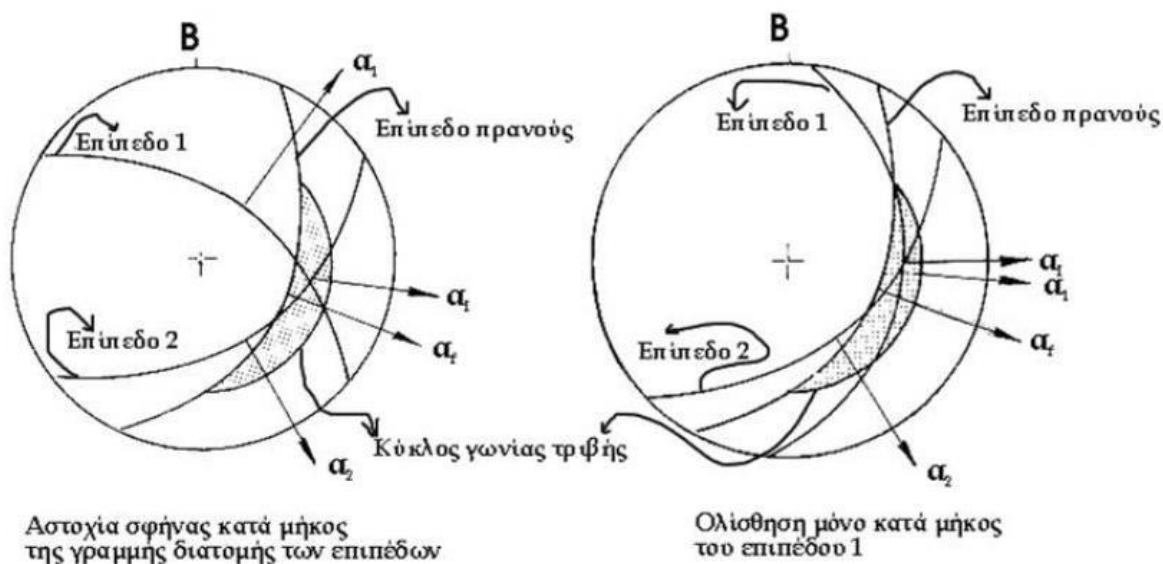
Για να εκδηλωθεί αστοχία σφήνας, δηλαδή για να αποσπασθεί το τμήμα της βραχομάζας που οριοθετείται από τα δύο αλληλοτεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες :

- Η διεύθυνση του πρηνούς και της σφήνας να συμφωνούν
- Τα δύο επίπεδα να τέμνουν την επιφάνεια του πρηνούς και να αλληλοτέμνονται
- Η γραμμή διατομής των επιπέδων να σχηματίζει γωνία  $\psi_j$  με το οριζόντιο επίπεδο που να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής της βραχομάζας  $\varphi$ , αλλά μικρότερη της γωνίας του επιπέδου του πρηνούς  $\psi_f$  (Εικόνα 2.10)



Εικόνα 2.10: Η πλέον αναγκαία συνθήκη για αστοχία σφήνας από Hoek & Bray, 1981

Η ολίσθηση θα σημειωθεί κατά μήκος της γραμμής διατομής των δύο επιπέδων, εφ' όσον η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης αυτών βρίσκεται εκτός ζώνης δυνητικής αστάθειας. Ωστόσο, αν η διεύθυνση μέγιστης κλίσης του ενός επιπέδου βρίσκεται εντός της ζώνης αυτής, τότε η ολίσθηση της σφήνας θα γίνει κατά μήκος του υπόψη επιπέδου. Στην Εικόνα 2.11 δίνονται σχηματικά και οι δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 2.11: Αστοχία σφήνας με ολίσθηση μόνο κατά μήκος της γραμμής διατομής των δύο επιπέδων, και με ολίσθηση μόνο κατά μήκος του ενός επιπέδου εκ των δύο (Hoek & Bray, 1981)

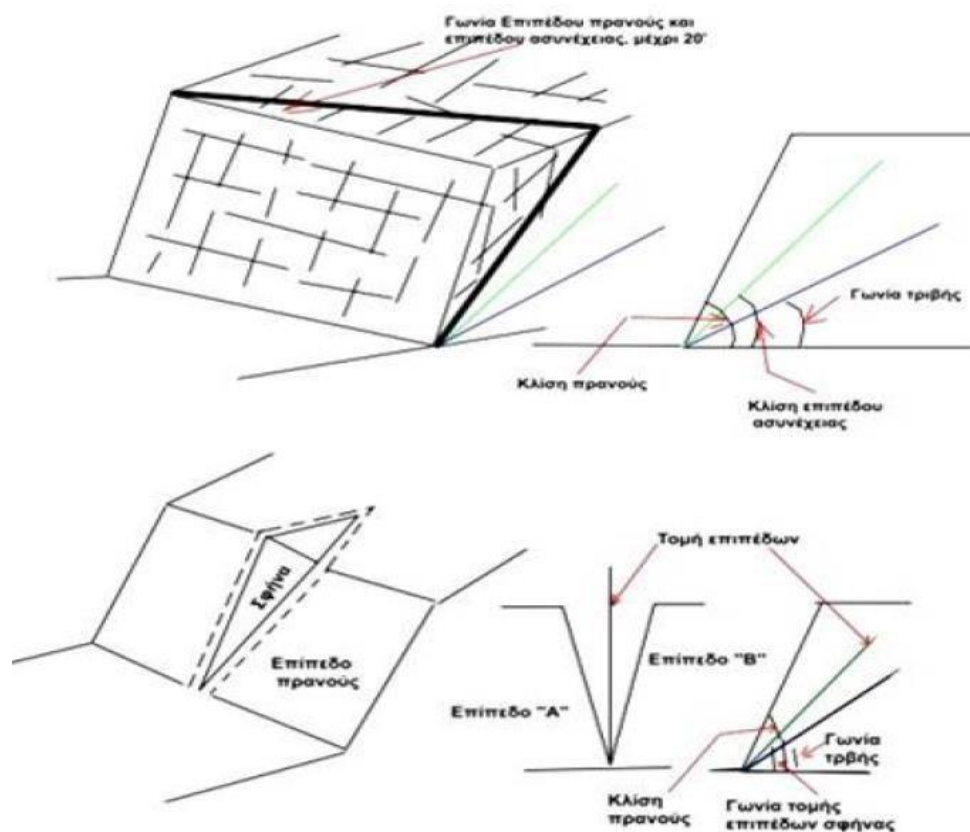
Γενικά, διαπιστώνεται ότι σε περίπτωση αστοχίας σφήνας ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς εξαρτάται από τη βύθιση της διατομής των δύο επιπέδων, τη διατμητική αντοχή της επιφάνειας των ασυνεχειών και τη γεωμετρία της σφήνας.

### Αστοχία επιπέδου

Η αστοχία επιπέδου (plane failure), η οποία αποτελεί ειδική περίπτωση αστοχίας σφήνας κατά την οποία έχουμε παραλληλισμό των δύο επιπέδων, για να συμβεί θα πρέπει :

- Η περιοχή αστοχίας να οριοθετείται από εγκάρσιες στο πρανές ασυνέχειες
- Το επίπεδο της ασυνέχειας να μη σχηματίζει με το επίπεδο του πρανούς γωνία μεγαλύτερη των  $20^\circ$
- Να ισχύει η σχέση  $\phi_f > \phi_p > \phi$ , δηλαδή η γωνία του πρανούς να είναι μεγαλύτερη αυτής του επιπέδου και εκείνη με τη σειρά της μεγαλύτερη αυτής της γωνίας τριβής.

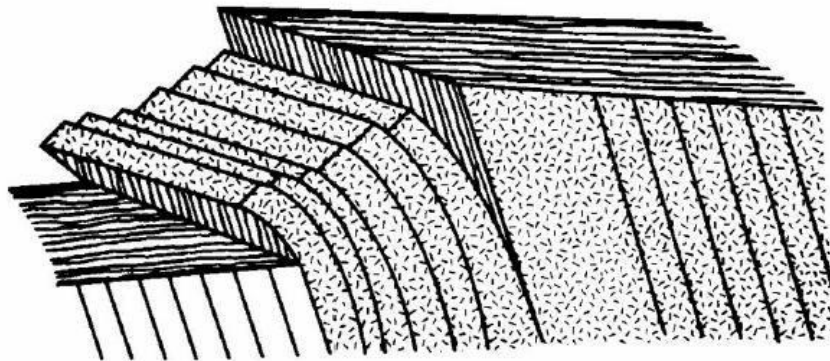
Στην Εικόνα 2.12 δίνονται σχηματικά οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για αστοχία επιπέδου και σφήνας αντίστοιχα.



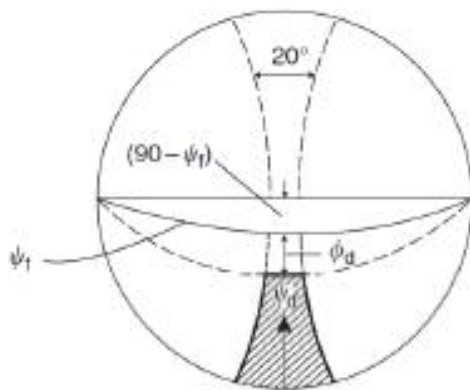
**Εικόνα 2.12:** Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών για την εκδήλωση αστοχιών επιπέδου και σφήνας σε βραχώδη πρανή (Hoek & Bray, 1981)

**Ανατροπή**

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένας πρόσθετος τύπος αστοχίας στα βραχώδη πρανή είναι οι ανατροπές (toppling), που μπορεί να συμβούν σε επίπεδα ασυνεχειών με μεγάλη κλίση (μεγαλύτερη των  $70^\circ$ ), ενώ η κλίση τους πρέπει να είναι αντίθετης φοράς από του πρανούς, με μια διαφορά  $\pm 20^\circ$ . Στην Εικόνα 2.13 δίνεται τύπος αστοχίας ανατροπής, όπου διακρίνεται η μεγάλη έως και ανάστροφη κλίση των επιπέδων ασυνέχειας, ενώ στην Εικόνα 2.14 παρουσιάζεται ο τρόπος προσδιορισμού του κινδύνου σε ανατροπή.



Εικόνα 2.13: Τύπος αστοχίας ανατροπής (toppling) από Goodman, 1980.



Εκδήλωση αστοχίας όταν:

$$\psi_d \geq (90 - \psi_f) + \phi_d$$

Όπου:

$\phi_d$ : γωνία τριβής

$\psi_f$ : κλίση του πρανούς

$\psi_d$ : κλίση των ασυνεχειών που διαμορφώνουν τα ανατρεπόμενα τεμάχια.

Εικόνα 2.14: Συνθήκη εκδήλωσης αστοχίας σε ανατροπή (Λουπασάκης 2014)

## 2.5. Μέτρα προστασίας

Στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη προστασίας στην περιοχή του πρανούς, πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν είτε στην παροδική ή μόνιμη βελτίωση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των σχηματισμών, είτε στην αποτροπή ή εξάλειψη του κινδύνου αστοχιών. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι αγκυρώσεις, χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μέτρα αποστράγγισης, ξεσκάρωμα των επισφαλών τεμάχων του πρανούς, κτλ. Στη δεύτερη κατηγορία αντίθετα, ανήκουν οι μεταλλικοί φράχτες, τα μεταλλικά δίχτυα, οι φράχτες ανάσχεσης, οι τάφροι και τα επιχώματα ανάσχεσης, κλπ.

Γενικά, τα έργα αντιστηρίξεων αυξάνουν τη σταθερότητα των πρανών ή ενισχύουν πρανή που αστοχούν. Αποτελούν ισχυρές κατασκευές που δέχονται μεγάλα φορτία, γι' αυτό κρίνονται αντισυμβατικές και τα αποτελέσματά τους είναι συζητήσιμα. Αλλά η κατασκευή τους πρέπει να προτιμάται, στην ευστάθεια πρανών, όταν δεν είναι δυνατόν να ληφθούν άλλα μέτρα.

Οι υψηλοί και μεγάλοι **τοίχοι αντιστήριξης** είναι δαπανηροί και επομένως η στατική αυτών απαιτεί ειδική προσοχή. Οι τοίχοι αυτοί υποβάλλονται σε μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις, για να επιτευχθεί η αύξηση της ευστάθειας πρανούς ή για σταθεροποίηση μαζών που κατολισθαίνουν.

Οι τοίχοι από **συρματοκιβώτια**, τα οποία τοποθετούνται κλιμακωτά στο πρανές με κατάλληλη θεμελίωση ενώ συνήθως συνδυάζονται και με την τοποθέτηση στο εσωτερικό της βάσης τους κατάλληλου στραγγιστηρίου, αποτελούν την πλέον κατάλληλη λύση. Τους χαρακτηρίζει η ευκαμψία (μπορούν να ανεχθούν μεγάλες πλευρικές φορτίσεις πριν παραμορφωθούν και τελικά αστοχήσουν) καθώς και η ευχέρεια στην αποστράγγιση (το νερό διέρχεται εύκολα μέσα από τα δομικά στοιχεία) εξασφαλίζοντας χαμηλές πιέσεις πόρων πίσω από αυτούς, δηλαδή χαμηλές ωθήσεις γαιών.

Η χρήση **πασσάλων**, έχει εφαρμοσθεί πολλές φορές, κατά κανόνα όμως χωρίς μεγάλη επιτυχία. Με την εξαίρεση αβαθών κατολισθήσεων, ενεργοποιούνται πολύ μεγάλες δυνάμεις που δεν είναι δυνατόν να αναχαιτισθούν από μία σειρά πασσάλων. Παράδειγμα χρήσης πασσάλων στον Ελληνικό χώρο που αστόχησαν αποτελεί η περίπτωση της ΠΑΘΕ στην Μαλακάσα. Αβαθείς κατολισθήσεις, μπορεί να ελεγχθούν με πασσάλους, υπό την προϋπόθεση ότι θα οδηγηθούν αυτοί σε ικανοποιητικό βάθος, για αρκετή ασφάλεια.

**Οριζόντιες αναβαθμίδες** με κλίση στην επιφάνεια εφαρμόζονται για τα μεγάλης κλίσης πρανή. Η αποστράγγιση του νερού από τις αναβαθμίδες, καθώς και η συντήρηση αυτών, είναι απαραίτητα στοιχεία για την επιτυχία του μέτρου αυτού.

**Η γεφύρωση της κατολισθαίνουσας περιοχής** σε περιπτώσεις διέλευσης γραμμικών έργων από ζώνες αστοχιών πρανών είναι πλέον ασφαλής λύση. Αν και υψηλού κόστους, χρησιμοποιείται συχνά σε πρανή βουνών με ισχυρές κλίσεις, για την αποφυγή κατολισθητικών φαινομένων τύπου ρευμάτων γαιών. Επίσης, η ίδια λύση αναφέρεται και

για δρόμους, σε μεγάλης έκτασης στρωματοειδείς κατολισθήσεις. Τα βάρθρα αυτά δεν πρέπει να εμποδίζουν την ελεύθερη ερπυστική κίνηση των σχηματισμών του πρανούς.

Τέλος, εξομάλυνση του πρανούς, αγκυρώσεις, επένδυση με gunite, τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος ή δικτύου, σφράγιση των ρωγμών, έλεγχος επιφανειακών νερών, κλπ, εφαρμόζονται στα ανάντη πρανών οδικών αξόνων. Εν τούτοις, αν τα πρανή αυτά είναι υψηλά και απότομα, τότε τα μέτρα αυτά είναι δαπανηρά, η εκτέλεσή τους δύσκολη και τα αποτελέσματά συζητήσιμα. Η μέθοδος αγκύρωσης βραχωδών μαζών σήμερα εφαρμόζεται και στη σταθεροποίηση εδαφικών πρανών. Οι τρεις κύριοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα αγκυρώσεων για τη σταθεροποίηση ενός κατολισθαίνοντος πρανούς, είναι το στατικό αποτέλεσμα των αγκυρίων ή ήλων, ο παράγων χρόνος για την κατασκευή και η διάρκεια ζωής τους.

### Προστασία από καταπτώσεις βράχων

Η πτώση βράχων είναι πολύ συνήθης στα βραχώδη πρανή και πολλές φορές έχουν καταστρεπτικά αποτελέσματα για το οδικό δίκτυο, αλλά και για τους διερχόμενους με τα μεταφορικά μέσα. Τέτοια ατυχήματα έχουν σημειωθεί στην περιοχή της Κακιάς Σκάλας, όπου εντοπίζονται πολύ υψηλά και απότομα ασβεστολιθικά πρανή.

Ένας σύνηθης τρόπος αντιμετώπισης μιας τέτοιας κατάστασης κινδύνου είναι ο αποκλεισμός του πρανούς και η απαγόρευση της πρόσβασης σε αυτό. Ο αποκλεισμός των πρανών είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την τοποθέτηση δύσκαμπτου μεταλλικού φράκτη, όπου φυσικά αυτό κρίνεται εφικτό

Οι φράκτες αυτοί κατασκευάζονται για τη δημιουργία ζωνών εγκλωβισμού βραχοτεμαχίων στη βάση των πρανών (Andrew, 1992a). Ο απαιτούμενος τύπος μεταλλικού φράκτη και οι διαστάσεις του εξαρτώνται από την κινητική ενέργεια που αναπτύσσουν τα αποκολλημένα βραχοτεμάχια, τις διαστάσεις του πρανούς και τη διαθεσιμότητα των υλικών κατασκευής.

Τα κύρια στοιχεία τους είναι (Ρόζος, 2007):

- Οι μεταλλικοί στύλοι, πάνω στους οποίους στερεώνεται το μεταλλικό δίκτυο. Οι στύλοι αυτοί πακτώνονται στο έδαφος στη θέση που έχει επιλεγεί για την προστασία του πρανούς με σχετική κλίση προς τα έξω.
- Τα μεταλλικά καλώδια που συνδέουν τους στύλους αλλά και τους αντιστηρίζουν, τα οποία βοηθούν στη συγκράτηση του πλέγματος.
- Το μεταλλικό πλέγμα συγκράτησης που απλώνεται σε όλο το μήκος ανάπτυξης των στύλων και το οποίο στερεώνεται σε αυτούς και αναρτάται στα μεταλλικά καλώδια.
- Πρόσθετα συστήματα ανάσχεσης της κίνησης.





**Εικόνα 2.15:** *Μεταλλικός φράκτης.*

Οι φράκτες ανάσχεσης κατασκευάζονται κυρίως κατά μήκος συγκοινωνιακών αξόνων και κτιρίων με σκοπό την ανάσχεση και παγίδευση μικρών βραχωδών τεμαχίων που αποσπώνται και πέφτουν από το πρσανές.

Για την επιλογή των φραχτών ανάσχεσης βασική προϋπόθεση αποτελεί η γνώση της φύσης των υλικών που δύναται να κατολισθήσουν δηλαδή, αν είναι βραχώδη ή εδαφικά. Επίσης βασική προϋπόθεση είναι τα καταπίπτοντα υλικά να έχουν μέγεθος και κινητική ενέργεια ικανή να συγκρατήσουν οι φράκτες που διατίθενται στην αγορά.

Οι φράκτες ανάσχεσης βραχοπτώσεων αποτελούν παθητικό σύστημα προστασίας και διατίθενται σε διάφορους τύπους ανάλογα με το ποσόν ενέργειας που θα πρέπει να απορροφήσουν.



**Εικόνα 2.16:** *Φράκτης ανάσχεσης*

Η χρήση μεταλλικού πλέγματος αποσκοπεί στη να αποτραπεί η αναπήδηση των αποκολλημένων τεμαχίων και η εκτίναξή τους έξω από τον μεταλλικό φράκτη ή τον τοίχο ανάσχεσης.

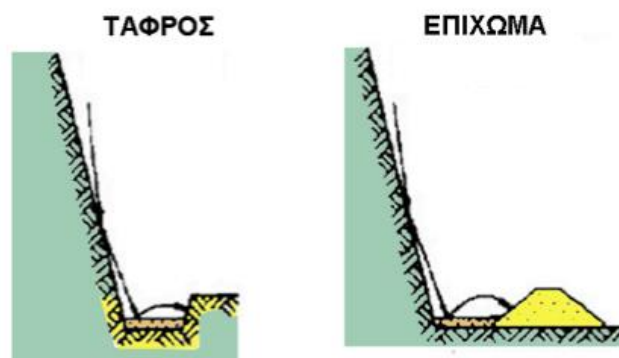
Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός πλέγματος (Ρόζος, 2007) για χρήση στην προστασία πρηνούς είναι:

- ο χάλυβας κατασκευής αλλά και το δίκτυ που θα προκύψει από αυτόν να είναι υψηλής εφελκυστικής αντοχής
- το δίκτυ να έχει μικρό βάρος
- να είναι εύκολο στη χρήση και την τοποθέτηση
- να έχει ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.



Εικόνα 2.17: Μεταλλικό πλέγμα συγκράτησης βραχοτεμαχίων

Τέλος, δεδομένης της ύπαρξης επαρκούς χώρου στη βάση των πρηνών, δύναται η κατασκευή τάφρων ανάσχεσης. Οι διαστάσεις τους, όπως και η απόσταση στην οποία θα κατασκευαστούν από τη βάση του πρηνούς, εξαρτώνται από το ύψος και την κλίση του πρηνούς. Αποτελούν σχετικά οικονομική λύση και συνδυάζονται άρτια με άλλα μέτρα προστασίας.



Εικόνα 2.18: Τάφρος και επίχωμα ανάσχεσης (Hoek, 2000)

### 3. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

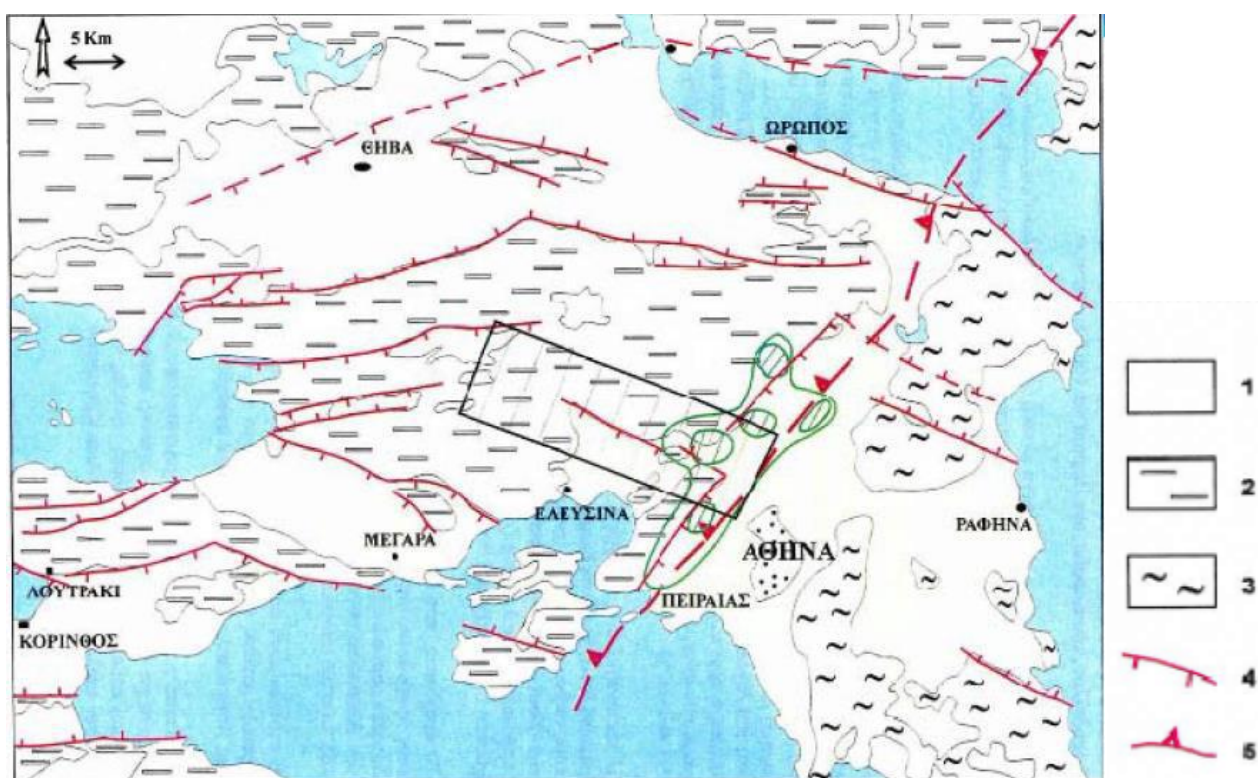
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του πετρώματος που την συνθέτουν, καθώς και η μορφολογία των πρηνών του λατομείου.

#### 3.1. Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής

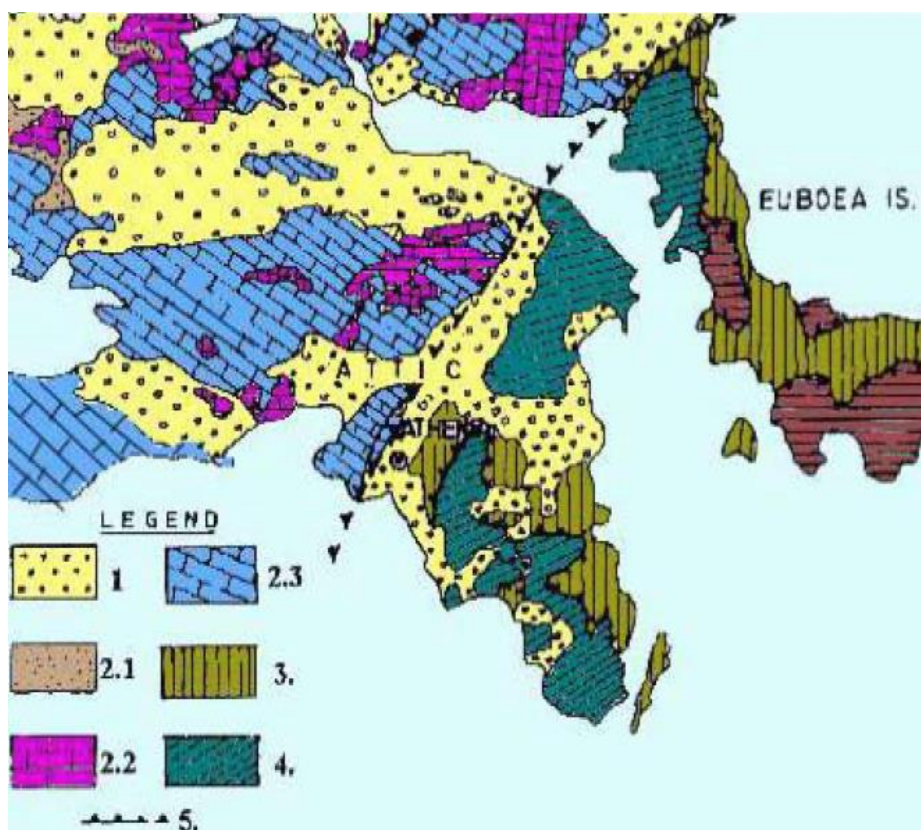
##### 3.1.1. Γεωλογία λεκανοπεδίου Αττικής

Οι σχηματισμοί που λαμβάνουν μέρος στη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου, διακρίνονται σε Αλπικούς και Μεταλπικούς (Χάρτης 3.1). Οι αλπικοί εντοπίζονται στους ορεινούς όγκους που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο αλλά και στους μικρούς λόφους που αναπτύσσονται μέσα σε αυτό, ενώ οι μεταλπικοί πληρούν το εσωτερικό του λεκανοπεδίου, όπου καλύπτουν ασύμφωνα τους υποκείμενους αλπικούς σχηματισμούς.

Η γεωλογική δομή που κυριαρχεί στο λεκανοπέδιο είναι μια μεγάλη τεκτονική ζώνη (αποκόλληση – detachment) που οριοθετεί δύο διαφορετικές ενότητες πετρωμάτων. Τα πετρώματα ανατολικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην ενότητα του Μεταμορφωμένου Αυτόχθονου συστήματος της Αττικής, ενώ αυτά στα δυτικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην Αλλόχθονη ενότητα της Υποπελαγονικής (Παπανικολάου 2002).

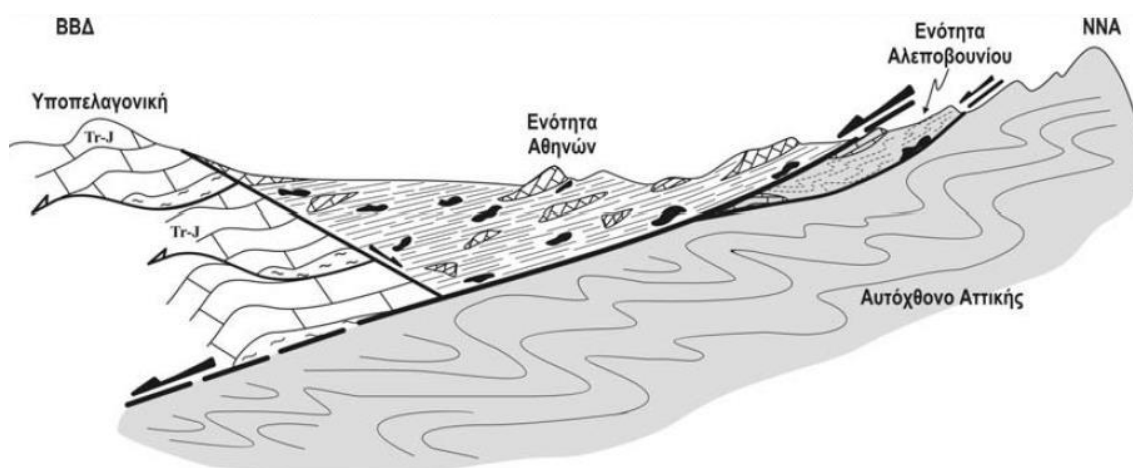


**Εικόνα 3.1:** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αττικής (1: μεταλπικοί σχηματισμοί Ανω Μειοκαινικής-Ολοκαινικής ηλικίας, 2 : μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 3 : μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 4 : κύρια ρήγματα, 5 : μεγάλης κλίμακα τεκτονική επαφή – αποκόλληση (Παπανικολάου et al. 2002)



**Εικόνα 3.2:** Ενοποιημένος γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (1. Νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις, 2. Πελαγονική ζώνη, 2.1. Φλύσσης, 2.2. Ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού, 2.3. Νεοπαλαιοζωικά- τριαδικόουρασικά μεταμορφωμένα πετρώματα, ασβεστόλιθοι και δολομίτες, 3. Αυτόχθονη ενότητα, 4. Αλλόχθονη ενότητα 5. Επώθηση (Katsikatsos et al. 1986))

Η ζώνη τεκτονικής αποκόλλησης εφελκυστικού χαρακτήρα, έχει βυθίσει προς ΒΒΔ τα αμεταμόρφωτα πετρώματα της Υποπελαγονικής και της Ενότητας Αθηνών, και έχει ανυψώσει προς τα ΝΝΑ τα πετρώματα της Ενότητας Αλεποβουνίου και του σχετικά Αυτόχθονου Μεταμορφωμένου της Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004).



**Εικόνα 3.3:** Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών κατά Παπανικολάου et al. 2004

### 3.1.1.1. Αλπικοί σχηματισμοί

Όπως προαναφέρθηκε, τα αλπικά πετρώματα ανατολικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην ενότητα του μεταμορφωμένου Αυτόχθονου συστήματος της Αττικής, ενώ αυτά στα δυτικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην ενότητα της Υποπελαγονικής (Παπανικολάου 2002).

**Η Αυτόχθονη Ενότητα Αλμυροποτάμου - Αττικής**, αναπτύσσεται στην Α-ΒΑ Αττική και δομεί τους ορεινούς όγκους Πεντέλης – Υμηττού και τα άλλα όρη που βρίσκονται ανατολικότερα. Σύμφωνα με τον Παπανικολάου (2002) η αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου – Αττικής περιλαμβάνει τις ακόλουθες επιμέρους ενότητες:

1. Τη μεταμορφωμένη **ενότητα της Βάρης** με εν μέρει Τριαδική ηλικία και άγνωστη μέχρι στιγμής γεωτεκτονική ένταξη. Αντιστοιχεί μερικώς στους «Σχιστόλιθους Βάρης» και «Δολομίτες και Ασβεστολιθικούς Σχιστόλιθους Πιρναρής» του Lepsius (1893) και περιλαμβάνει σχιστόλιθους και μεταβασικά πετρώματα στη βάση που με τυπική μετάβαση περνούν σε μια παχιά ακολουθία από δολομιτικά μάρμαρα. Η αλπική δομή είναι πολύπλοκη με ισοκλινείς πτυχές και πολλές εσωτερικές ολισθήσεις.
2. Την υπερκείμενη μεταμορφωμένη **ενότητα Υμηττού**, με εν μέρει τριαδικο-ιουρασική ηλικία και άγνωστη επίσης ένταξη. Αντιστοιχεί στο «Κατώτερο Μάρμαρο», «Ανώτερο Μάρμαρο» και «Σχιστόλιθους Καισαριανής» του Lepsius (1893) και περιλαμβάνει μια ακολουθία από μάρμαρα και δολομίτες που με μετάβαση περνάει σε σχιστόλιθους (που περικλείουν μεταβασικά και υπερβασικά πετρώματα), πτυχωμένα ισοκλινώς με πτυχές χιλιομετρικής κλίμακας που δημιουργούν επαναλήψεις των ίδιων οριζόντων.
3. Την επίσης μεταμορφωμένη **ενότητα Πεντέλης** που ανήκει στις εξωτερικές ελληνίδες με χαρακτήρες που θυμίζουν την ενότητα της Τρίπολης ή αυτή των Νοτίων Κυκλάδων. Περιλαμβάνει μια μετα-ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία στη βάση που με μετάβαση περνάει σε μια παχιά ακολουθία από μάρμαρα.

**Τα μη-μεταμορφωμένα ιζηματογενή πετρώματα, της Υποπελαγονικής** (Τεκτονικές ενότητες Σφενδάλης & Μαυρηνόρας – Κατσιμιδιού), αναπτύσσονται στη ΒΔ Αττική και δομούν τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας, του Ποικίλου Όρους και του Αιγάλεω (Marinos & Petracheck 1956, Παπανικολάου 1986).

1. Ο σχηματισμός βάσης, αποτελεί ένα ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα που αποτελείται από εναλλαγές τεφροπράσινων κυρίως και φαιών αργιλλικών σχιστών, πηλιτών, ψαμμιτών, χαλαζιακών κροκαλοπαγών, τόφφων και τοφφιών μέσα στις οποίες απαντούν επίσης ασβεστόλιθοι, αρκόζες και γραουβάκες, καθώς και τεμάχη λαβών, που ανήκουν κυρίως στον τύπο του χαλαζιακού κερατοφύρη.
2. Ο κύριος λιθολογικός τύπος της Υποπελαγονικής ενότητας αποτελείται από λευκούς, τεφρόλευκους και κατά θέσεις ροδόχρους ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, νηρητικής φάσεως. Τα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής εμφανίζονται συνήθως κατακερματισμένα, αναπτύσσοντας πυκνές διακλάσεις και δευτερογενές πορώδες, λόγω καρστικοποίησης, ενώ το πάχος τους φθάνει τις μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου, υπερκείμενη τεκτονικά της Υποπελαγονικής Ενότητας, καθώς και το ανατολικό τμήμα, υπερκείμενη τεκτονικά του Αυτόχθονου της Αττικής, εμφανίζεται το **Αλλόχθονο Σύστημα του Λεκανοπεδίου**

**Αττικής**, οι «Σχιστόλιθοι των Αθηνών» (Marinos et al. 1971, 1974), οι οποίοι, με βάση τη λιθολογική σύσταση, την παραμόρφωση και το βαθμό μεταμόρφωσης, διακρίνονται σε δύο ενότητες:

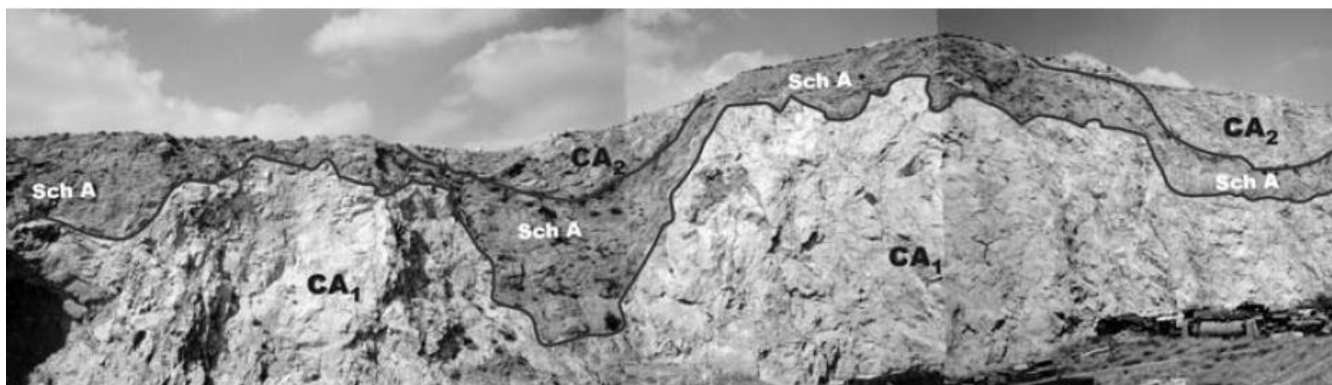
1. Την υπερκείμενη, ουσιαστικά αμεταμόρφωτη, **Ενότητα Αθηνών** και
2. Την υποκείμενη ελαφρά μεταμορφωμένη **Ενότητα Αλεποβουνίου**.

Ο Κατσικάσος (1986) ονομάζει το σύνολο των σχηματισμών αυτών Νεοελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα.

Η **Ενότητα Αθηνών** εμφανίζεται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου, υπερκείμενη τεκτονικά της Υποπελαγονικής Ενότητας (δυτικά) και της Ενότητας Αλεποβουνίου (ανατολικά) και περιλαμβάνει δύο βασικά λιθολογικά συστήματα, τα οποία παρουσιάζουν βασικές λιθοφασικές διαφορές και διαφορετικούς χαρακτήρες τεκτονικής παραμόρφωσης (Παπανικολάου et al., 2004). Εξ άλλου τα δύο αυτά λιθολογικά σύνολα αποτελούν δύο επιμέρους «τεκτονικές ενότητες».

- Το πρώτο, συνίσταται από λευκούς συμπαγείς ανακρυσταλλωμένους ως επί το πλείστον ασβεστόλιθους του Άνω Κρητιδικού, οι οποίοι εμφανίζονται άστρωτοι σε υφαλώδη και γενικά νηρητική φάση.
- Από την άλλη, το δεύτερο σύστημα της ενότητας, αντιστοιχεί σε ένα σύνθετο πετρολογικό σύνολο – μείγμα πετρωμάτων (melange) Άνω Κρητιδικής ηλικίας στο οποίο περιλαμβάνονται κλασικά ιζήματα, όπως ψαμμίτες, άργιλοι, ψαμμούχες μάργες και γραουβάκες, πηλίτες, καθώς επίσης και πλακώδεις πελαγικοί ασβεστόλιθοι ενίοτε με πυριτικές ενδιάστρώσεις και άλλοτε με κονδύλους πυριτιολίθων.

Η εσωτερική γεωμετρία της Ενότητας Αθηνών με τις διαδοχικές εναλλαγές των δύο υποενότητων αποκαλύπτεται με εντυπωσιακό ή μη τρόπο στα παλαιά λατομεία του δυτικού και του κεντρικού τμήματος του Λεκανοπεδίου. Στο δυτικό τμήμα, και συγκεκριμένα στα λατομεία Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων, διακρίνονται τουλάχιστον δύο επαναλήψεις, από τις τρεις που αναγνωρίστηκαν συνολικά στο δυτικό τμήμα. Στη θέση αυτή παρατηρούνται εντυπωσιακές τεκτονικές επιφάνειες με οριζόντιες γραμμές ολίσθησης, που φέρνουν σε επαφή τους διάφορους λιθολογικούς τύπους της δεύτερης υποενότητας μεταξύ τους αλλά και με τους νηρητικούς ασβεστόλιθους της πρώτης υποενότητας (Φωτογραφία 3.2).



**Εικόνα 3.4:** Παλαιά λατομεία Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων: η εσωτερική χαοτική δομή της Ενότητας Αθηνών με συνύπαρξη πελαγικών σχιστών, ψαμμιτών (Sch A) και νηρητικών ασβεστόλιθων του Άνω Κρητιδικού (CA1 ανοιχτόχρωμοι, CA2 σκουρόχρωμοι) από Παπανικολάου et al. 2004.

Η **Ενότητα Αλεποβουνίου** εντοπίζεται μόνο στο ανατολικό περιθώριο του Λεκανοπεδίου, και είναι τεκτονικά σφηνωμένη μεταξύ της υπερκείμενης Ενότητας Αθηνών και των υποκείμενων μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Υμηττού. Διακρίνονται 2 κύρια λιθολογικά σύνολα εκ των οποίων το ένα υπέρκειται τεκτονικά του άλλου σχηματίζοντας 2 ξεχωριστά τεκτονικά καλύμματα: α) το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα Αλεποβουνίου και β) το κατώτερο κάλυμμα.

- Το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα περιλαμβάνει συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, λευκούς έως ερυθρίζοντες ή φαιοκάστανους, με ασαφή στρώση κατά θέσεις έως παχυστρωματώδεις.
- Το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα συνίσταται από αμυδρώς μεταμορφωμένα έως ημιμεταμορφωμένα σχιστομαργαϊκά στρώματα και φυλλίτες, έντονα σχιστοποιημένους, ιδιαιτέρως αμέσως κάτω από την τεκτονική επαφή προς τους υπερκείμενους ασβεστόλιθους Αλεποβουνίου. Πρόκειται για ένα σύνθετο πετρολογικά σύστημα που αποτελείται κυρίως από φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, εντός των οποίων παρεμβάλλονται τεφροί ή καστανοί, πλακώδεις ασβεστόλιθοι, καθώς και πλακώδεις ερυθροί ή κιτρινωποί μικροκοκκώδεις χαλαζίτες. Οι παλαιότεροι ερευνητές αναφέρουν τα κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα ως «Στρώματα Καρά» ηλικίας Μ.- Αν. Κρητιδικό (Lepsius 1893, Kober 1929).

### 3.1.1.2. Μεταλπικοί σχηματισμοί

Οι μεταλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε σχηματισμούς του Νεογενούς και σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς. Βάσει της φάσης τους αλλά και της γεωγραφικής τους κατανομής, οι νεογενείς σχηματισμοί έχουν διαιρεθεί (Παπανικολάου κ.α. 2004) σε:

- **Θαλάσσιους**, οι οποίοι περιλαμβάνουν αμιγώς θαλάσσιες, αλλά και παράκτιες και παράλιες φάσεις και εντοπίζονται στην περιοχή του Νότιου Λεκανοπεδίου Αθηνών.
- **Ηπειρωτικούς**, οι οποίοι περιλαμβάνουν λιμναίες έως λιμνοχερσαίες αποθέσεις οι οποίες κατά θέσεις περιέχουν απολιθώματα της Πικερμικής πανίδας (Πύργος Βασιλίσσης) και εντοπίζονται στην περιοχή του Βόρειου Λεκανοπεδίου Αθηνών.

#### Θαλάσσιοι Νεογενείς σχηματισμοί:

- Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί: μάργες, ψαμμίτες, μαργαϊκοί ψαμμίτες, λατυπποπαγή, ασβεστόλιθοι.
- Άνω Μειοκαινικοί σχηματισμοί: κλαστική σειρά, στην οποία απαντώνται άργιλοι και ιλύες με κυμαινόμενο ποσοστό κυρίως σχιστολιθικών λατύπων, αμμούχες μάργες, λατυπποπαγή. Η σειρά αυτή συνήθως υπόκειται των ανθρακικών ανωμειοκαινικών σχηματισμών, οι οποίοι αποτελούνται από λατυπποπαγείς ασβεστόλιθους, ασβεστοψαμμίτες, κοραλλιογενείς και ωολιθικούς ασβεστόλιθους

#### Ηπειρωτικοί Νεογενείς σχηματισμοί:

- Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί: άμμοι και άργιλοι, οι οποίοι υπέρκεινται των Άνω Μειοκαινικών ηπειρωτικών σχηματισμών.
- Άνω Μειοκαινικοί ηπειρωτικοί-λιμναίοι σχηματισμοί: μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αμμούχες μάργες και μάργες (λιμναίες φάσεις) και ερυθρές άργιλοι και λατυπποπαγή (χερσαίες φάσεις).

Τέλος, επί όλων των παραπάνω σχηματισμών επικάθονται Τεταρτογενείς αποθέσεις, στις οποίες συμμετέχουν τα φερτά υλικά των ποταμών του Λεκανοπεδίου, οι παράκτιες αποθέσεις, οι ποτάμιες αναβαθμίδες, οι πλευρικές αποθέσεις κορημάτων, τα ριπίδια και οι κώνοι κορημάτων των περιφερειακών ορεινών όγκων.

### 3.1.2. Γεωλογία περιοχής μελέτης

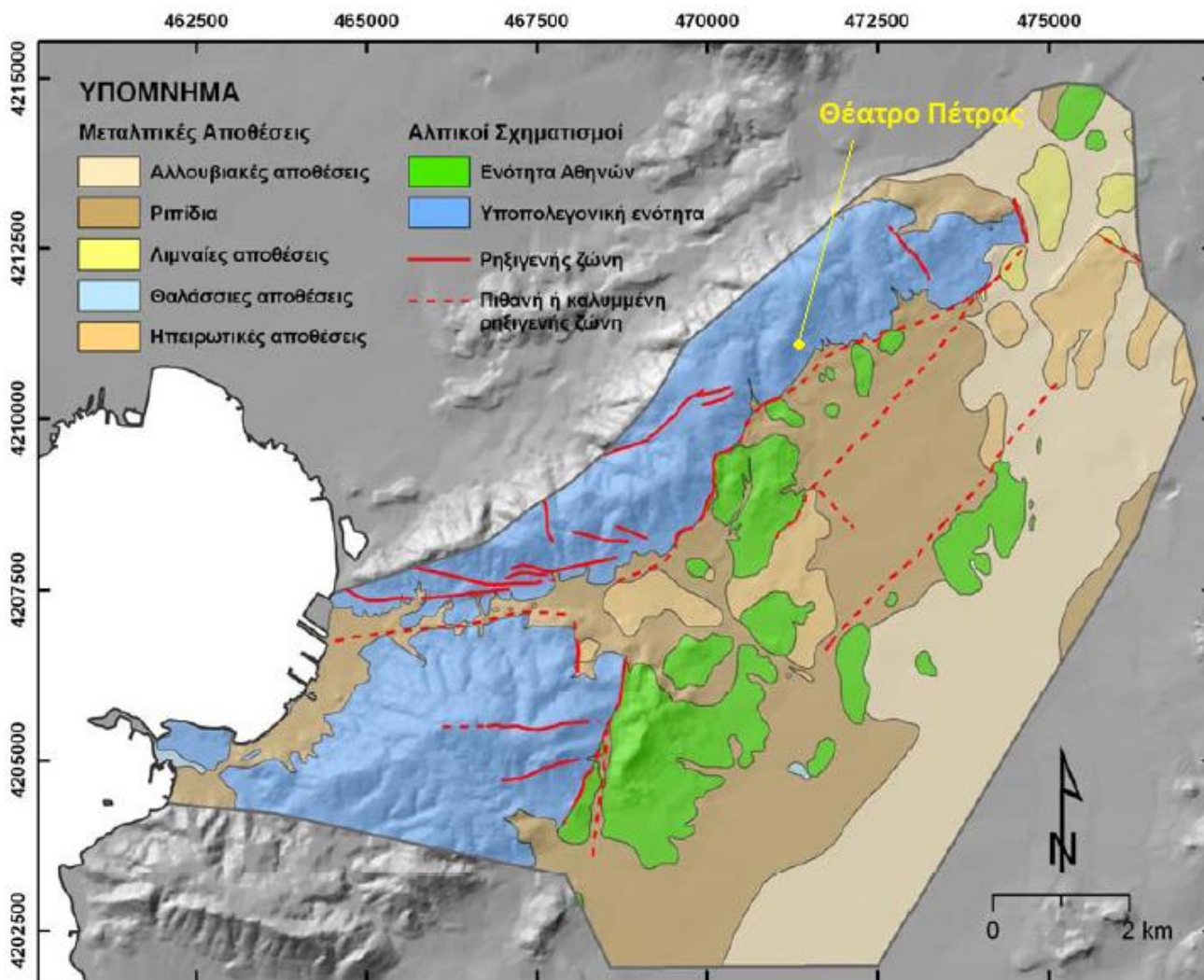
Το Θέατρο Πέτρας βρίσκεται στους πρόποδες του Ποικίλου Όρους, και συνεπώς τα πετρώματα που συναντούνται στον ευρύτερο χώρο ανήκουν στην Υποπελαγονική ζώνη (Εικόνα 3.5). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενότητα της Υποπελαγονικής συνίσταται από μια σειρά ιζηματογενών πετρωμάτων, κλαστικών στη βάση, και στη συνέχεια ανθρακικών, η ηλικία των οποίων κυμαίνεται από το Ανώτερο Παλαιοζωϊκό μέχρι το Ανώτερο Ιουρασικό.

Χαρακτηριστική λιθολογική φάση του **κλαστικού σχηματισμού της βάσης** της Υποπελαγονικής αποτελούν οι **βαθυκύανοι έως μαύροι βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι** που βρίσκονται μέσα στα κλαστικά ιζήματα ως ανεξάρτητα τεμάχια με τη μορφή μεγάλων ή μικρότερων ολισθολίθων. Μερικές φορές αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από θραύσματα στελεχών κρινοειδών και άλλων εχινόδερμων, φυκών, ενώ απαντούν επίσης και βραγχιονόποδα, γαστερόποδα και τρηματοφόρα, όλα χαρακτηριστικά είδη του Περμίου (250-230 εκατομμύρια χρόνια από σήμερα). Από τα απολιθώματα των ασβεστολιθικών ολισθολίθων και από τη στρωματογραφική θέση του συνόλου του σχηματισμού προκύπτει η ηλικία του, η οποία είναι **μεταξύ Ανώτερου Παλαιοζωϊκού και Κατώτερου Τριαδικού**.

Ο κλαστικός σχηματισμός της βάσης της Υποπελαγονικής αναπτύσσεται με μικρή σχετικά επιφανειακή εξάπλωση, σε όλη την έκταση του Ποικίλου Όρους (Περιοχή Καματερού), ενώ αρκετά εκτεταμένος βρίσκεται στην περιοχή του Αιγάλεω. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιοχές ο σχηματισμός βρίσκεται τεκτονικά ενσφηνωμένος με τα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής, λόγω των **φαινομένων επιπτεύσεως**, που χαρακτηρίζουν ολόκληρη την ενότητα. Έτσι σε πολλές θέσεις το ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα της βάσης της Υποπελαγονικής, αν και κατώτερος στρωματογραφικά σχηματισμός, επικάθεται τεκτονικά των ανθρακικών σχηματισμών, που είναι και οι νεώτεροι, όπως συμβαίνει σε πολλές θέσεις στο Ποικίλο Όρος (Γουλιώτης, 2002), και μέσα στην κύρια ορεινή μάζα του Αιγάλεω (Τάταρης-Σίδερης 1989).

**Ο δεύτερος λιθολογικός σχηματισμός** της Υποπελαγονικής, που είναι και ο κύριος, συγκροτεί σχεδόν το σύνολο των ορεινών μαζών Αιγάλεω, Ποικίλου Όρους. Αποτελείται από **λευκούς, τεφρόλευκους και κατά θέσεις ροδόχρους ασβεστόλιθους**, και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, νηρητικής φάσεως. Η ηλικία τους, βάσει της περιεχομένης πανίδας και χλωρίδας (δίθυρα ελασματοβράγχια, φύκη, τρηματοφόρα, κοράλλια), κυμαίνεται από το **Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Ιουρασικό (Κιμμερίδιο)**. Αποτελούν την προς τα άνω κανονική εξέλιξη του ηφαιστειοϊζηματογενούς συμπλέγματος, αλλά λόγω της έντονης τεκτονικής που έχει επηρεάσει την ενότητα, η στρωματογραφική συνέχεια έχει χαθεί, μ' αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις η επαφή να είναι τεκτονική. Τα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής εμφανίζονται συνήθως κατακερματισμένα, αναπτύσσοντας πυκνές διακλάσεις και δευτερογενές πορώδες, λόγω καρστοποίησης, ενώ το πάχος τους φθάνει τις μερικές εκατοντάδες μέτρα.





Εικόνα 3.5: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής της Δυτικής Αθήνας (Λέκκας 2010), όπου παρουσιάζεται η θέση του Θεάτρου Πέτρας

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τα όσα ειπώθηκαν περί γεωλογίας του Λεκανοπεδίου Αττικής και της Υποπελαγονικής ενότητας, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης είναι τα ακόλουθα:

1. Το λατομείο απαρτίζεται από Αλπικούς σχηματισμούς οι οποίοι εντάσσονται στην ενότητα της Υποπελαγονικής.
2. Τα πρανή του λατομείου αποτελούνται από δύο διαφορετικών ειδών ασβεστόλιθους (Φωτογραφία 3.1). Συγκεκριμένα, στο νοτιότερο τμήμα του χώρου παρατηρήθηκε βαθυκύανος ασβεστόλιθος (Κατώτερος) (Φωτογραφία 3.2), άστρωτος, αρκετά κατακερματισμένος με ελαφρώς τραχείες ασυνέχειες και με αργιλικό υλικό πλήρωσης (σχηματισμός βάσης Υποπελαγονικής, μεταξύ Ανώτερου Παλαιοζωϊκού και Κατώτερου Τριαδικού). Στο βορειότερο τμήμα, παρατηρήθηκε τεφρόλευκος ασβεστόλιθος (Ανώτερος) (Φωτογραφία 3.3), παχυστρωματώδης με τραχείες ασυνέχειες, χωρίς υλικό πλήρωσης (δευτερός σχηματισμός Υποπελαγονικής, Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Ιουρασικό). Στο σύνολό τους, παρουσιάζονται έντονα κερματισμένοι, λόγω της εκτεταμένης χρήση εκρηκτικών υλών κατά την λατόμευσή τους, και αλλά και εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού στα τμήματα εκατέρωθεν των ρηγμάτων.



**Φωτογραφία 3.1:** Ανώτερος (επάνω) και Κατώτερος (κάτω) ασβεστόλιθος, όπως εμφανίζονται στα περιμετρικά πρανή

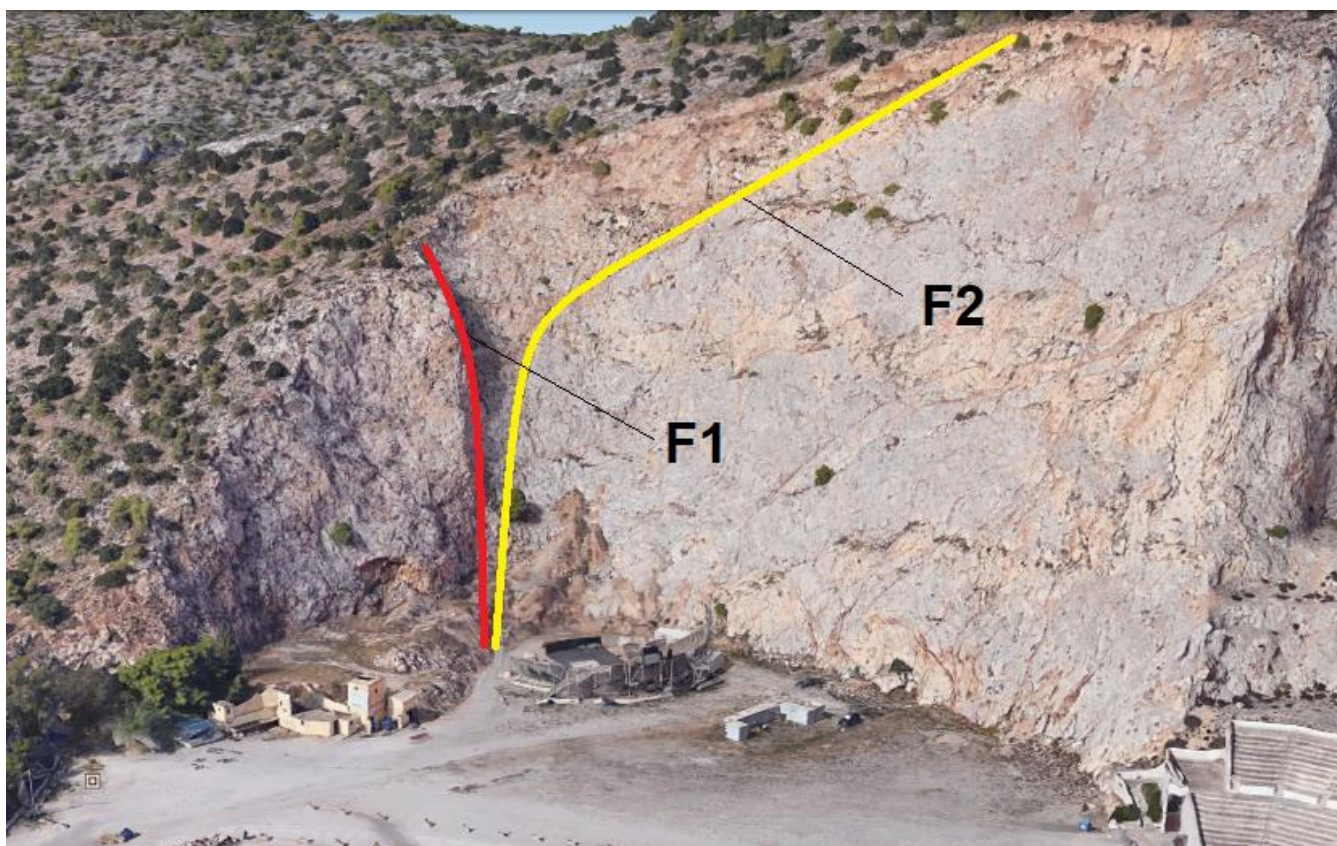


**Φωτογραφία 3.2:** Το νοτιότερο τμήμα του χώρου, όπου εμφανίζεται ο Κατώτερος ασβεστόλιθος



**Φωτογραφία 3.3:** Το βορειότερο τμήμα του χώρου, όπου εμφανίζεται ο Ανώτερος ασβεστόλιθος

3. Η τεκτονική επαφή των ασβεστόλιθων διακρίνεται στην Εικόνα 3.6, που όπως φαίνεται ο Κατώτερος σχηματισμός επωθείται επί του Ανώτερου σχηματισμού στο ρήγμα F2.



**Εικόνα 3.6:** Η τεκτονική επαφή των σχηματισμών και η επώθηση του Κατώτερου επί του Ανώτερου (F1- κόκκινη γραμμή, F2- κίτρινη γραμμή) (Google Earth)



Φωτογραφία 3.4: Το ρήγμα F1



Εικόνα 3.7: Η εμφάνιση του ρήγματος F1 στο αντιδιαμετρικό τμήμα του λατομείου

## 3.2. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά πετρώματος

### 3.2.1. Θλιπτική αντοχή πετρώματος

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των πετρωμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σημειακής φόρτισης (point load).

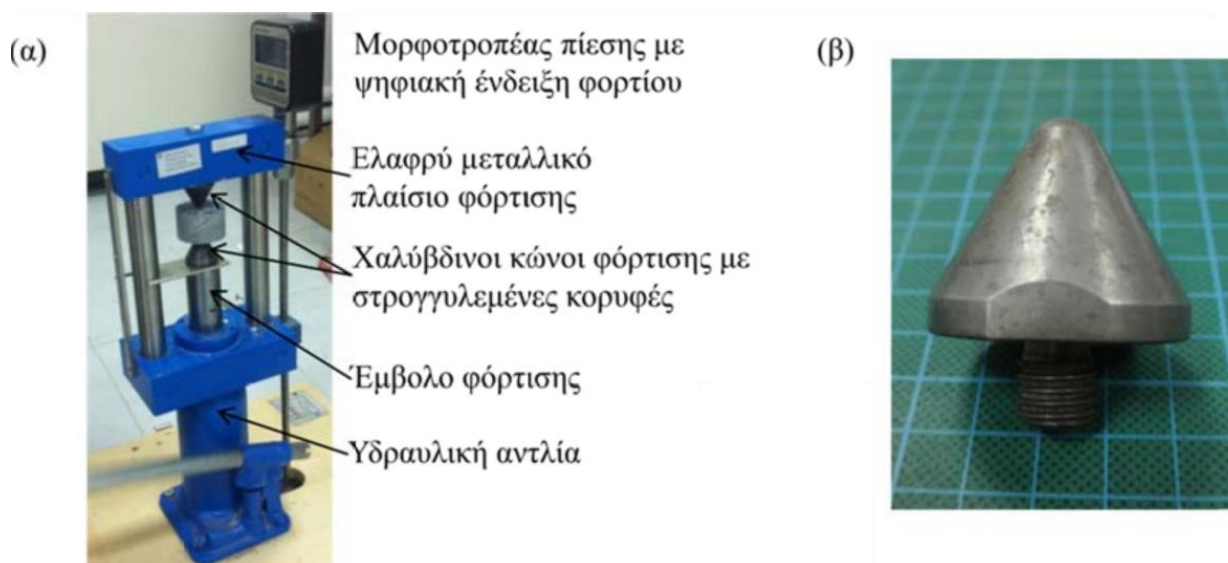
#### 3.2.1.1. Η δοκιμή σημειακής φόρτισης

Στη δοκιμή σημειακής φόρτισης (point load test), κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος φορτίζονται σημειακά μέχρι τη θραύση τους από ένα ζεύγος χαλύβδινων ορθών κώνων με σφαιρικά στρογγυλεμένες κορυφές. Η δοκιμή εκτελείται είτε στην ύπαιθρο με φορητό εξοπλισμό, είτε στο εργαστήριο με συσκευή εφοδιασμένη με ελαφρύ πλαίσιο φόρτισης, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3.8.

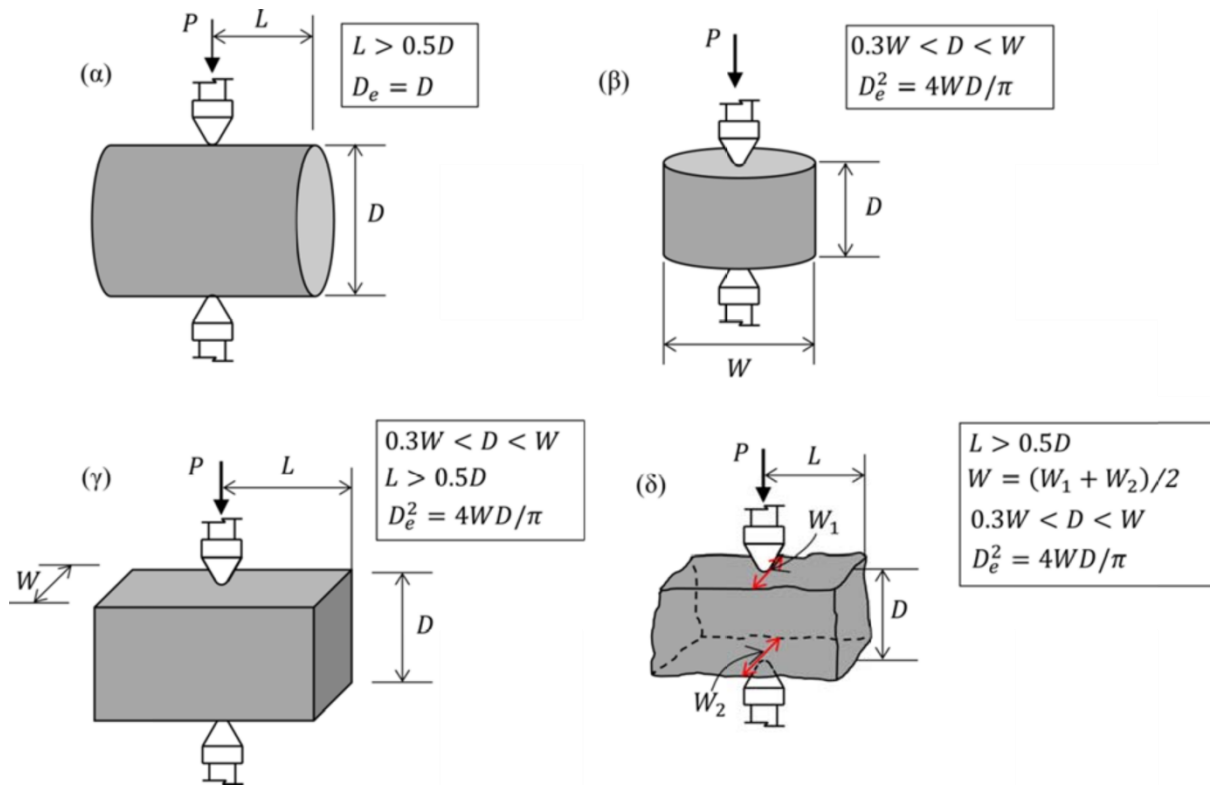
Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κυλινδρικά δοκίμια πετρώματος φορτίζοντας είτε παράλληλα με μια διάμετρο της κυκλικής διατομής τους (Εικόνα 3.9α), είτε παράλληλα προς τον άξονά τους (Εικόνα 3.9β). Επίσης, πραγματοποιείται σε πρισματικά δοκίμια μεγέθους  $50 \pm 35$  mm (Εικόνα 3.9γ), είτε σε ακανόνιστης μορφής δοκίμια παρόμοιου μεγέθους (Εικόνα 3.9δ).

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με την ελληνική τεχνική προδιαγραφή Ε103-84 για τον προσδιορισμό της αντοχής δοκιμίων πετρώματος σε σημειακή φόρτιση, η οποία ακολουθεί γενικά την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (1985).

Το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ των κώνων φόρτισης, έτσι ώστε η φόρτιση να γίνεται στο μέσο μήκος του δοκιμίου και κατά διάμετρο. Η φόρτιση γίνεται βαθμιαία και με σταθερή ταχύτητα μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Σύμφωνα με την προδιαγραφή της ISRM, η θραύση του θα πρέπει να συμβεί σε χρονικό διάστημα 10-60 sec. Η πίεση του μανομέτρου ή το αντίστοιχο φορτίο κατά τη θραύση, αναγράφεται στο δελτίο αποτελεσμάτων.

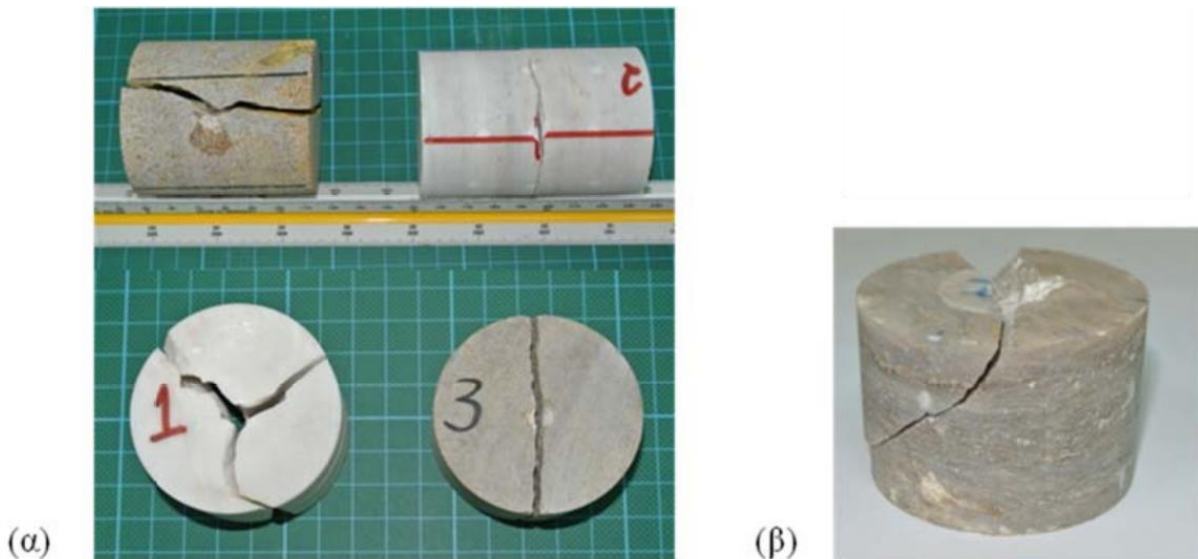


Εικόνα 3.8: (α) Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης, (β) λεπτομέρεια χαλύβδινου κώνου φόρτισης (Νομικός, 2015)



**Εικόνα 3.9:** Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης σε κυλινδρικά (α, β), πρισματικά (γ) και ακανόνιστης μορφής (δ) δοκίμια πετρώματος, με σημειωμένες τις απαιτούμενες διαστάσεις των δοκιμίων, σύμφωνα με την προδιαγραφή της ISRM (1985) (Νομικός, 2015)

Η δοκιμή θεωρείται αποδεκτή, εάν η επιφάνεια της θραύσης διέρχεται και από τα δύο σημεία φόρτισης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.10.



**Εικόνα 3.10:** Αποδεκτές (α) και μη-αποδεκτή (β) μορφές της επιφάνειας της θραύσης κατά τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (Νομικός, 2015)

Από τη δοκιμή υπολογίζεται ο δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης  $I_s$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_s = P/D_e^2 \tag{3.1}$$

όπου,  $P$  είναι το φορτίο θραύσης και  $D_e$  η ονομαζόμενη διάμετρος του δοκιμίου, η οποία ισούται με  $D_e=D$  για την περίπτωση διαμετρικής δοκιμής, και με  $D_e^2=4WD/\pi$  για τις περιπτώσεις αξονικής δοκιμής σε κυλινδρικό δοκίμιο και δοκιμής σε πρισματικό ή ακανόνιστης μορφής. Ως  $D$ , ορίζεται η απόσταση των ακμών φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής, ενώ  $W$  είναι το πλάτος της διατομής του δοκιμίου στο αναμενόμενο επίπεδο της θραύσης (Εικόνα 3.9).

Από τη γραφική παράσταση του φορτίου θραύσης σε συνάρτηση με το τετράγωνο της ονομαζόμενης διαμέτρου ( $\log P-D_e^2$ ) μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή του φορτίου θραύσης για δοκίμιο διαμέτρου 50 mm. Διαιρώντας το συγκεκριμένο φορτίο με το τετράγωνο της διαμέτρου των 50 mm μπορεί να προσδιοριστεί ο δείκτης σημειακής φόρτισης  $I_{s(50)}$ . Όταν όλα τα δοκίμια έχουν την ίδια ισοδύναμη διάμετρο,  $I_s$ , τότε ο  $I_{s(50)}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (3.2)$$

όπου  $F$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$F = (D_e/50)^{0,45} \quad (3.3)$$

Η ισοδύναμη διάμετρος  $D_e$  εισάγεται σε mm. Όταν πλησιάζει τα 50 mm, τότε για τον υπολογισμό του συντελεστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική σχέση:

$$F = \sqrt{D_e/50} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM, η παραπάνω διόρθωση μεγέθους είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από την ύπαρξη ανισοτροπίας στο πέτρωμα και από τη διεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τα επίπεδα αδυναμίας του πετρώματος.

Η μέση τιμή του δείκτη  $I_{s(50)}$  υπολογίζεται ως η μέση τιμή 10 ή περισσότερων δοκιμών, όπου οι 2 μεγαλύτερες και οι 2 μικρότερες τιμές δε λαμβάνονται υπόψη.

Προκειμένου για πετρώματα με κάποιο εμφανές επίπεδο αδυναμίας (π.χ. στρώση ή σχιστότητα), η ανισοτροπία της αντοχής μπορεί να εκτιμηθεί με τον δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής  $I_{s(50)\perp}$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη  $I_{s(50)\perp}$ , για φόρτιση κάθετα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος προς το δείκτη  $I_{s(50)\parallel}$ , για φόρτιση παράλληλα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος:

$$I_{\alpha(50)} = I_{s(50)\perp} / I_{s(50)\parallel} \quad (3.5)$$

Ο δείκτης ανισοτροπίας της αντοχής λαμβάνει τιμές περίπου 1,0 για την περίπτωση ισότροπου πετρώματος και μεγαλύτερες τιμές όταν το πέτρωμα είναι ανισότροπο.

Για τη συσχέτιση του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις, οι οποίες έχουν συνήθως τη μορφή:

$$\sigma_c = \alpha I_{s(50)} \quad (3.6)$$

όπου,  $\alpha$  είναι σταθερά συσχέτισης, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογική προέλευση του πετρώματος, την ορυκτολογική του σύσταση και την κατάσταση από

πλευράς αποσάθρωσης. Ο Πίνακας 3.1 δίνει ενδεικτικές τιμές της σταθεράς  $a$  από πειραματικά δεδομένα σε διάφορα πετρώματα. Όπως προκύπτει από αυτόν, η συσχέτιση του δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι μόνον προσεγγιστική και εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος.

**Πίνακας 3.1:** Σταθερά συσχέτισης του δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για διάφορα πετρώματα (Νομικός 2015)

Πέτρωμα	$a = \sigma_c / I_{s(50)}$	Αναφορά
Διάφορα πετρώματα	24	Broch & Franklin (1972)
Ψαμμίτες	~23	Bieniawski (1975)
Ιζηματογενή	16	Read et al. (1980)
Βασάλτης	20	Read et al. (1980)
-	20-25	ISRM (1985)
Ψαμμίτης	~ 17	Vallejo et al. (1989)
Γρανίτες και τόφφοι	~ 13	Chou & Wong (1996)
Ιζηματογενή πετρώματα	13-28	Sabatidakis et al. (2008)
Σερπεντινίτες	~20	Diamantis et al (2009)
Διάφορα πετρώματα	14-24	Singh et al. (2012)
Ψαμμίτης	22	Singh et al. (2012)
ασβεστόλιθος	19	Singh et al. (2012)
Διάφορα πετρώματα	~15	Mishra & Basu (2013)

### 3.2.1.2. Αποτελέσματα δοκιμής

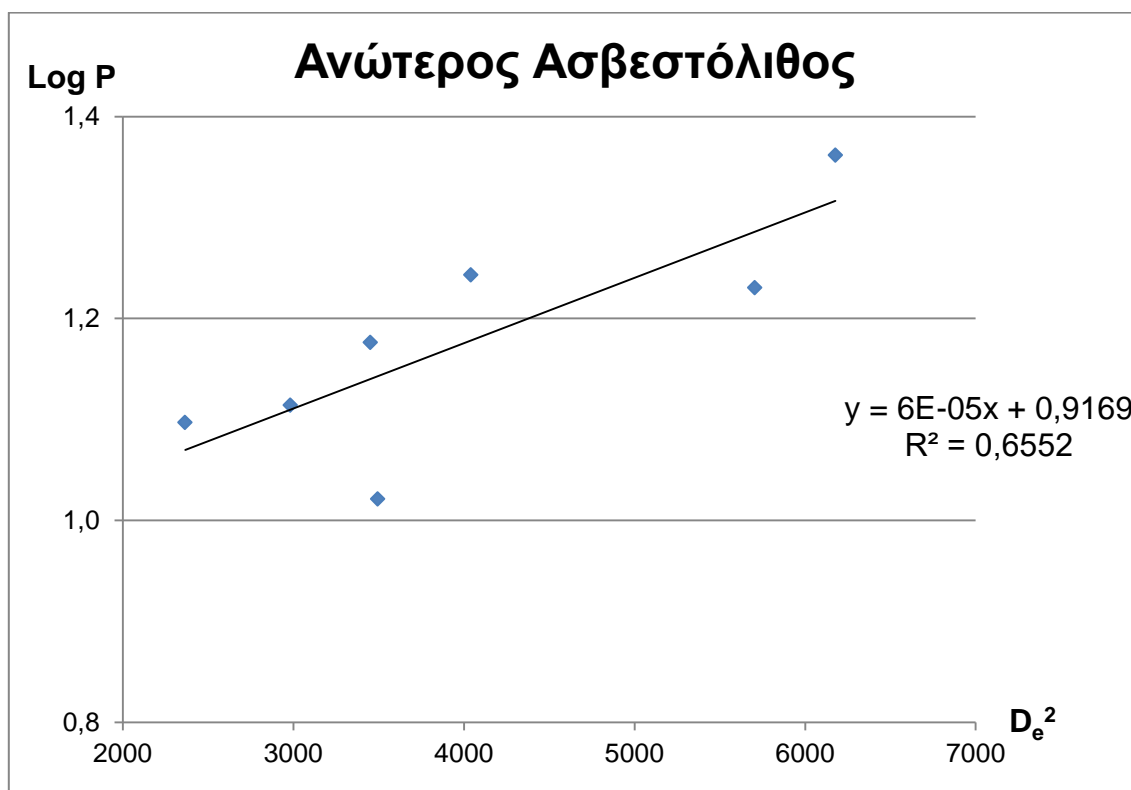
Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε για τον Ανώτερο και τον Κατώτερο ασβεστόλιθο θλιπτική αντοχή ίση με 90 MPa, όπως παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.2 και 3.3, ενώ οι δείκτες σημειακής φόρτισης  $I_{s(50)}$  εκτιμήθηκαν βάσει των διαγραμμάτων  $\log P - D_e^2$ , τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2 αντίστοιχα. Τέλος, στις Φωτογραφίες 3.5 έως 3.8 παρουσιάζονται τα δείγματα των δοκιμών πριν και μετά τις φορτίσεις.

Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς η σταθερά  $a$  επιλέχθηκε ίση με 19, βάσει του Πίνακα 3.1. Επίσης, από το σύνολο των δοκιμών από όπου προέκυψαν οι τελικές τιμές των αντοχών, αφαιρέθηκαν οι δοκιμές στις οποίες εκδηλώθηκαν μη αποδεκτές μορφές επιφάνειας αστοχίας.



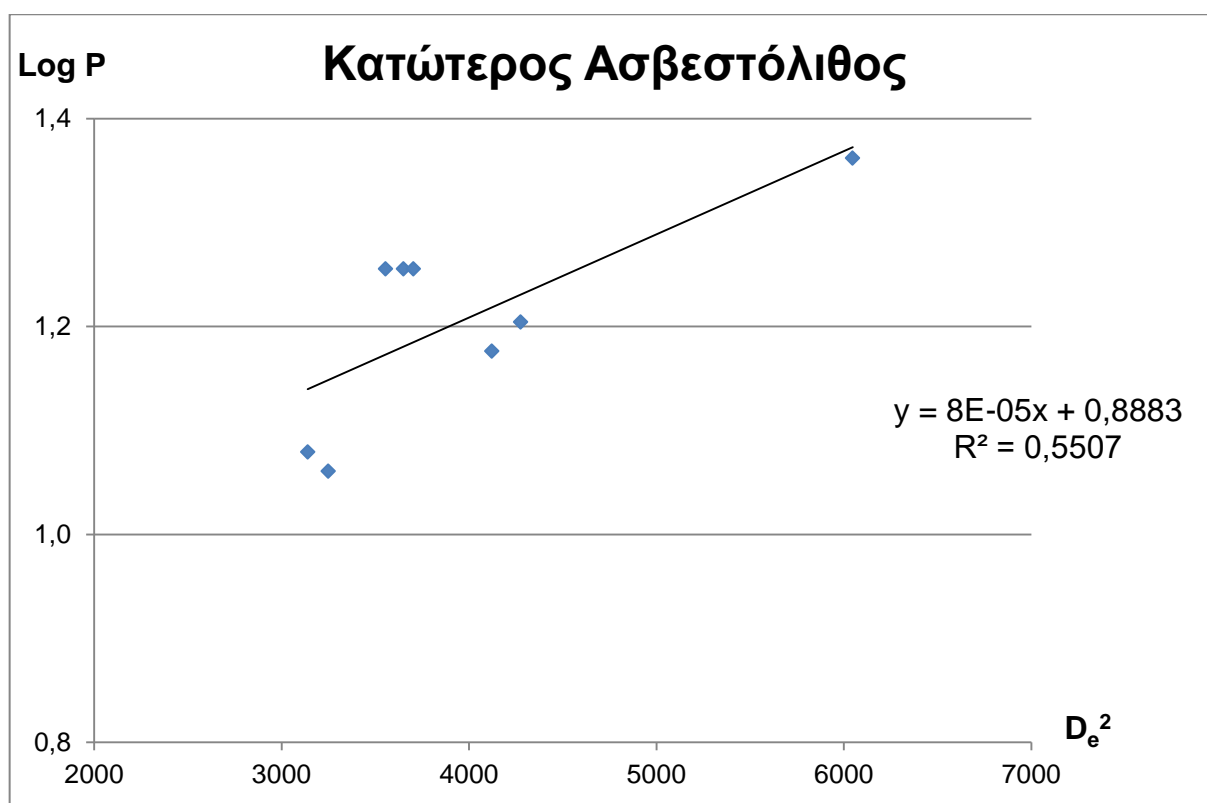
Πίνακας 3.2: Δοκιμές σημειακής φόρτισης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του Ανώτερου ασβεστόλιθου

Ανώτερος Ασβεστόλιθος							
Δοκιμή	1	2	3	4	5	6	7
D (cm)	5,52	4,54	4,18	4,72	3,61	3,72	5,01
L (cm)	12,70	9,07	8,78	10,18	13,88	8,31	8,24
W <sub>1</sub> (cm)	9,01	7,36	6,12	9,34	6,30	4,86	4,85
W <sub>2</sub> (cm)	8,57	6,62	6,85	9,65	6,68	5,13	6,11
W (cm)	8,79	6,99	6,49	9,50	6,49	5,00	5,48
P (KN)	23,0	17,5	15,0	17,0	13,0	12,5	10,5
D <sub>e</sub> (mm)	78,60	63,57	58,75	75,54	54,62	48,64	59,12
I <sub>s(50)</sub> (MPa)				4,70			
σ <sub>c</sub> (MPa)				90			

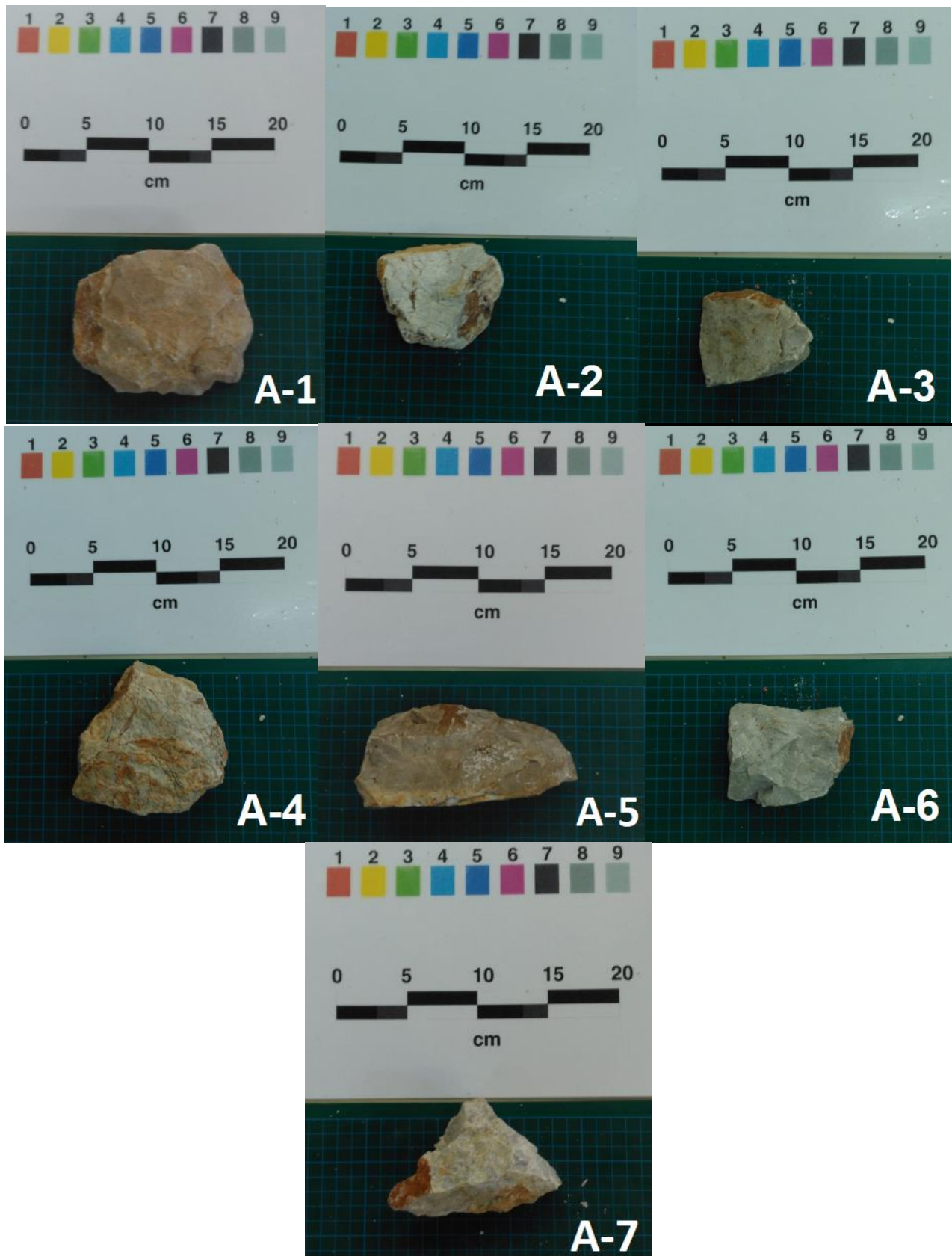
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα  $\log P - D_e^2$  για τον προσδιορισμό του  $I_{s(50)}$  στον Ανώτερο ασβεστόλιθο

Πίνακας 3.3: Δοκιμές σημειακής φόρτισης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του Κατώτερου ασβεστόλιθου

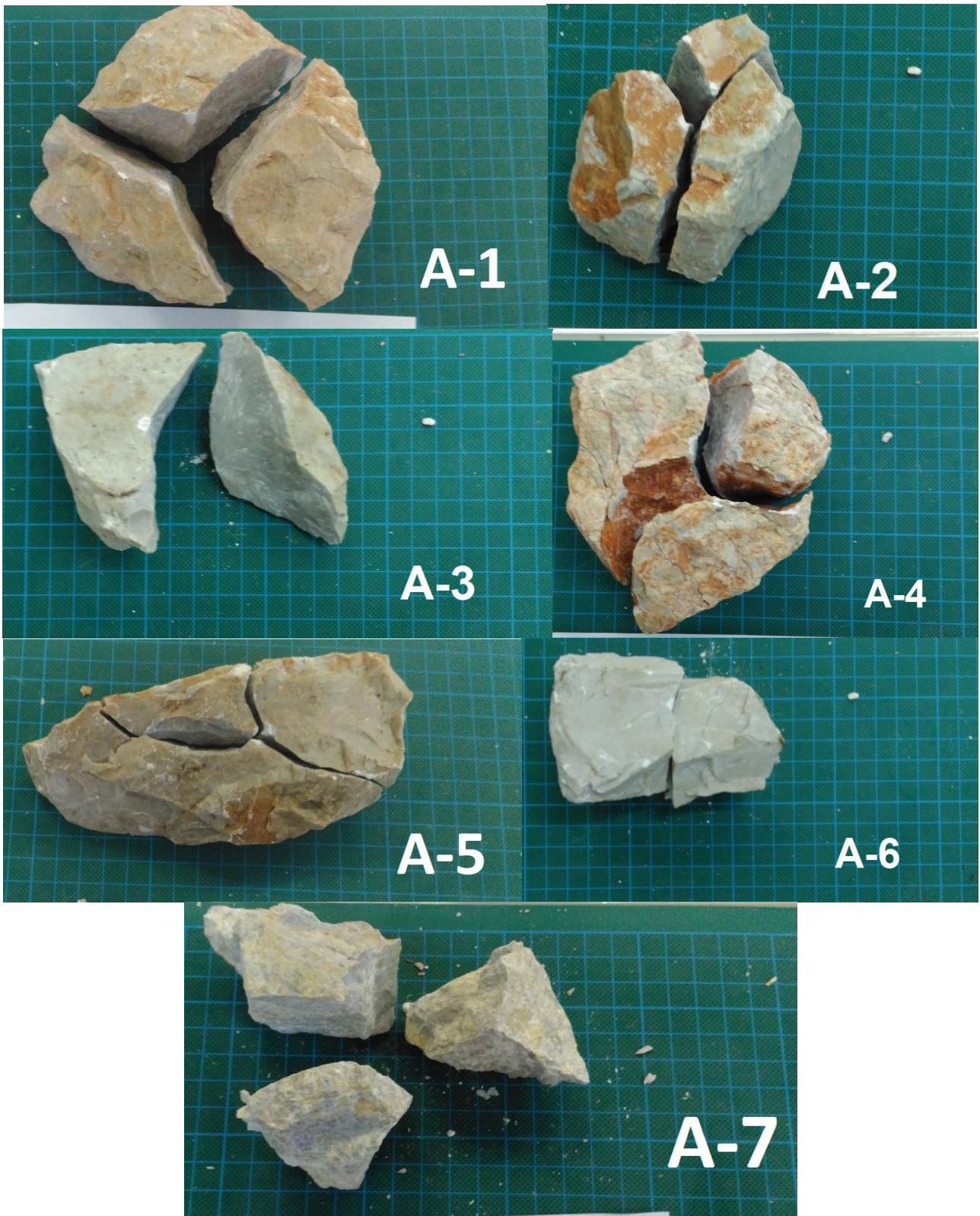
Κατώτερος Ασβεστόλιθος								
Δοκιμή	1	2	3	4	5	6	7	8
D (cm)	4,70	3,42	5,07	5,07	5,23	4,35	4,53	4,12
L (cm)	10,62	12,31	7,93	10,16	9,44	11,85	11,85	8,02
W <sub>1</sub> (cm)	9,70	7,03	5,75	6,24	5,77	6,20	6,20	5,83
W <sub>2</sub> (cm)	10,51	7,39	5,56	6,53	7,07	6,64	6,64	6,56
W (cm)	10,11	7,21	5,66	6,39	6,42	6,42	6,42	6,20
P (KN)	23,0	12,0	18,0	15,0	16,0	18,0	18,0	11,5
D <sub>e</sub> (mm)	77,76	56,03	60,42	64,20	65,38	59,63	60,85	57,01
I <sub>s(50)</sub> (MPa)				4,90				
σ <sub>c</sub> (MPa)				90				



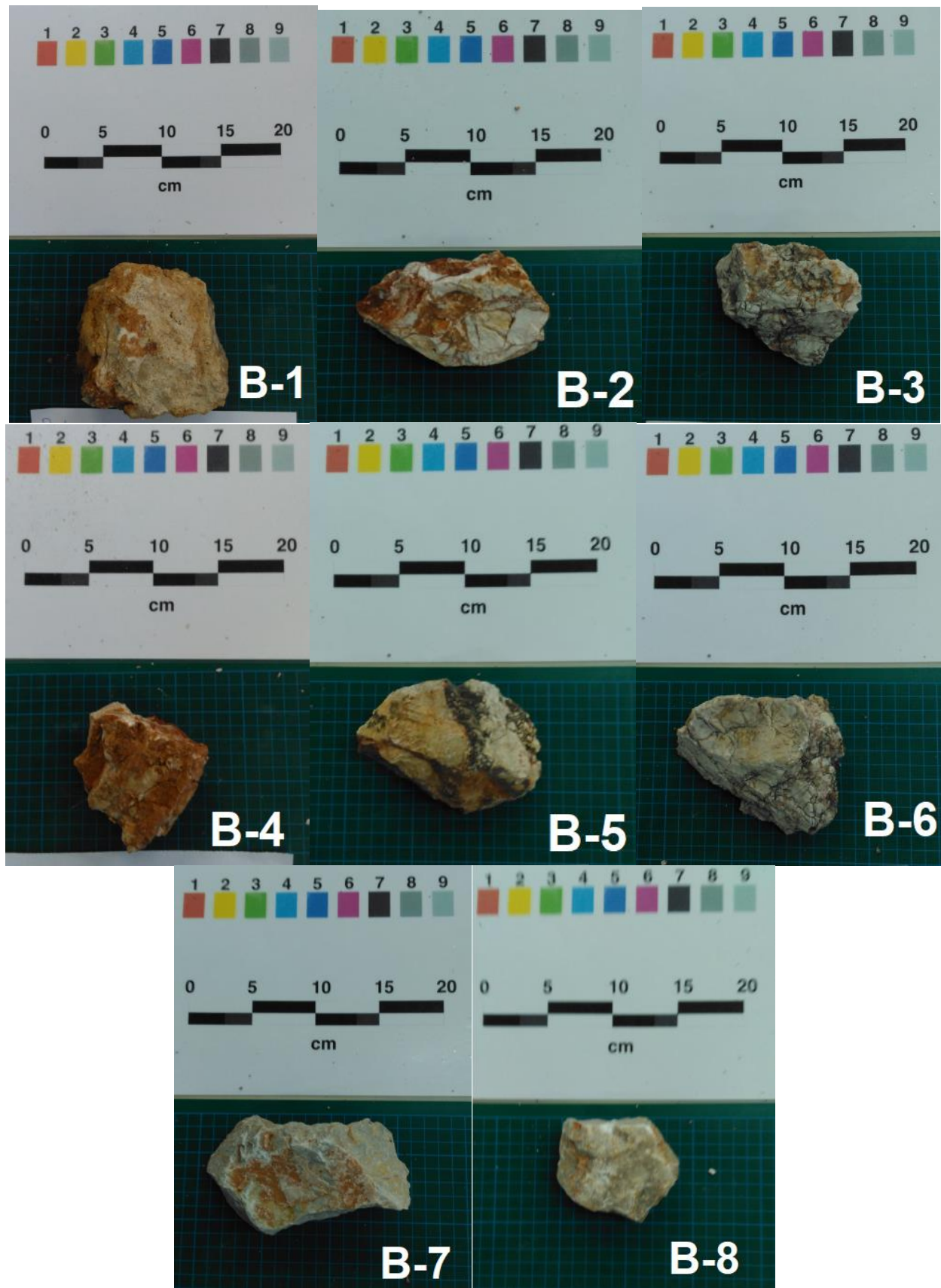
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα  $\log P - D_e^2$  για τον προσδιορισμό του  $I_{s(50)}$  στον Κατώτερο ασβεστόλιθο



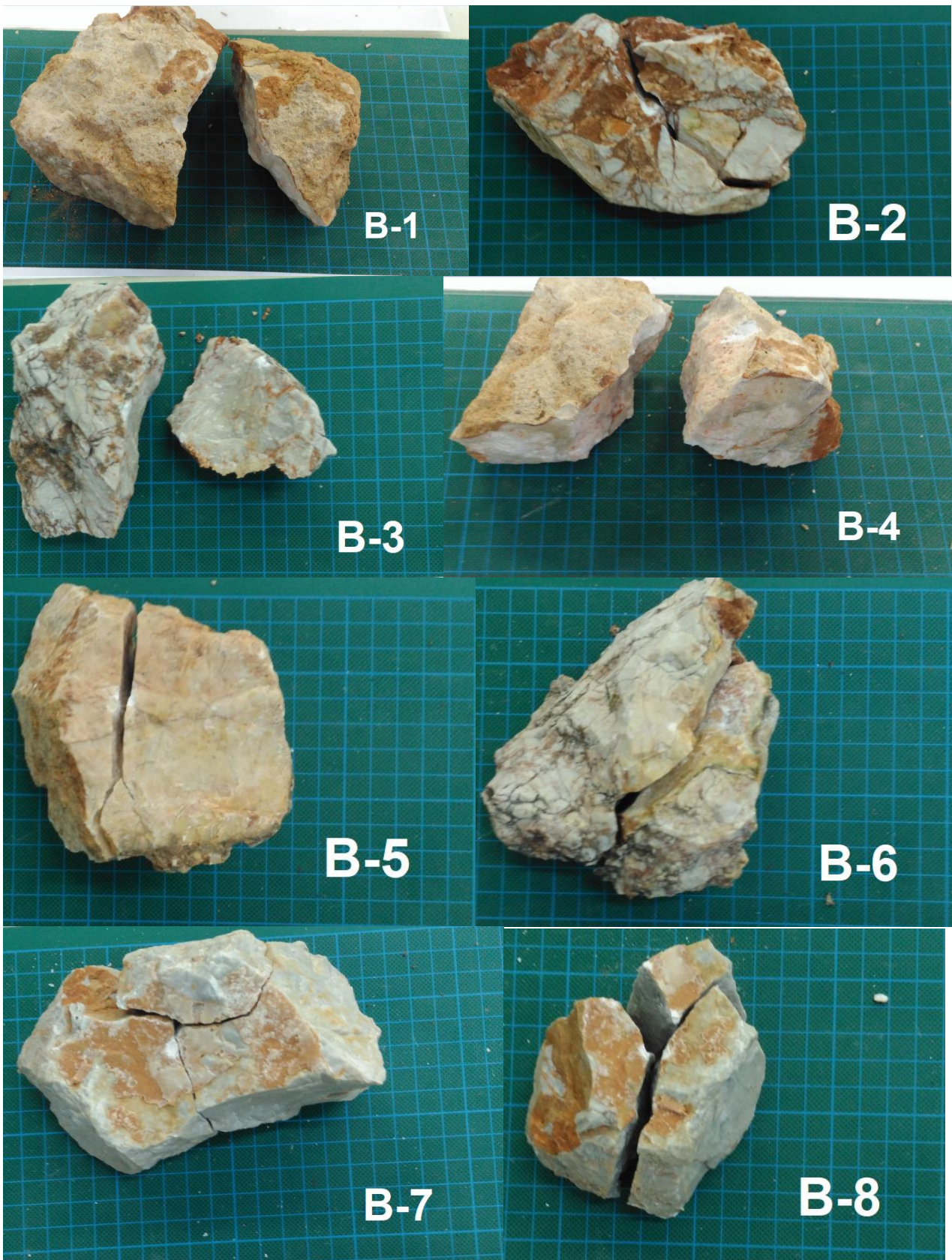
Φωτογραφία 3.5: Ανώτερος Ασβεστόλιθος- Τα 7 δοκίμια πριν τη φόρτιση



Φωτογραφία 3.6: Ανώτερος Ασβεστόλιθος- Τα 7 δοκίμια μετά τη φόρπιση



Φωτογραφία 3.7: Κατώτερος Ασβεστόλιθος - Τα 8 δοκίμια πριν τη φόρτιση



**Φωτογραφία 3.8:** Κατώτερος Ασβεστόλιθος - Τα 8 δοκίμια μετά τη φόρτιση

### 3.2.2. Γωνία τριβής ασυνεχειών

#### 3.2.2.1. Γενικά

Ο προσδιορισμός της επιτόπου διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών του πετρώματος θα πρέπει να πραγματοποιείται με την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών διάτμησης σε μεγάλα δοκίμια ασυνεχειών. για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορα εμπειρικά κριτήρια προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, που βασίζονται σε εξιδανίκευση του σχήματος της ασυνέχειας, εμπειρικούς δείκτες, εργαστηριακές δοκιμές διάτμησης σε δοκίμια ασυνεχειών και επέκταση των αποτελεσμάτων στην κλίμακα του έργου.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών οφείλεται αφενός στην αντίσταση τριβής, αφετέρου στη συνεισφορά της τραχύτητας. Οι φυσικές ασυνέχειες, εκτός και εάν είναι επουλωμένες, δεν έχουν πραγματική συνοχή στο επίπεδό τους (π.χ. Barton 2013). Ειδική περίπτωση αποτελούν οι πληρωμένες ασυνέχειες, όταν το υλικό πλήρωσης έχει ικανό πάχος ώστε να επιδρά καθοριστικά στην αντοχή της ασυνέχειας.

#### Το διαγραμμικό κριτήριο του Patton

Μία από τις πρώτες προσπάθειες για την ποσοτική συσχέτιση της τραχύτητας με τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος έγινε από τον Patton (1966), ο οποίος εκτέλεσε εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης σε δοκίμια γύψου με τεχνητές ασυνέχειες. Ο Patton προσομοίωσε την τραχύτητα της ασυνέχειας με οδοντώσεις. Κατασκευάζοντας δοκίμια με διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης των οδοντώσεων ως προς την οριζόντιο και εκτελώντας δοκιμές σε διάφορες τιμές της ορθής τάσης, έδωσε τις περιβάλλουσες κορυφαίας και παραμένουσας αντοχής για την κάθε γεωμετρία.

Σύμφωνα με τα πειράματα του Patton, για επίπεδες, μη λειασμένες επιφάνειες ασυνεχειών χωρίς οδοντώσεις, η περιβάλλουσα κορυφαίας αντοχής είναι ευθεία με γωνία κλίσης  $\varphi_{\mu}$  και δίνεται από τη σχέση:

$$\tau^p = \sigma_n \tan \varphi_{\mu} \quad (3.7)$$

όπου,  $\varphi_{\mu}$  είναι η γωνία της αντίστασης τριβής, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Κατά τον Patton, για εφαρμογές σε πρακτικά προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων, λαμβάνεται από δοκιμές άμεσης διάτμησης ύστερα από μεγάλη διατμητική μετατόπιση σε μακροσκοπικά λείες και επίπεδες, αλλά μικροσκοπικά ακανόνιστες (χωρίς τεχνητή λείανση), υγρές επιφάνειες.

Για την περίπτωση όπου η επιφάνεια της ασυνέχειας περιέχει μία σειρά οδοντώσεων γωνίας κλίσης  $i$ , τα πειράματα του Patton δείχνουν ότι σε χαμηλές τιμές της ορθής τάσης παρατηρείται ολίσθηση πάνω στις κεκλιμένες επιφάνειες οδοντώσεων, ενώ η περιβάλλουσα κορυφαία αντοχή είναι ευθεία με γωνία κλίσης  $\varphi_{\mu}+i$ , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\tau^p = \sigma_n \tan(\varphi_{\mu}+i) \quad (3.8)$$

#### Το κριτήριο Barton-Bandis

Ο Barton (1971, 1973, 1974, 1976) διατύπωσε ένα μη-γραμμικό κριτήριο για την κορυφαία διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος, συμπεριλαμβάνοντας με σαφή τρόπο

την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας της ασυνέχειας, και της μεταβολής της με την ορθή τάση. Το κριτήριο διατυπώθηκε αρχικά για μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών ως (Barton 1976):

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10}(JCS / \sigma_n) + \phi_b) \quad (3.9)$$

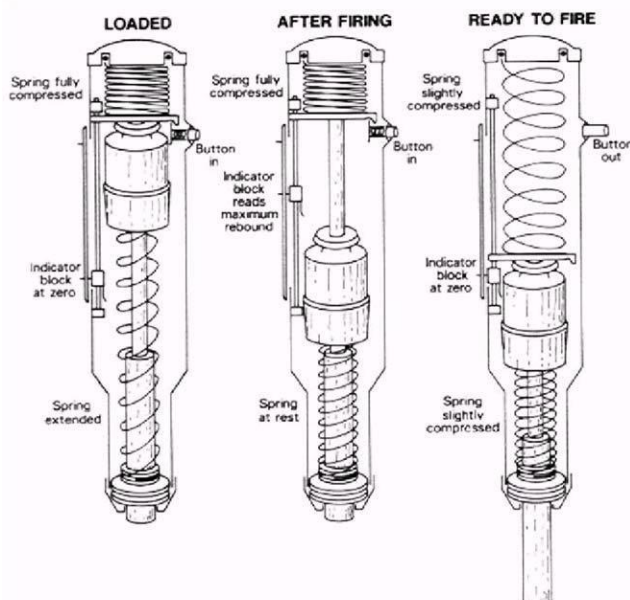
όπου,  $\phi_b$  είναι η βασική γωνία τριβής,  $JRC$  (Joint Roughness Coefficient) ο συντελεστής τραχύτητας, και  $JCS$  (Joint Compressive Strength) είναι η θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Η γενική μορφή του κριτηρίου, τόσο για αποσαθρωμένες, όσο και για μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών, γράφεται ως (Barton & Choubey 1977):

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10}(JCS / \sigma_n) + \phi_r) \quad (3.10)$$

όπου,  $\phi_r$  είναι η παραμένουσα γωνία τριβής. Η βασική γωνία τριβής  $\phi_b$  μπορεί να μετρηθεί από δοκιμές άμεσης διάτμησης, σε επίπεδες και υγιείς (μη αποσαθρωμένες) επιφάνειες του πετρώματος, ύστερα από μεγάλη διατμητική ολίσθηση (Barton & Choubey, 1977).

### Προσδιορισμός $JCS$

Ο προσδιορισμός του δείκτη  $JCS$  μπορεί να γίνει με τη χρήση κρουσιομέτρου Schmidt. Η σφύρα Schmidt είναι μία ελαφριά φορητή συσκευή που χρησιμοποιείται εξίσου καλά τόσο στην ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο. Η φορητή συσκευή της σφύρας αναπήδησης αποτελείται από ένα έμβολο στο οποίο είναι προσαρμοσμένα δύο ελατήρια και μια ασάλινη μάζα αναπήδησης (Εικόνα 3.11). Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι η εύρεση της σκληρότητας των πετρωμάτων καθώς και η έμμεση εκτίμηση της αντοχής τους σε ανεμπόδιστη θλίψη.



Εικόνα 3.11: Σφύρα αναπήδησης Schmidt (Λουπασάκης, 2015)

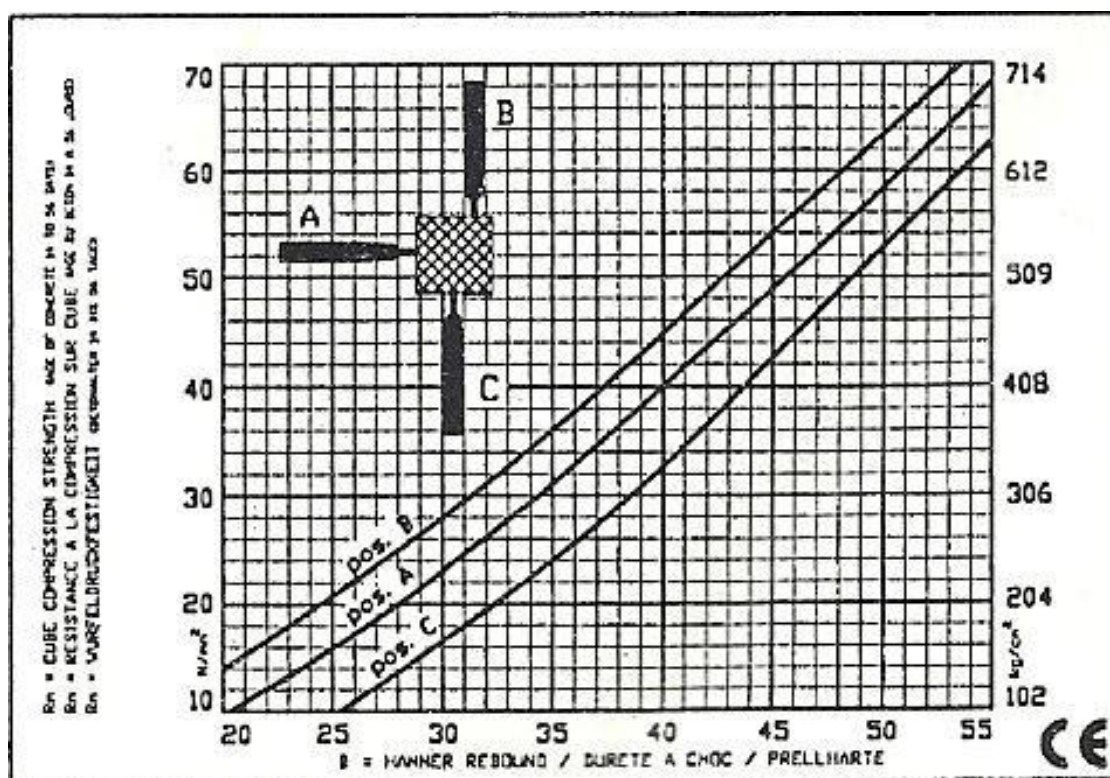
Το σφυρί χρησιμοποιείται σε θέση οριζόντια, κατακόρυφη με το έμβολο προς τα κάτω ή κατακόρυφη με το έμβολο προς τα πάνω (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).



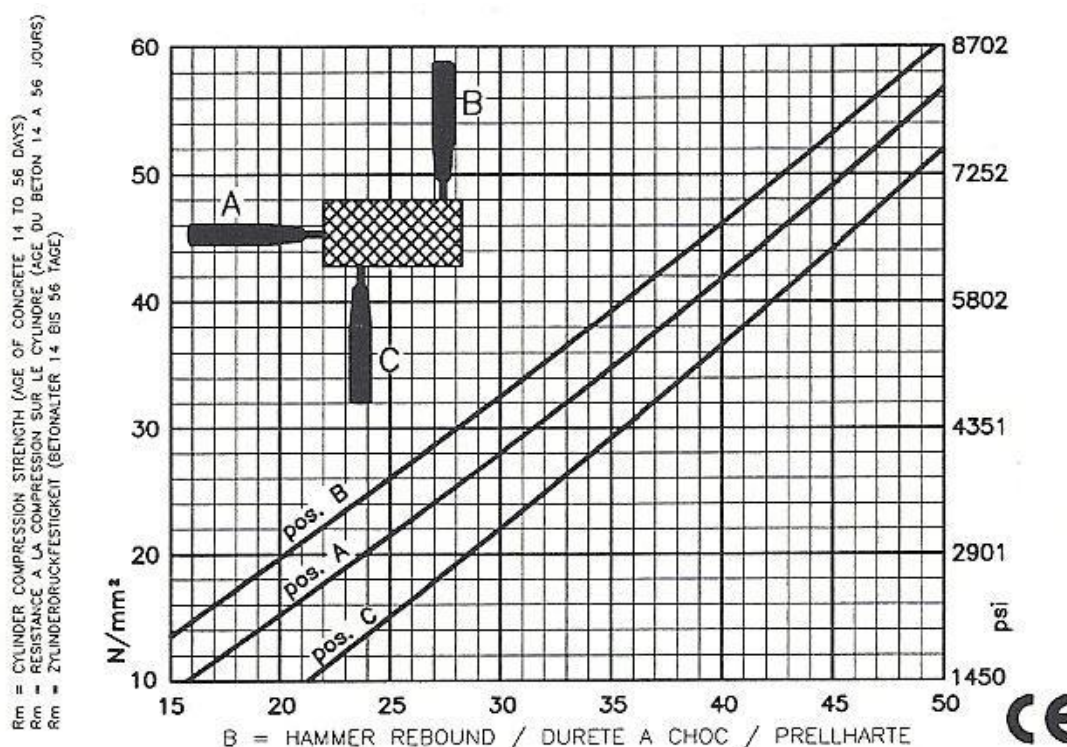
Κατά τη διάρκεια της δοκιμής το έμβολο πιέζεται πάνω στην επιφάνεια του δείγματος μέχρι να απελευθερωθεί το ελατήριο αναπήδησης και να εκτινάξει την ασάλινη μάζα. Η ασάλινη μάζα αναπηδά και προσκρούει με ενέργεια ανάλογη του τύπου της σφύρας. Το ύψος αναπήδησης της μάζας μετρείται σε μια βαθμονομημένη κλίμακα που βρίσκεται πάνω στη συσκευή, και είναι ανάλογο με τη σκληρότητα του υλικού που δοκιμάζεται.

Το έμβολο κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης δοκιμών στο ύπαιθρο πρέπει να βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια του υλικού που δοκιμάζεται, ενώ ο άξονας του οργάνου μπορεί να σχηματίζει με τον ορίζοντα γωνία  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ .

Πρέπει να τονιστεί ότι για κάθε ανάγνωση ανάλογα με τον προσανατολισμό της σφύρας σε σχέση με την επιφάνεια του δείγματος πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες καμπύλες διορθώσεως που δίνονται από τον κατασκευαστή (Σχήματα 3.3 και 3.4). Τέλος γίνεται εκτίμηση της αντοχής τους σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη βοήθεια καμπυλών συσχέτισης που δίνονται από τον κατασκευαστή του οργάνου. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη δοκιμή θεωρείται μικρότερης ακρίβειας, σε σχέση με τη δοκιμή σημειακής φόρτισης, για τον προσδιορισμό της αντοχής του πετρώματος.



Σχήμα 3.3: Νομόγραμμα υπολογισμού της μονοαξονικής αντοχής με τη χρήση των μετρήσεων του κρουσίμετρου Schmidt, τύπου L όπως δίνεται από τον κατασκευαστή



**Σχήμα 3.4:** Νομόγραμμα υπολογισμού της μονοαξονικής αντοχής με τη χρήση των μετρήσεων του κρουσίμετρου Schmidt, τύπου N όπως δίνεται από τον κατασκευαστή

Για την ολοκλήρωση της δοκιμής απαιτούνται 20 μετρήσεις, εκ των οποίων στους υπολογισμούς αμελούνται οι μισές με τις μικρότερες τιμές. Εναλλακτικά, η δοκιμή μπορεί να σταματήσει όταν 10 διαδοχικές τιμές δεν διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 4 (ISRM,2009).

Υπάρχουν δύο τυποποιημένα κρουσιόμετρα που διακρίνονται από την ενέργεια κρούσης. Το κρουσιόμετρο τύπου L όπου παράγει ενέργεια κρούσης ίση με 0,735 Nm και το κρουσιόμετρο τύπου N όπου παράγει ενέργεια κρούσης ίση με 2,207 Nm. Σύμφωνα με την ISRM (2009) το κρουσιόμετρο τύπου N δίνει καλύτερα αποτελέσματα στις μετρήσεις πεδίου ενώ το κρουσιόμετρο τύπου L έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στα χαμηλότερα εύροι τιμών και δίνει καλύτερα αποτελέσματα για ασθενή, πορώδη και αποσαθρωμένα πετρώματα. Γενικά η ISRM συνιστά τη χρήση αυτών των δύο τύπων για εύρος τιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, UCS=20-150 MPa.

Σημαντικό ρόλο παίζει η διεύθυνση κρουσιομέτρησης η οποία πρέπει να είναι κάθετη στην επιφάνεια η οποία είναι προς εξέταση, με μία απόκλιση  $\pm 5^\circ$ . Σε κάθε περίπτωση όταν οι δοκιμές εκτελούνται σε διαφορετικές διευθύνσεις από την οριζόντιο, οι τιμές επηρεάζονται από τη δράση της δύναμης της βαρύτητας επί του εμβόλου και πρέπει να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις βάσει ανάλογων προτεινόμενων διαγραμμάτων.

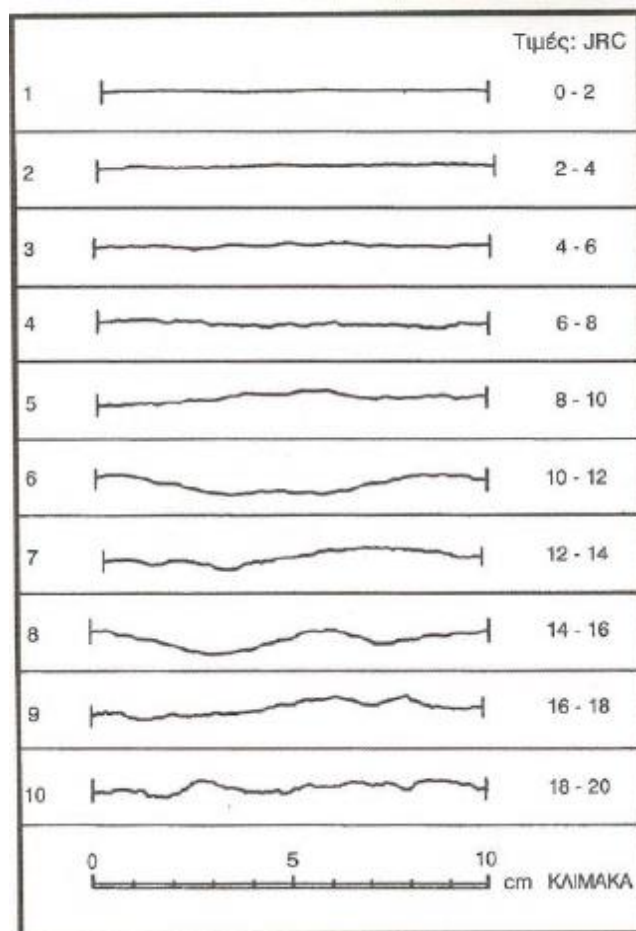
### Προσδιορισμός JRC

Για τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας στην κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων, με τυπικό μήκος 10 cm, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλά μηχανικά προφιλόμετρα. Τα μηχανικά προφιλόμετρα διαθέτουν μία σειρά λεπτών μεταλλικών ακίδων, οι οποίες φέρονται σε επαφή με την επιφάνεια της ασυνέχειας, αναπαράγοντας το προφίλ της κατά μήκος μίας ευθείας (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: Φωτογραφία μηχανικού προφιλόμετρου (Νομικός 2015)

Το προφίλ της επιφάνειας της ασυνέχειας σε μήκος 10 cm μπορεί να συγκριθεί με τυπικά προφίλ των Barton & Choubey (1977) (Σχήμα 3.5), από τα οποία μπορεί να εξαχθεί ο δείκτης *JRC* της ασυνέχειας. Ο δείκτης αυτός αποτελεί μία ποσοτικοποίηση της τραχύτητας στην κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων. Για μία ιδεατή λεία ασυνέχεια  $JRC=0$ , ενώ για μία πολύ τραχεία ασυνέχεια  $JRC=20$ .



Σχήμα 3.5: Τυπικά προφίλ των Barton & Choubey (1977)

## 3.2.2.2. Προσδιορισμός γωνίας τριβής ασυνεχειών

Για την εκτίμηση της γωνίας τριβής των ασυνεχειών βάσει του κριτηρίου Barton-Bandis (3.10) αρκεί να προσδιοριστούν οι δείκτες JRC και JCS. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε προφιλόμετρο μήκους 10 cm και σφύρα Schmidt τύπου N, καθώς . Οι μετρήσεις με τη σφύρα πραγματοποιήθηκαν σε κάθετης κλίσης ασυνέχειες, με το όργανο κάθετο στο επίπεδό τους (μηδενική διαφορά κλίσης ως προς την οριζόντια γωνία).

Τα αποτελέσματα για τους δείκτες προέκυψαν με τη χρήση των Σχημάτων 3.4 και 3.5. Στους υπολογισμούς θεωρήθηκε ειδικό βάρος για τους δυο σχηματισμούς ίσο με  $2,5 \text{ tn/m}^3$ , γωνία τριβής λείας ασυνέχειας  $\varphi_{\mu}=30^\circ$  και κατακόρυφη τάση  $\sigma_v$  αντίστοιχη του μέγιστου ύψους πρανούς για κάθε ασβεστόλιθο. Έτσι, αφού πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές δοκιμών σε κάθε ασβεστόλιθο, προέκυψε για τον Ανώτερο σχηματισμό γωνία περίπου  $38,5^\circ$ , ενώ για τον Κατώτερο γωνίες  $34^\circ$  και  $37^\circ$ .

Πίνακας 3.4: Προσδιορισμός της γωνίας τριβής ασυνεχειών στον Ανώτερο ασβεστόλιθο

Ανώτερος Ασβεστόλιθος							
Δοκιμή A-1				Δοκιμή A-2			
Μετρήσεις αναπήδησης με τη σφύρα Schmidt τύπου N							
39	43	42	44	31	30	42	52
50	36	55	44	58	45	39	52
33	53	42	39	44	47	55	52
44	50	46	36	54	49	54	55
48	37	41	49	49	55	49	50
Μέσος όρος : 48,3				Μέσος όρος : 53,7			
JCS= 54 MPa				JCS= 66 MPa			
Μέτρηση τραχύτητας με το προφιλόμετρο							
JRC = 10				JRC = 9			
Για ύψος H= 100 m, δηλαδή $\sigma= 2500 \text{ kPa}$ , προκύπτει:							
$\varphi= 38,5^\circ$				$\varphi= 38,5^\circ$			

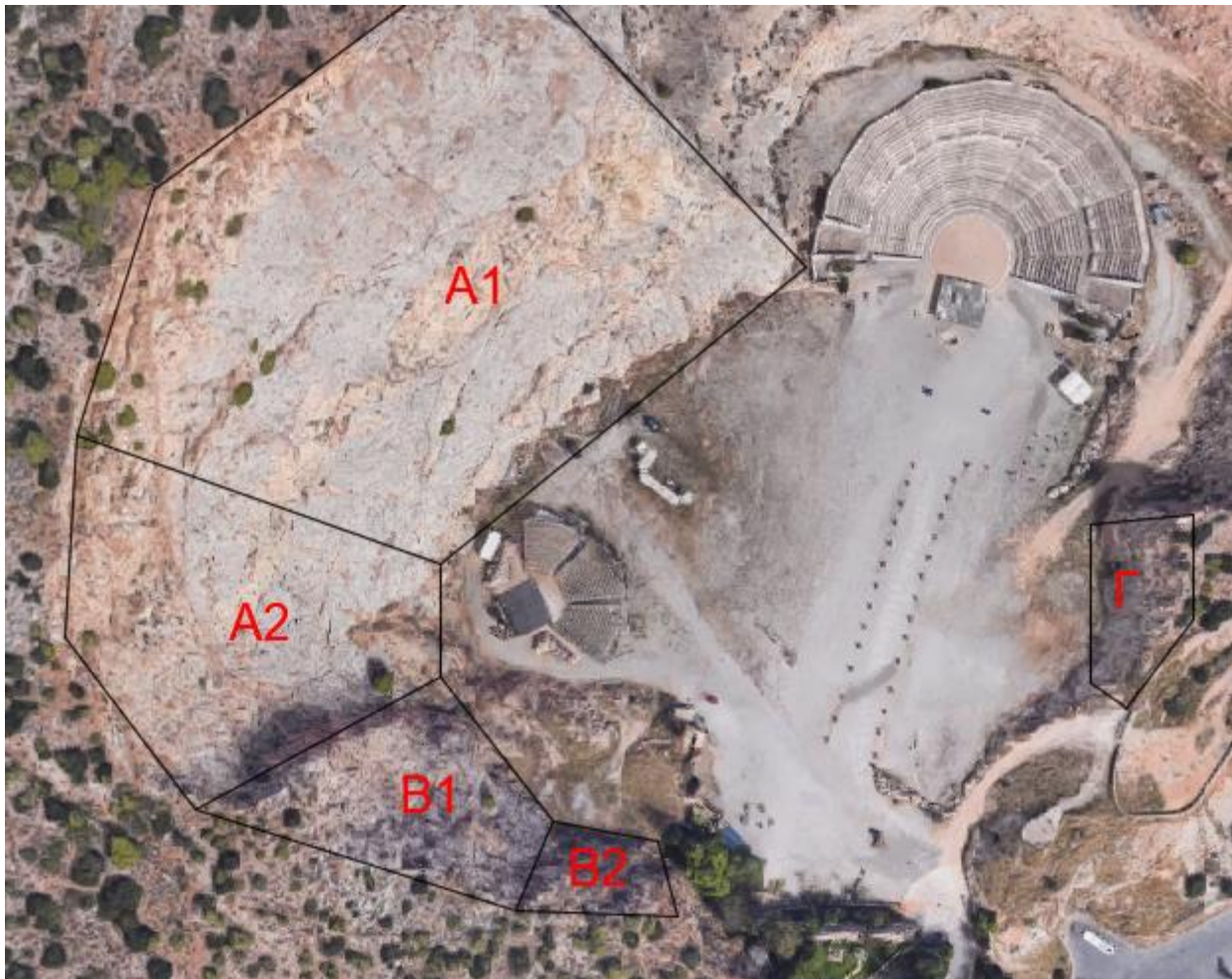
Πίνακας 3.5: Προσδιορισμός της γωνίας τριβής ασυνεχειών στον Κατώτερο ασβεστόλιθο

Κατώτερος Ασβεστόλιθος							
Δοκιμή B-1				Δοκιμή B-2			
Μετρήσεις αναπήδησης με τη σφύρα Schmidt τύπου N:							
40	30	37	33	44	44	44	46
34	34	35	31	36	45	47	48
36	20	38	28	32	42	46	48
32	31	42	35	42	49	50	37
38	27	30	38	52	44	44	49
Μέσος όρος : 37,3				Μέσος όρος : 48			
JCS= 34 MPa				JCS= 54 MPa			
Δοκιμή με προφιλόμετρο :							
JRC = 7				JRC = 3			
Για ύψος H= 50 m, δηλαδή $\sigma= 1250 \text{ kPa}$ , προκύπτει:							
$\varphi= 37^\circ$				$\varphi= 34^\circ$			

### 3.3. Μορφολογικά χαρακτηριστικά του λατομείου

Στην περιοχή του λατομείου εξαιτίας της λατομικής δραστηριότητας, έχουν σχηματιστεί πρηνή μεταβλητού προσανατολισμού, κλίσης και ύψους. Το ανάγλυφό τους παρουσιάζει έντονη τραχύτητα, λόγω της κατακερματισμένης βραχομάζας που τα απαρτίζει, με αποτέλεσμα τη μεταβλητότητα των κλίσεων της επιφάνειάς τους. Στη βάση αυτών υπάρχει μια επίπεδη έκταση εμβαδού περίπου 25000 m<sup>2</sup>.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος, με σκοπό την πληρέστερη μελέτη των πρηνών, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός τους σε 5 τμήματα, βάσει της γεωλογικής του σύστασης και της γεωμετρίας τους, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.13.

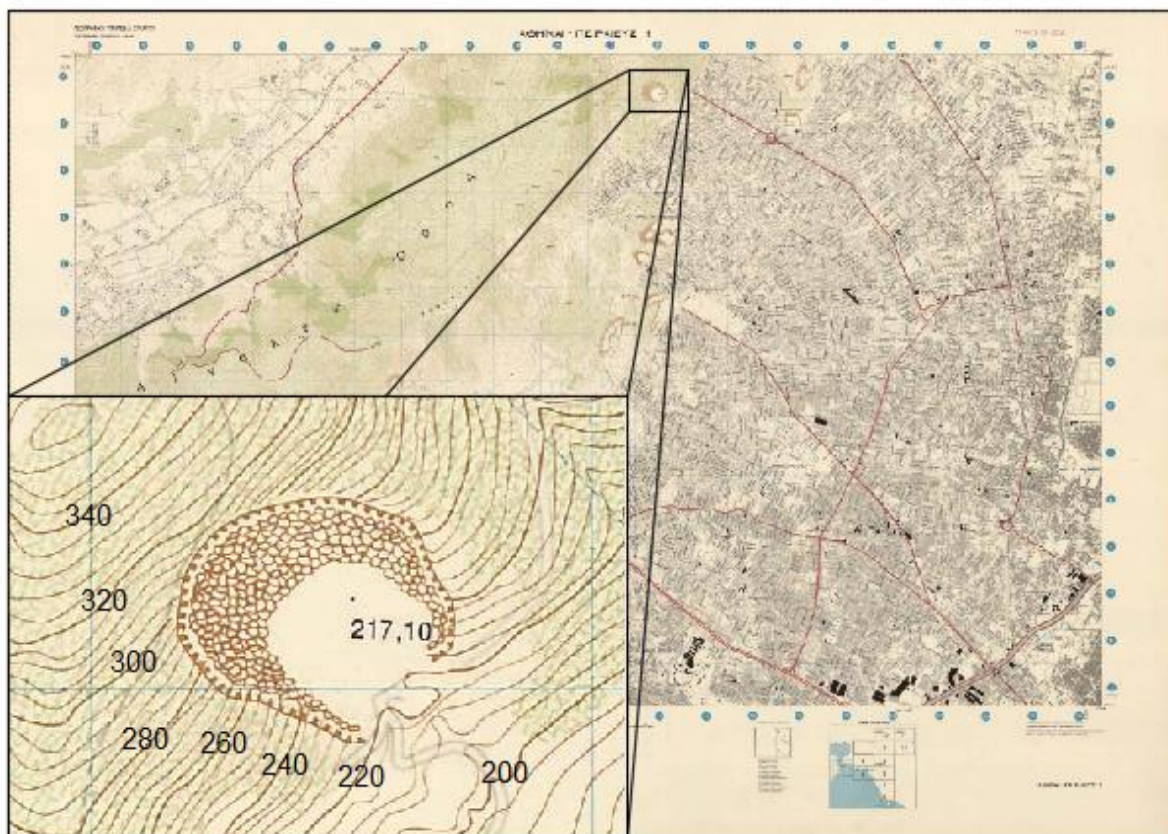


**Εικόνα 3.13:** Επιμέρους τμήματα πρηνών λατομείου «Αίμου», όπως ορίστηκαν για τις ανάγκες της μελέτης (Google Maps)

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, πως η γεωμετρία των πρηνών που παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη αποτελεί μια εκτίμηση των πραγματικών διαστάσεων, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα χρήσης τοπογραφικών οργάνων. Τα μεγάλα ύψη των πρηνών τα οποία σε μερικές περιπτώσεις άγγιζαν τα 100 m, καθιστούν την προσέγγιση του απόλυτου αριθμού μια αρκετά δύσκολη διαδικασία.

Για τον λόγο αυτό, πέραν της χρήσης χάρτη ισοϋψών της περιοχής (Εικόνα 3.14), τα υψόμετρα εκτιμήθηκαν επιπρόσθετα με ένα συνδυασμό επί τόπου μετρήσεων,

παρατηρήσεων στο πεδίο, φωτογραφιών και διαδικτυακών εφαρμογών (Google Maps, DaftLogic).



**Εικόνα 3.14:** Μεγέθυνση διαγράμματος πόλεως, κλίμακας 1:10.000, φύλλο 1 «Αθήναι - Πειραιεύς» (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού)

### 3.3.1. Πρανές Α1

Το πρανές Α1 (Φωτογραφία 3.9) εκτείνεται στο βορειότερο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, και γεωλογικά αποτελείται από τον Ανώτερο ασβεστόλιθο . Αποτελεί το πρανές με το μεγαλύτερο ύψος, το οποίο παρουσιάζει διακυμάνσεις από 80-100 m, καλύπτοντας μήκος περίπου 100 m. Η κλίση του δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά το μήκος του, ενώ κυμαίνεται καθ' ύψος από 50° έως 70°, με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις 135°.



Φωτογραφία 3.9: Πρανές A1

### 3.3.2. Πρανές A2

Το πρανές A2 (Φωτογραφία 3.10) εκτείνεται στο δυτικότερο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, και γεωλογικά αποτελείται από τον Ανώτερο ασβεστόλιθο. Το ύψος του παρουσιάζει διακυμάνσεις από 65-85 m, καλύπτοντας μήκος περίπου 25 m. Η κλίση του δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά το μήκος του, ενώ κυμαίνεται καθ' ύψος από 45° έως 65°, με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις 055°.



Φωτογραφία 3.10: Πρανές A2

### 3.3.3. Πρανές Β1

Το πρανές Β1 (Φωτογραφία 3.11) εκτείνεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, και γεωλογικά αποτελείται από τον Κατώτερο ασβεστόλιθο. Το ύψος του παρουσιάζει διακυμάνσεις από 25-50 m, καλύπτοντας μήκος περίπου 40 m. Η κλίση του παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά το μήκος του, ενώ κυμαίνεται καθ' ύψος από 45° έως 75°, με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις 060°.



Φωτογραφία 3.11: Πρανές Β1

### 3.3.4. Πρανές Β2

Το πρανές Β2 (Φωτογραφία 3.12) εκτείνεται στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, και γεωλογικά αποτελείται από τον Κατώτερο ασβεστόλιθο. Το ύψος του παρουσιάζει διακυμάνσεις από 7-25 m, καλύπτοντας μήκος περίπου 25 m. Η κλίση του παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά το μήκος του, ενώ κυμαίνεται καθ' ύψος από 45° έως 65°, με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις 005°.



Φωτογραφία 3.12: Πρανές Β2



Στις βάσεις των πρανών Β1 και Β2 εμφανίζεται αναβαθμός αποτελούμενος από προϊόντα εκσκαφής του λατομείου, ύψους περίπου 5 m, όπως παρουσιάζεται στη Φωτογραφία 3.13.



**Φωτογραφία 3.13:** Ο αναβαθμός που εμφανίζεται στις βάσεις των πρανών Β1 και Β2

### 3.3.5. Πρανές Γ

Το πρανές Γ (Φωτογραφία 3.13) εκτείνεται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, και γεωλογικά αποτελείται από τον Κατώτερο ασβεστόλιθο. Το ύψος του παρουσιάζει διακυμάνσεις από 5-20 m, καλύπτοντας μήκος περίπου 40 m. Η κλίση του δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά το μήκος του, ενώ κυμαίνεται καθ' ύψος από 45° έως 75°, με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις 265°.



**Φωτογραφία 3.14:** Πρανές Γ



## 4. Στερεογραφική ανάλυση ευστάθειας πρανών

### 4.1. Στερεογραφική προβολή με το πρόγραμμα Dips

Το Dips είναι λογισμικό σχεδιασμένο για την ανάλυση δεδομένων με βάση τον προσανατολισμό τους και χρησιμοποιείται κυρίως για την στερεογραφική προβολή γεωλογικών στοιχείων.

Για τον ορθό προσδιορισμό της γεωμηχανικής συμπεριφοράς μιας βραχομάζας πρέπει να καθοριστούν ο αριθμός των συστημάτων των ασυνεχειών, ο προσανατολισμός τους, η συνέχεια, η απόσταση, το άνοιγμα, η τραχύτητα, το υλικό πλήρωσης, η αντοχή των ασυνεχειών και το καθεστώς του νερού.

Με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας, με τη μορφή μέγιστη κλίση και διεύθυνση μέγιστης κλίσης (Dip/Dip direction), προσδιορίζονται τα κυριότερα συστήματα ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχομάζα. Επίσης, καταγράφονται ο προσανατολισμός των πρανών και η κλίση τους, στοιχεία που βοηθούν στον καθορισμό των δυνητικών αστοχιών.

Συνήθως οι μετρήσεις με τη γεωλογική πυξίδα πρέπει να ξεπερνούν τις 100 για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα. Οι μετρήσεις αυτές συμβάλλουν σημαντικά στην κατανόηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας, δεδομένου ότι πιθανή παρουσία επιπέδων ασυνέχειας με δυσμενή προσανατολισμό αποτελεί σοβαρό παράγοντα χαλάρωσης και αστάθειας των πρανών γενικά.

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας κάτω από το συγκεκριμένο καθεστώς τεκτονικής διάρρηξης, είναι αναγκαία σε πρώτη φάση η καταγραφή των πόλων και στη συνέχεια η ισοβαρής κατανομή αυτών. Το πρόγραμμα Dips, δεχόμενο τις μετρήσεις υπαίθρου, υπολογίζει τη θέση των πόλων, από την οποία προκύπτουν τα κύρια συστήματα ασυνεχειών. Από το βοήθημα του προγράμματος, συνιστάται οι περιοχές συγκέντρωσης πόλων οι οποίες περιλαμβάνουν ποσοστό μεγαλύτερο του 6% των συνολικών μετρήσεων να θεωρούνται συστήματα ασυνεχειών μεγάλης σημασίας. Οι περιοχές που περιλαμβάνουν ποσοστό 4-6%, πρέπει να θεωρούνται μικρότερης σημασίας, ενώ εκείνες που περιλαμβάνουν ποσοστό μικρότερο του 4% να αγνοούνται, εκτός της περίπτωσης που ο συνολικός αριθμός μετρήσεων είναι πολύ μεγάλος, της τάξης των μερικών εκατοντάδων.

### 4.2. Προσδιορισμός των πιθανών μορφών αστοχίας

Για τον προσδιορισμό των πιθανών μορφών αστοχίας σε κάθε πρανές έγιναν μετρήσεις με χρήση γεωλογικής πυξίδας Clar (Εικόνα 4.1). Έτσι, πραγματοποιήθηκαν 225 μετρήσεις για τον καθορισμό των ασυνεχειών στον Ανώτερο ασβεστόλιθο (μετρήσεις στα πρανή A1 και A2), και 107 για τον Κατώτερο ασβεστόλιθο (στα πρανή B1 και B2). Η στερεογραφική προβολή τους από το πρόγραμμα Dips κατέδειξε 5 οικογένειες ασυνεχειών για την πρώτη περίπτωση και 4 αντίστοιχα για τη δεύτερη.



Εικόνα 4.1: Η γεωλογική πυξίδα Clar

Πιο συγκεκριμένα, στα πρανή όπου εμφανίζεται ο Ανώτερος ασβεστόλιθος, προέκυψαν οι εξής οικογένειες ασυνχειών:

- J1 - 17°/077°
- J2 - 89°/259°
- J3 - 88°/183°
- J4 - 89°/036°
- J5 - 55°/151°

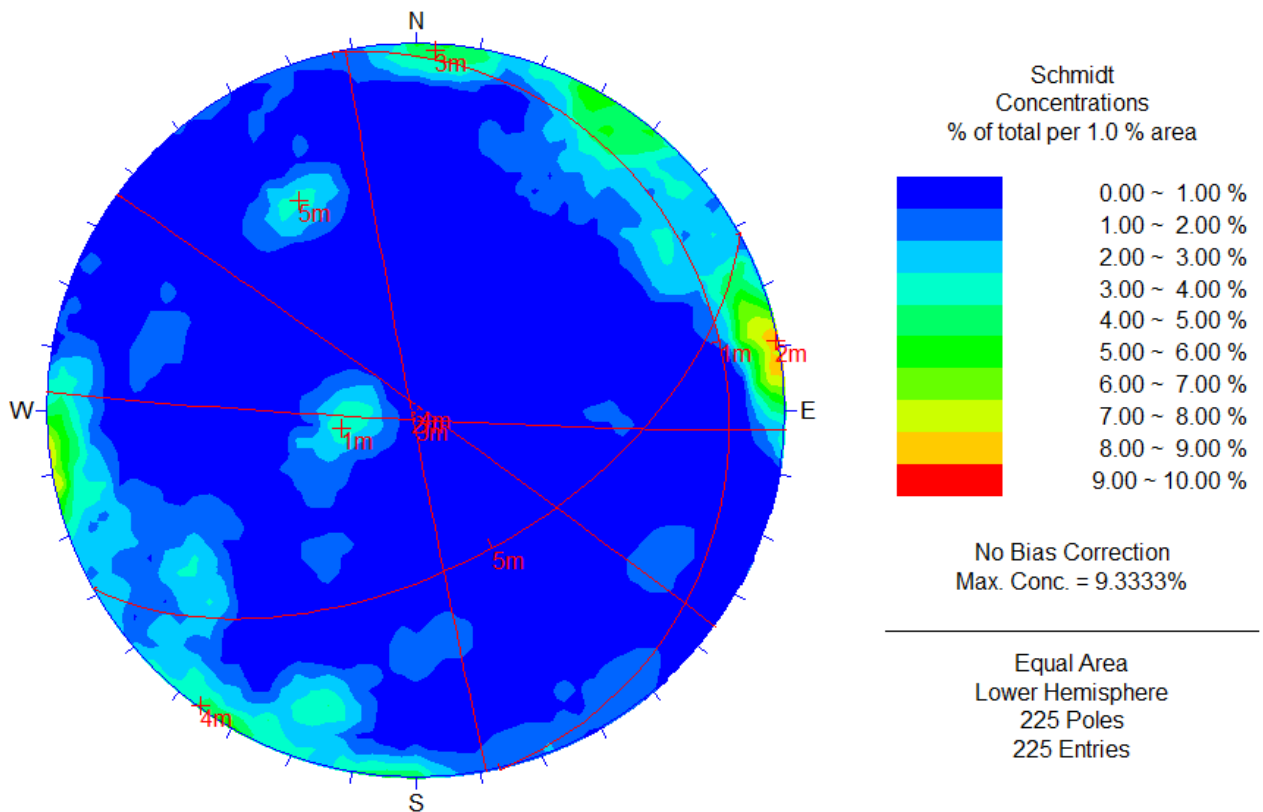
Το σύνολο των ασυνχειών παρουσιάζουν από πολύ μικρή εμμονή, της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών, μέχρι και μεγάλη, αφού στη βάση του πρανούς A1 βρίσκονται ασυνέχειες των οικογενειών J3 και J4 που εκτείνονται μέχρι και 12 m. Η απόστασή τους είναι σχετικά μικρή, επικρατούν στεγνές συνθήκες και η αντοχή των τοιχωμάτων τους κρίνεται σκληρή (βάσει μετρήσεων στο προηγούμενο κεφάλαιο). Τέλος, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους χαρακτηρίζονται ως τραχείες επιφάνειες, από πολύ κλειστές έως πολύ ευρείες (5 cm) σε λίγες μόνο περιπτώσεις, χωρίς υλικό πλήρωσης, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων εμφάνισης ασβεστιτικού υλικού.

Στα πρανή όπου εμφανίζεται ο Κατώτερος ασβεστόλιθος, προέκυψαν οι εξής οικογενειών ασυνχειών:

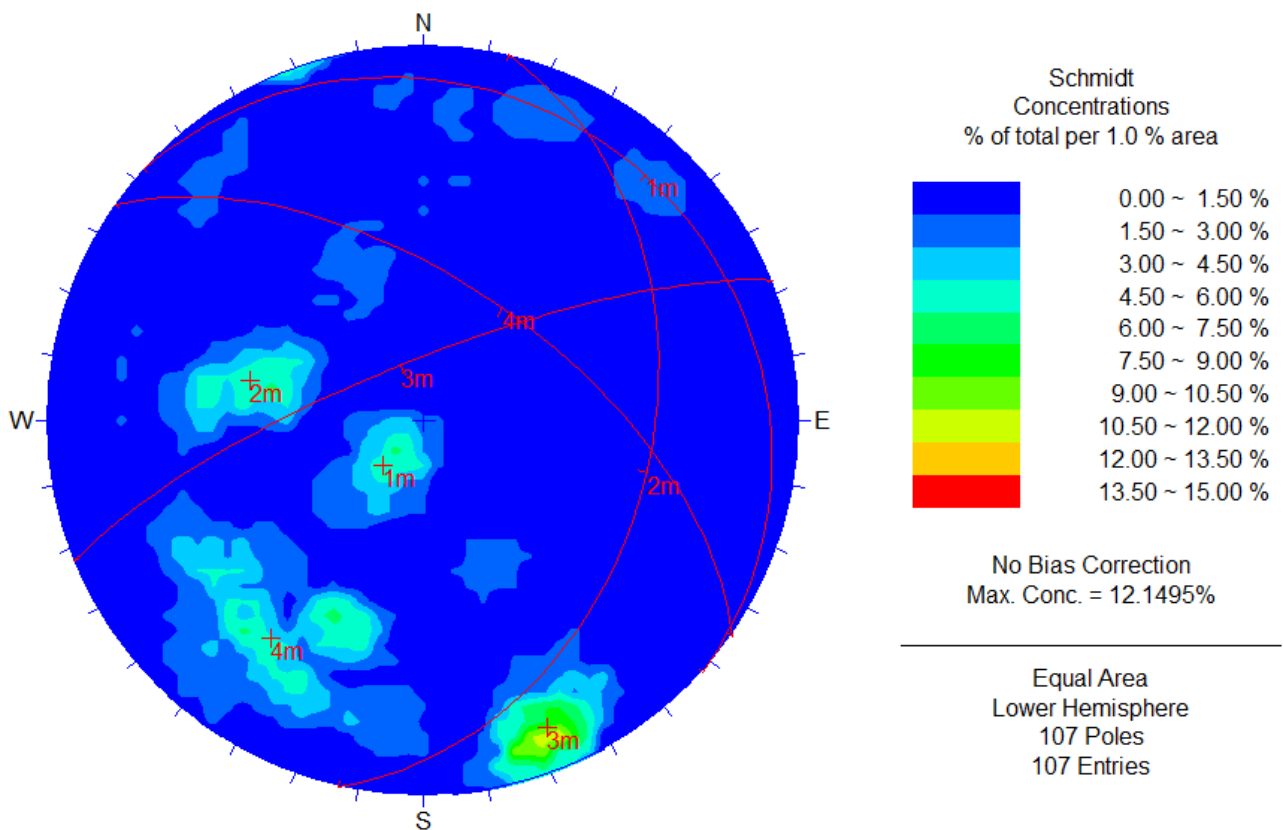
- J1 - 77°/222°
- J2 - 51°/283°
- J3 - 13°/158°
- J4 - 30°/215°

Το σύνολο των ασυνχειών παρουσιάζουν από πολύ μικρή εμμονή, της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών, μέχρι και μέτρια, αφού ασυνέχειες της οικογένειας J2 εκτείνονται μέχρι και 8 m. Η απόστασή τους είναι σχετικά μικρή, επικρατούν στεγνές συνθήκες και η αντοχή των τοιχωμάτων τους κρίνεται από μέτρια έως σκληρή (βάσει μετρήσεων στο προηγούμενο κεφάλαιο). Τέλος, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους χαρακτηρίζονται ως ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, από πολύ κλειστές έως, λιγότερο συχνά, πολύ ευρείες (5 cm), με υλικό πλήρωσης σε αρκετές περιπτώσεις αργιλικού υλικού, και σε λιγότερες με ασβεστιτικό υλικό.

Η στερεογραφική προβολή των μετρήσεων στο πρόγραμμα Dips για τους 2 σχηματισμούς παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Στερεογραφική προβολή των μετρήσεων για τον Ανώτερο ασβεστόλιθο στο πρόγραμμα Dips

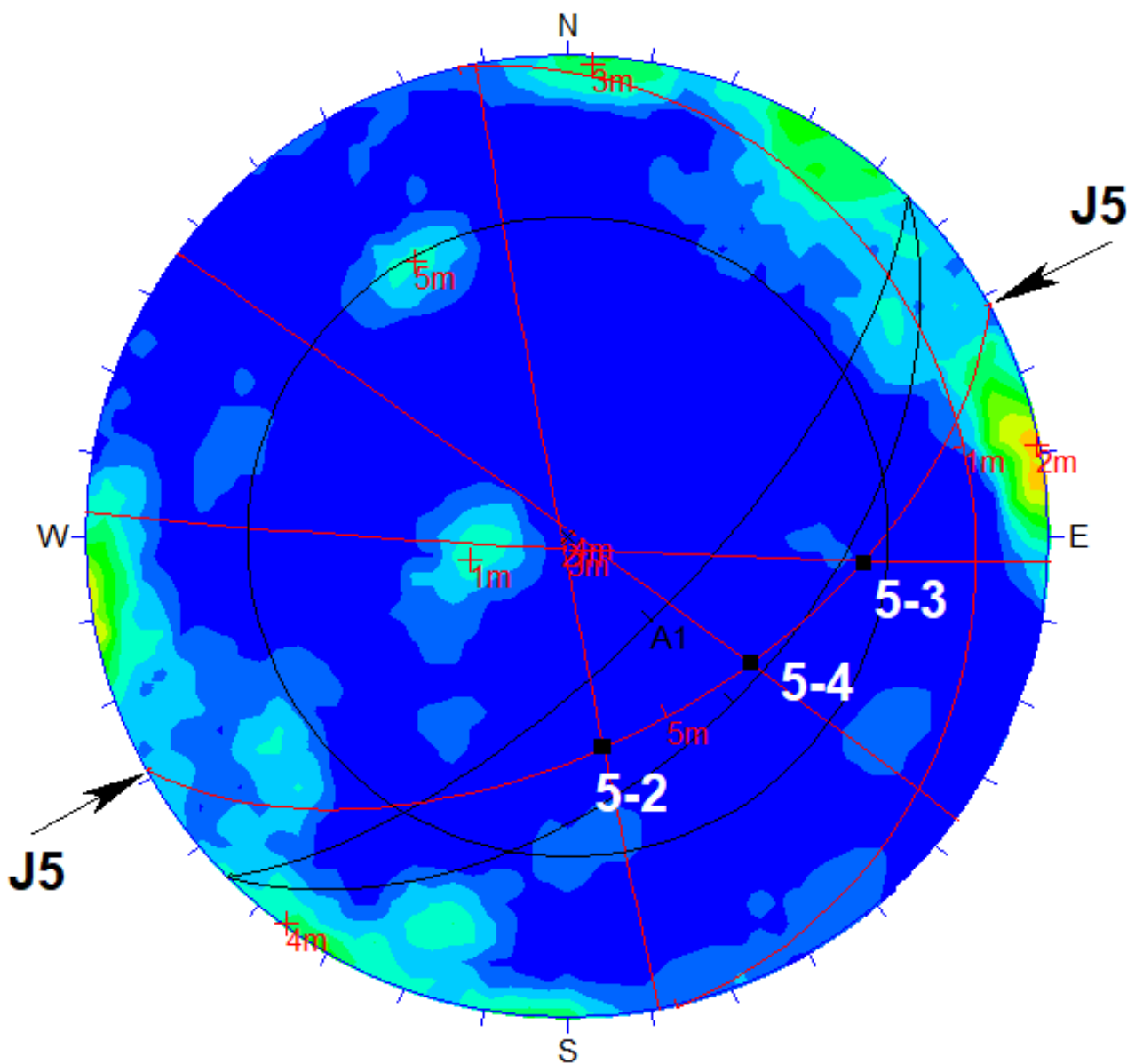


Σχήμα 4.2: Στερεογραφική προβολή των μετρήσεων για τον Κατώτερο ασβεστόλιθο στο πρόγραμμα Dips

Παρακάτω παρουσιάζονται για το κάθε πρανές οι πιθανές μορφές αστοχίας που μπορεί να προκύψουν, βάσει των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν. Στις αναλύσεις που ακολουθούν χρησιμοποιείται ως γωνία τριβής των ασυνεχειών η ελάχιστη τιμή (από τη μεριά της ασφάλειας) που προέκυψε από τις ανάλογες μετρήσεις στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή  $\varphi = 34^\circ$ . Τέλος, οι έλεγχοι των πιθανών μορφών αστοχίας σε κάθε πρανές πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα αντίστοιχα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

#### 4.2.1. Πρανές A1

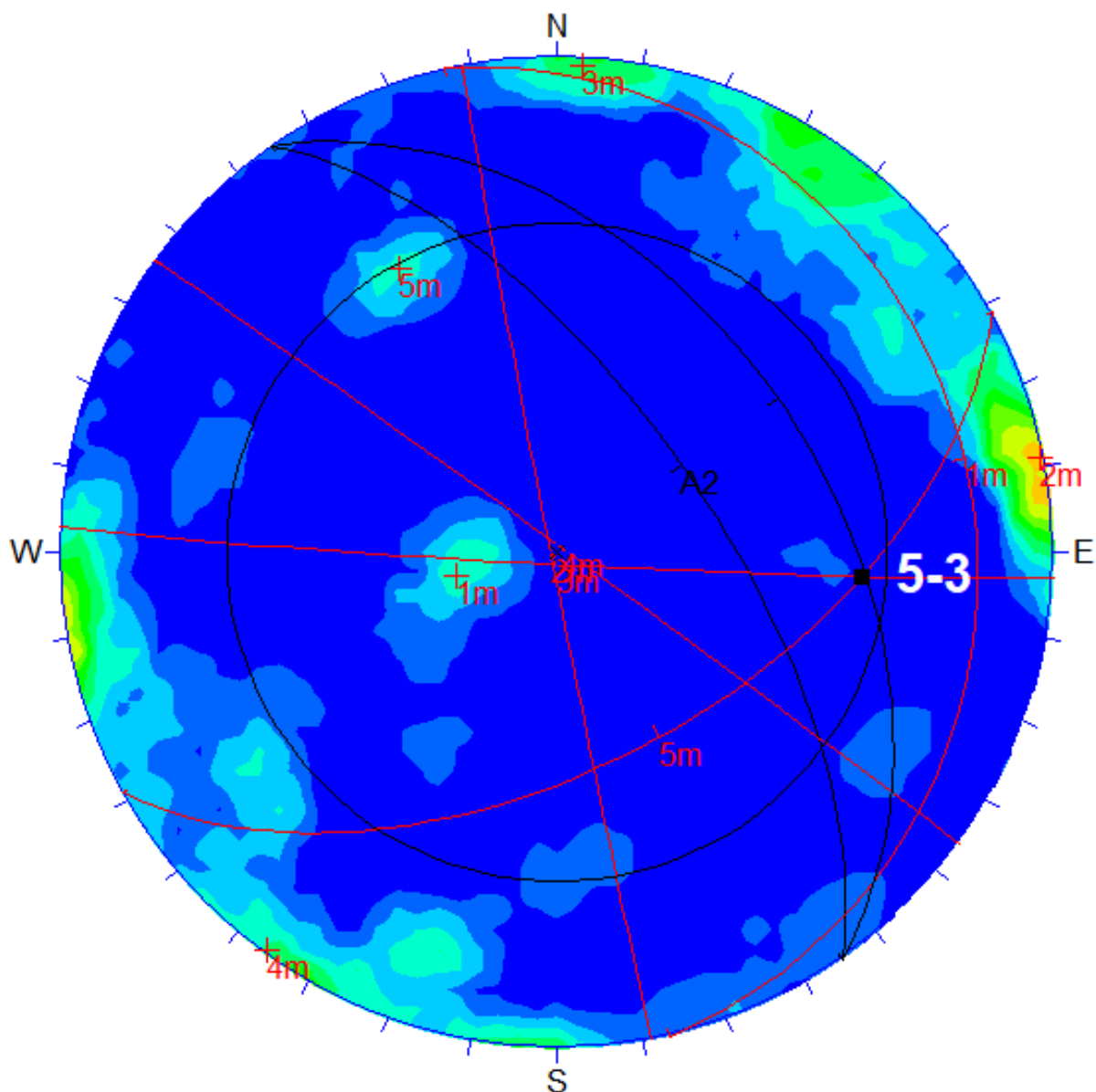
Η στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για το πρανές A1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Η κλίση του πρανούς κυμαίνεται από  $50^\circ$  έως  $70^\circ$ , με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις  $135^\circ$ . Από τη στερεογραφική ανάλυση προέκυψαν πιθανός κίνδυνος σε ολίσθηση σφήνας από τις ασυνέχειες **J5-J2**, **J5-J3** και **J5-J4**, πιθανή ολίσθηση επιπέδου της ασυνέχειας **J5**, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος σε αστοχία ανατροπής.



Σχήμα 4.3: Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές A1

### 4.2.2. Πρανές A2

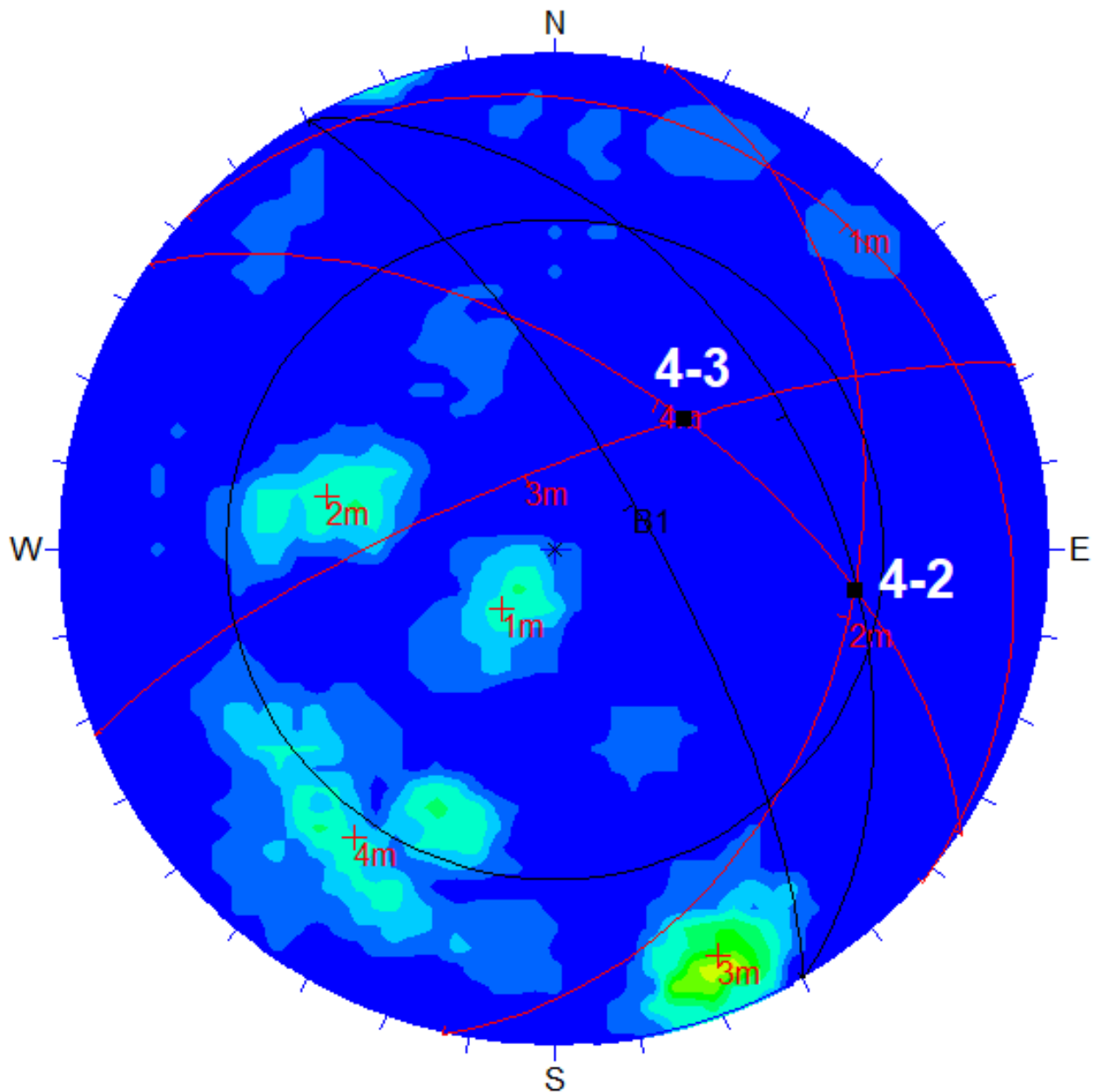
Η στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για το πρανές A2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Η κλίση του πρανούς κυμαίνεται από  $45^\circ$  έως  $65^\circ$ , με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις  $055^\circ$ . Από τη στερεογραφική ανάλυση προέκυψαν πιθανός κίνδυνος σε **ολίσθηση σφήνας** από τις ασυνέχειες **J5-J3**, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος σε αστοχία επιπέδου ή ανατροπής.



Σχήμα 4.4: Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές A2

### 4.2.3. Πρανές B1

Η στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για το πρανές B1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Η κλίση του πρανούς κυμαίνεται από  $45^\circ$  έως  $75^\circ$ , με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις  $060^\circ$ . Από τη στερεογραφική ανάλυση προέκυψαν πιθανός κίνδυνος σε **ολίσθηση σφήνας** από τις ασυνέχειες **J4-J2** και **J4-J3**, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος σε αστοχία επιπέδου ή ανατροπής.

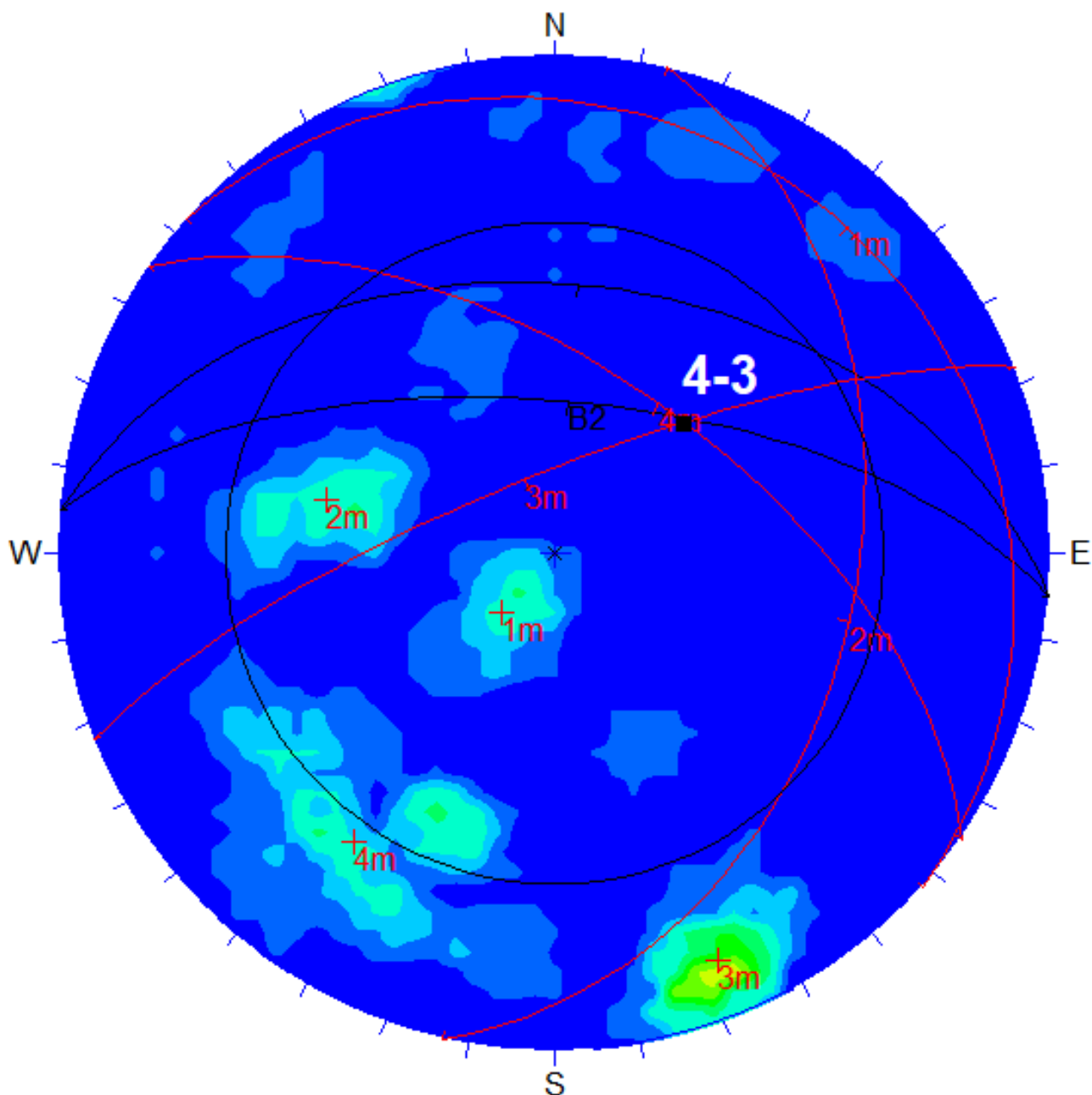


Σχήμα 4.5: Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές B1

#### 4.2.4. Πρανές B2

Η στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για το πρανές B2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Η κλίση του πρανούς κυμαίνεται από  $45^\circ$  έως  $65^\circ$ , με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις  $005^\circ$ . Από τη στερεογραφική ανάλυση προέκυψαν πιθανός κίνδυνος σε **ολίσθηση σφήνας** από τις ασυνέχειες **J4-J3**, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος σε αστοχία επιπέδου ή ανατροπής.

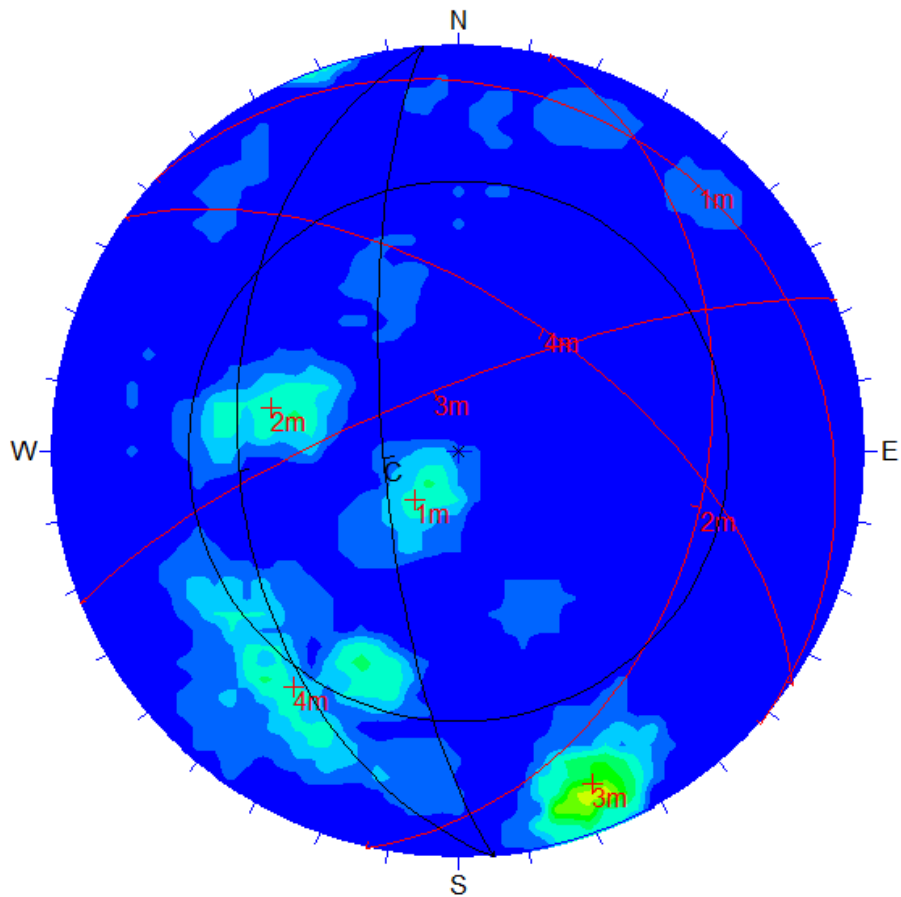




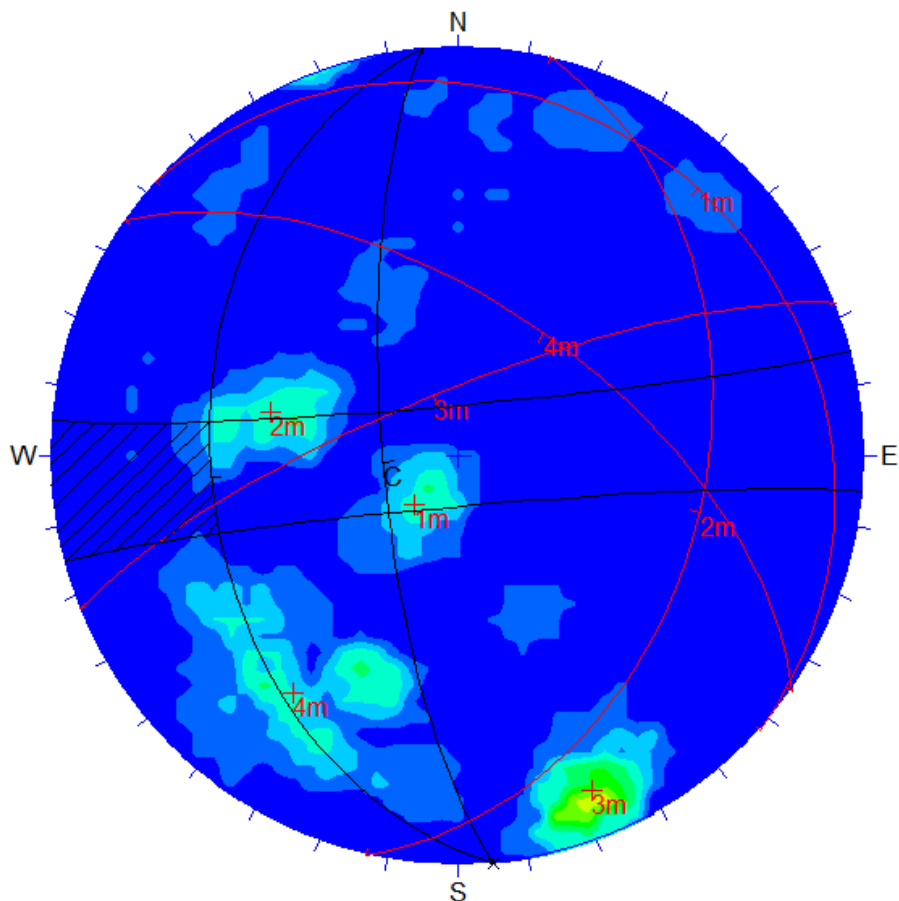
Σχήμα 4.6: Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές B2

#### 4.2.5. Πρανές Γ

Η στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για το πρανές Γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Η κλίση του πρανούς κυμαίνεται από  $45^\circ$  έως  $75^\circ$ , με τη διεύθυνση κλίσης του να εκτιμάται στις  $265^\circ$ . Από τη στερεογραφική ανάλυση δεν προέκυψε κίνδυνος αστοχίας σφήνας ή επιπέδου. Στο Σχήμα 4.8 γίνεται ο έλεγχος για την περίπτωση ανατροπής λόγω της ασυνέχειας J2, όπου η περιοχή κινδύνου εμφανίζεται γραμμοσκιασμένη. Αφού ο πόλως της οικογένειας J2 βρίσκεται εκτός αυτής της περιοχής, συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει κίνδυνος σε ανατροπή.



Σχήμα 4.7: Στερεογραφική προβολή των πιθανών μορφών αστοχίας για τον πρανές Γ



Σχήμα 4.8: Έλεγχος για την περίπτωση εμφάνισης φαινομένου ανατροπής για τον πρανές Γ

### 4.3. Υπολογισμός όγκου βραχοτεμαχίων από ενδεχόμενη κατάπτωση

Η στερεογραφική ανάλυση έδειξε πως στα πρανή που περιβάλλουν το χώρο του θεάτρου, εκτός του πρανούς Γ, υπάρχει κίνδυνος κατάπτωσης από ολισθήσεις σφηνών και σε μία περίπτωση από ολίσθηση επιπέδου. Για να υπολογιστούν οι ενδεχόμενες συνέπειες από μια τέτοια αστοχία, πρέπει να καθορισθεί ο όγκος και στη συνέχεια η μάζα ενός τέτοιου τεμαχίου.

Για να εκτιμηθεί ο όγκος των σφηνών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Swedge. Το πρόγραμμα με την εισαγωγή του προσανατολισμού του πρανούς και των ασυνεχειών που ορίζουν τις σφήνες που δύναται να ολισθήσουν, καθώς και του ύψος που μπορεί να εμφανίσει μια τέτοια αστοχία, παρέχει στο χρήστη τα γεωμετρικά στοιχεία της σφήνας.

Στα πρανή A1 και A2 οι εμμονές των ασυνεχειών J3 και J4 εμφανίζουν εμμονή ακόμη και 12 m. Παρόλα αυτά, η οικογένεια J5 δεν εμφανίζει εμμονή μεγαλύτερη των 2-3 m. Στα πρανή B1 και B2 επικρατεί μια αντίστοιχη περίπτωση, με την οικογένεια J2 να εμφανίζει συνέχεια μέχρι και 8 m αλλά με τις υπόλοιπες να μην υπερβαίνουν τα 2-3 m. Ως αποτέλεσμα, συμπεραίνεται ότι μια σφήνα που θα προέκυπτε από τις παραπάνω ασυνέχειες δε θα μπορούσε να ξεπερνά τα 3 m.

Προκειμένου να ορισθεί καλύτερα το ζητούμενο ύψος, ελέγχθηκαν οι διαστάσεις βραχοτεμαχίων που βρέθηκαν στις βάσεις των πρανών αλλά και γενικότερα στο χώρο του θεάτρου. Το μεγαλύτερο τεμάχιο που βρέθηκε ήταν όγκου περίπου  $3,5 \text{ m}^3$  (9 tn), με μέγιστη διάσταση περίπου 2,5 m, το οποίο απεικονίζεται στη Φωτογραφία 4.1. Γενικά από επί τόπου παρατηρήσεις στα πρανή, δεν παρατηρήθηκαν επί των πρανών μεγαλύτερης διάστασης επικίνδυνων τεμαχίων. Έτσι λοιπόν, επιλέχθηκε η εισαγωγή της τιμής των 3 m ως δυσμενέστερο σενάριο σχηματισμού σφήνας στα πρανή.

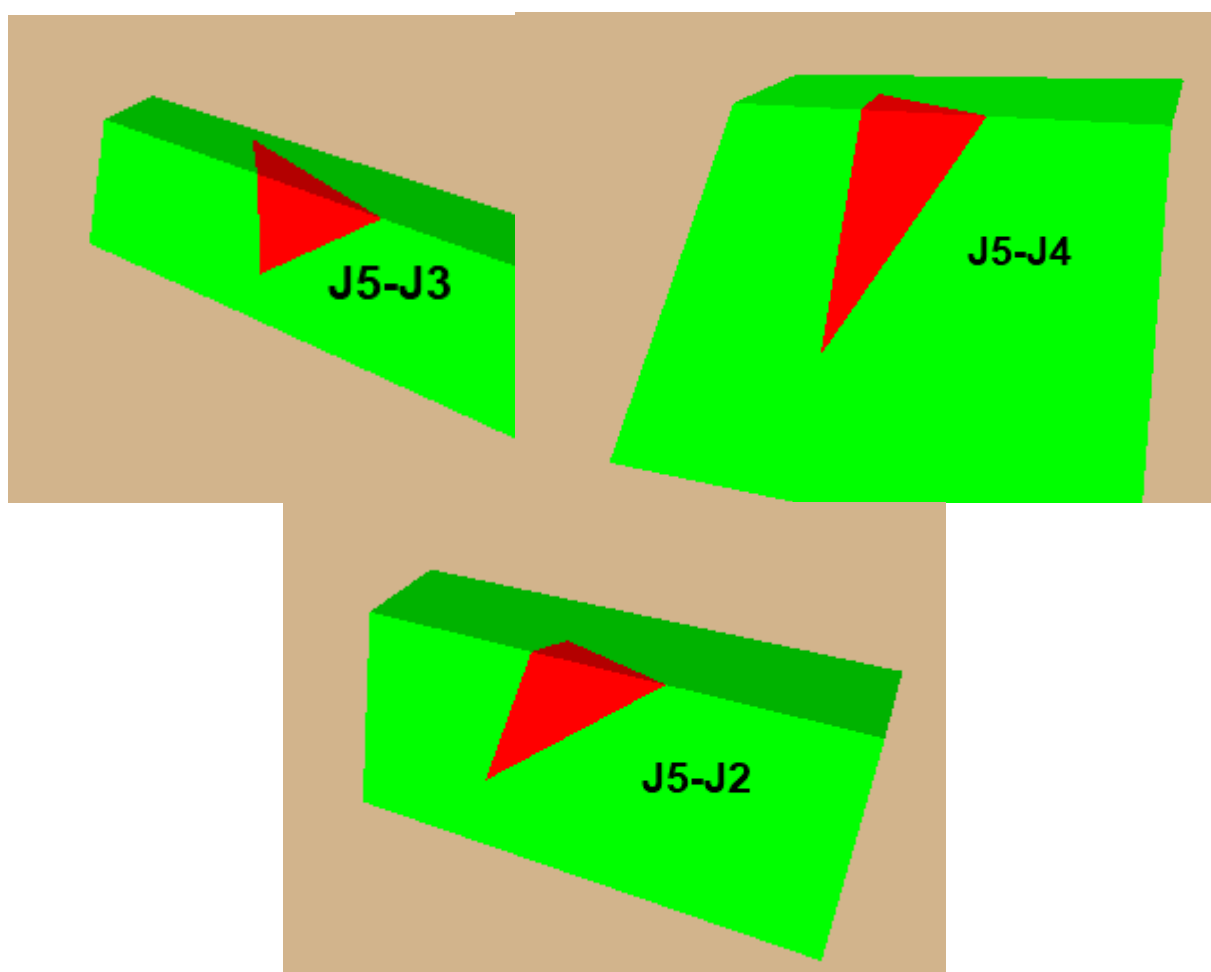
Από την παραπάνω ανάλυση, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ στα Σχήματα 4.9 - 4.12 απεικονίζονται οι σφήνες από το πρόγραμμα Swedge.



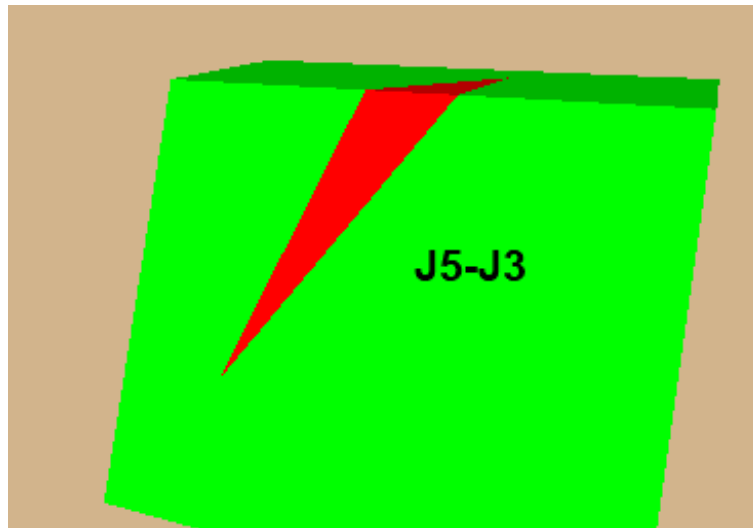
**Φωτογραφία 4.1:** Το μεγαλύτερο βραχοτεμάχιο που βρέθηκε στο χώρο του θεάτρου, με μέγιστη διάσταση 2,5 m (το όργανο είναι ανοιγμένο στην ένδειξη των 50 cm)

Πίνακας 4.1: Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Swedge

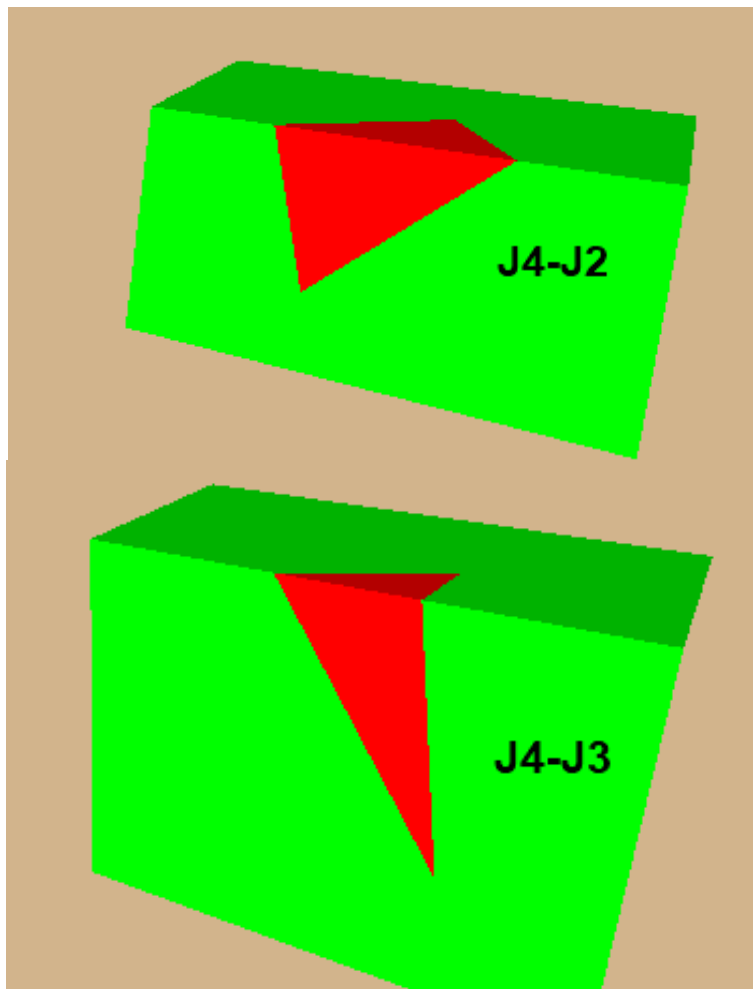
Πρανές	Ασυνέχειες που ορίζουν τη σφήνα	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Μάζα (tn)
A1	J5 - J2	1,1	2,8
	J5 - J3	4,2	<b>10,5</b>
	J5 - J4	0,7	1,8
A2	J5 - J3	0,8	2,0
B1	J4 - J2	3,9	9,8
	J4 - J3	0,8	2,0
B2	J4 - J3	0,2	0,5



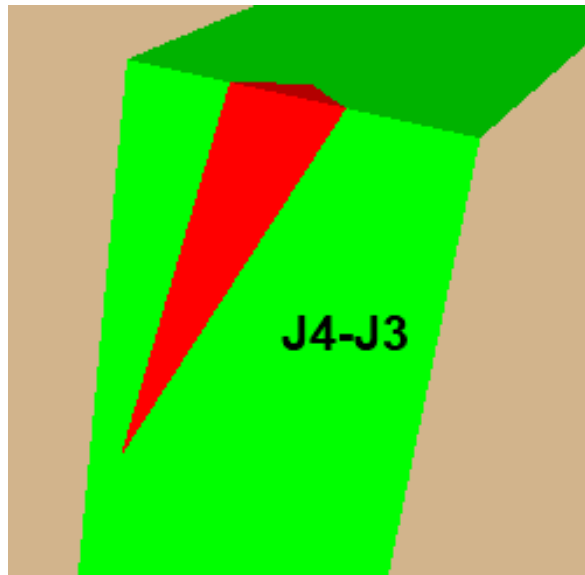
Σχήμα 4.9: Οι σφήνες που προκύπτουν στο πρανές A1, από το πρόγραμμα Swedge



Σχήμα 4.10: Η σφήνα που προκύπτει στο πρανές A2, από το πρόγραμμα Swedge

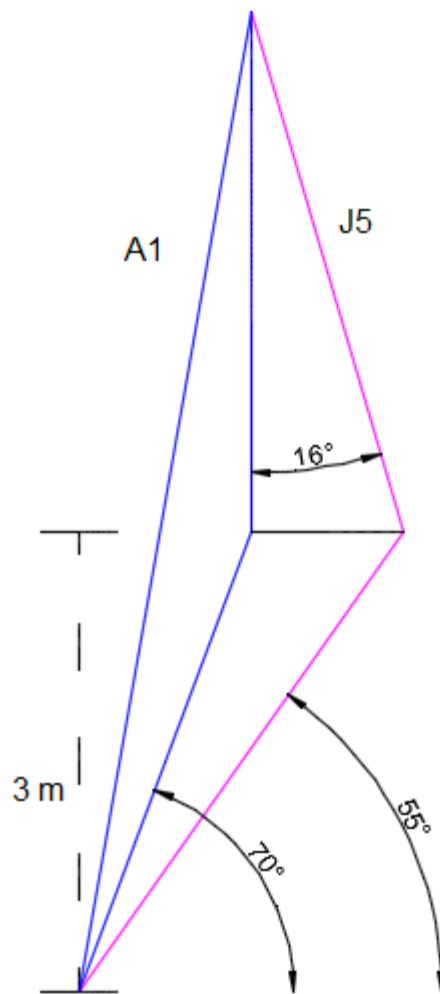


Σχήμα 4.11: Οι σφήνες που προκύπτουν στο πρανές B1, από το πρόγραμμα Swedge



Σχήμα 4.12: Η σφήνα που προκύπτει στο πρανές B2, από το πρόγραμμα Swedge

Τέλος, η εκτίμηση του όγκου του τεμάχους που θα ολισθήσει λόγω της αστοχίας επιπέδου της ασυνέχειας J5 στο πρανές A1, υπολογίστηκε γραφικά (Σχήμα 4.13). Ο όγκος υπολογίστηκε σε 1,7 m<sup>3</sup> (4,3 tn).



Σχήμα 4.13: Γραφική απεικόνιση του τεμάχους από αστοχία επιπέδου στο πρανές A1

## 5. Προσομοίωση καταπτώσεων με το πρόγραμμα Rocfall

Το Rocfall της Rocscience είναι ένα πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας πτώσεως βραχοτεμαχίων. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει την κινητική ενέργεια, την ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης καθώς επίσης και τη θέση τερματισμού των βραχοτεμαχίων στο πρηνές ενδιαφέροντος.

Το Rocfall εξυπηρετεί επίσης στον καθορισμό των απαιτούμενων μέτρων αντιστήριξης ή και των μέτρων προστασίας που χρειάζονται προκειμένου το πρηνές που εξετάζεται να καταστεί ασφαλές. Με το πρόγραμμα αυτό είναι δυνατή η εισαγωγή και η προσομοίωση μέτρων προστασίας όπως η τοποθέτηση φραχτών συγκράτησης. Οι πληροφορίες που παρέχονται μέσω γραφικών παραστάσεων και διαγραμμάτων σχετικά με την αναμενόμενη κινητική ενέργεια, το ύψος αναπήδησης και τη θέση κατάληξης των βραχοτεμαχίων καθιστούν δυνατό τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας, της ανθεκτικότητας, του μεγέθους και της θέσης τοποθέτησης των απαραίτητων μέτρων προστασίας – αντιστήριξης.

### 5.1. Διαδικασία ανάλυσης με τη χρήση του προγράμματος Rocfall

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών μέσω του Rocfall απαιτείται η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και των παραμέτρων τους. Η ακρίβεια των δεδομένων που συλλέχτηκαν στην υπαίθρια παρατήρηση διαδραματίζουν καθοριστικό παράγοντα εξαγωγής ορθών αποτελεσμάτων.

Τα δεδομένα και οι παράμετροι που εισάγονται στο πρόγραμμα είναι :

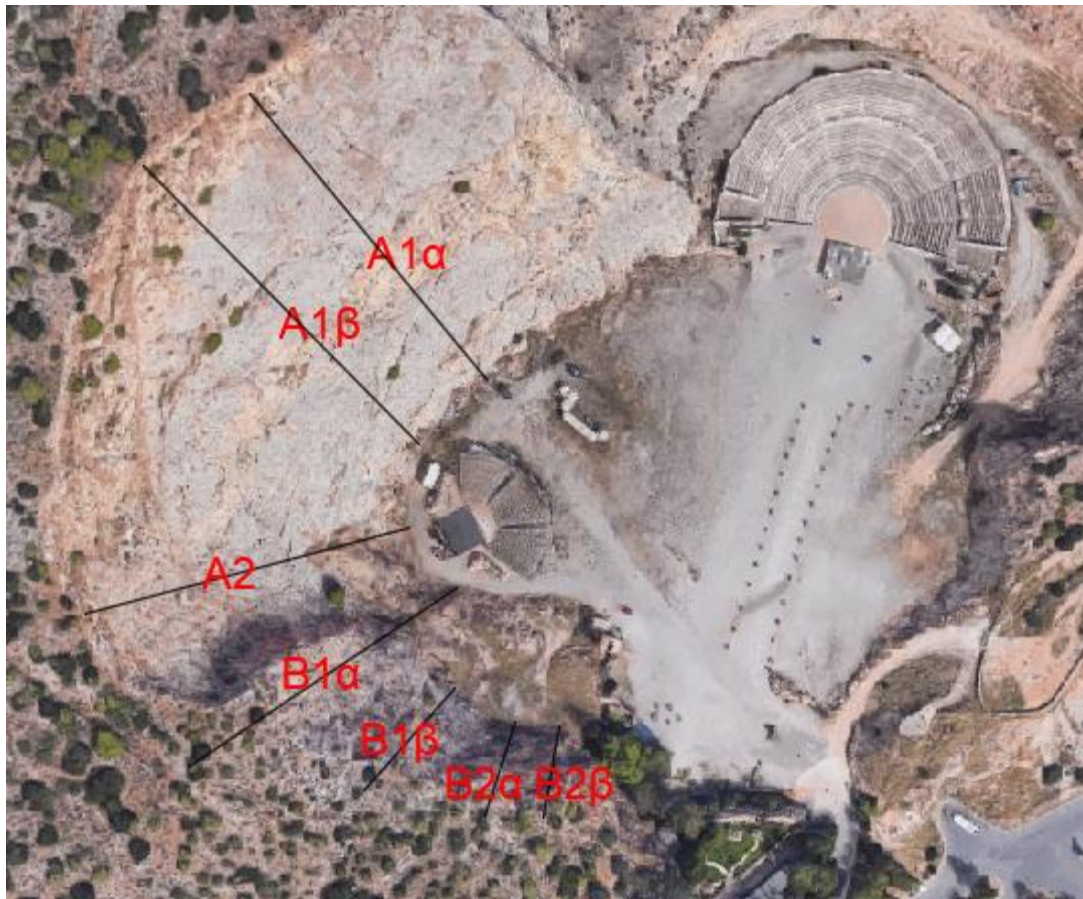
- Η γεωμετρία (σκαρίφημα) και η τραχύτητα του πρηνούς.
- Τα υλικά που απαρτίζουν το πρηνές και οι παράμετροι αυτών.
- Οι θέσεις εκκίνησης βραχοτεμαχίων προς πτώση.

#### 5.1.1. Γεωμετρία και τραχύτητα πρηνούς

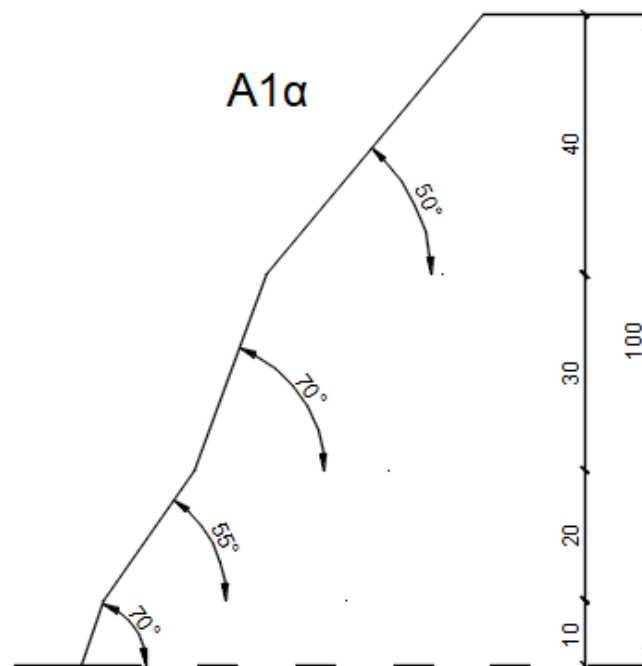
Η Γεωμετρία του πρηνούς αναφέρεται στην αποτύπωση του ανάγλυφου της κάθετης τομής του πρηνούς στο πρόγραμμα και αποτελεί ίσως την πιο κρίσιμη παράμετρο ως προς την ακρίβεια των υπολογισμών, καθώς ακόμη και η παραμικρή διακύμανση της κλίσης μπορεί να αλλάξει εντελώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης επιλέχθηκαν συνολικά 7 θέσεις προσομοίωσης στα 4 πρηνή, οι οποίες επιλέχθηκαν με βάση τις πλέον κρίσιμες συνθήκες που επικρατούσαν σε κάθε περίπτωση, όπως το ύψος, η κλίση του πρηνούς και η γεωμετρία της βάσης του. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται οι επιλεγμένες θέσεις στα πρηνή. Η εκτίμηση της κλίσης για κάθε θέση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φωτογραφιών και παρατηρήσεων που έγιναν στο πεδίο. Έτσι, προέκυψαν τα σκαριφήματα κάθε περίπτωσης, τα οποία παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.2-5.8.

Η τραχύτητα του πρηνούς (slope roughness) χρησιμοποιείται από το Rocfall ως συντελεστής προσδιορισμού της διακύμανσης της κλίσης λόγω μεταβολών του ανάγλυφου και εξαρτάται όχι μόνο από τα υλικά, αλλά και από το μέγεθος των βραχοτεμαχίων που πέφτουν σε σύγκριση με την επιφάνεια στην οποία αναπηδούν. Οι τυπικές τιμές της τραχύτητας είναι συνήθως 0, 2, 3, 5. Από τα έως τώρα δεδομένα δεν υπάρχουν τιμές μεγαλύτερες των 5 μοιρών. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέχθηκε τιμή ίση με 2,5.

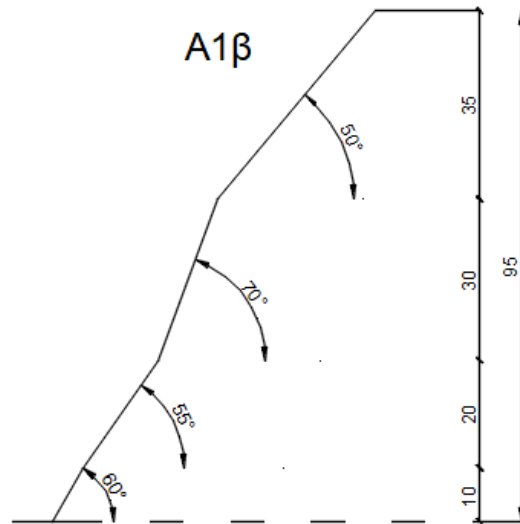


Εικόνα 5.1: Οι θέσεις ανάλυσης στα πρανή

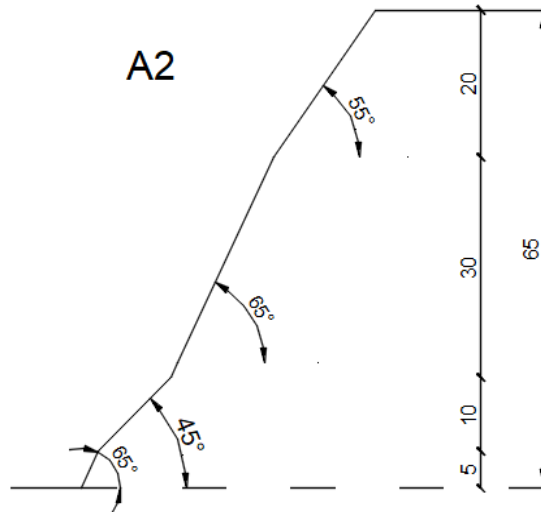


Εικόνα 5.2: Σκαρίφημα πρανούς A1 στη θέση A1α

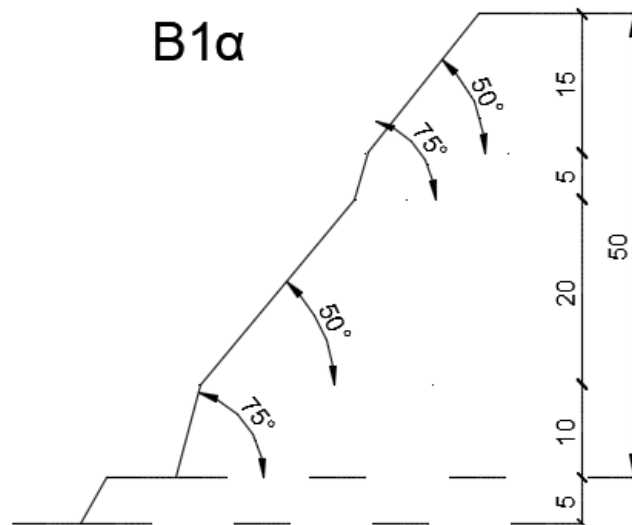




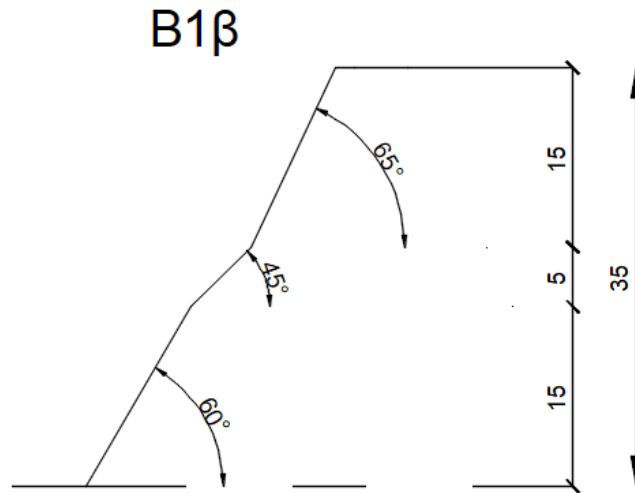
Εικόνα 5.3: Σκαρίφημα πρανούς A1 στη θέση A1β



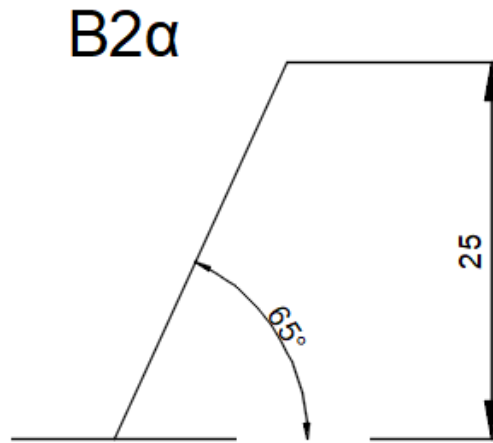
Εικόνα 5.4: Σκαρίφημα πρανούς A2



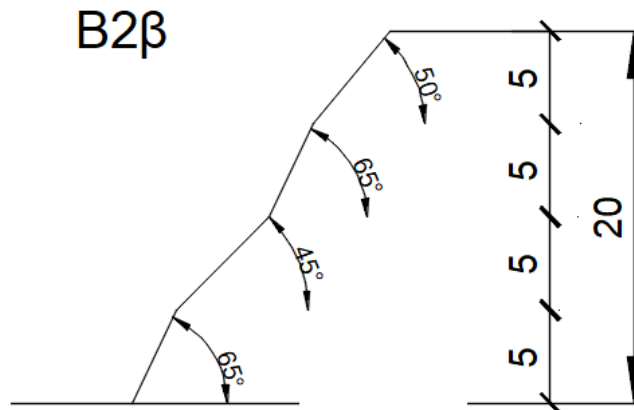
Εικόνα 5.5: Σκαρίφημα πρανούς B1 στη θέση B1α



Εικόνα 5.6: Σκαρίφημα πρανούς B1 στη θέση B1β



Εικόνα 5.7: Σκαρίφημα πρανούς B2 στη θέση B2α



Εικόνα 5.8: Σκαρίφημα πρανούς B2 στη θέση B2β

### 5.1.2. Υλικά που απαρτίζουν το πρανές και οι παράμετροι αυτών

Τα υλικά που απαρτίζουν το πρανές πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα και στην συνέχεια να καθοριστούν τα τμήματα του πρανούς στα οποία εμφανίζονται με τις ιδιότητές τους. Πιο συγκεκριμένα, οι ιδιότητες που πρέπει να καθοριστούν είναι:

- **Οι συντελεστές αναπήδησης  $R_n$  και  $R_t$**

Η επιλογή της κατάλληλης τιμής των συντελεστών της αναπήδησης είναι σημαντική, καθώς το αποτέλεσμα είναι συχνά πολύ ευαίσθητο στις τιμές που χρησιμοποιούνται. Αν υπάρχει αβεβαιότητα για τις τιμές αυτές, προτείνεται η χρήση του πίνακα παραγόντων κρούσης της Rocscience που συνοδεύει το πρόγραμμα και στη συνέχεια η προσαρμογή των συντελεστών ώσπου οι τροχιές των βράχων, οι ενέργειες, οι ταχύτητες και τα τελικά σημεία των τροχιών να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις παρατηρήσεις καταπτώσεων του παρελθόντος.

- **Η γωνία τριβής διεπιφάνειας πρανούς – βραχοτεμαχίου**

Η γωνία τριβής διεπιφάνειας πρανούς – βραχοτεμαχίου όπως αυτή χρησιμοποιείται στην ανάλυση με το Rocfall, είναι η κρίσιμη γωνία κλίσης του πρανούς η οποία όταν ξεπεραστεί, τα βραχώδη τεμάχια αρχίζουν να ολισθαίνουν. Επιλέγεται με βάση τη μέτρηση που έχει παρθεί με επιτόπου δοκιμή και συγκρίνεται πάντα, για την ορθότητά της, με τη βιβλιογραφική τιμή που αντιστοιχεί στο υλικό που απαρτίζει το πρανές. Σε γενικές γραμμές, η επιλογή χαμηλότερων τιμών από τις μετρηθείσες δίνουν πιο συντηρητικές εκτιμήσεις και παρέχουν εικόνα για το χειρίστο σενάριο, αυξάνοντας έτσι το συντελεστή ασφάλειας της μελέτης.

Για την προκειμένη περίπτωση επιλέγονται 4 υλικά εμφάνισης στα ασβεστολιθικά πρανή, με τις τιμές  $R_n$  και  $R_t$  να επιλέγονται από τον προτεινόμενο πίνακα του προγράμματος. Οι τιμές τις γωνίας τριβής επιλέχθηκαν ίσες με  $34^\circ$  για τα βραχώδη ασβεστολιθικά υλικά, όπως μετρήθηκε από τις αντίστοιχες γωνίες των ασυνεχειών τους, και  $30^\circ$  για τα εδαφικά υλικά (Πίνακας 5.1).

**Πίνακας 5.1:** Τα υλικά εμφάνισης στο πρανές και οι παράμετροί τους

Υλικό	$R_n$		$R_t$		Γωνία τριβής $\varphi$
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	
Ασβεστόλιθος	0,315	0,064	0,712	0,116	$34^\circ$
Λοιθώνες ασβεστολίθου	0,303	0,080	0,615	0,170	$34^\circ$
Έδαφος με μερική φυτοκάλυψη	0,300	-	0,800	-	$30^\circ$
Κορρήματα	0,300	-	0,815	-	$30^\circ$

### 5.1.3. Θέσεις εκκίνησης βραχοτεμαχίων

Οι θέσεις εκκίνησης των βραχοτεμαχίων πρέπει να καθοριστούν ώστε να γίνει η προσομοίωση των καταπτώσεων. Η επιλογή των θέσεων αυτών εναποτίθεται στην κρίση του μηχανικού και βασίζεται στην αξιολόγηση κινδύνου καταπτώσεων από τις επιτόπου παρατηρήσεις, καθώς επίσης και στα συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από τη στερεογραφική μελέτη. Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε ως θέση εκκίνησης η δυσμενέστερη, δηλαδή η στέψη του πρανούς, για όλες τις περιπτώσεις. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι παράμετροι των τεμαχίων προς πτώση, οι οποίοι είναι:

- **Η αρχική γωνιακή, οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα**

Η αρχική γωνιακή ταχύτητα γενικά ορίζεται μηδενική, εφόσον δεν υπάρχει λόγος να γίνει αλλιώς και εξαρτάται κυρίως από το σχήμα των τεμαχίων προς πτώση. Κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης είναι καλό να εξετάζεται εάν αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν εισάγεται μια μη μηδενική αρχική γωνιακή ταχύτητα. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα σύγκρισης βράχου που αρχίζει με περιστροφική κίνηση και ενός που κινείται ολισθαίνοντας.

Η αρχική οριζόντια και κάθετη ταχύτητα ορίζεται πάντα μηδενική εκτός και αν για λόγους δοκιμής κάποιοι αστάθμητοι παράγοντα ο χρήστης επιθυμεί την προσομοίωση με κάποια αρχική τιμή. Συνήθως οι δοκιμές που εμπριέχουν αρχική οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα βραχοτεμαχίων πραγματοποιούνται για λόγους επιπρόσθετης ασφάλειας.

Στα μοντέλα προσομοίωσης που ακολουθούν έχουν θεωρηθεί μηδενικές αρχικές ταχύτητες.

- **Αριθμός Βραχοτεμαχίων προς πτώση και οριζόντιων σημείων ανάλυσης**

Ο καθορισμός του αριθμού των βραχοτεμαχίων προς πτώση και των οριζόντιων σημείων ανάλυσης αποσκοπεί στην ακρίβεια της ανάλυσης του Rocfall. Μεγαλύτερος αριθμός σημαίνει περισσότερα σενάρια προς προσομοίωση άρα και μεγαλύτερη ακρίβεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την επικινδυνότητα των καταπτώσεων. Γενικά ο αριθμός 200 θεωρείται ικανοποιητικός.

- **Μάζα**

Ο καθορισμός της μάζας των βραχοτεμαχίων που πρόκειται να αποκολληθούν κατά την προσομοίωση γίνεται πάντα με βάση τις μετρήσεις-εκτιμήσεις όγκου που γίνονται στο πρανές ενδιαφέροντος.

Στη συγκεκριμένη μελέτη ως μέγιστη τιμή ελέγχου λαμβάνεται η μεγαλύτερη τιμή που προέκυψε από όλες τις περιπτώσεις της στερεογραφικής ανάλυσης και του προγράμματος Swedge του προηγούμενου κεφαλαίου, δηλαδή για βάρος 10,5 tn. Επιπρόσθετα, επιλέγονται μικρότερες τιμές για βραχοτεμάχια που βρέθηκαν στις βάσεις των πρανών (Φωτογραφία 5.1).

Έτσι, για κάθε ανάλυση σε κάθε θέση πρανούς, θα πραγματοποιηθούν έλεγχοι για βραχοτεμάχια 10,5 tn, 1 tn, 150 kg και 10 kg.



*Φωτογραφία 5.1: Βραχοτεμαχία που βρέθηκαν στις βάσεις των πρानών*

#### 5.1.4. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, γίνεται η προσομοίωση των καταπτώσεων και ακολουθεί καταγραφή των αποτελεσμάτων με την βοήθεια του σχήματος αποτύπωσης των τροχιών πτώσης των βραχοτεμαχίων καθώς και με τα γραφήματα αποτύπωσης συνολικής κινητικής ενέργειας, ύψους αναπήδησης και μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση.

Τα παραπάνω γραφήματα παρέχουν μετρήσεις οι οποίες συλλέγονται από τα τελικά σημεία κατάληξης των βραχοτεμαχίων. Παρόλα αυτά, μέσω της χρήσης των συλλεκτών δεδομένων (Data Collectors) του προγράμματος Rocfall, είναι δυνατή η συλλογή μετρήσεων σε οποιαδήποτε σημείο ενδιαφέροντος πάνω στο σχήμα αποτύπωσης των τροχιών πτώσης των βραχοτεμαχίων. Οι συλλέκτες δεδομένων δεν αποτελούν κάποια φυσική οντότητα, είναι απλώς γραμμικά ίχνη επί του πρानούς που καθορίζονται από το χρήστη και κατά μήκος των οποίων το πρόγραμμα υπολογίζει την ταχύτητα, την κινητική ενέργεια και τις θέσεις κάθε βραχοτεμαχίου κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, όπως αυτό διέρχεται από το συγκεκριμένο σημείο.

Τέλος, όλα τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας του πρानούς και την μελέτη καθορισμού των απαραίτητων μέτρων προστασίας που πρέπει να ληφθούν.

## 5.2. Προσομοίωση καταπτώσεων στα εξεταζόμενα πρανή

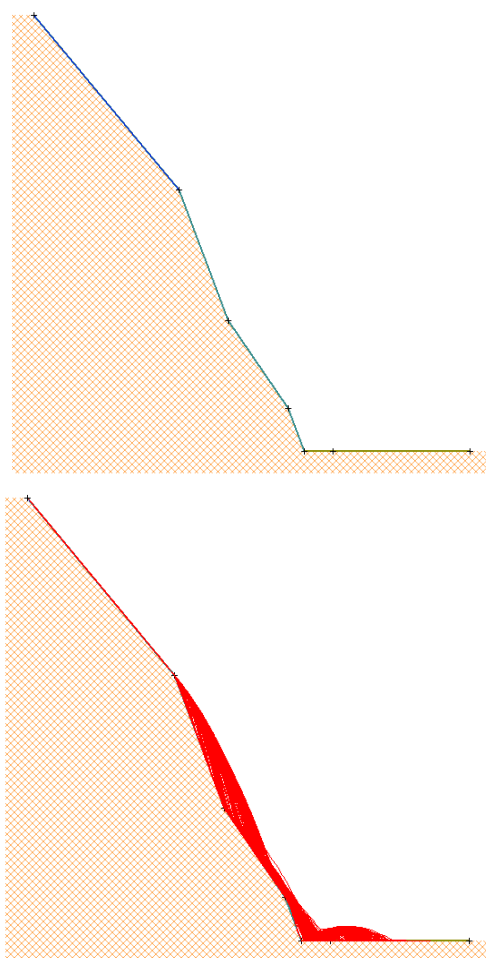
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε κάθε θέση πρανούς, σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν παραπάνω. Σημειώνεται πως στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθούν οι αναλύσεις μόνο για την προσομοίωση βάρους 10,5 tn, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις τα μικρότερα βάρη δεν έδιναν δυσμενέστερα αποτελέσματα.

### 5.2.1. Πρανές A1

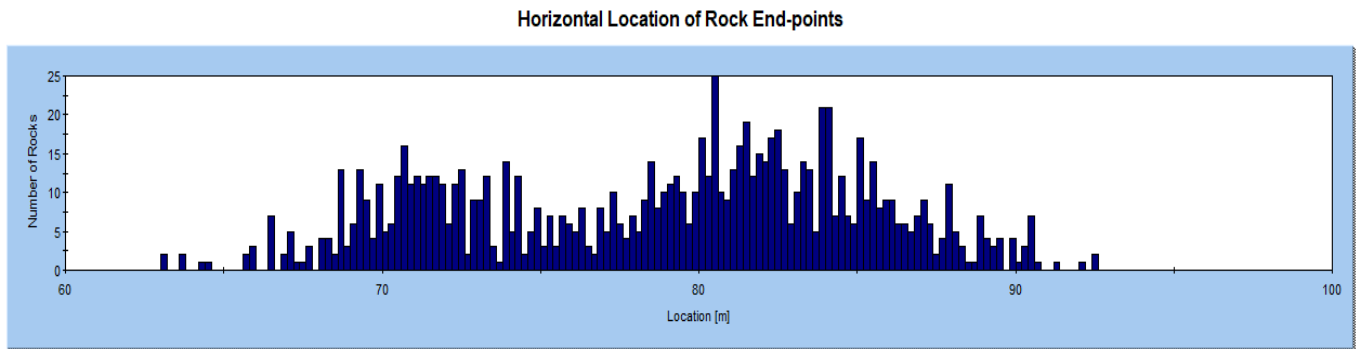
Στο πρανές A1 επιλέχθηκε ανάλυση σε 2 διαφορετικά σημεία, το πρώτο στη θέση μέγιστου ύψους (100 m) και το δεύτερο στη θέση που είναι πλησιέστερη στο θέατρο, με ύψος 95 m και μικρή αλλαγή κλίσης του κατώτερου τμήματος του πρανούς σε σχέση με την πρώτη.

#### 5.2.1.1. Θέση A1α

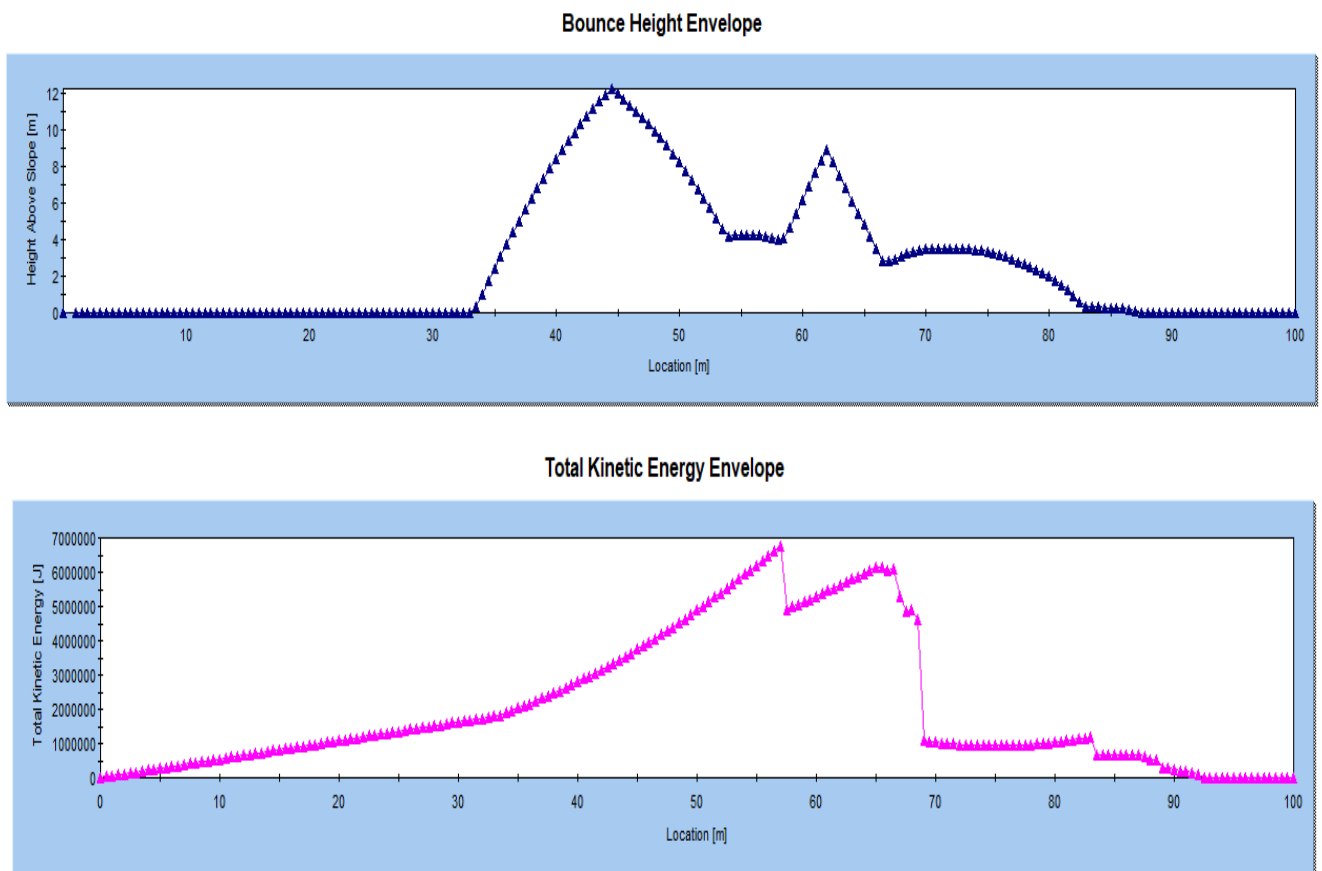
Στην Εικόνα 5.9 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.1 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.2 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



**Εικόνα 5.9:** Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A1α



**Σχήμα 5.1:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1α. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 62 m



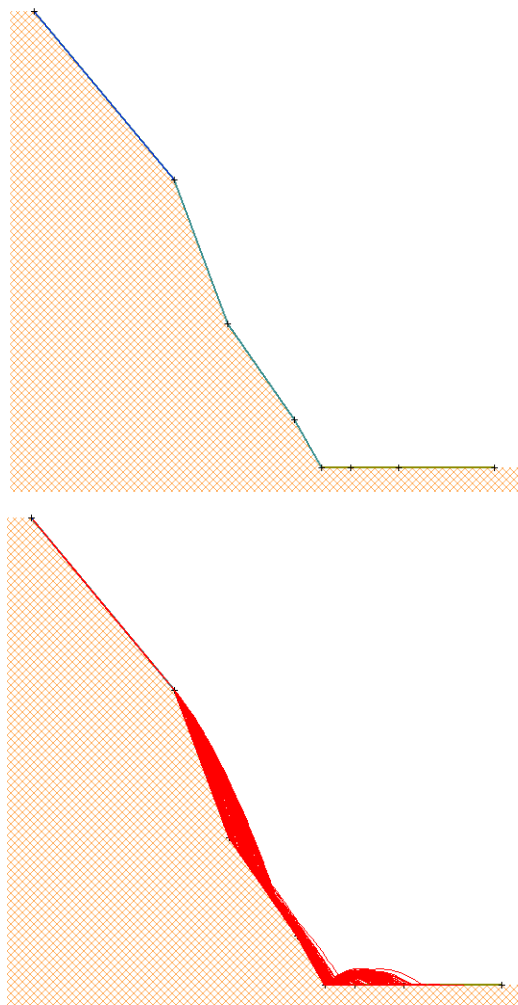
**Σχήμα 5.2:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1α

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

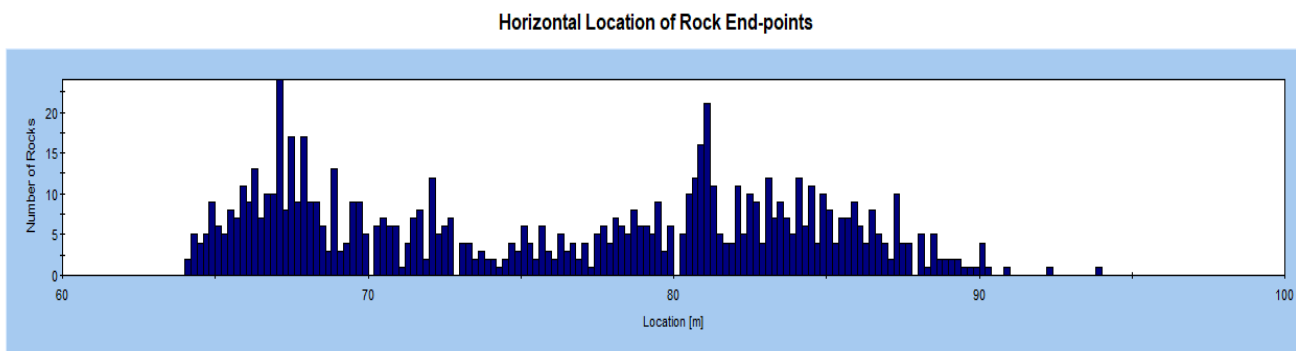
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 30 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 7000 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 1250 kJ, στα 7 m κατάντη από το πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 12,25 m, ενώ στα 7 m κατάντη από το πόδι του πρανούς είναι 3,5 m.

## 5.2.1.2. Θέση A1β

Στην Εικόνα 5.10 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.3 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.4 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.

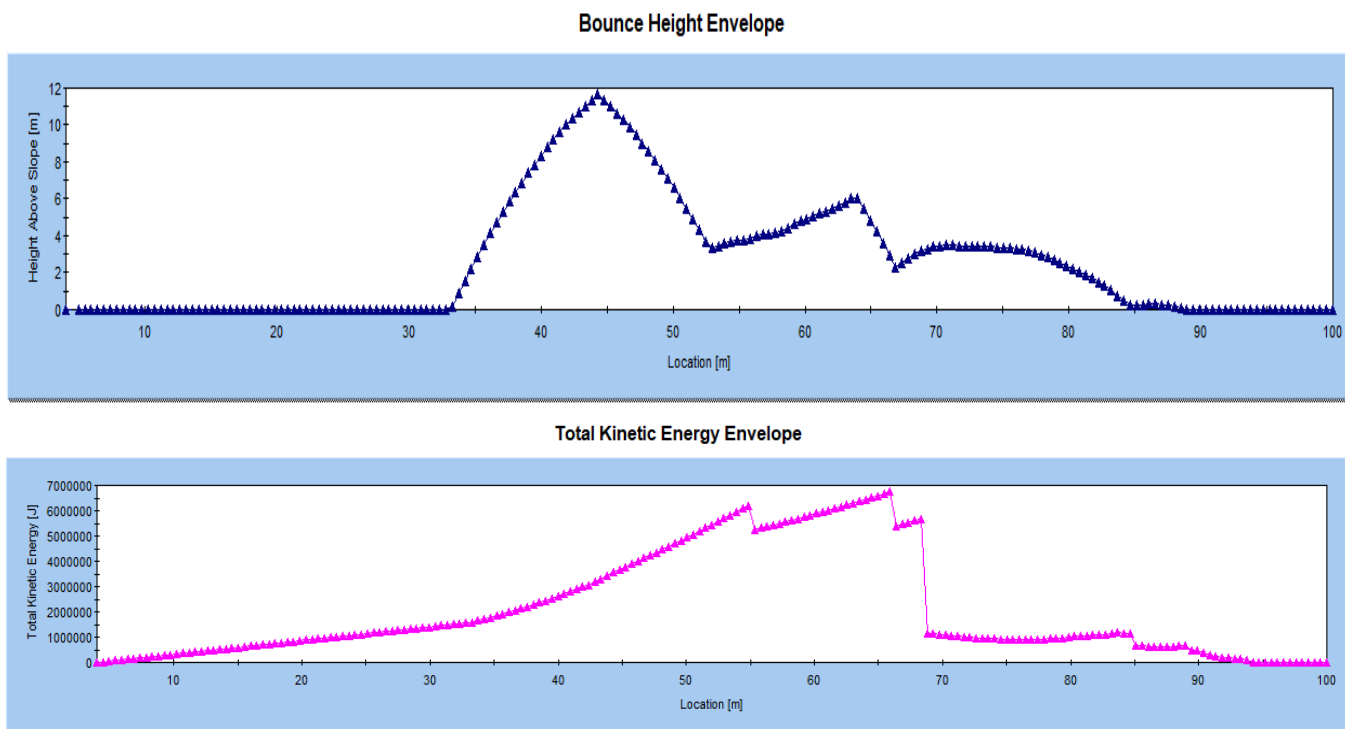


Εικόνα 5.10: Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A1β



Σχήμα 5.3: Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1β. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 64 m





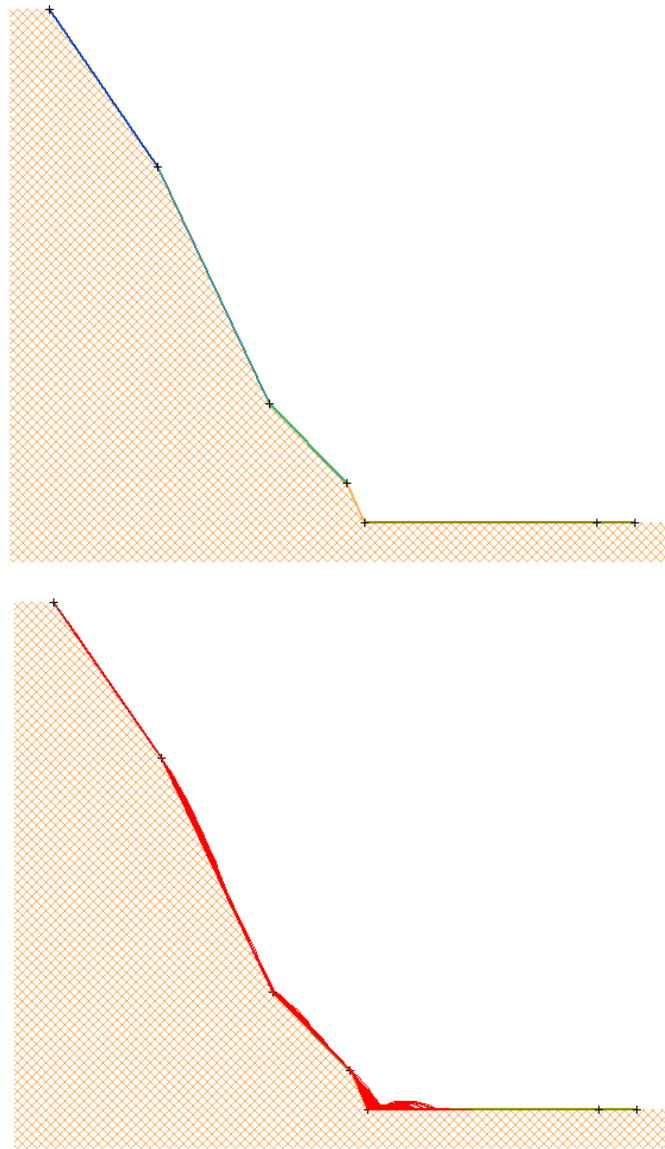
**Σχήμα 5.4:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A1β

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

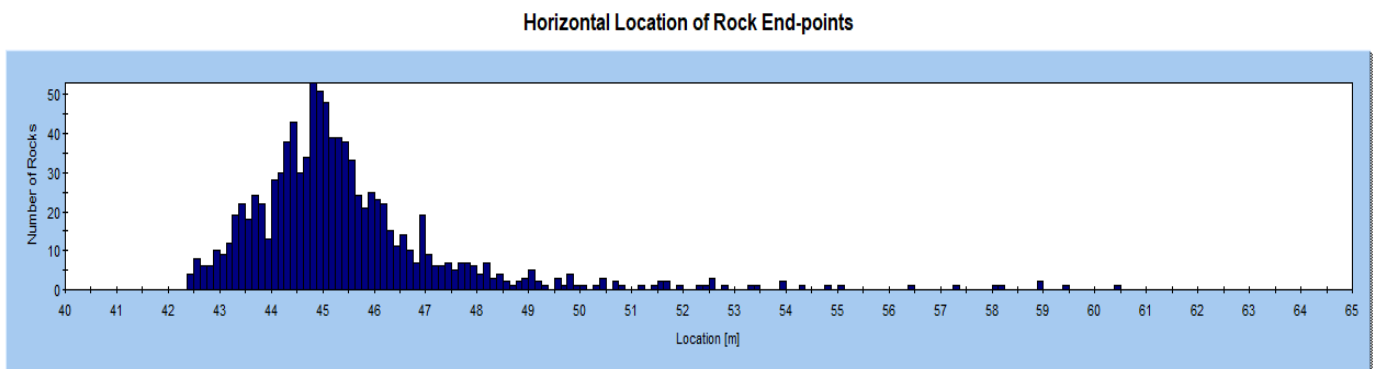
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 30 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 6800 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 1500 kJ, στα 5 m κατάντη από το πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 12 m, ενώ στα 5 m κατάντη από το πόδι του πρανούς είναι 3,5 m.

### 5.2.2. Πρανές A2

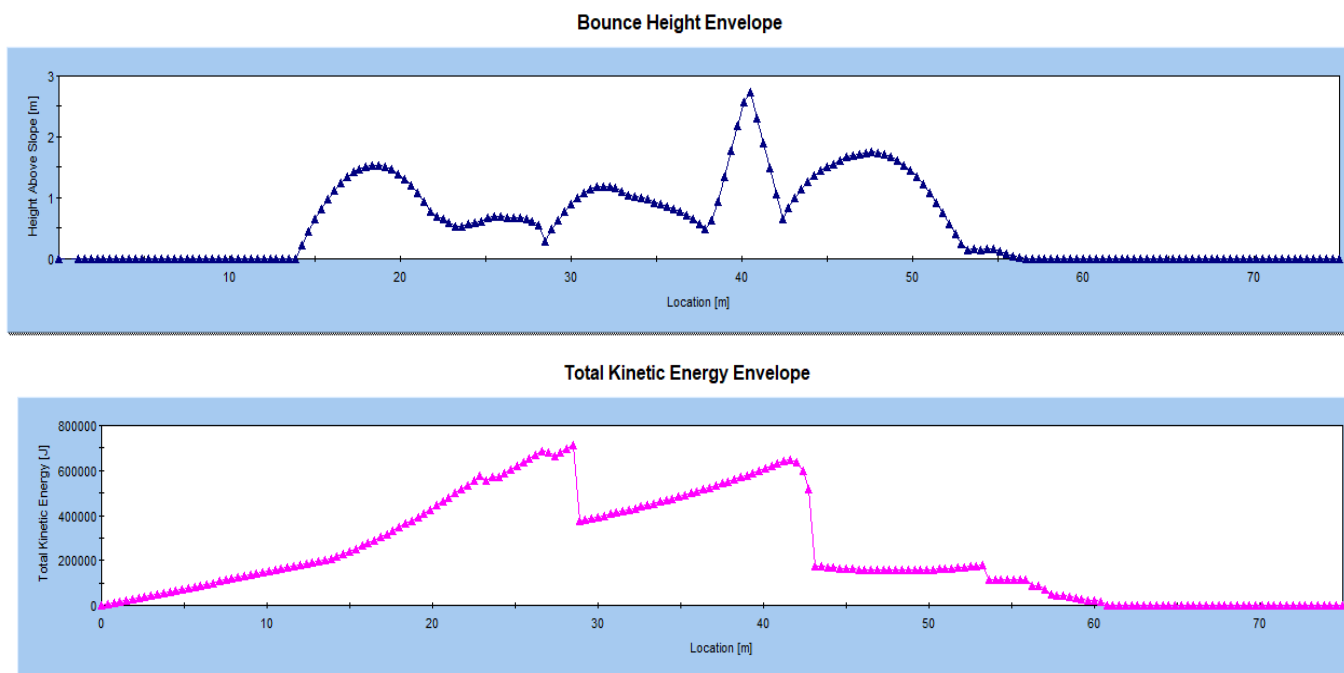
Στο πρανές A2 επιλέχθηκε ανάλυση στη δυσμενέστερη θέση, όπου το πρανές έχει ύψος 65 m. Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.5 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.6 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



Εικόνα 5.11: Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση A2



Σχήμα 5.5: Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A2. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 40,5 m



**Σχήμα 5.6:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση A2

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

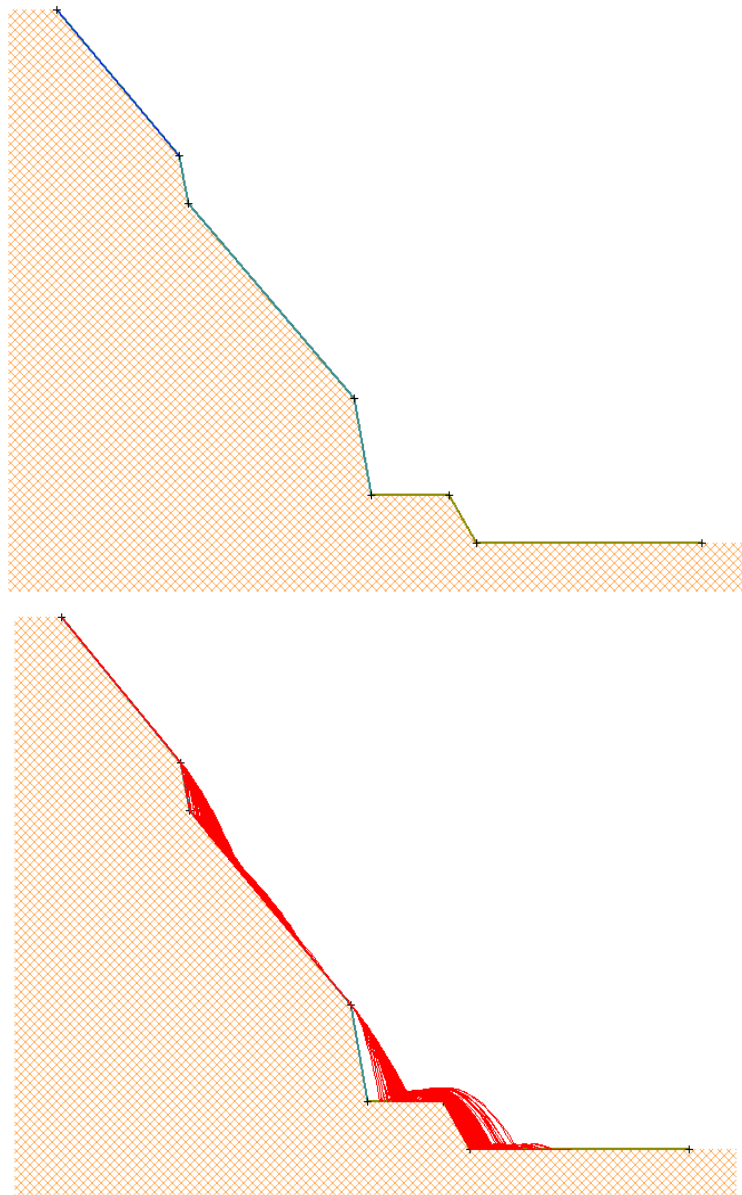
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 20 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 750 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 200 kJ, στο πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης είναι περίπου 2,5 m, και εμφανίζεται στο πόδι του πρανούς.

### 5.2.3. Πρανές B1

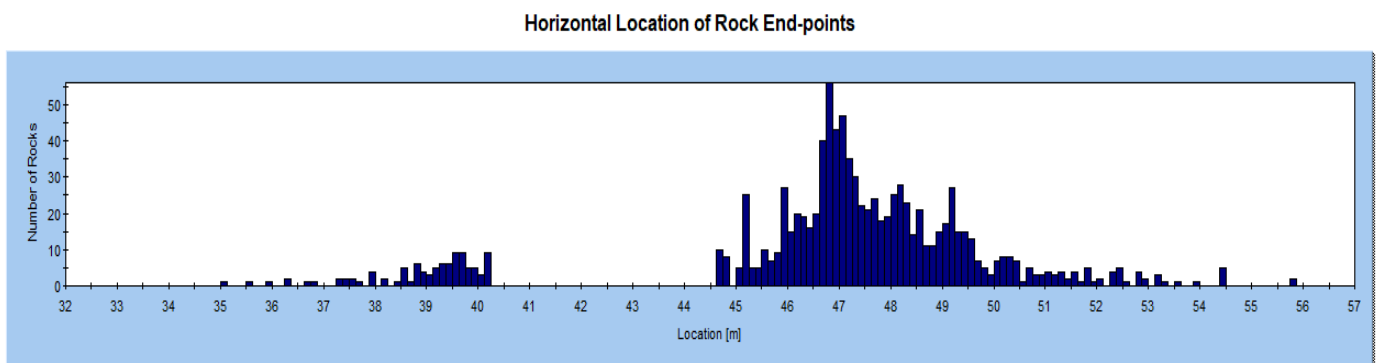
Στο πρανές B1 επιλέχθηκε ανάλυση σε 2 διαφορετικά σημεία, το πρώτο στην πλησιέστερη θέση στο θέατρο, με ύψος 50 m και εμφάνιση αναβαθμού μήκους 8 m και ύψους 5 m, και το δεύτερο στη δυσμενέστερη θέση όπου ο αναβαθμός εκτείνεται για διάστημα περίπου 20 m και το πρανές έχει ύψος 35 m.

#### 5.2.3.1. Θέση B1α

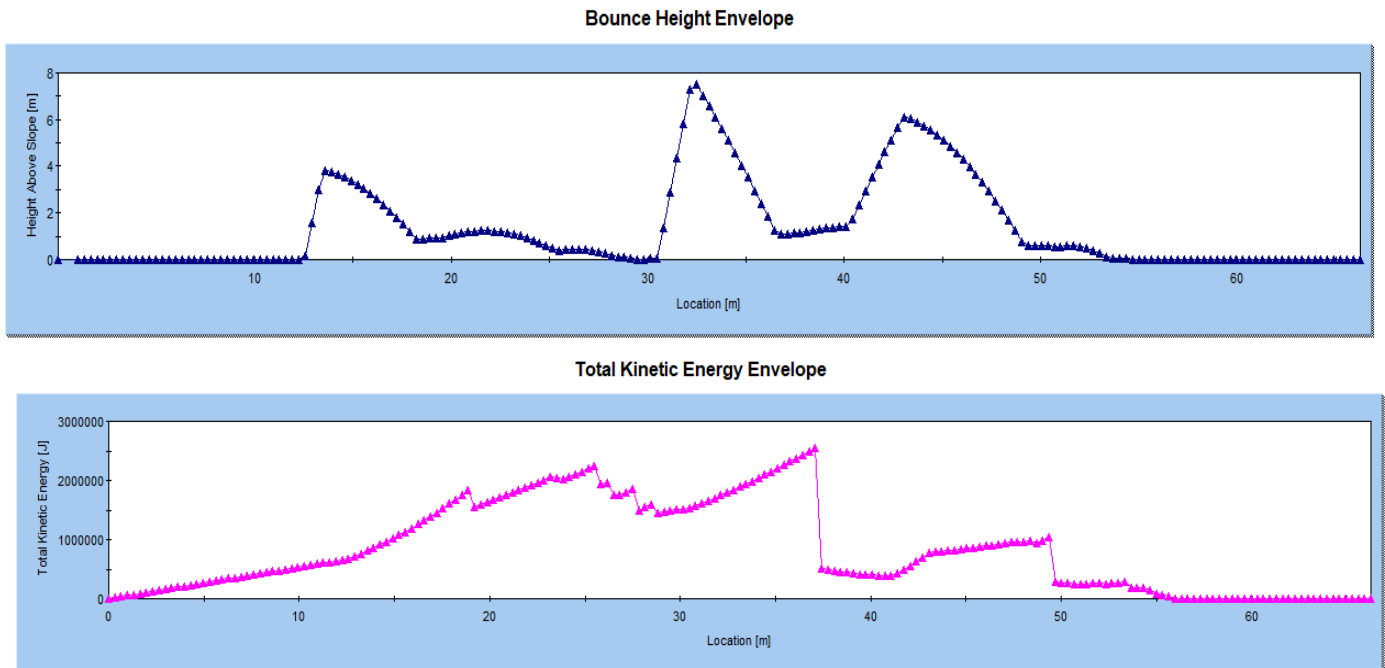
Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.7 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.8 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



**Εικόνα 5.12:** Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομείωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B1α



**Σχήμα 5.7:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1α. Το πόδι του πρανού βρίσκεται στη θέση 32 m και το πέρας του αναβαθμού στα 43 m



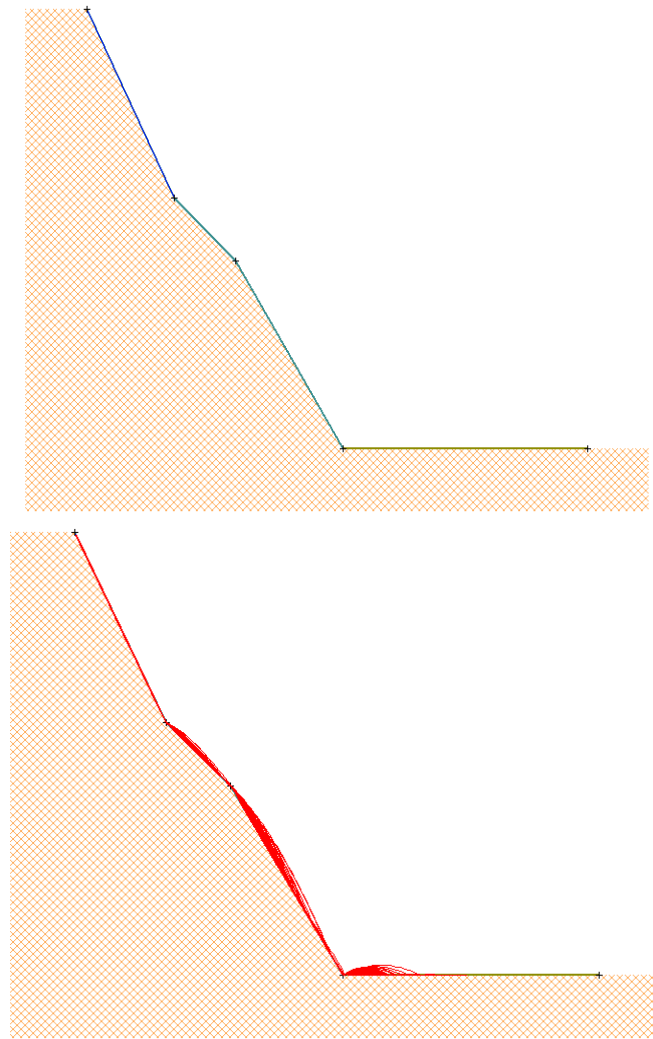
**Σχήμα 5.8:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1α

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

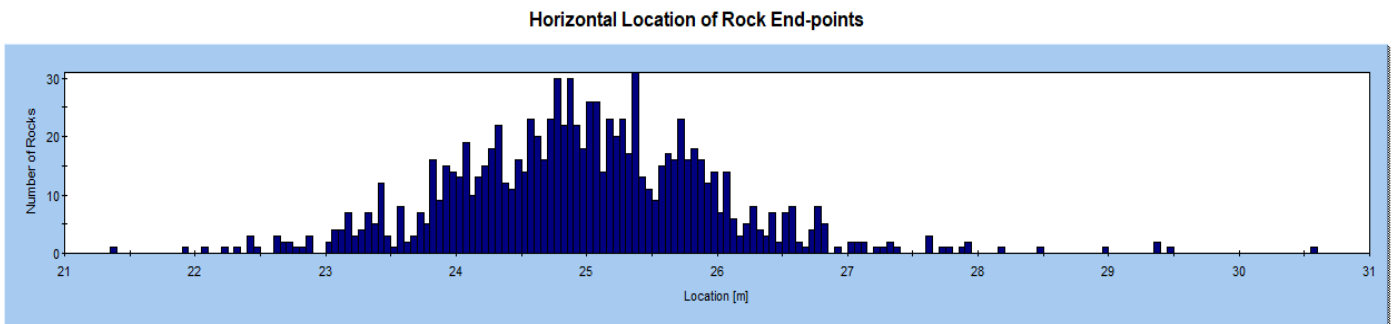
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του αναβαθμού είναι 12,5 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 2500 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 600 kJ, στα 5,5 m κατόντη από το πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 7,5 m, ενώ στα 5,5 m κατόντη από το πόδι του πρανούς είναι 1,5 m.

### 5.2.3.2. Θέση B1β

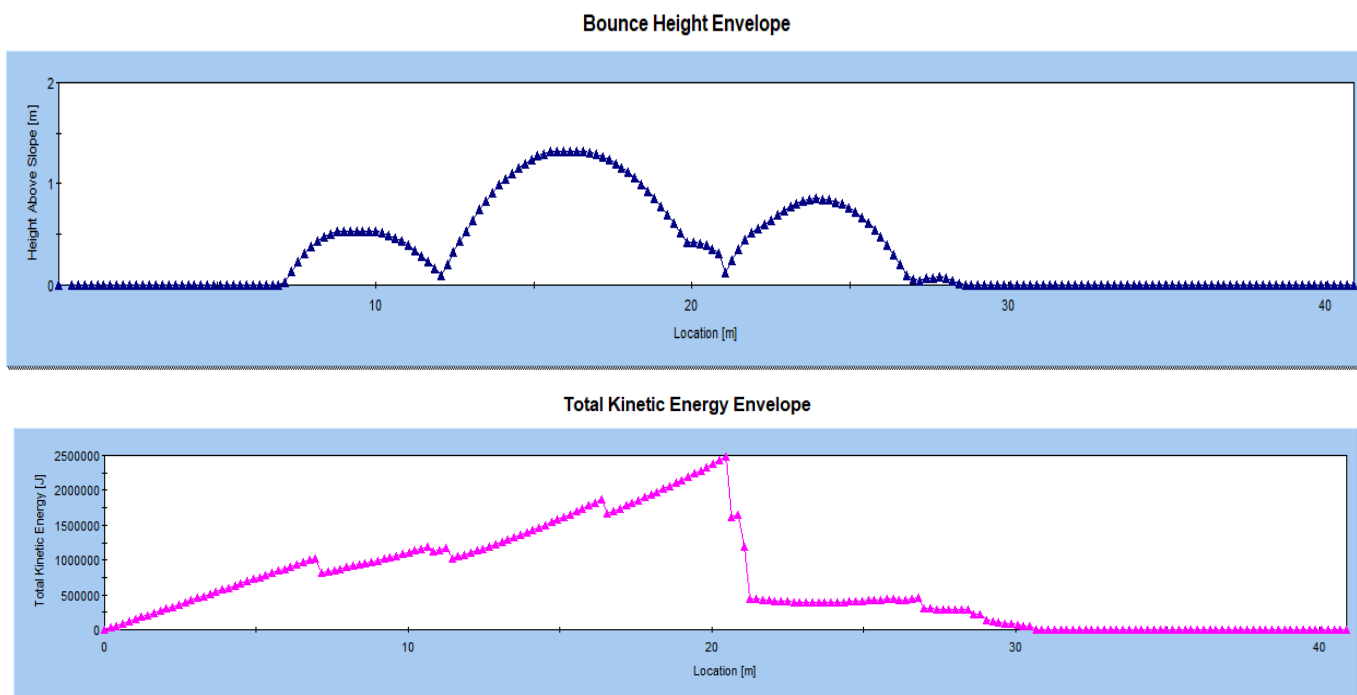
Στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.9 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.10 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



**Εικόνα 5.13:** Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B1β



**Σχήμα 5.9:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1β. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 21 m



**Σχήμα 5.10:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B1β

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

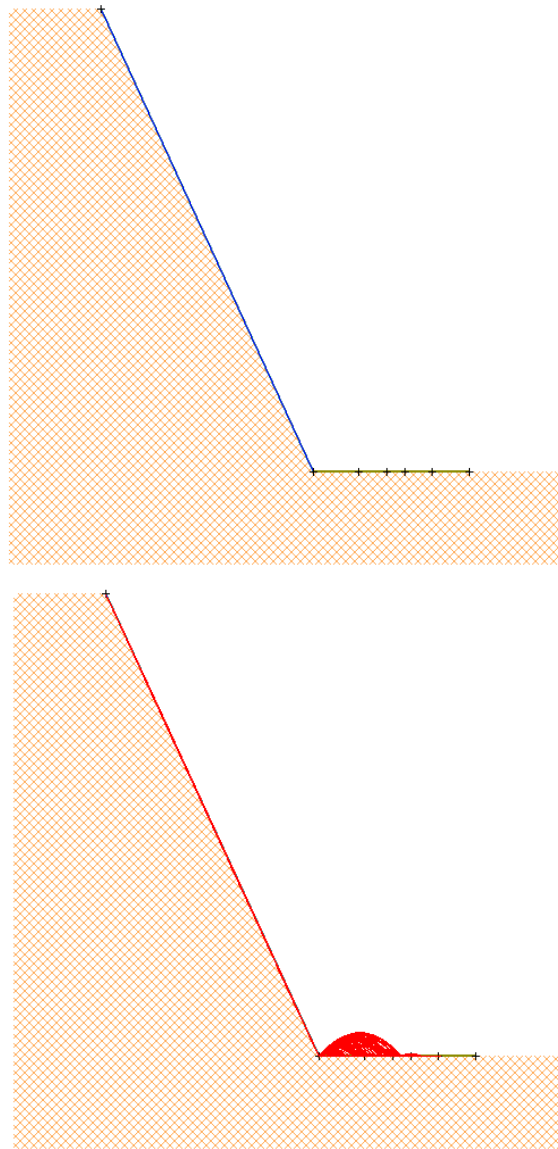
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 9,5 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 2500 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 500 kJ, στο πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 1,5 m, ενώ σχεδόν μηδενίζεται στο πόδι του πρανούς και έπειτα ξανά στα 5 m από το πόδι του πρανούς.

#### 5.2.4. Πρανές B2

Στο πρανές B2 επιλέχθηκε ανάλυση σε 2 διαφορετικά σημεία διαφορετικού ύψους (25 και 20 m αντίστοιχα) και διαφορετικής κλίσης.

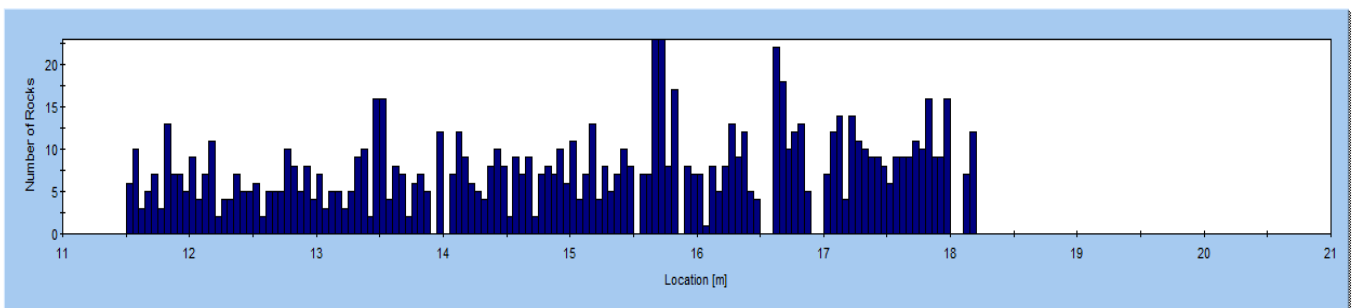
##### 5.2.4.1. Θέση B2α

Στην Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.11 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.12 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



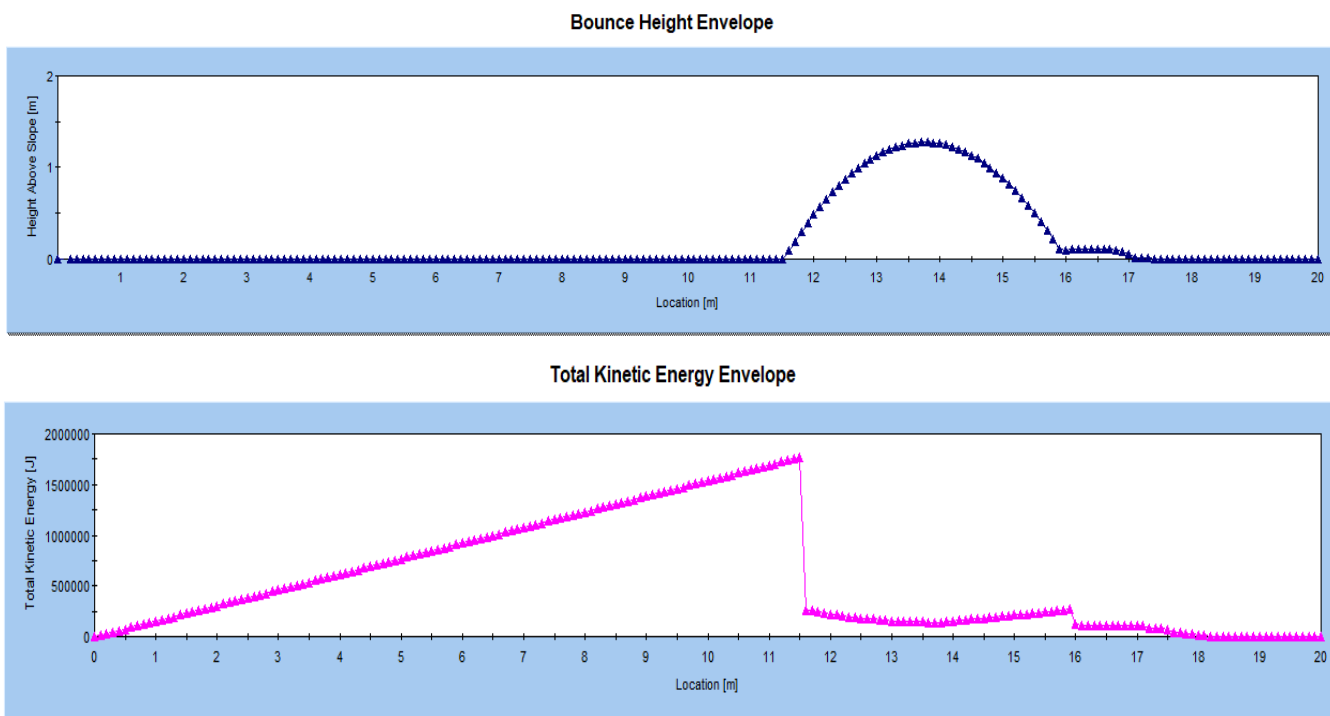
**Εικόνα 5.14:** Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομοίωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B2α

Horizontal Location of Rock End-points



**Σχήμα 5.11:** Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2α. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 11,5 m





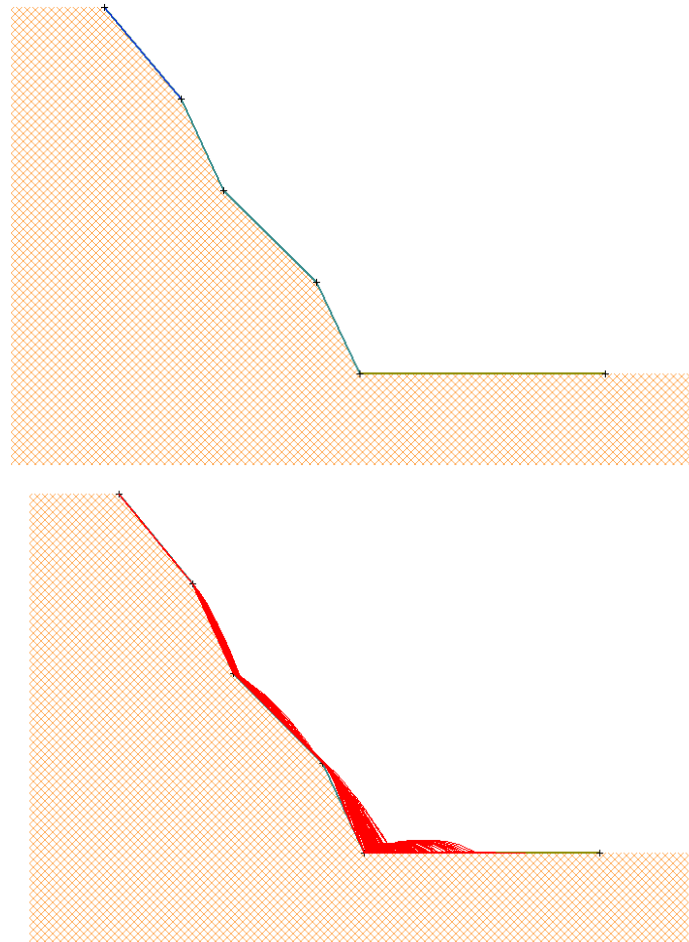
**Σχήμα 5.12:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2α

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

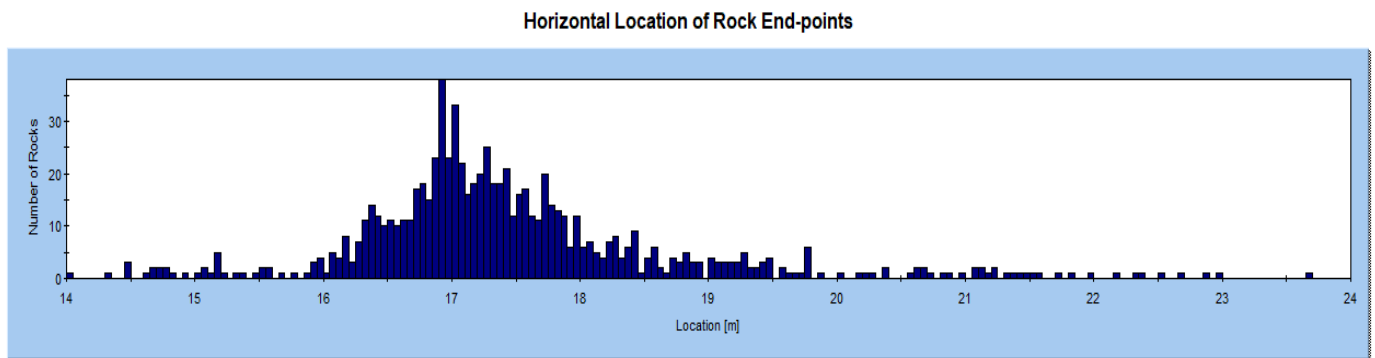
- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 7 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 1700 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 200 kJ, στο πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 0 m (κύλιση, χωρίς αναπήδηση), ενώ στα 3 m κατάντη από το πόδι του πρανούς είναι 1,3 m.

#### 5.2.4.2. Θέση B2β

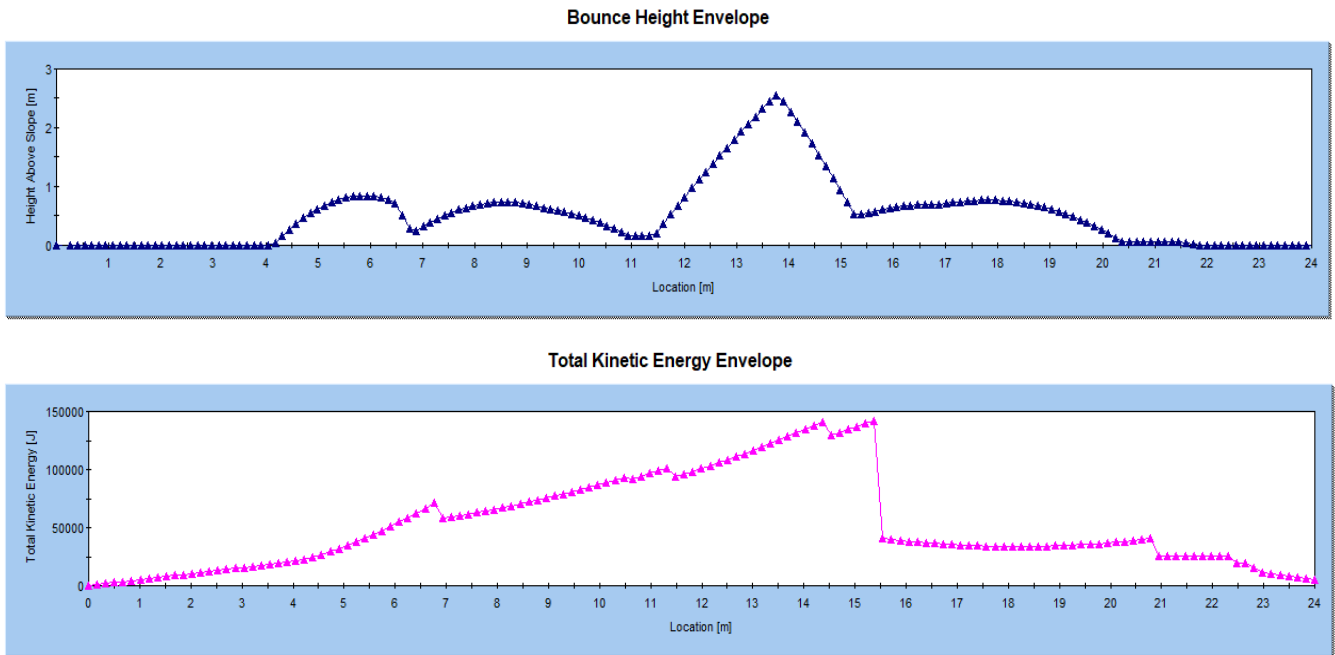
Στην Εικόνα 5.15 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πρανούς στο πρόγραμμα και η απεικόνιση της ανάλυσης για την προσομοίωση πτώσης βραχοτεμαχίων βάρους 10,5 tn. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.13 ακολουθεί γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση και στο Σχήμα 5.14 οι περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης και συνολικής κινητικής ενέργειας.



Εικόνα 5.15: Απεικόνιση της γεωμετρίας του πρανούς (επάνω) και της προσομείωσης πτώσης τεμαχίων βάρους 10,5 tn (κάτω), στη θέση B2β



Σχήμα 5.13: Γράφημα αποτύπωσης της μέγιστης απόστασης βραχοτεμαχίων από την αρχική τους θέση για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2β. Το πόδι του πρανούς βρίσκεται στη θέση 14 m



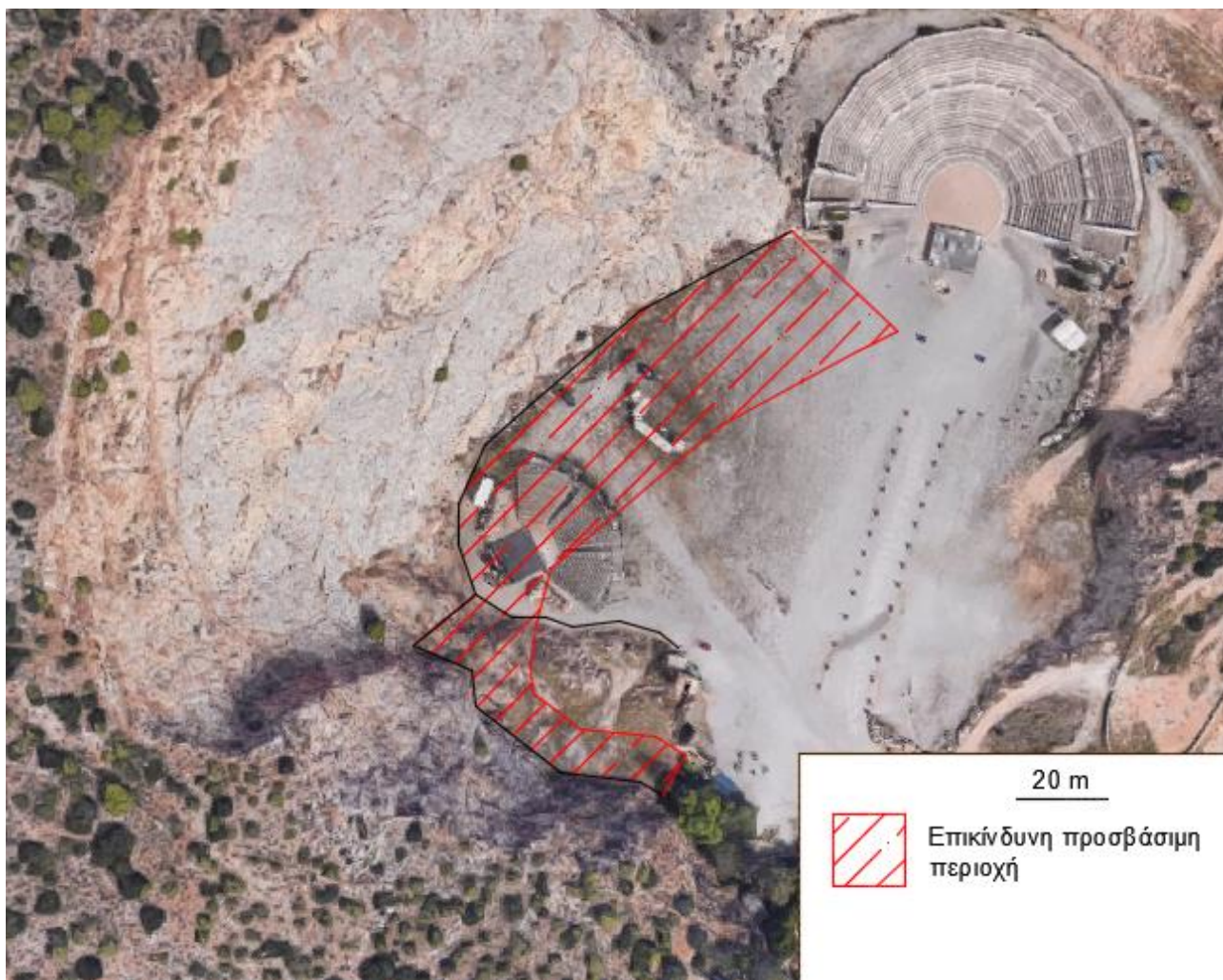
**Σχήμα 5.14:** Περιβάλλουσες ύψους αναπήδησης (επάνω) και συνολικής κινητικής ενέργειας (κάτω) για πτώση τεμαχίων βάρους 10,5 tn, στη θέση B2β

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Η μέγιστη απόσταση βραχοτεμαχίων από το πόδι του πρανούς είναι 10 m.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των τεμαχίων είναι περίπου 140 kJ, ενώ σημειώνει σημαντική πτώση στα 40 kJ, στο 1,5 m κατάντη από το πόδι του πρανούς.
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης επί του πρανούς είναι 2,5 m, ενώ στο 1,5 m κατάντη από το πόδι του πρανούς είναι 0,5 m.

### 5.3. Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τις μέγιστες αποστάσεις βραχοτεμαχίων που προέκυψαν από τις παραπάνω αναλύσεις με τη χρήση του προγράμματος Rocfall, συμπεραίνεται ότι το θέατρο βρίσκεται σε επικίνδυνη τοποθεσία στο χώρο. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.16, το μεγαλύτερο τμήμα της κατασκευής, αλλά και της ευρύτερης περιοχής χρήσης της, βρίσκονται σε περιοχές που πλήττονται από τα τεμάχια που είναι πιθανό να καταπέσουν. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση μέτρων προστασίας στο χώρο, ο υπολογισμών των οποίων ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 5.16: Απεικόνιση των επικίνδυνων περιοχών του προσβάσιμου χώρου στην περιοχή μελέτης

## 6. Προτεινόμενα μέτρα προστασίας

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το είδος και τα χαρακτηριστικά των απαραίτητων μέτρων προστασίας που πρέπει να ληφθούν για την ασφάλεια του χώρου. Η ανάλυση πραγματοποιείται με το πρόγραμμα Rocfall, είτε με τη χρήση barriers (μεταλλικοί φράχτες και λιθοπλήρωτα συρματοκιβώτια), είτε με την αλλαγή της γεωμετρίας της βάσης του πρανούς (τάφροι και επιχώματα ανάσχεσης), ανάλογα με τις απαιτήσεις ενέργειας, κόστους και της γεωμετρίας του διαθέσιμου χώρου. Έτσι, ορίζονται συνολικά 6 περιπτώσεις που απαιτούν διαφορετική προσέγγιση λύσης, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1.

Γενικά, οι μεταλλικοί φράχτες ανάσχεσης απαιτούν αφενός μικρό χώρο εγκατάστασης, αλλά αφετέρου πρέπει να υπάρχει κατόντη διαθέσιμος χώρος (σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και 8 m) για να μπορεί το άνοιγμα του φράχτη να επιμηκυνθεί κατά την ενεργοποίησή του. Επίσης, οι μεταλλικοί φράχτες διατίθενται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αντοχής ανάλογα με την εταιρία κατασκευής τους, χρειάζονται συντήρηση όποτε ενεργοποιούνται και αποτελούν σχετικά ακριβή λύση. Τέλος, καθώς οι φράχτες ανάσχεσης μπορούν να συγκρατήσουν μόνο μια κατάπτωση τεμάχους, στην πράξη ενδείκνυται να τοποθετείται επιπρόσθετη σειρά φράχτη μερικά μέτρα πριν τη σειρά που υπολογίζεται.

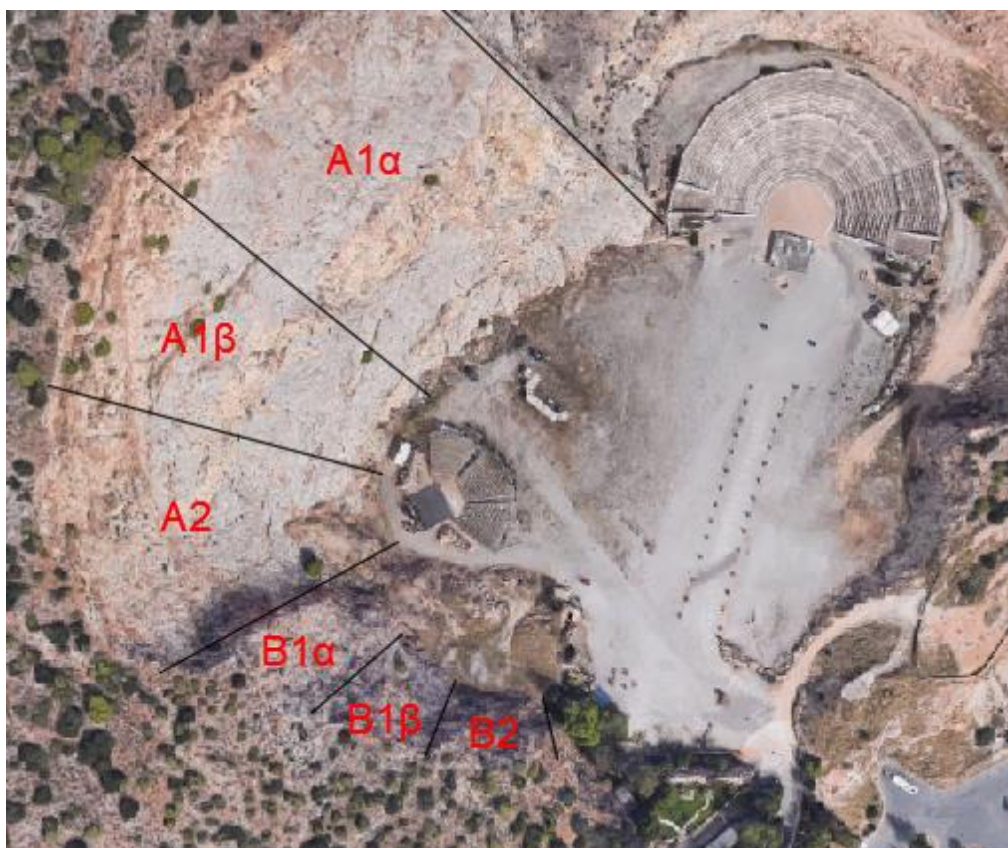
Η χρήση λιθοπλήρωτων συρματοκιβωτίων (βραχοπαγίδες) για κατασκευή αντίστοιχου φράχτη ανάσχεσης, τα οποία είναι συνήθως διαστάσεων 2x1x1 m, αποτελεί μια αρκετά οικονομικότερη λύση και η πλέον άρτια από αισθητικής άποψης. Η κατασκευή θα χρειαστεί ελάχιστη έως καθόλου συντήρηση με την πάροδο του χρόνου, ενώ οι πέτρες με τις οποίες γεμίζουν τα συρματοκιβώτια προσφέρονται σε κοντινή απόσταση από το έργο, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος. Ωστόσο, σε αυτή την επιλογή, η ακριβής διαστασιολόγηση πρέπει να γίνει με επιτόπου δοκιμές στο πεδίο και απαιτείται επαρκής χώρος για την κατασκευή.

Οι τάφροι ανάσχεσης και τα επιχώματα προτείνονται ως οι πλέον οικονομικές και γρήγορες αντιμετώπισεις, οι οποίες είναι και φιλικές προς το περιβάλλον του χώρου. Παρόλα αυτά, χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση και αντίστοιχα με τις βραχοπαγίδες, απαιτούν επαρκή χώρο καθώς και δοκιμές πεδίου για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός επιχώματος ανάσχεσης.

Κατασκευασμένα από οπλισμένο έδαφος (χρήση γεωπλέγματος), τα επιχώματα ανάσχεσης βραχοπτώσεων μπορούν να αντιμετωπίσουν ακραίες δυνάμεις βραχοπτώσεων (ενδεχομένως έως 20.000 kJ). Σε αντίθεση με τους φράχτες ανάσχεσης, τα επιχώματα αυτά μπορούν να αντέξουν πολλαπλές κρούσεις και εκδηλώσεις βραχοπτώσεων χωρίς επιδιόρθωση. Ο οπλισμός με γεωπλέγματα, που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το εδαφικό υλικό, δίνουν τη δυνατότητα στο έδαφος να έχει καλύτερες αποδόσεις από ό,τι θα είχε σε μη οπλισμένη κατάσταση, ανταποκρινόμενο σε μεγαλύτερα φορτία ή σε πιο απότομες γωνίες (στις αναλύσεις που ακολουθούν, τα επιχώματα έχουν σχεδιαστεί υπό γωνία 45°). Επίσης, επιτρέπει έτσι στους εργολάβους να χρησιμοποιούν υλικά που εξάγονται τοπικά από την περιοχή.

Τέλος, η χρήση μεταλλικών πλεγμάτων επί των πρανών αποτελεί μια ικανοποιητική λύση στην περίπτωση περιορισμένου διαθέσιμου χώρου μπροστά από το μέτωπο του πρανούς, αλλά δεν συνίσταται η χρήση του σε περιπτώσεις τόσο ψηλών πρανών λόγω μεγάλου κόστους. Εκτός αυτού, δεν συνίσταται η τοποθέτησή του σε περιπτώσεις χώρων

πολιτιστικού ενδιαφέροντος όπως στην προκειμένη περίπτωση, καθώς δεν αποτελεί μια καλαίσθητη επιλογή.



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση των διαφορετικών περιπτώσεων που απαιτούν λύση

## 6.1. Πρανές A1

Στο πρανές A1 η αντιμετώπιση της λύσης χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις: (α) την περιοχή A1α, την έκταση δηλαδή που καλύπτει το διάστημα ανάμεσα στα δύο θέατρα, και (β) τον χώρο που βρίσκεται το μικρό θέατρο, την περιοχή A1β.

### 6.1.1. Περιοχή A1α

Η περιοχή A1α έχει μήκος περίπου 75 m και από την ανάλυση κινδύνου προέκυψε ότι δημιουργείται επικίνδυνη ζώνη πλάτους 30 m. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει κάποια κατασκευή, κι έτσι η ζώνη αυτή θα μπορούσε να αποκλειστεί για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων. Παρόλα αυτά, επειδή ο ευρύτερος χώρος φιλοξενεί μεγάλο πλήθος κόσμου κατά την περίοδο λειτουργίας του, είναι αναγκαίο να περιοριστεί η έκτασή της.

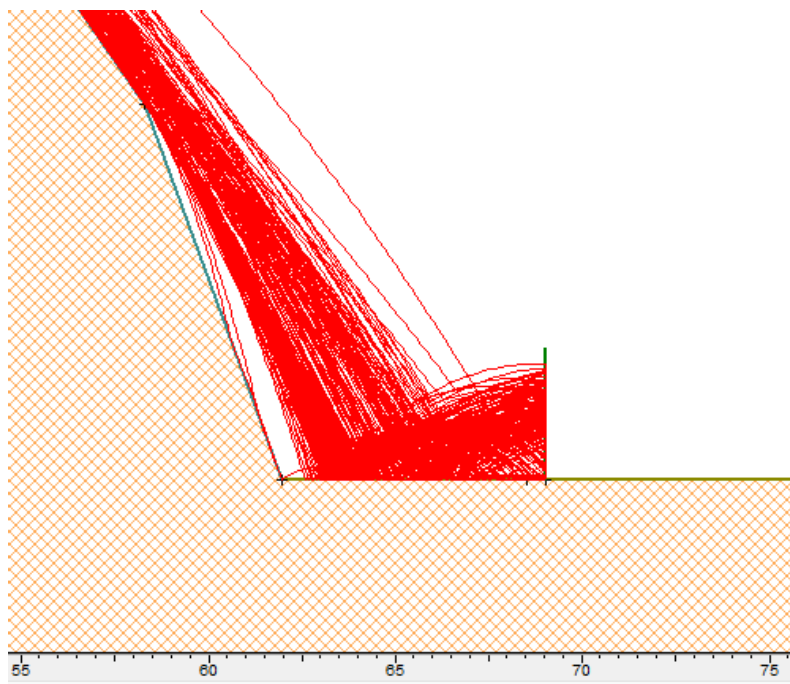
#### Προσέγγιση 1 – χρήση φράχτη ανάσχεσης

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που προέκυψαν στο Κεφάλαιο 5, κρίνεται ως βέλτιστη λύση με φράχτη ανάσχεσης η εισαγωγή του στα 7m από τη βάση του πρανού, αντοχής τουλάχιστον 1250 KJ και ύψους 3,5 m. Ωστόσο, επειδή το πρόγραμμα Rocfall προσομοιώνει τα καταπίπτοντα τεμάχια με σημειακές μάζες χωρίς όγκο, κρίνεται απαραίτητη η αύξηση του ελάχιστου απαιτούμενου ύψους κατά το σχεδιασμό για 1,5 m, όσο δηλαδή το μισό της μέγιστης θεωρούμενης διάστασης ενός τέτοιου τεμάχου. Επίσης,

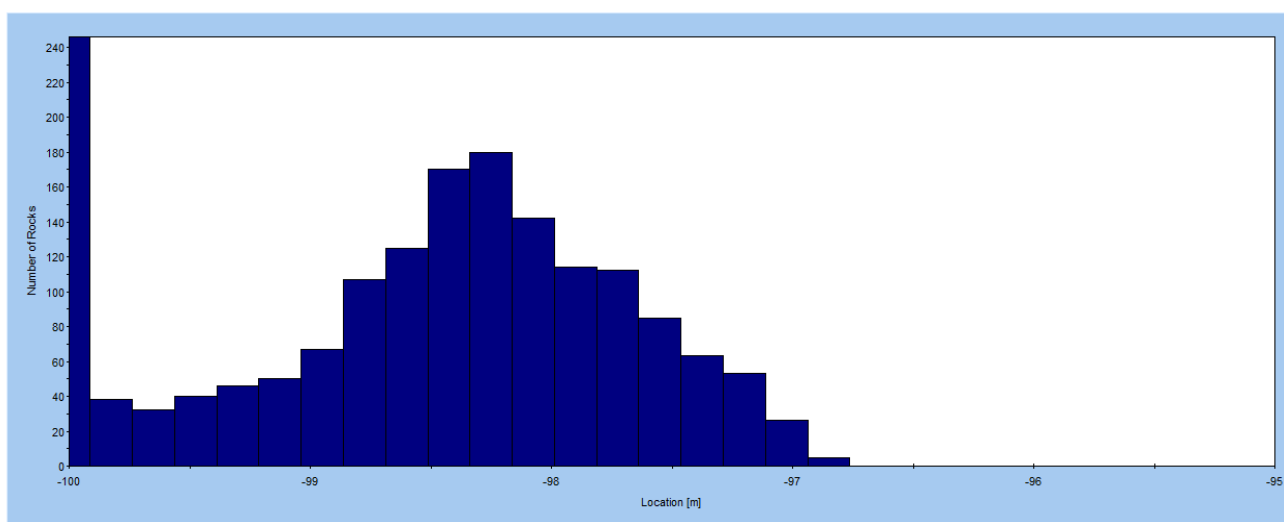
ο φράχτης πρέπει να έχει αντοχή 1500 KJ, ώστε να ικανοποιείται συντελεστής ασφάλειας ίσος με 1,2.

Έτσι λοιπόν, προτείνεται η εγκατάσταση ενός μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στα 7m από τη βάση του πρηνούς με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Το ανάπτυγμα του φράχτη μπορεί να επιμηκυνθεί έως και 6 m, το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να αποκλειστεί συνολικά μια περιοχή μήκους 13 m από το πόδι του πρηνούς.

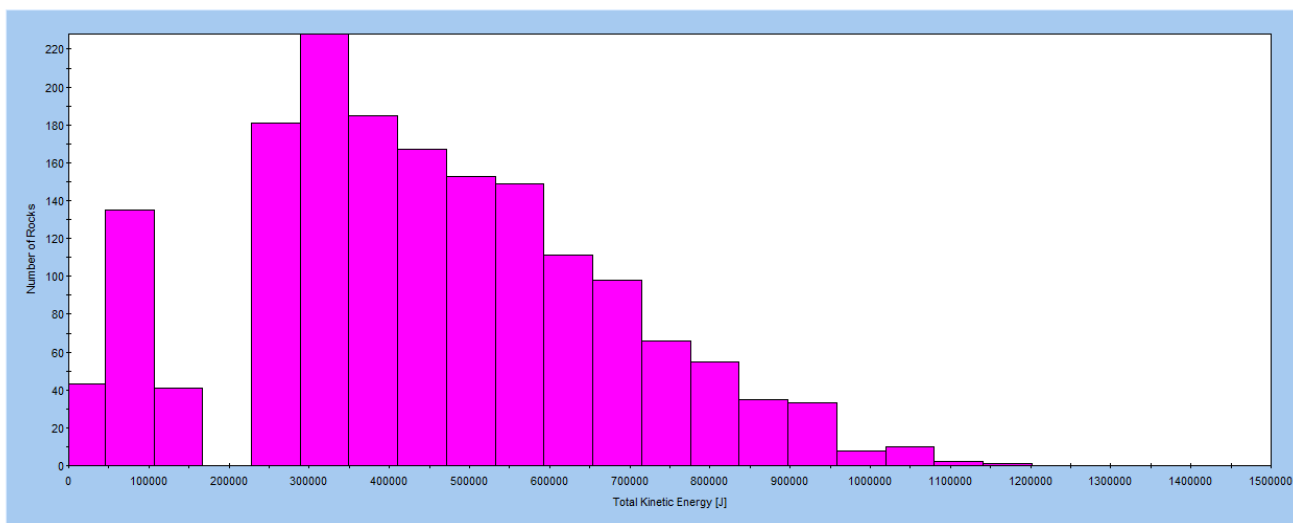
Εναλλακτικά, μπορεί να κατασκευαστεί αντίστοιχων χαρακτηριστικών φράχτης από βραχοπαγίδες, η οποία καθιστά και οικονομικότερη λύση. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η ακριβής διαστασιολόγησή του πρέπει να γίνει με επιτόπου δοκιμές στο πεδίο, και εικάζεται πως θα καταλαμβάνει περίπου τον ίδιο χώρο με τον φράχτη.



Εικόνα 6.2: Προσομοίωση προσέγγισης 1- μεταλλικός φράχτης ανάσχεσης στην περιοχή A1α



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A1α (βάση φράχτη: -100)

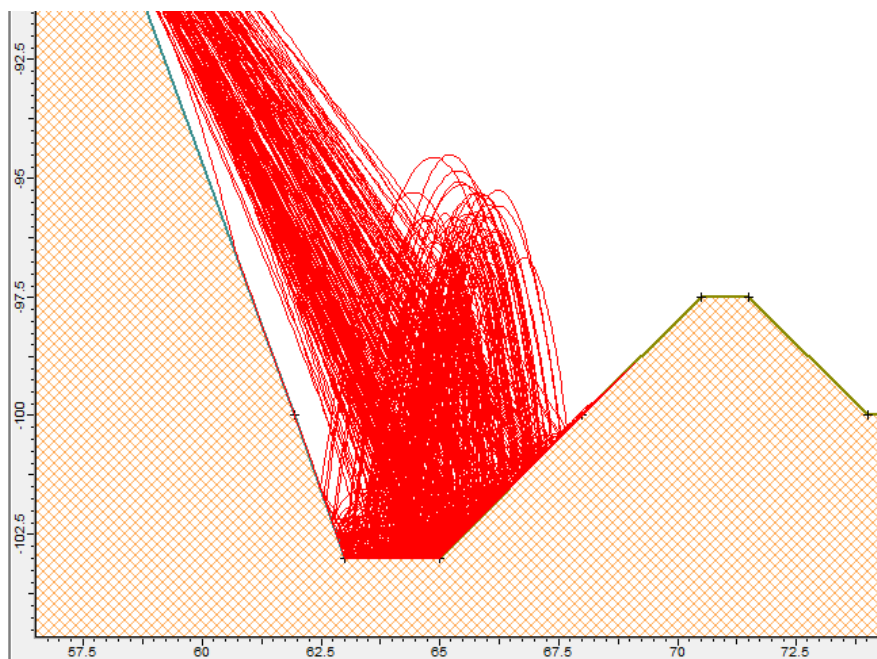


**Σχήμα 6.2:** Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A1α

### Προσέγγιση 2 – αλλαγή της γεωμετρίας της βάσης

Για περιορισμό του κόστους, αντί του φράχτη δύναται η κατασκευή τάφρου ανάσχεσης, πλάτους 6 m και βάθους 3 m, και χωμάτινου υβώματος πλάτους 6 m και ύψους 2 m για επιπρόσθετη ασφάλεια (Εικόνα 6.3). Στην βάση του υβώματος κρίνεται απαραίτητη εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές. Με τον τρόπο αυτό, η αποκλεισμένη περιοχή θα περιοριστεί στα 12 m.

Για το σύνολο του πρανούς, μετά την εκσκαφή του ορύγματος και την δημιουργία του επιχώματος, υπολογίζεται ότι θα υπάρχουν περίσσεια  $245 \text{ m}^3$  ( $3,25 \text{ m}^3/\text{τ.μ.}$ ).



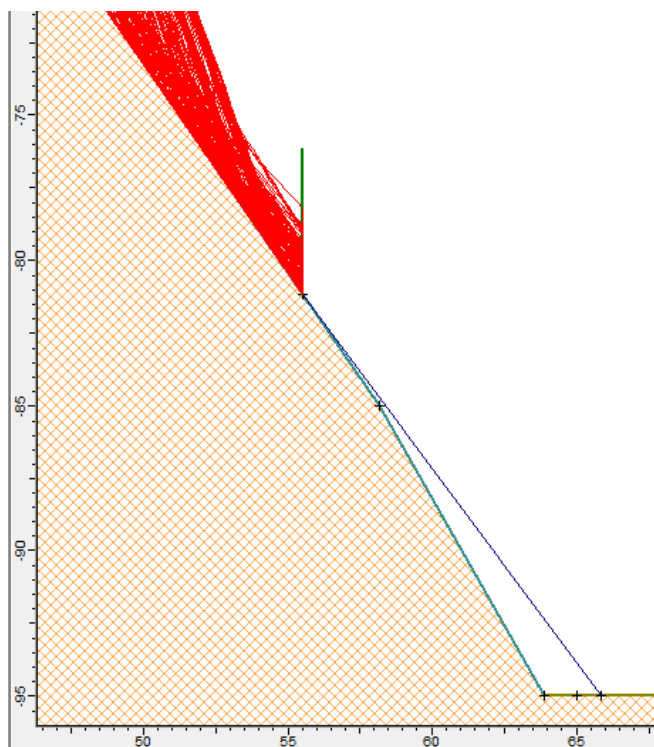
**Εικόνα 6.3:** Προσομοίωση προσέγγισης 2- τάφρος και επίχωμα ανάσχεσης στην περιοχή A1α



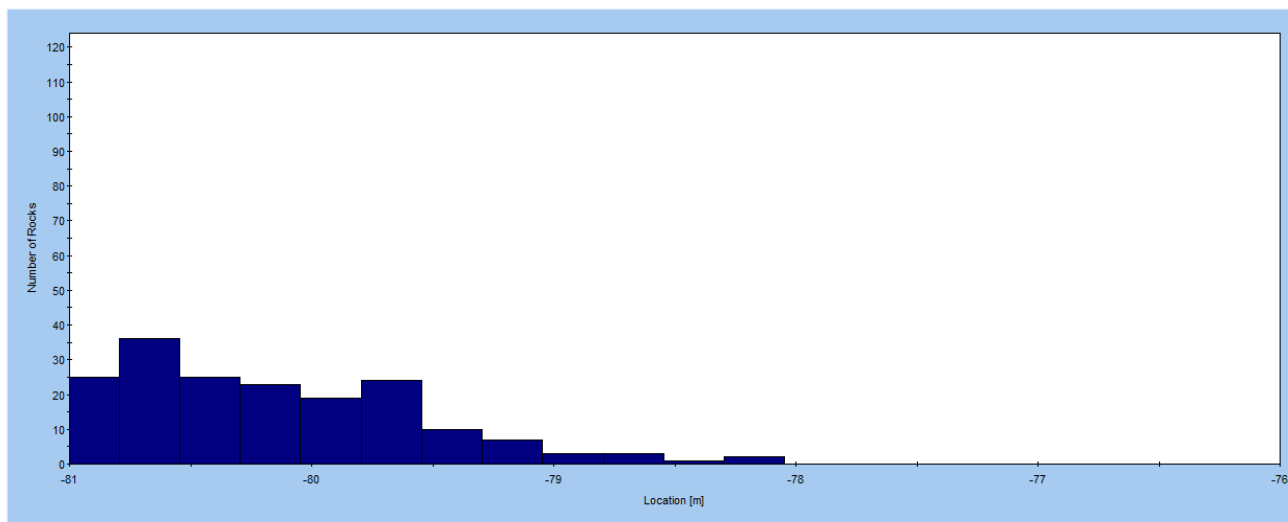
### 6.1.2. Περιοχή Α1β

Η περιοχή Α1β καλύπτει μια περιοχή μήκους περίπου 30 m και βρίσκεται μόλις 8 m από την κατασκευή του θεάτρου. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να βρεθεί κατάλληλη λύση ώστε να περιοριστεί ο ακατάλληλος χώρος στο ελάχιστο.

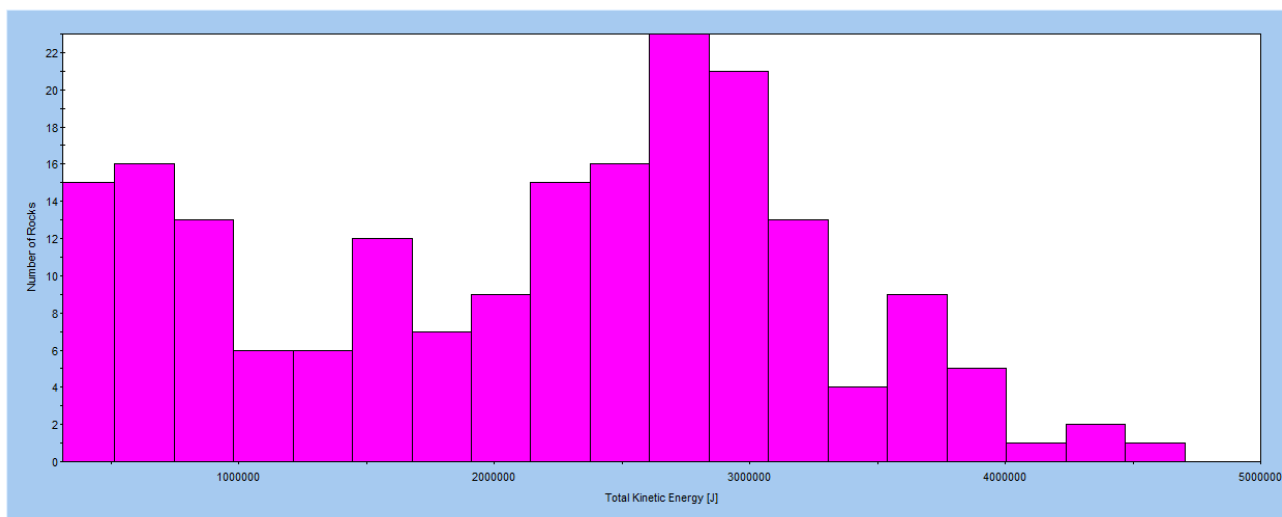
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του προηγούμενου Κεφαλαίου, κρίνεται ως βέλτιστη λύση η εγκατάσταση ενός μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στα 8 m ανάντη του πρανούς και σε ύψος 14 m από το πόδι του. Ο φράχτης θα πρέπει να έχει αντοχή τουλάχιστον 5700 KJ και ύψος 5 m, το ανάπλυγμα του οποίου μπορεί να επιμηκυνθεί έως και 8 m και συνεπώς το επιλεγμένο ύψος είναι ικανοποιητικό. Για το υπόλοιπο τμήμα του πρανούς προτείνεται η τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος προστασίας το οποίο θα είναι αγκυρωμένο στο μέτωπο και στο πόδι, και θα μεταφέρει με ασφάλεια τα αποκολλούμενα βραχοτεμάχια στη βάση του πρανούς, χωρίς να επιτρέπει την ανάπτυξη ταχύτητας. Η αντοχή του θα πρέπει να μπορεί να υπερβαίνει τα 125 KN και στο πέρας του, περίπου 2 m μπροστά από το μέτωπο, να γίνει εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.3.



**Εικόνα 6.4:** Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης και μεταλλικού πλέγματος στην περιοχή Α1β



**Σχήμα 6.3:** Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A1β (βάση φράχτη: -81)



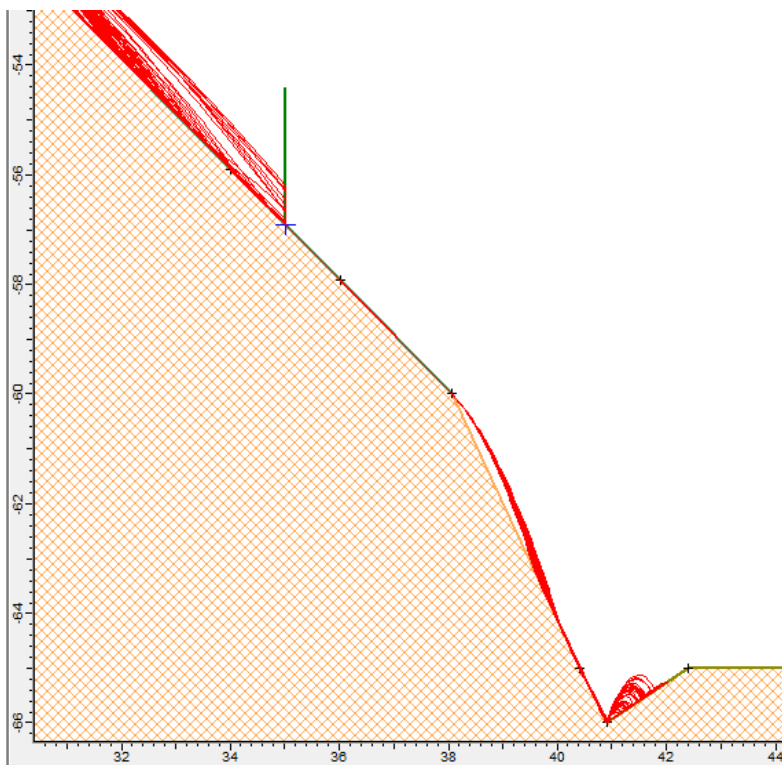
**Σχήμα 6.4:** Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A1β

## 6.2. Πρανές A2

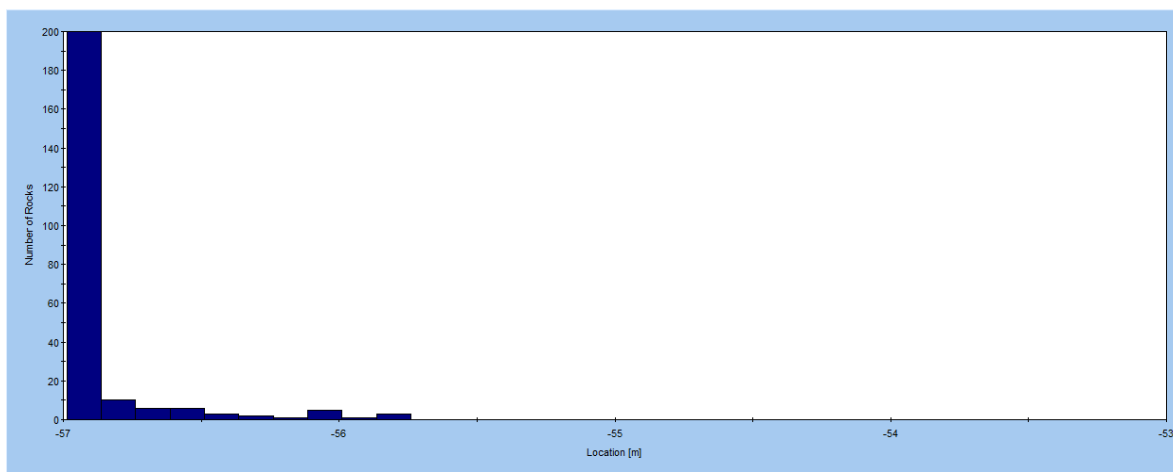
Η περιοχή A2 καλύπτει μια περιοχή μήκους περίπου 25 m και βρίσκεται μόλις 7 m από τη σκηνή του θεάτρου. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να βρεθεί κατάλληλη λύση όπως στην περιοχή A1β, ώστε να περιοριστεί ο ακατάλληλος χώρος στο ελάχιστο.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 5, κρίνεται ως βέλτιστη λύση η εγκατάσταση ενός μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στα 5,5 m ανάντη του πρανούς και σε ύψος 5 m από το πόδι του. Ο φράχτης θα πρέπει να έχει αντοχή τουλάχιστον 2900 KJ και 3 m ύψος, το ανάπτυσμα του οποίου μπορεί να επιμηκυνθεί έως και 6 m και συνεπώς το ύψος των 5 m είναι ικανοποιητικό. Για το υπόλοιπο τμήμα του πρανούς, στο πόδι θα εκσκαφτεί μια τάφρος πλάτους 2 m και βάθους 1 m όπου θα αποτίθενται τα τεμάχια και θα γίνει εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές, όπως παρουσιάζεται

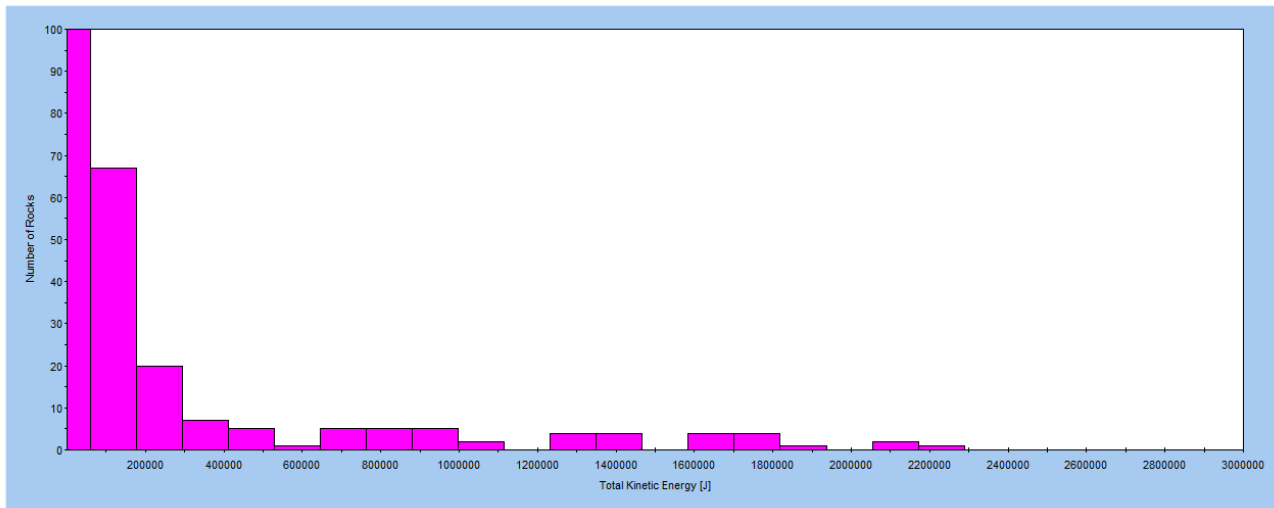
στην Εικόνα 6.5. Για το σύνολο του πρανού, υπολογίζεται ότι θα πρέπει να γίνει εκσκαφή περίπου 20 m<sup>3</sup> (1 m<sup>3</sup>/τ.μ.) εδάφους.



Εικόνα 6.5: Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στην περιοχή A2



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή A2 (βάση φράχτη: -57)



**Σχήμα 6.6:** Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή A2

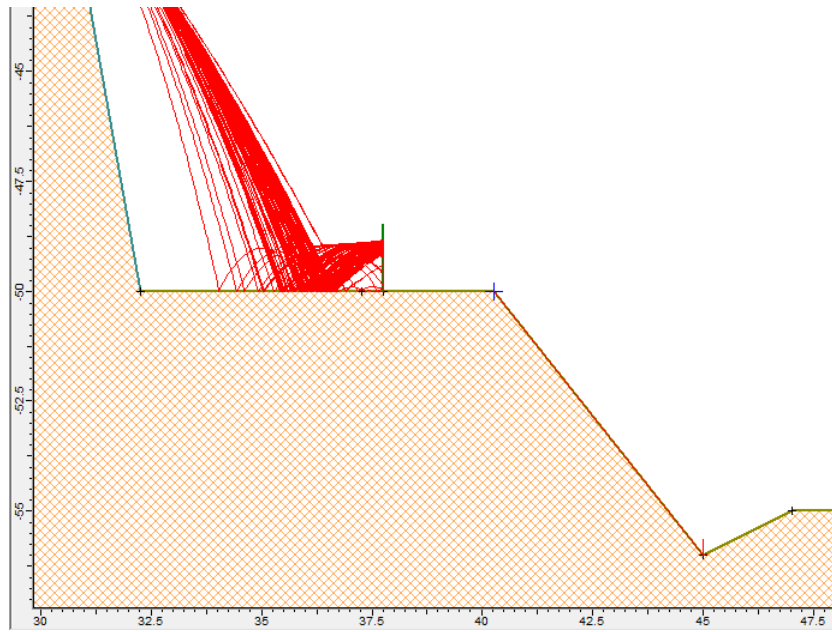
### 6.3. Πρανές B1

Στο πρανές B1 η αντιμετώπιση της λύσης χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις: (α) την περιοχή B1α, η οποία βρίσκεται πλησιέστερα στο θέατρο, και (β) την υπόλοιπη έκταση που καλύπτει το πρανές B1, την περιοχή B1β.

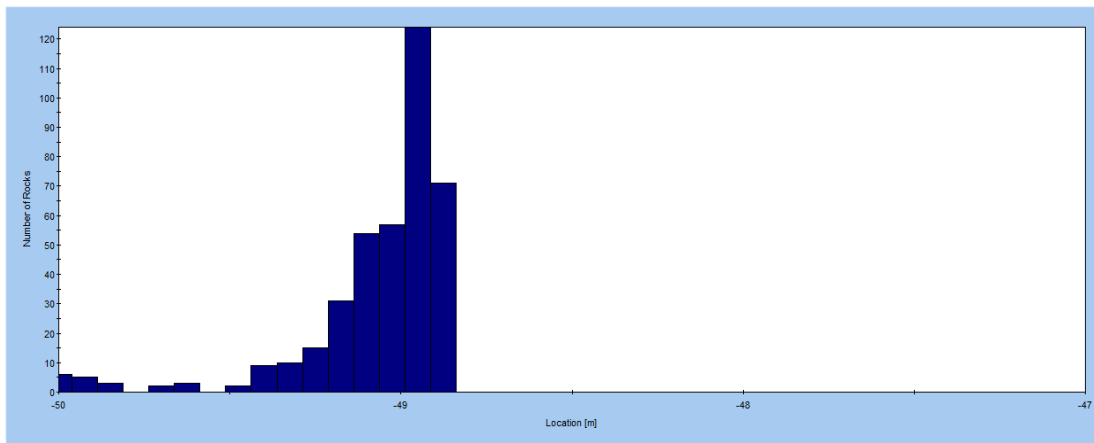
#### 6.3.1. Περιοχή B1α

Η περιοχή B1α καλύπτει μια περιοχή μήκους 25 m, βρίσκεται 17 m από τη σκηνή του θεάτρου και όπως υπολογίστηκε ήδη, πρέπει να τοποθετηθούν μέτρα προστασίας.

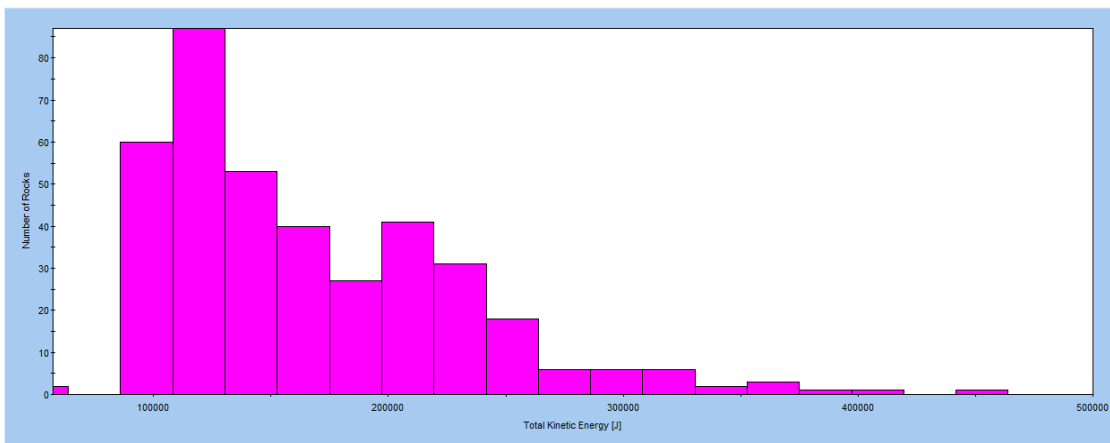
Στη βάση του πρανούς βρίσκεται ένας αναβαθμός 8 m και ύψους 5 m όπου κρίνεται ως βέλτιστη λύση η εγκατάσταση ενός μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης. Ο φράχτης θα πρέπει να τοποθετηθεί στα 5,5 m κατάντη του πρανούς, να έχει αντοχή τουλάχιστον 550 KJ και ύψος 3 m, το ανάπτυγμα του οποίου μπορεί να επιμηκυνθεί έως και 4,5 m και συνεπώς το ύψος των 5 m είναι αρκετό. Για το υπόλοιπο τμήμα του πρανούς, στο πόδι θα εκσκαφτεί μια τάφος πλάτους 2 m και βάθους 1 m όπου θα αποτίθενται τα τεμάχια και θα γίνει εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.6. Για το σύνολο του πρανούς, υπολογίζεται ότι θα πρέπει να γίνει εκσκαφή περίπου  $10 \text{ m}^3$  ( $1 \text{ m}^3/\text{τ.μ.}$ ) εδάφους.



Εικόνα 6.6: Προσομοίωση λύσης με χρήση μεταλλικού φράχτη ανάσχεσης στην περιοχή Β1α



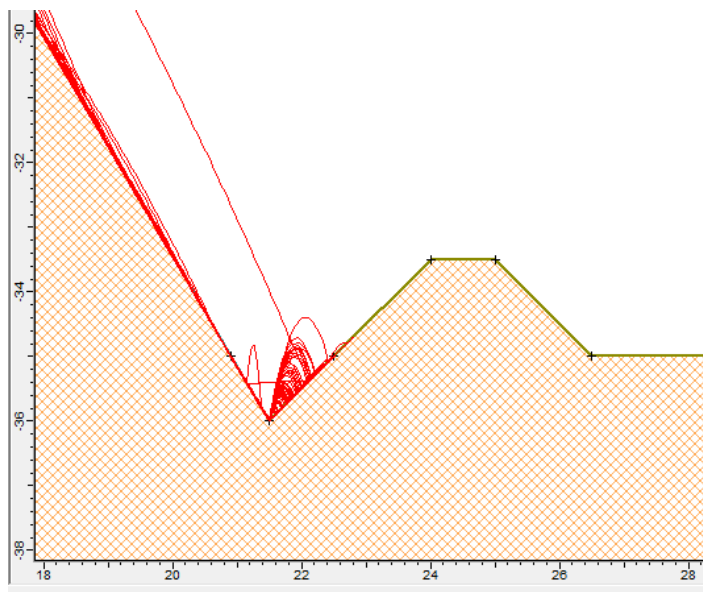
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα κατανομής ύψους κατακόρυφης πρόσπτωσης επί του φράχτη στην περιοχή Β1α (βάση φράχτη: -50)



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα κατανομής κινητικής ενέργειας βραχοτεμαχίων μετά από πρόσκρουση πάνω στο φράχτη στην περιοχή Β1α

### 6.3.2. Περιοχή B1β

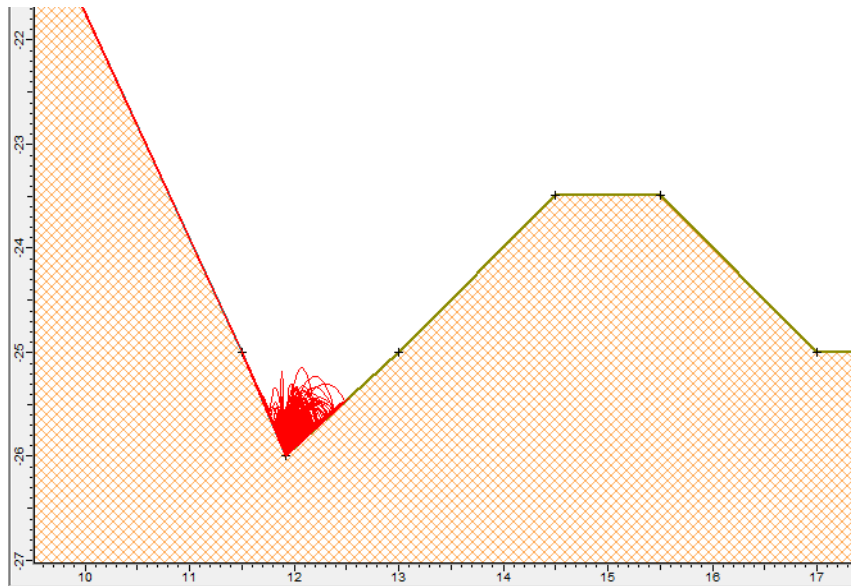
Η περιοχή B1β καλύπτει μια περιοχή μήκους περίπου 25 m. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει κάποια κατασκευή κι έτσι θα μπορούσε απλώς να αποκλειστεί για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων. Για επιπρόσθετη ασφάλεια, προτείνεται η κατασκευή τάφρου ανάσχεσης, πλάτους 1,5 m και βάθους 1 m, καθώς και χωμάτινου υβώματος πλάτους 5 m και ύψους 2 m, ενώ στο πέρας της κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές. Έτσι ο αναξιοποίητος χώρος θα εκτείνεται μόλις 6,5 m από το πόδι του πρανούς, ενώ προκύπτουν έλλειμμα 130 m<sup>3</sup> εδάφους (5,25 m<sup>3</sup>/τ.μ.).



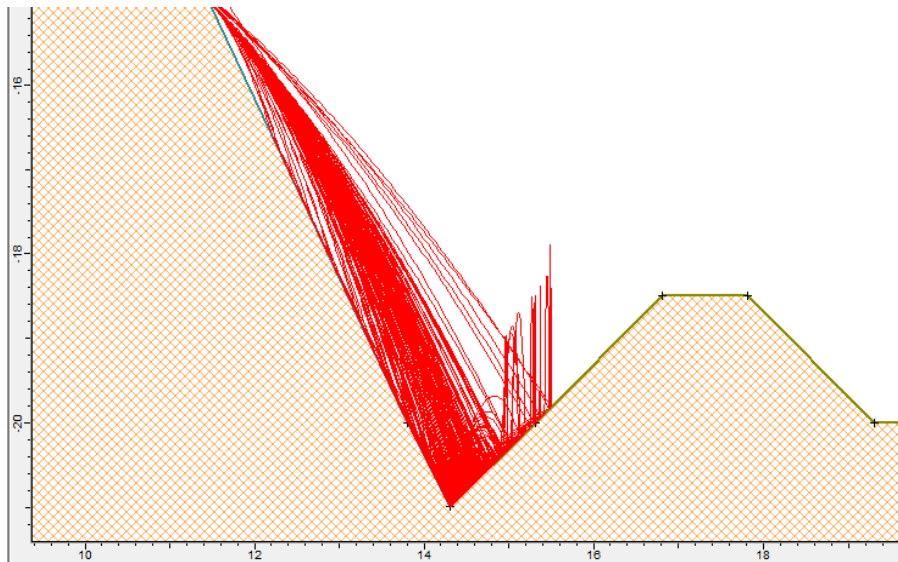
Εικόνα 6.7: Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή B1β

### 6.4. Πρανές B2

Η περιοχή B2 καλύπτεται από τις περιοχές που ορίζουν τα πρανή B2α και B2β, συνολικού μήκους περίπου 15 m. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει κάποια κατασκευή κι έτσι θα μπορούσε απλώς να αποκλειστεί για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων. Τελικά, για επιπρόσθετη ασφάλεια, προτείνεται η κατασκευή τάφρου ανάσχεσης, πλάτους 2 m και βάθους 1 m, καθώς και χωμάτινου υβώματος πλάτους 4 m και ύψους 1,5 m, ενώ στο πέρας της κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές. Έτσι ο αναξιοποίητος χώρος θα εκτείνεται μόλις 5,5 m από το πόδι του πρανούς, ενώ προκύπτουν έλλειμμα 45 m<sup>3</sup> εδάφους (3 m<sup>3</sup>/τ.μ.).



Εικόνα 6.8: Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή Β2α



Εικόνα 6.9: Προσομοίωση λύσης με χρήση τάφρου ανάσχεσης στην περιοχή Β2β





## 7. Συμπεράσματα και προτάσεις

Το πρώην λατομείο “Αίμου” βρίσκεται στις ανατολικές παρυφές του Ποικίλου Όρους, στο Δήμο Πετρούπολης και στο χώρο του πλέον στεγάζεται το Θέατρο Πέτρας. Ο ευρύτερος χώρος απαρτίζεται από Αλπικούς σχηματισμούς οι οποίοι εντάσσονται στην Υποπελαγονική ενότητα και πιο συγκεκριμένα από ασβεστόλιθους. Στο νοτιότερο τμήμα του χώρου παρατηρήθηκε βαθυκύανος ασβεστόλιθος (Κατώτερος), άστρωτος, αρκετά κατακερματισμένος με ελαφρώς τραχείες ασυνέχειες και με αργιλικό υλικό πλήρωσης (σχηματισμός βάσης Υποπελαγονικής, μεταξύ Ανώτερου Παλαιοζωϊκού και Κατώτερου Τριαδικού), ενώ στο βορειότερο τμήμα, παρατηρήθηκε τεφρόλευκος ασβεστόλιθος (Ανώτερος), παχυστρωματώδης με τραχείες ασυνέχειες, χωρίς υλικό πλήρωσης (δεύτερος σχηματισμός Υποπελαγονικής, Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό μέχρι το Ανώτερο Ιουρασικό).

Βάσει των αποτελεσμάτων της στερεογραφικής ανάλυσης, εκτιμήθηκε ότι στο σύνολο των πρानών του λατομείου παρουσιάζεται αυξημένος κίνδυνος καταπτώσεων βράχων. Με τη χρήση του προγράμματος Dips, προσδιορίστηκαν ως πιθανές μορφές αστοχίας 6 περιπτώσεις ολίσθησης σφήνας και 1 επιπέδου στο σύνολο των πρानών.

Αφού εκτιμήθηκε ο όγκος και το βάρος των βραχοτεμαχίων που δύναται να αστοχήσουν εκλέχθηκε μια τιμή, η δυσμενέστερη των 10,5 tn, για την ανάλυση με το πρόγραμμα Rocfall. Οι προσομοιώσεις καταπτώσεων σύμφωνα με το 5° Κεφάλαιο ανέδειξαν την ανάγκη εγκατάστασης μέτρων προστασίας στο σύνολο των πρानών, πλην του πρανούς Γ, ώστε να καταστεί ο χώρος ασφαλής. Τέλος, βάσει των μέτρων προστασίας που προσομοιώθηκαν και προτάθηκαν αναλυτικά στο 6° Κεφάλαιο, συνοπτικά για κάθε τμήμα προέκυψαν τα εξής :

- Το πρανές **A1** αποτελείται από τον Ανώτερο σχηματισμό. Με κλίση 50° - 70°, διεύθυνση κλίσης 135° και μέγιστο ύψος 100 m, παρουσιάζεται αυξημένος κίνδυνος καταπτώσεως βραχοτεμαχίων που οφείλεται σε ολίσθηση σφηνών και επιπέδου. Για την αποτελεσματική προστασία του εν λόγω πρανούς η περιοχή της βάσης του χωρίστηκε σε 2 τμήματα:
  - ✓ Στην περιοχή A1α, όπου προτάθηκαν 2 διαφορετικές λύσεις, μια με τοποθέτηση φράχτη ανάσχεσης, και μια δεύτερη με τάφρο και επίχωμα ανάσχεσης από οπλισμένη γη. Η τάφρος ανάσχεσης θα έχει πλάτος 6 m και βάθος 3 m, και το χωμάτινο ύβωμα πλάτος 6 m και ύψος 2 m. Με τον τρόπο αυτό, η αποκλεισμένη περιοχή θα περιοριστεί σε πλάτος 12 m.
  - ✓ Στην περιοχή A1β, η οποία βρίσκεται μόλις 8 m από την κατασκευή του μικρού θεάτρου, προτείνεται τοποθέτηση φράχτη ανάσχεσης 8 m ανάντη της βάσης του πρανούς (ύψος 14 m), αντοχής 5700 kJ και ύψους 5 m, ενώ για το υπόλοιπο μέτωπο του πρανούς η τοποθέτηση μεταλλικού διχτυού αντοχής 125 kN (η αποκλεισμένη περιοχή θα έχει πλάτος 2 m).
- Στο πρανές **A2**, το οποίο δομείται επίσης από τον Ανώτερο σχηματισμό, με κλίση 45° - 65°, διεύθυνση κλίσης 055° και μέγιστου ύψους 65 m, παρουσιάζεται κίνδυνος καταπτώσεως που οφείλεται σε ολίσθηση σφήνας. Για την εξάλειψη του κινδύνου προτάθηκε τοποθέτηση φράχτη ανάσχεσης 5,5 m ανάντη της βάσης του πρανούς (ύψος 5 m), αντοχής 2900 kJ και ύψους 3 m, ενώ στη βάση του μια τάφρος πλάτους 2 m και βάθους 1 m (η αποκλεισμένη περιοχή θα έχει πλάτος 2 m).

- Το πρανές **B1** αποτελείται από τον Κατώτερο σχηματισμό. Με κλίση  $45^\circ - 75^\circ$ , διεύθυνση κλίσης  $060^\circ$  και μέγιστο ύψος 50 m, παρουσιάζεται αυξημένος κίνδυνος καταπτώσεως βραχοτεμαχίων που οφείλεται σε ολίσθηση σφηνών. Για την αποτελεσματική προστασία του εν λόγω πρανούς η περιοχή της βάσης του χωρίστηκε σε 2 τμήματα:
  - ✓ Στην περιοχή **B1α**, όπου προτάθηκε η τοποθέτηση φράχτη ανάσχεσης 5,5 m κατάντη της βάσης του πρανούς, αντοχής 2900 kJ και ύψους 3 m, ενώ στη βάση του αναβαθμού που υπάρχει, μια τάφρος πλάτους 2 m και βάθους 1 m (η αποκλεισμένη περιοχή θα έχει πλάτος 2 m).
  - ✓ Στην περιοχή **B1β**, όπου προτείνεται η εκσκαφή τάφρου, πλάτους 1,5 m και βάθους 1 m, και η κατασκευή επιχώματος ανάσχεσης πλάτους 5 m και ύψους 2 m. (η αποκλεισμένη περιοχή θα έχει πλάτος 6,5 m).
- Το πρανές **B2** δομείται επίσης από τον Κατώτερο σχηματισμό. Με κλίση  $45^\circ - 65^\circ$ , διεύθυνση κλίσης  $005^\circ$  και μέγιστο ύψος 25 m, παρουσιάζεται αυξημένος κίνδυνος καταπτώσεως βραχοτεμαχίων που οφείλεται σε ολίσθηση σφήνας. Για την αποτελεσματική προστασία του εν λόγω πρανούς η περιοχή της βάσης του χωρίστηκε σε 2 τμήματα. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ως βέλτιστη λύση η εκσκαφή τάφρου, πλάτους 2 m και βάθους 1 m, και η κατασκευή επιχώματος ανάσχεσης πλάτους 4 m και ύψους 1,5 m. (η αποκλεισμένη περιοχή θα έχει πλάτος 5,5 m).
- Τέλος, το πρανές **Γ** αποτελείται από τον Κατώτερο σχηματισμό, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Με κλίση  $45^\circ - 75^\circ$ , διεύθυνση κλίσης  $265^\circ$  και μέγιστο ύψος 20 m, δεν παρουσιάζεται κίνδυνος καταπτώσεως βραχοτεμαχίων, οπότε δεν πραγματοποιήθηκαν ανάλογες προσομοιώσεις. Παρόλα αυτά, λόγω του ύψους των 20 m αλλά και της απότομής του κλίσης, συνίσταται η απαγόρευση της πρόσβασης στο πρανές τουλάχιστον 2 m από το μέτωπό του στην περιοχή μέγιστου ύψους.

Από τις συνολικές εκσκαφές και επιχωματώσεις τάφρων και υβωμάτων προκύπτει περίσσεια εδαφικού υλικού της τάξης των  $100 \text{ m}^3$ , χωρίς βέβαια να έχει ληφθεί υπόψη η συμπύκνωση που θα δεχθεί το υλικό κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης στη μόρφωση των επιχωμάτων ανάσχεσης.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι στο πέρας της κατασκευής κάθε μέτρου που προτάθηκε κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση συρματοπλέγματος για αποκλεισμό της πρόσβασης στο πρανές.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, προκύπτει ο Πίνακας 7.1, όπου παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα στοιχεία των πρανών και των μέτρων προστασίας που αναφέρθηκαν, ενώ στην Εικόνα 7.1 απεικονίζεται η τελική μορφή του χώρου αφού εισαχθούν τα μέτρα προστασίας.

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα στοιχεία των πρανών και των προτεινόμενων μέτρων προστασίας

Πρανές	A1		A2		B1			B2		Γ			
Αρβεσόλιθος	A		A		B			B		B			
Εύρος κλίσης (°)	50-70		45-65		45-75			45-65		45-75			
Διεύθυνση κλίσης (°)	135		55		60			5		265			
Κίνδυνος καταπτώσεων	NAI		NAI		NAI			NAI		ΌΧΙ			
Χωρισμός σε επιμέρους περιοχές	A1α	A1β	A2	A2	B1α	B1β	B2	B2	Γ				
Μήκος έκτασης (m)	75	30	25	25	25	25	15	15	40				
Μέγιστο ύψος (m)	100	95	65	65	50	35	25	25	20				
Πλάτος επικίνδυνης περιοχής (m)	30		20		12,5			10		-			
Μέτρα προστασίας	Είδος	Τάφος	Επίχωμα	Φράχτης ανασχεσης	Μεταλλικό δίχτυ	Φράχτης ανασχεσης	Τάφος	Φράχτης ανασχεσης	Τάφος	Επίχωμα	Τάφος	Επίχωμα	Απαγόρευση πρόσβασης
		Οριζ. απόσταση από πόδι (m)		-8 (κατ. 14)		-5,5 (κατ. 5)		5,5					
	Αντοχή		5700 kJ	125 kN	2900 kJ								
	Πλάτος (m)	6	6				2	2	1,5	5	2	4	
Χαρακτηριστικά	Υψος/Βάθος (m)	3	2	5	14	3	1	3	1	2	1	1,5	
	Πλάτος μη αειφορικής περιοχής (m)	12		2		2		6,5			5,5		2



Εικόνα 7.1: Απεικόνιση της τελικής λύσης για τα μέτρα προστασίας στο σύνολο του χώρου

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο μιας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, στην οποία έγιναν αρκετές παραδοχές και εκτιμήσεις, όπως για παράδειγμα στη γεωμετρία των πρανών ελλείπει τοπογραφικών μετρήσεων, γεγονός που οδήγησε με τη σειρά του σε συντηρητικές παραδοχές στην ανάλυση που ακολούθησε (για παράδειγμα, το βάρος τεμάχους στην προσομοίωση καταπτώσεων θεωρήθηκε κοινό σε όλα τα πρανά ενδιαφέροντος, και ίσο με τη δυσμενέστερη τιμή των 10,5 tn).

Έτσι λοιπόν, η εν λόγω εργασία θα πρέπει να θεωρηθεί περισσότερο ως μια μεθοδολογία ανάλυσης για την συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, παρά η τελική λύση του προβλήματος. Παρόλα αυτά, βάσει των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν κρίνεται σαφές πως υπάρχει πιθανότητα κατάπτωσης βραχοτεμαχίων στο χώρο του Θεάτρου Πέτρας με πιθανά σοβαρές συνέπειες. Λόγω της τεράστιας σημασίας του χώρου για τους πολίτες αλλά και για την κοινότητα, κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση της υπάρχουσας κατάστασης και η εύρεση κατάλληλης τεχνικής λύσης που θα παρέχει απόλυτη ασφάλεια, αλλά και θα σεβαστεί την πολιτιστική αξία αυτού του χώρου, ενός από τα ελάχιστα μεγάλα υπαίθρια θέατρα τέτοιου βεληνεκούς στην πόλη της Αθήνας.

## 8. Βιβλιογραφία

**Αστερίου, Π.** (2011) Διερεύνηση χαρακτηριστικών τροχιάς καταπτώσεων σε βραχώδη πρηνή. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π..

**Καρφάκης, Ι., Λουπασάκης, Κ.** (2005). Γεωτεχνική μελέτη ευστάθειας πρηνών στο Αττικό Αλσος. Αθήνα: ΙΓΜΕ

**Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.,** (2002). Τεχνική Γεωλογία, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

**Λέκκας, Ε. Λ., Λόζιος, Σ. Γ, Δανάμος, Γ. Δ.** (2001) Γεωλογική και τεκτονική δομή της περιοχής μεταξύ των ορέων Αιγάλεω και Πάρνηθας (Αττική, Ελλάδα) και η σημασία τους στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

**Λέκκας, Ε. Λ.,** (2010) Επιχειρησιακή οργάνωση των δήμων του ΑΣΔΑ για την πολιτική προστασία & αντιμετώπιση φυσικών & περιβαλλοντικών κινδύνων - Α' φάση: δράσεις μείωσης πλημμυρικού κινδύνου.

**Λέκκας, Ε. Λ.,** (2010) Επιχειρησιακή οργάνωση των δήμων του ΑΣΔΑ για την πολιτική προστασία & αντιμετώπιση φυσικών & περιβαλλοντικών κινδύνων - Β' φάση: δράσεις μείωσης σεισμικών γεωδυναμικών κινδύνων.

**Λουπασάκης, Κ.** (2014) Παρουσιάσεις Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας II, Ε.Μ.Π..

**Λουπασάκης, Κ. και συνεργάτες** (2015) Γεωτεχνικός χαρακτηρισμός επιλεγμένων θέσεων στην Κρήτη με την συνδυαστική χρήση γεωφυσικών και γεωτεχνικών μεθόδων.

**Μαρίνος, Γ., Κασικάτσος, Γ., Γεωργιάδου-Δικαιούλια, Ε. & Μίρκου Ρ.,** (1971). Το σύστημα των Σχιστολίθων Αθηνών. Ι. Στρωματογραφία και τεκτονική, Ann. Geol. Pays Hell, XXIII, 183-26.

**Μαρίνος, Γ., Κασικάτσος, Γ., Μίρκου-Περιποπούλου, Ρ.,** (1974). Το σύστημα των σχιστολίθων των Αθηνών ΙΙ. Στρωματογραφία και τεκτονική. Ann. Geol. Pays Hell., XXV

**Νομικός, Π.** (2015). Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων. Αθήνα.

**Παπανικολάου Δ. και συνεργάτες** (πάνω από 10 ονόματα) (2002), Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών. Εφαρμοσμένο Ερευνητικό πρόγραμμα. Αθήνα.

**Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Σούκης Κ. και Σκούρτσος Εμ.,** (2004). «Η Γεωλογική Δομή του Αλλόχθονου Συστήματος των Σχιστολίθων Αθηνών». 10° Διεθνές Συνέδριο Ε.Γ.Ε., Θεσσαλονίκη 2004, Δ.Ε.Γ.Ε. том. XXXVI

**Παπανικολάου Δ., Μπάση Ε.-Κ., Κράνης Χ. και Δανάμος Γ** (2004) Παλαιογεωγραφική εξέλιξη του λεκανοπεδίου Αθηνών από το Άνω Μειόκαινο έως σήμερα.

**Ρόζος, Δ.** (2007). Τεχνική Γεωλογία. Αθήνα.

**Ρόζος, Δ.**, Ηλεκτρονικές σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Ι.

**Τάταρης Α. & Σίδερης Χ.** (1989). Γεωλογική Δομή του Νοτ. Αιγάλεω και συσχετισμός προς την απέναντι περιοχή της Σαλαμίνας. Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρ., 23/1, 303-320

**Azzoni, A.; Freitas, M. H.** (1995): Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28(2), pp. 111-124, Wien, A

**Barton, N.** (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13, 1-24.

**Barton, N.R.** (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* 7, 287-332. Barton, N.R. 1974. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105.* Oslo: Norwegian Geotech. Inst.

**Barton, N.R.** (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13(10), 1-24.

**Barton, N.R. and Bandis, S.C.** (1982). Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock. 23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley, 739-760.

**Barton, N.R. and Bandis, S.C.** (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Loen, Norway*, (eds N. Barton and O. Stephansson), 603-610. Rotterdam: Balkema.

**Barton, N.R. and Choubey, V.** (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10(1-2), 1-54.

**Chau, K. T.; Wong, R. H. C.; Wu, J. J.** (2002): Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, pp. 69- 77

**ISRM**, (2008), Suggested method for determination of the Schmidt hammer re-bound hardness: Revised version.

**Katsikatsos, G. , Migiros, G., Triantaphyllis, M. & Mettos A.**, (1986). Geological structure of internal Hellenides. *I.G.M.E., Geol. Geoph. Res., Special Issue*, p. 191-212, Athens

**Kober, L.** (1929). Beitrage zur Geologie von Attika. *Sitzungsb. AcaD. Wiss. In Wien. Abt. I* 138B, 8 Heft.

**Lepsius, R.**, (1893). Geologie von Attika. Ein Beitrag zur Lehre von Metamorphismus der Gesteine, Berlin *Zeitschr. f. partkt. Geol.*, 4, 196 S.592 p

**Marinos, G. & Petracheck, W.** (1956). Laurium. *I.G.M.E. Geol. Geoph. Res.*, V/1, 247pp.

**Papanikolaou, D.**, (1986). Late Cretaceous Paleogeography of the Metamorphic Hellenides. Geol. Geoph. Res., IGME. Hors serie volume in honor of Prof Papastamatiou, 315-328.

**Patton, F.D.** (1966). Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon 1, 509-513.

**Ritchie, A.M.**, (1963). The evaluation of rockfall and its control. Highway Record.

**Stevens, Warren D.**, (1998). RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto

**Varnes, D. J.** (1978). Slope movement types and processes. In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

**Geobruigg**, (2014). Brochures,

[http://www.geobruigg.com/contento/Portals/35/media/Download-Brochures/Geobruigg-AG\\_Tabelle\\_GBE\\_en.pdf](http://www.geobruigg.com/contento/Portals/35/media/Download-Brochures/Geobruigg-AG_Tabelle_GBE_en.pdf)

**Maccaferri**, (2014). Brochures,

[http://www.maccaferri.co.uk/media/om\\_www/uk/Brochures/MACro\\_Brochure.pdf](http://www.maccaferri.co.uk/media/om_www/uk/Brochures/MACro_Brochure.pdf)

**Rocscience**, (2014). Dips Tutorials,

[https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp/tutorials/Dips\\_Tutorials.htm](https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp/tutorials/Dips_Tutorials.htm)

**Rocscience**, (2014). Rocfall Advance Tutorial,

[http://www.rocscience.com/support/rockfall/RF\\_adv\\_tutor\\_1\\_tutorial.pdf](http://www.rocscience.com/support/rockfall/RF_adv_tutor_1_tutorial.pdf)