ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ».

Μονεμβάσια

Κακιά Σκάλα

ΚΟΥΛΟΥΡΗ ΙΦΙΓΕΝΕΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Παύλο Μαρίνο, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτήν την εργασία.

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά και τον κ. Γεώργιο Τσιαμπάο, Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος ανέλαβε την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας στο τελικό της στάδιο, καθώς και για τις συμβουλές και τη βοήθεια που μου παρείχε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στο Δρ. Χάρη Σαρόγλου, ΙΔΑΧ ΕΜΠ για τη συνεχή καθοδήγηση και επίβλεψη, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για την αμέριστη στήριξη και τη συμπαράσταση που μου παρείχαν.

Αθήνα 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο των καταπτώσεων αποτελεί ένα αρκετά σοβαρό και καταστροφικό γεωλογικό πρόβλημα. Τα αποτελέσματα αυτού του φαινομένου έχουν σημαντικές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, που διαδραματίζουν σημαντικό 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 θέσεων για διάφορες χρήσεις. Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων. Στην παρούσα εργασία γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας στα πρανή, επιλέγονται τα πιο αντιπροσωπευτικά και εφαρμόζονται στα πρανή της Κακιάς Σκάλας, της Ε.Ο. Αθηνών - Κορίνθου και του ιστορικού χώρου της Μονεμβάσιας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι έννοιες του πρανούς, της κατολίσθησης και της κατάπτωσης. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κάθε έννοιας αναλύονται διεξοδικά και ταξινομούνται σε κατηγορίες.

Στη συνέχεια, το δεύτερο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο ενότητες. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα πιο αντιπροσωπευτικά συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας των βραχωδών πρανών που προτείνονται διεθνώς, ενώ στο δεύτερο μέρος, γίνεται αξιολόγηση και σύγκρισή τους, χρησιμοποιώντας απλές μεθόδους παραμετρικής ανάλυσης.

Στα κεφάλαια 3 και 4 γίνεται εφαρμογή των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων και πιο αξιόπιστων συστημάτων ταξινόμησης, στα πρανή της Κακιάς Σκάλας και της Μονεμβάσιας αντίστοιχα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικότερα στοιχεία, εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

ABSTRACT

Rockfalls and landslides as phenomena can cause quite serious and catastrophic geological problems. The results of these phenomena have important social and economic implications, which may play a vital role to the maintenance of the infrastructures. For these reasons it is necessary to address these phenomena. In this study, a literature review resulted in the selection of the most representative Rockfall Hazard Rating Systems for further analysis. These systems were applied to the slopes of Kakia Skala, along the National Highway of Athens - Corinth and Monemvasia historical site.

The first chapter describes the classification of landslides and rockfalls. The individual characteristics of each mechanism are thoroughly described and classified into categories.

The second chapter is divided into two sections. In the first part the most representative Rockfall Hazard Rating Systems are presented, while in the second part these systems are assessed and compared using simple parametric analysis.

In chapters 3 and 4 the most frequently used Rating Systems are applied to the slopes of Kakia Skala and Monemvasia respectively.

In the last chapter the key elements of this study are summarized, conclusions are drawn and recommendations are made for future investigation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 - ΠΡΑΝΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

1.1 Πρανή 1
1.1.1 Εισαγωγή 1
1.1.2 Ευστάθεια πρανών 2
1.1.2.1 Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων 4
1.1.2.2 Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων 4

1.2 Κατολισθήσεις 5
1.2.1 Εισαγωγή 5
1.2.2 Παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση μιας κατολίσθησης 6
1.2.3 Ταξινόμηση των κατολισθήσεων 7
1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τις κατολισθήσεις 11
1.2.5 Μηχανισμοί ενεργοποίησης των κατολισθητικών φαινομένων 12
1.2.6 Περιοχές επιρρεπείς σε κατολισθήσεις και μέθοδοι αποκατάστασης 13

1.3 Καταπτώσεις βραχωδών πρανών –Ανάλυση του φαινομένου των καταπτώσεων
1.3.1 Εισαγωγή 14
1.3.2 Τα αίτια του φαινομένου 16
1.3.3 Ταξινόμηση των βραχοπτώσεων 17
1.3.4 Η τροχιά και ο μηχανισμός των βραχοπτώσεων 18

Κεφάλαιο 2.1 - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1.1 Εισαγωγή – Περιγραφή 20

2.1.2 Oregon’s Rock fall Hazard Risk Assessment 21

2.1.3. Marinos et al. Rock fall Hazard Rating System (2005) 24

2.1.4. National Highway Institute’s Rock fall Hazard Risk Assessment 31

2.1.5. Tennessee Geologic Character Scoring System 34

2.1.6. Three Gorges Rockfall Risk Assessment System 37

2.1.6.1. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακινδύνευσης 38

2.1.7. Modification and statistical analysis of the Colorado RHRS 42

2.1.8. WSDOT's Unstable Slope Management Program (USMS) 48

2.1.9. CN Rock fall Hazard Risk Management System 51

2.1.10. Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area 56

Κεφάλαιο 2.2 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ 61

2.2.1 Γενικές παρατηρήσεις 62

2.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στα συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας 69

2.2.3. Εφαρμογή του συστήματος Marinos et al. (2005) 83

2.2.3 Συμπεράσματα 86

Κεφάλαιο 3- ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΚΑΚΙΑΣ ΣΚΑΛΑΣ 87

3.1 Εισαγωγή 87

3.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά 88

3.3 Εκτίμηση της επικινδυνότητας – Παραδοχές 91

3.4 Αξιολόγηση του κινδύνου κατάπτωσης 96

3.5 Η επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων 103

3.5.1 Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους της κυκλοφορίας 103

3.5.2 Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους από ιστορικά στοιχεία 103

3.5.3 Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους που απαιτούν την κρίση του μελετητή 104

3.5.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων 104

3.6 Σύνοψη 109

Κεφάλαιο 4- ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ 110

4.1. Εισαγωγή - Περιγραφή 110

4.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά 111

4.3. Εκτίμηση επικινδυνότητας - Παραδοχές 114

4.4. Αξιολόγηση του κινδύνου κατάπτωσης 116

Κεφάλαιο 5- ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 117

5.1 Συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας βραχωδών πρανών 117

5.2 Σύγκριση συστημάτων εκτίμησης της επικινδυνότητας βραχωδών πρανών 119

5.2.1 Γενικές παρατηρήσεις 119

5.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στα συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας 122

5.3 Εφαρμογή των συστημάτων στο πρανές της Κακιάς Σκάλας 127

5.4 Εφαρμογή των συστημάτων στο πρανές της Μονεμβάσιας 131

5.5 Επιπλέον συμπεράσματα- Μελλοντική διερεύνηση 133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΡΑΝΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

1.1 ΠΡΑΝΗ

1.1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι έννοιες του πρανούς, της κατολίσθησης και της κατάπτωσης βράχων. Σε κάθε περίπτωση δίδεται ορισμός της έννοιας και γίνεται ταξινόμηση των χαρακτηριστικών της.

Ως πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν, 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, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα προκειμένου να εξομαλύνουν το ανάγλυφο. Στις διατμητικές αυτές τάσεις αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους και στη περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί, τότε προκαλείται θραύση του πρανούς και μετακίνηση της εδαφικής μάζας, που 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 στο έδαφος 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 φυσικού εδάφους 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, ακυρώσεις 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 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.

1.1.2 Ευστάθεια πρανών

Τα προβλήματα ανάλυσης της ευστάθειας του πρανούς γενικώς αναλύονται με την εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση του πρανούς κατά μήκος μιας συγκεκριμένης (και διαφορετικής σε κάθε έλεγχο) επιφάνειας και εκείνων που ασκούνται κατά μήκος αυτής και αντιτίθενται στην ολίσθηση.

Η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

• Τη συνοχή (c) και την εσωτερική τριβή (φ), οι οποίες συγκρατούν ενωμένα τα υλικά που αποτελούν το πρανές και αντιστέκονται σε οποιαδήποτε μετακίνηση, συμβάλλοντας στην ευστάθειά τους.

• Τη βαρύτητα, η οποία τείνει να παρασύρει προς τα κάτω και προς τα έξω ορισμένη μάζα εδάφους και επομένως αποτελεί παράγοντα αστάθειας του πρανούς.

• Τη στρώση και την κατάτμηση του εδάφους.

• Την αποστράγγιση του πρανούς.

• Τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

• Τις χρονικές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών βασίζονται στη παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας. Στη περίπτωση που το υλικό μελέτης είναι βράχος τότε οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται είναι: α) κατολίσθηση με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης, β) κατολίσθηση σφηνοειδούς μορφής (διεδρική), γ) κατάπτωση με ανατροπή και δ) κατολίσθηση με περιστροφή (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. Περίπτωση επίπεδης ολίσθησης έχουμε όταν η συνοχή είναι ίση με μηδέν (c=0).

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 κατάντη, κατά μήκος του ίχνους τομής τους, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια σφήνα.

γ) Κατάπτωση με ανατροπή. 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 πρανές, ή όταν η βραχόμαζα είναι έντονα ρηγματωμένη ή θρυμματισμένη, τότε η αστοχία ορίζεται από μια ασυνέχεια και τείνει να ακολουθήσει μια κυκλική επιφάνεια.

1.1.2.1. Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων

Αφού γίνει η παραδοχή της μορφής αστοχίας, ακολουθεί ανάλυση με μεθόδους οριακής ισορροπίας από την οποία προκύπτει κάποιος συντελεστής, ο οποίος ονομάζεται Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας και συμβολίζεται με F ή F.S. Ο στατικός συντελεστής ασφαλείας ισούται με το λόγο των δυνάμεων ή ροπών που ανθίστανται στη ολίσθηση (διατμητική αντοχή εδάφους) προς τις δυνάμεις ή ροπές που συνεισφέρουν στην αστάθεια του πρανούς και προκαλούν την ολίσθησή του.

Αν ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με τη μονάδα τότε έχουμε οριακή ισορροπία – ευστάθεια του πρανούς. Αντίθετα, αν ο συντελεστής είναι μικρότερος από τη μονάδα τότε το πρανές είναι ασταθές και είναι πιθανή η εκδήλωση κάποιας κατολίσθησης. Συνήθως, αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας είναι 1.4 έως 1.5 και 1.0 όταν συνυπολογίζεται η σεισμική δράση. Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους όπως τη μέθοδο του κύκλου τριβής (Taylor), με τα νομογραφήματα Hoek και Bray κτλ.

1.1.2.2. Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων

Η εκδήλωση ενός σεισμού μπορεί να επιφέρει σημαντικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις σε φυσικά ή τεχνικά πρανή (Ambraseys N., Srbulov M., 1995). Εάν και κατά πόσο ένας σεισμός θα προκαλέσει μόνιμες παραμορφώσεις σε ένα πρανές, είναι συνάρτηση αρκετών παραγόντων, όπως είναι η αντοχή του υλικού, η σύσταση του πρανούς, καθώς και η εδαφική κίνηση.

Η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου των πρανών στηριζόμενη μόνο στο συντελεστή ασφαλείας F.S., είναι ανεπαρκής. Επομένως, η επιδεκτικότητα των πρανών σε διάφορες μορφές αστοχιών κατά την εκδήλωση σεισμικού φαινομένου, προσδιορίζεται μέσω μιας άλλης παραμέτρου, της κρίσιμης επιτάχυνσης k_c, η οποία και αντιστοιχεί στη τιμή επιτάχυνσης που μπορεί να φέρει το πρανές σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης k_c εξαρτάται από τη γεωμετρία καθώς και από τις εδαφικές ιδιότητες του πρανούς (Ambraseys N., Menu J., 1988).

1.2 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

1.2.1. Εισαγωγή

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

- Οι οποιεσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρανή 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 αιτίων, 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. (Π. Μαρίνος)

- Εναλλακτικά η κατολίσθηση ορίζεται ως την προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου, κορημάτων ή γαιών σε ένα πρανές (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.

Οι κατολισθήσεις προκαλούνται από τις κινήσεις πρανών, στα οποία αστοχία συμβαίνει κατά μια συγκεκριμένη επιφάνεια ή κατά συνδυασμό επιφανειών. Η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί απόρροια ελλιπούς ευστάθειας των πρανών έναντι

στατικών και σεισμικών φορτίων. Έχει παρατηρηθεί ότι στην παρουσία των τελευταίων η κατολίσθηση είναι πιο έντονη.

Στη περίπτωση που η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τάση προς κατολίσθηση των εδαφικών μαζών που βρίσκονται πίσω από φυσικό ή τεχνητό πρανές, τότε το πρανές διατηρείται σταθερό, διαφορετικά κατολισθαίνει. Αξίζει να σημειωθεί πως οι μόνες μετακινήσεις εδαφικών μαζών που δεν θεωρούνται κατολισθήσεις, είναι οι καθιζήσεις.

Όσον αφορά στον ελληνικό χώρο, οι περισσότερες και μεγαλύτερες κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν στο παρελθόν αποτελούν κυρίως ζώνες παλαιότερης ενεργοποίησης, και οφείλονται στις γεωλογικές και κλιματικές διεργασίες που έλαβαν χώρα στο παρελθόν. Οι περισσότερες κατολισθητικές κινήσεις προκαλούνται κυρίως λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, της μεγάλης έντασης των βροχοπτώσεων, της μορφολογίας και της σεισμικής δράσης. Οι κατολισθήσεις, οι οποίες εκδηλώνονται στην Ελλάδα περισσότερο με τη μορφή αστοχιών στα πλαίσια τεχνικών έργων παρά με τη μορφή εντυπωσιακών μετακινήσεων μεγάλου μεγέθους, οφείλονται στη συνδυασμένη δράση της γεωλογίας, του κλίματος, της γεωμορφολογίας και της ανθρωπογενούς παρέμβασης (Φερεντίνου, 2004).

1.2.2. Παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση μιας κατολίσθησης

i. *Καθαρά γεωλογικοί* : φύση εδάφους ή πετρώματος, δομή, εσωτερική γεωμετρία και σχέση με το σταθερό περιβάλλον,

ii. *Γεωμορφολογικοί* (στατική - δυναμική) και *τοπογραφικοί* (εξωτερική γεωμετρία και σχέση με σταθερό περιβάλλον)

iii. *Υδρολογικοί, κλιματολογικοί, υδρογεωλογικοί* (επιφανειακά και υπόγεια νερά, υγρασία εδάφους κλπ.)

iv. *Μηχανικοί* (εντατικές καταστάσεις, μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους κλπ.)

1.2.3. Ταξινόμηση των Κατολισθήσεων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, οι οποίες στηρίζονται σε ποικίλα κριτήρια, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των συστημάτων ταξινόμησης.

- Ανάλογα με το στάδιο δράσης, χαρακτηρίζονται σε:

• Ενεργές

• Απενεργοποιημένες

• Αδρανείς

• Ανενεργές

• Αρχαίες ή απολιθωμένες

- Ανάλογα με το υλικό, η μάζα η οποία κατολισθαίνει μπορεί να είναι βράχος ή έδαφος.

- Ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης, υπάρχει ο παρακάτω διαχωρισμός:

Τάξη	**Περιγραφή**	**Ταχύτητα (mm/sec)**	**Ταχύτητα μετακίνησης**
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 5*10^{-2}$	> 5 m/sec
6	Πολύ γρήγορη	$5*10^{1}$	3 m/min
5	Γρήγορη	$5*10^{-1}$	1.8 m/hr
4	Μέτρια	$5*10^{-3}$	1.8 m/hr
3	Αργή	$5*10^{-5}$	1.8 m/hr
2	Πολύ αργή	$5*10^{-7}$	1.8 m/hr
1	Εξαιρετικά αργή	$< 5*10^{-7}$	<1.8 m/hr

Πίνακας 1.1. Προτεινόμενη κλίμακα ταχύτητας κατολισθήσεων (Varnes, 1979).

- Ανάλογα με το είδος της κίνησης οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται σε πέντε (5) κατηγορίες: i) πτώσεις (falls), ii) ανατροπές (topples), iii) ολισθήσεις (slides), iv) εξαπλώσεις (spreads) και v) ροές (flows).

Οι σύνθετες κατολισθήσεις έχουν αφαιρεθεί από την επίσημη κατηγοριοποίηση, αν και ο όρος σύνθετη έχει διατηρηθεί σαν περιγραφή του τρόπου δράσης μιας κατολίσθησης.

Αυτές οι πέντε (5) κατηγορίες, οι οποίες και αναλύονται στη συνέχεια, είναι εκείνες -που επικρατούν στο μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των κατολισθήσεων και αφορούν τις κινήσεις επιφανειακών αποθέσεων και στρωμάτων.

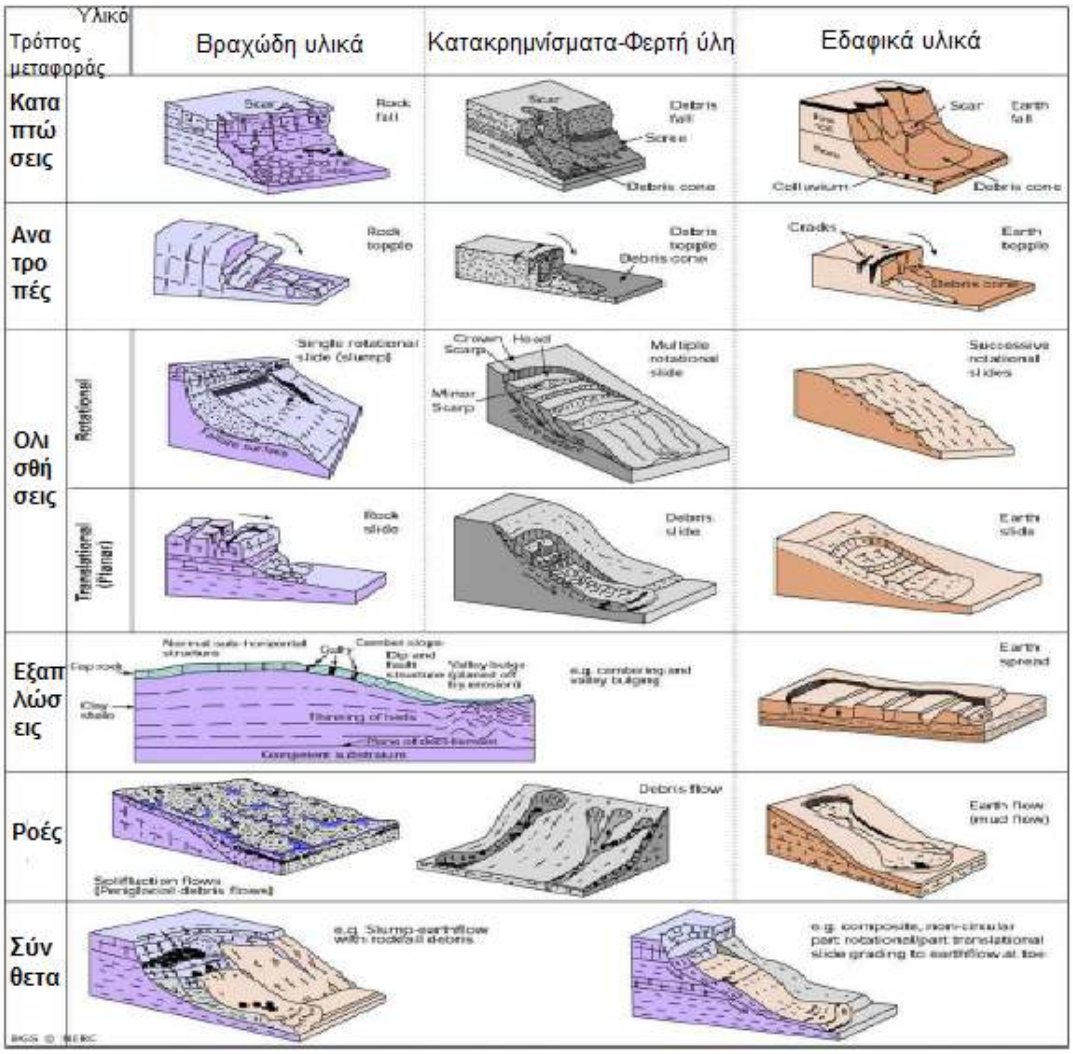
i) Καταπτώσεις (falls). Πρόκειται για αποκόλληση εδάφους ή βράχου από μια απότομη πλαγιά, κατά μήκος μιας επιφάνειας στη οποία υπάρχει μικρή ή σχεδόν καθόλου διατμητική αντοχή. Καθώς το υλικό κατεβαίνει με αρκετά μεγάλη ταχύτητα, χτυπάει στην πλαγιά και κατρακυλάει.

ii) Ανατροπές (topples). Πρόκειται για την προς τα εμπρός περιστροφή μιας μάζας βράχου, γύρω από ένα σημείο ή άξονα, που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους της μάζας. Μπορεί να προκληθεί από το βάρος του υλικού που βρίσκεται στο πάνω μέρος της πλαγιάς, καθώς και από το νερό ή τον πάγο που υπάρχει στις ρωγμές της μάζας. 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.

iii) Ολισθήσεις (slides). Πρόκειται για την προς τα κάτω κίνηση, εδαφικής ή βραχώδους μάζας που λαμβάνει χώρα κατά μήκος επιφανειών αστοχίας ή σχετικά λεπτών ζωνών έντονης διάτμησης. Τα πρώτα σημάδια είναι ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος των οποίων σχηματίζεται η κύρια επιφάνεια ολίσθησης. Η μάζα που μετατίθεται μπορεί να ολισθήσει κάτω από τον πόδα της επιφάνειας αστοχίας καλύπτοντας την αρχική επιφάνεια του εδάφους της πλαγιάς, η οποία στη συνέχεια γίνεται η επιφάνεια αποχωρισμού. Οι διάφορες μορφές της ολίσθησης διακρίνονται σε περιστροφικές και μεταφορικές. Στις περιστροφικές ολισθήσεις η μάζα κινείται κατά μήκος μιας επιφάνειας αστοχίας, η οποία είναι κοίλη. Αντίθετα στις μεταφορικές (στρωματοειδείς) ολισθήσεις, που είναι και πιο ρηχές από τις περιστροφικές, η μάζα μετατοπίζεται κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματιστής επιφάνειας αστοχίας, ολισθαίνοντας πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.

iv) Εξαπλώσεις (spreads). Πρόκειται για την επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους ή μιας βραχώδους μάζας συνδυασμένης με μια γενική υποχώρηση της τεμαχισμένης μάζας ή του συνεκτικού υλικού, μέσα σε μαλακότερο υλικό. Σε αυτή τη περίπτωση, η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι μια επιφάνεια έντονης διάτμησης. Εξαπλώσεις μπορούν να συμβούν από υγροποίηση ή ροή του μαλακότερου υλικού. Στις μορφές των εξαπλώσεων διακρίνονται οι εξαπλώσεις μεγάλων τεμαχίων (block spreads), όπου ένα παχύ στρώμα βράχου βρίσκεται πάνω από μαλακότερα υλικά, και οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads), που σχηματίζονται σε αργίλους και ιλύες οι οποίες έχουν χάσει την αντοχή τους και έχει καταστραφεί η δομή τους.

v) Ροές (flows). Πρόκειται για μια συνεχή κίνηση στο χώρο, στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης είναι κοντά η μια στην άλλη και συνήθως δε διατηρούνται. Η κατανομή των ταχυτήτων στο μετατιθέμενο υλικό, μοιάζει με εκείνη ενός παχύρρευστου υλικού. Το κάτω όριο της κινούμενης μάζας μπορεί να είναι μια επιφάνεια κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα διαφορική κίνηση ή μια παχιά ζώνη με κατανεμημένη διάτμηση. Έτσι υπάρχει μια βαθμιαία μετάβαση από ολισθήσεις σε ροές, που εξαρτάται από το περιεχόμενο του νερού, την κινητικότητα και την εξέλιξη της κίνησης.



Εικόνα 1.1. Κατάταξη των καταπτώσεων με βάση τα μοντέλα των Varnes (1978) και Cruden και Varnes (1996). Αυτή η ορολογία και η κατάταξη προτάθηκαν και από την Unesco Working Party στο World Landslide Inventory (WP/WLI 1990, 1993). Τα κύρια χαρακτηριστικά κατάταξης είναι ο τρόπος μεταφοράς και το είδος του υλικού, που υπεισέρχεται σε αυτή.

1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τις κατολισθήσεις

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 μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις, διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς είναι εκείνοι οι παράγοντες που δημιουργούν την προδιάθεση ολίσθησης, ενώ οι δευτερογενείς προκαλούν άμεσα την κατολίσθηση.

Ειδικότερα, 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. Ιδιαιτέρα επικίνδυνες χαρακτηρίζονται οι περιοχές που επιδεικνύουν νεοτεκτονική δραστηριότητα.

1.2.5 Μηχανισμοί ενεργοποίησης των κατολισθητικών φαινόμενων

Η πραγματοποίηση μιας κατολίσθησης επιτυγχάνεται είτε με τη με τη δράση εξωγενών παραγόντων που συντελούν στην αύξηση της διατμητικής τάσης του εδάφους, είτε των ενδογενών παραγόντων που συντελούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής του.

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 φαινόμενου 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 αύξηση της άνωσης που ασκείται σε μια μάζα από τα υπόγεια νερά.

• 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 αύξηση της πιέσεως του νερού των πόρων, γνωστή και ως ουδέτερη τάση.

• Η σεισμική φόρτιση. Ιδιαιτέρα σε πρανή 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 πρανές 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 πρανών και η αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου.

• Ενδογενή αίτια, όπως είναι η αύξηση της άνωσης, η αύξηση της πιέσεως του νερού των πόρων, η μείωση της συνοχής, η μείωση της τριβής και η αύξηση του ύψους και του πλάτους της τομής του εδάφους.

1.2.6 Περιοχές επιρρεπείς σε κατολισθήσεις και μέθοδοι αποκατάστασης

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών χρησιμεύουν στην ανίχνευση σημείων ή περιοχών οι οποίες επιδεικνύουν επιδεκτικότητα σε κατολισθητικά φαινόμενα.

Τυπικές περιοχές για την εκδήλωση κατολισθήσεων αποτελούν οι απότομες πλαγιές, οι γκρεμοί και τα απότομα βράχια, τα οποία βρίσκονται υπό διάβρωση και αποσάθρωση, οι περιοχές συγκέντρωσης νερού, καθώς και οι ρηξιγενείς ζώνες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κατολισθήσεις δεν συμβαίνουν πάντα σε επιρρεπείς περιοχές, αν δεν επικρατούν συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι κατολισθήσεις είναι συνηθισμένες σε συγκεκριμένα είδη εδαφών όπως σε μανδύες αποσάθρωσης των πετρωμάτων, στα κορήματα και στα προϊόντα διάβρωσης από το νερό ή τον άνεμο ενώ είναι πολύ σπάνιες σε άλλα είδη εδαφών.

Τυπικά, οι εκδηλώσεις κατολισθήσεων μετριάζονται είτε με παθητικές μεθόδους άμβλυνσης είτε με ενεργητικές. Οι παθητικές μέθοδοι ουσιαστικά επιτρέπουν την ελεγχόμενη εκδήλωση των κατολισθήσεων. Η δραστικές- ενεργητικές μέθοδοι λαμβάνουν χώρα στη ζώνη κίνησης και αποτρέπουν την εμφάνιση του φαινομένου. Τα άμεσα μέτρα που μπορούν να ληφθούν προκειμένου να αντιμετωπιστεί μια κατολίσθηση, είναι τα ακόλουθα:

• Τοποθέτηση χωματισμών στη βάση της ολισθαίνουσας μάζας ή αφαίρεση χωματισμών από τη κεφαλή της κατολίσθησης.

• Συλλογή και απομάκρυνση όλων των επιφανειακών υδάτων που ρέουν μέσα στην περιοχή που ολίσθησε, με χρήση στραγγιστηρίων που κατασκευάζονται είτε παράλληλα με το φρύδι του πρανούς, είτε πάνω στην ολισθαίνουσα μάζα.

• Διάνοιξη μέσα στην ολισθαίνουσα μάζα συστήματος κυρίων και δευτερευουσών αποστραγγιστικών στοών για τη συλλογή των υπογείων υδάτων (με φυσική ροή).

• Διάνοιξη φρεάτων για άντληση των υπογείων υδάτων με στόχο την ταπείνωση της στάθμης του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα.

Παράλληλα, επιπλέον μέτρα μπορούν να ληφθούν για την αντιμετώπιση μιας κατολίσθησης, όπως η φυτοκάλυψη του πρανούς με την ταυτόχρονη χρήση γεωπλέγματος, η ενίσχυση του εδάφους με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η κατασκευή τοίχου αντιστήριξης στη βάση του πρανούς με πασσάλους ή πασσαλότοιχους με χρήση αγκυρίων, ώστε να παραλαμβάνονται και οριζόντια φορτία, η μείωση της κλίσεως των πρανών με τη δημιουργία αναβαθμίδων, καθώς και η αποφυγή εξωτερικών φορτίσεων στην κορυφή αλλά και στο σώμα του πρανούς.

1.3 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΩΝ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

1.3.1 Εισαγωγή

Με τον όρο κατάπτωση βραχόμαζας ή βραχόπτωση, χαρακτηρίζεται η αποκόλληση τμήματος εδάφους ή βράχου από απότομο πρανές (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 πρανή με μεγάλη κλίση, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία δεν εκδηλώνεται σημαντική κίνηση. Η κίνηση είναι γρήγορη και συνήθως αυξάνει προς τα κάτω λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Πρόκειται για συνήθη φαινόμενα σε απότομα βραχώδη πρανή και ακτές, λόγω της δράσεως των κυμάτων ή λόγω 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, όμως, βαθμό επικινδυνότητας κυρίως στις ορεινές περιοχές και κατά μήκος τεχνητών πρανών, όπου μπορεί ενδεχομένως να απειλήσει ανθρώπινες ζωές, συγκοινωνιακά δίκτυα, οικισμούς, εξοπλισμούς και εγκαταστάσεις.

Η μεγάλη καταστροφική ιδιότητα των καταπτώσεων οφείλεται στο ότι, παρόλο που αφορούν συνήθως μικρούς όγκους βραχοτεμαχίων, χαρακτηρίζονται από υψηλή ενέργεια και κινητικότητα. Επομένως, η εκτίμηση του κίνδυνου και της διακινδύνευσης για την κατάπτωση βραχοτεμαχίων είναι απαραίτητα τόσο για την εξασφάλιση 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 πρανές, ενώ στον πόδα του συγκεντρώνονται τεμάχη αποσαθρωμένων υλικών. Οι διαδρομές κατά μήκος των οποίων πραγματοποιούνται καταπτώσεις είναι ορατές από ψηλά, 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 πρανών σχετίζονται με φαινόμενα καταπτώσεων βράχων.

1.3.2. Τα αίτια του φαινομένου

Οι καταπτώσεις βράχων συμβαίνουν όταν μία μάζα αποκοπεί από το μητρικό πέτρωμα και είναι δυνατή η κίνησή της προς τα κάτω, εφόσον το επιτρέπει η θέση της. Οι καταπτώσεις, γενικά, εκκινούν λόγω κάποιου γεγονότος το οποίο προκαλεί μια αλλαγή στις δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο τέμαχος, δυνάμεις που μπορεί να συνδέονται με κλιματικά ή φυσικά γεγονότα ή με κάποια κατασκευαστική δραστηριότητα. Συνήθως, η χαλάρωση των βράχων συνδέεται με την ύπαρξη ασυνεχειών. Η άμεση αιτία χαλάρωσης είναι μία αλλοίωση, συνδεόμενη συνήθως με αποσάθρωση στο υλικό των επιπέδων της πιθανής κίνησης. Τα συνηθέστερα αίτια που μπορεί να προκαλέσουν καταπτώσεις τεμαχών βράχου, είναι η αύξηση της πίεσης του ύδατος στις διακλάσεις λόγω έντονης βροχόπτωσης, η συστολή – διαστολή του βράχου σε ήπια και ψυχρά κλίματα, η χημική αποσάθρωση του βράχου σε υγρά και τροπικά κλίματα, η ανάπτυξη των ριζών ή η μόχλευση από αυτές όταν κινούνται λόγω δυνατών ανέμων και οι δονήσεις λόγω σεισμού ή κατασκευαστικής δραστηριότητας. Οι κατασκευαστικές δραστηριότητες είναι πιθανόν να αυξήσουν την επιδεκτικότητα του βράχου στο φαινόμενο της κατάπτωσης βραχοτεμαχίων κατά το διπλάσιο σε σχέση με τα κλιματικά και τα βιολογικά γεγονότα.

Συγκεντρωτικά και σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, τα βασικότερα αίτια της χαλάρωσης των βράχων αποτελούν η διάβρωση, ο κορεσμός, ο παγετός, η υποσκαφή από ροή νερού, η διαταραχή από υπερκείμενους βράχους, οι σεισμοί, το ριζικό σύστημα βλάστησης, η θερμική διαστολή-συστολή και οι βροχοπτώσεις. Γενικά παρατηρείται ένταση του φαινομένου σε περιόδους με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλές βροχοπτώσεις.

Εικόνα 1.1. Κατάπτωση βράχων σε οδόστρωμα, British Columbia, Canada. (Πηγή: Natural Resources Canada- Geoscape Vancouver)

1.3.3. Ταξινόμηση των βραχοπτώσεων

Δεν είναι εύκολο να ταξινομηθούν με απλό τρόπο, καθώς εξαρτώνται άμεσα από το βαθμό και τη διαμόρφωση της ρηγμάτωσης του βράχου. Βάσει της δυναμικής αλληλεπίδρασης των βραχοτεμαχίων, ο Rochet (1987) ταξινόμησε τις καταπτώσεις σε τέσσερις κατηγορίες:

• Την κατάπτωση ενός μόνο βραχοτεμαχίου (ο όγκος κυμαίνεται από 10÷102 m^3),

• Την κατάπτωση μάζας βράχου (όγκος από 102÷105 m^3).

• Την κατάπτωση πολύ μεγάλης μάζας βράχου (όγκος από 105÷107 m^3),

• και τη μετατόπιση μάζας (όγκος > 107 m^3)

Οι δύο πρώτες κατηγορίες (όγκος < 105 m^3), οι οποίες ορίζονται επίσης και ως «καταπτώσεις βραχοτεμαχίων», χαρακτηρίζονται από μηδενική ή αμελητέα αλληλεπίδραση μεταξύ των βραχοτεμαχίων που πέφτουν. Ακόμα και όταν περιλαμβάνουν περιορισμένα σε όγκο βραχοτεμάχια, οι καταπτώσεις βραχοτεμαχίων είναι εξαιρετικά επικίνδυνες λόγω της υψηλής χωρικής και χρονικής τους επανάληψης.

Παράλληλα, ανάλογα με το μέγεθος της έκτασης του φαινομένου, μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

• Καταπτώσεις μεγάλης κλίμακας με διαστάσεις φυσικής καταστροφής.

• Καταπτώσεις μικρότερης κλίμακας που επηρεάζουν ορεινά συγκοινωνιακά δίκτυα και δίκτυα τα οποία διέρχονται μέσα από ορύγματα.

• Καταπτώσεις μικρότερης έκτασης που είναι όμως επικίνδυνες.

Επιπλέον των περιπτώσεων που έχουν χαρακτήρα μαζικό, συμβαίνουν και μεμονωμένες καταπτώσεις βραχοτεμαχίων για τον έλεγχο των οποίων πρέπει να πραγματοποιούνται τακτικές επιθεωρήσεις και συντήρηση των συγκοινωνιακών δικτύων.

1.3.4. Η τροχιά και ο μηχανισμός των βραχοπτώσεων

Μετά την αποκόλληση, η τροχιά που θα ακολουθήσει το τέμαχος του βράχου εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρία και το ανάγλυφο του πρανούς και είναι συνδυασμός τεσσάρων (4) κύριων διαδικασιών (ή «καταστάσεων»). Συγκεκριμένα:

• ολίσθηση και/ ή ανατροπή

• ελεύθερη πτώση

• αναπήδηση (κρούση)

• και κύλιση

Η κρούση αποτελεί την πιο πολύπλοκη, αβέβαιη και την λιγότερο κατανοητή διαδικασία μιας κατάπτωσης (Broili 1973, Habib 1977, Bozzolo & Pamini 1986, Azzoni and de Freitas 1995). Η κρούση ενδέχεται να είναι από πλήρως (ή σχεδόν πλήρως) ελαστική μέχρι και πλήρως (ή σχεδόν πλήρως) πλαστική, αναλόγως των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους και του τεμάχους, τη γωνία κρούσης, τη μάζα και τη ταχύτητα του βραχοτεμαχίου (Guzzeti et al, 2002).

Οι σημαντικότεροι παράγοντες ελέγχου της τροχιάς ενός βραχοτεμαχίου είναι η γεωμετρία του πρανούς και ο τύπος της επιφάνειας του πρανούς. Τα πρανή που έχουν συμπεριφορά σαν αυτή των «αλμάτων σκι» (ski jumps) θεωρούνται τα πιο επικίνδυνα αφού το βραχοτεμάχιο αποκτά υψηλή οριζόντια ταχύτητα η οποία το ωθεί να αναπηδήσει πολύ

μακριά από το πόδι του πρανούς. Η έννοια της επιβράδυνσης που χαρακτηρίζει τα υλικά της επιφάνειας του πρανούς, εκφράζεται με τον όρο «συντελεστής απόσβεσης» (coefficient of restitution). Η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από τη φύση των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν την επιφάνεια πρόσπτωσης. Πρανή με καθαρή επιφάνεια από σκληρό βράχο εκτεθειμένο, καθώς και αυτά που χαρακτηρίζονται από αραιή βλάστηση είναι επίσης επικίνδυνα γιατί έχουν υψηλό συντελεστή απόσβεσης ενέργειας λόγω κρούσης και συνεπώς δεν επιβραδύνουν σε σημαντικό βαθμό την κίνηση του βραχοτεμαχίου κατά την κατάπτωση. Αντιθέτως, υλικά αποσαθρωμένων βράχων, υλικά κορημάτων, κλαστικά υλικά και χαλίκια έχουν χαμηλό συντελεστή απόσβεσης ενέργειας και επομένως απορροφούν σημαντικό ποσό της ενέργειας του βραχοτεμαχίου, σε βαθμό τέτοιο που μπορεί ακόμα και να σταματήσει. Επιπλέον, αν τα πρανή καλύπτονται από έντονη βλάστηση, η κατάπτωση μπορεί να επιβραδυνθεί σημαντικά. Συνεπώς ο λόγος για τον οποίο στρώνεται μετά τον πόδα του πρανούς μία στρώση από χαλίκια είναι να μειωθεί η κινητική ενέργεια και να αποφευχθεί η περαιτέρω αναπήδηση των προσπιπτόντων βράχων.

Συγκεκριμένα, για ομαλή κλίση οι βράχοι ισορροπούν μέχρι κλίση 1/3. Σε πιο απότομα πρανή οι βράχοι κυλούν επιταχυνόμενα.

Εάν τα πρανή χαρακτηρίζονται λεία οι βράχοι κυλούν στην επιφάνειά τους. Αν και αυτή η συνθήκη σπάνια ικανοποιείται, μπορεί κατά προσέγγιση να ικανοποιηθεί όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των στοιχείων που απαρτίζουν την επιφάνεια του πρανούς. Εάν ένα πρανές θεωρείται τραχύ, προκαλεί απογείωση των βράχων συχνά μετά από μία ή δύο αναπηδήσεις.

Άλλοι παράγοντες, όπως το σχήμα των βράχων, ο συντελεστής τριβής της επιφάνειάς τους, ή το αν αυτοί σπάνε κατά την πρόσκρουσή τους σε μικρότερα κομμάτια ή όχι, θεωρούνται δευτερεύουσας σημασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

2.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.1.1 Εισαγωγή – Περιγραφή

Στο πρώτο μέρος του δευτέρου κεφαλαίου της εργασίας παρατίθενται εννέα (9) συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση, τα οποία και αναλύονται. Στο δεύτερο μέρος συγκρίνονται τα εξεταζόμενα συστήματα και εξάγονται συμπεράσματα ως προς την αξιοπιστία, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης, επιλέγονται ορισμένα συστήματα για περαιτέρω διερεύνηση.

Τα εξεταζόμενα συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας είναι τα εξής:

1. Oregon's Rockfall Hazard Risk Assessment (Pierson et al. 1990)
2. Marinos et al. Rockfall Hazard Rating System (2005)
3. National Highway Institute's Hazard Risk Assessment (New York Department of Transportation, 1993)
4. Tennessee's Rockfall Hazard Risk Assessment (Vandewater et al. 2005)
5. Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System (Bolin et al. 2009)
6. The Modified Colorado Hazard Risk Assessment (Santi et al. 2008)
7. WSDOT's Unstable Slope Management Program (Washington Department of Transportation, 2007)
8. Canadian (CN) Rockfall Hazard Risk Management System (Abbott et al. 1998)
9. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area (J. Corominas et al. 2005)

2.1.2. Oregon's Rock fall Hazard Risk Assessment

Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα βαθμονόμησης των καταπτώσεων είναι το Rockfall Hazard Rating System (RHRS), το οποίο σχεδιάστηκε στην πολιτεία Oregon (Pierson et al. 1990) για τη βαθμονόμηση πρανών σε αυτοκινητόδρομο.

Οι παράγοντες που αξιολογούνται είναι οι ακόλουθοι:

- Το ύψος του πρανούς
- Η αποτελεσματικότητα της τάφρου
- Η πιθανότητα παρουσίας οχήματος την ώρα της αστοχίας
- Η ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης των διερχόμενων οδηγών
- Το πλάτος του δρόμου (συμπεριλαμβανομένων των πεζοδρομίων)
- Η κατάσταση των ασυνεχειών
- Η τραχύτητα των ασυνεχειών
- Τα εμφανιζόμενα ίχνη διάβρωσης των πετρωμάτων
- Η διαφορά στο ρυθμό διάβρωσης
- Το μέγεθος και η ποσότητα των καταπιπτόντων τεμαχών
- Το κλίμα της περιοχής και η παρουσία νερού στις ασυνέχειες
- Το ιστορικό των καταπτώσεων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ			ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ			
			Βαθμοί 3	**Βαθμοί 9**	**Βαθμοί 27**	**Βαθμοί 81**
Ύψος πρανούς			7.5 m	15.0 m	22.5 m	30.0 m
Αποτελεσματικότητα τάφρου			Καλή συγκράτηση	Μέτρια συγκράτηση	Περιορισμένη συγκράτηση	Καθόλου συγκράτηση
Ποσοστό χρόνου παρουσίας αυτοκινήτου σε πιθανή κατάπτωση- Μέσος κίνδυνος οχήματος			25% του χρόνου	50% του χρόνου	75% του χρόνου	100% του χρόνου
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης			Επαρκής οπτική απόσταση, 100% χαμηλής τιμής σχεδιασμού	Μέτρια οπτική απόσταση, 80% χαμηλής τιμής σχεδιασμού	Περιορισμένη οπτική απόσταση, 60% χαμηλής τιμής σχεδιασμού	Πολύ περιορισμένη οπτική απόσταση, 40% χαμηλής τιμής σχεδιασμού
Συνολικό πλάτος δρόμου			44 ft=13.5 m	36 ft=11.0 m	28 ft=8.5 m	20 ft=6.0 m
Γεωλογικός χαρακτήρας	**Περίπτωση 1**	**Κατάσταση ασυνεχειών**	Ασυνεχείς διακλάσεις, ευμενής προσανατολισμός	Ασυνεχείς διακλάσεις, τυχαίος προσανατολισμός	Ασυνεχείς διακλάσεις, δυσμενής προσανατολισμός	Συνεχείς διακλάσεις, δυσμενής προσανατολισμός
		Τραχύτητα	Σκληρή, ανώμαλη	Κυματοειδής	Επίπεδη	Αργιλικό υλικό πλήρωσης
	Περίπτωση 2	**Κατάσταση ασυνεχειών**	Ελάχιστα διαφορικά ίχνη διάβρωσης	Περιστασιακά ίχνη διάβρωσης	Πολλά ίχνη διάβρωσης	Πολλά ίχνη διάβρωσης
		Διαφορά στο βαθμό διάβρωσης	Μικρή διαφορά	Μέτρια διαφορά	Μεγάλη διαφορά	Υπερβολικά μεγάλη διαφορά
Μέγεθος τεμαχών / Ποσότητα επισφαλών τεμαχών			1ft=0.3 m / 3 κυβικές γιάρδες=2.30 m^3	2ft=0.6 m / 6 κυβικές γιάρδες=4.60 m^3	3ft=0.9 m / 9 κυβικές γιάρδες=7.0 m^3	4ft =1.2 m/ 12 κυβικές γιάρδες=9.20 m^3

Κλίμα και παρουσία νερού στο πρανές	Χαμηλές έως μέτριες βροχοπτώσεις Καθόλου περίοδοι παγετού- Καθόλου νερό στο πρανές	Μέτριες βροχοπτώσεις ή μικροί περίοδοι παγετού ή περιστασιακή παρουσία νερού στο πρανές	Υψηλές βροχοπτώσεις ή μεγάλοι περίοδοι παγετού ή συνεχής παρουσία νερού στο πρανές	Υψηλές βροχοπτώσεις και μεγάλοι περίοδοι παγετού ή συνεχής παρουσία νερού στο πρανές και μεγάλοι περίοδοι παγετού
Ιστορικό καταπτώσεων	Ελάχιστες καταπτώσεις	Περιστασιακές καταπτώσεις	Πολλές καταπτώσεις	Συνεχείς καταπτώσεις

Πίνακας 2.1.1. Παράμετροι και βαθμολογία επικινδυνότητας (Oregon RHRS)

2.1.3. Marinos et al. Rock fall Hazard Rating System (2005)

Αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο βασίζεται στο μοντέλο του Pierson (1990), παρέχει τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής, ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν κατάντη και αφορά όλα τα φυσικά πρανή. Περιέχει και βασίζεται σε δεκαεννέα (19) παραμέτρους – μεταβλητές, οι οποίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Κάθε κατηγορία έχει διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής στην επικινδυνότητα του πρανούς. Οι παράμετροι της Α΄ κατηγορίας εκτιμήθηκε πως επηρεάζουν την επικινδυνότητα κατά 55%, αυτοί της δεύτερης κατά 30% και της τρίτης κατά 15%.

Οι παράγοντες που αξιολογούνται είναι οι ακόλουθοι:

Α΄ κατηγορία:

- Κλίση του πρανούς
- Τραχύτητα
- Υλικό πλήρωσης
- Προσανατολισμός
- Συνέχεια
- Άνοιγμα
- Απόσταση
- Συχνότητα βροχοπτώσεων
- Διαπερατότητα πετρώματος
- Ικανότητα αποστράγγισης πετρώματος

Β΄ κατηγορία:

- Ύψος πρανούς
- Θέση εκκίνησης καταπτώσεων στο πρανές
- Μέγεθος επισφαλών τεμαχών
- Πλάτος περιοχής αναχαίτισης των προσπιπτόντων βράχων

- Δυνατότητα επέμβασης στο πρανές
- Εκτιμώμενη αξία κατασκευών κατάντη του πρανούς – εκτιμώμενες συνέπειες πιθανής κατάπτωσης

Γ΄ κατηγορία:

- Εκτιμώμενος αριθμός επισφαλών τεμαχών
- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας
- Ιστορικό καταπτώσεων

Η **πρώτη κατηγορία** περιέχει τις παραμέτρους που μπορούν να αποτελέσουν αίτια δυνητικής αστοχίας και σχετίζονται με την κατάσταση πριν την εκδήλωση οποιασδήποτε αστοχίας. Οι μεταβλητές περιγράφουν κυρίως την κατάσταση των ασυνεχειών και την επίδραση του νερού στο πρανές. Στη **δεύτερη κατηγορία** περιλαμβάνονται οι παράμετροι που συνδέονται με την επικινδυνότητα του πρανούς στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Στην **τρίτη κατηγορία,** οι μεταβλητές εκφράζουν την έμμεση επικινδυνότητα του πρανούς, χωρίς όμως να απειλούν από μόνες τους τη γενικότερη αστάθεια ή να κρύβουν άμεσο κίνδυνο επικείμενων καταπτώσεων.

Α. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ							
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	**ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΤΑΞΗ Ή ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ/ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**					**ΒΑΘΜΟΣ**
1. Κλίση πρανούς	Α' Βαθμού / 0,07	Αμελητέα κλίση $<30^0$	Μέτρια κλίση $30^0 \div 50^0$	Μεγάλη κλίση $50^0 \div 70^0$ Παρουσία αναβαθμών	Απότομο πρανές $>70^0$ Παρουσία αρνητικών κλίσεων		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
Κατάσταση ασυνεχειών							
2. Τραχύτητα	Α' Βαθμού / 0,07	Τραχεία κλιμακωτή	Ολισθηρή - λεία κλιμακωτή	Κυματοειδής	Τραχεία επίπεδη	Ολισθηρή - λεία επίπεδη	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
3.Υλικό πλήρωσης	Α' Βαθμού / 0,07	Καθόλου	Γωνιώδη θραύσματα	Στιφρή άργιλος>5mm	Μαλακή άργιλος>5mm		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
4. Προσανατολισμός	Α' Βαθμού / 0,07	Ευμενής		Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	
Βαθμολογία		1		4	7	10	
5. Συνέχεια	Α' Βαθμού / 0,07	Πολύ μικρή <1m	Μικρή 1-3m	Μέση 3-10m	Υψηλή 10-20m	Πολύ υψηλή >20m	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
6. Άνοιγμα	Γ' Βαθμού / 0,02	Πολύ κλειστές <0,25mm	Κλειστές 0,25÷2,5mm	Μέτρια πλατιές 2,5÷10mm	Πολύ πλατιές 10÷100mm	Εξαιρετικά πλατιές 100÷1000mm	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	

Α. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ							
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	**ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΤΑΞΗ Ή ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ/ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**					**ΒΑΘΜΟΣ**
7. Απόσταση	Β' Βαθμού / 0,045	Εξαιρετικά μικρή απόσταση <30mm	Μικρή απόσταση 30÷200mm	Μέτρια απόσταση 200÷1000mm	Μεγάλη απόσταση 1000÷6000mm	Εξαιρετικά μεγάλη απόσταση >6000mm	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
Επίδραση νερού στις ασυνέχειες							
8. Συχνότητα βροχοπτώσεων	Β' Βαθμού / 0,045	Σπάνια έως καθόλου	Σε αραιά διαστήματα	Συχνά	Σε τακτά χρονικά διαστήματα	Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
9. Διαπερατότητα πετρώματος	Β' Βαθμού / 0,045	Τελείως διαπερατό	Μεγάλης διαπερατότητας	Μέτριας διαπερατότητας	Μικρής διαπερατότητας	Αδιαπέρατο	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
10. Ικανότητα αποστράγγισης πετρώματος	Β' Βαθμού / 0,045	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη	Μέτρια	Μικρή	Πολύ μικρή	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	

Β. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ							
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	**ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΤΑΞΗ Ή ΒΑΘΜΟΣ / ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**					**ΒΑΘΜΟΣ**
11. Ύψος πρανούς (m)	Β' Βαθμού / 0,045	<10	10-30	30-60	>60		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
12. Θέση εκκίνησης καταπτώσεων στο πρανές	Β' Βαθμού / 0,045	Καταπτώσεις από το κατώτερο τμήμα (Η/4)	Καταπτώσεις από θέσεις έως τη μέση του πρανούς (Η/2)	Καταπτώσεις από θέσεις έως και πριν το ανώτερο τμήμα (3Η/2)	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς (Η)		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
13. Μέγεθος επισφαλών τεμαχών (m^3)	Β' Βαθμού / 0,045	<1	1-2,5	2,5-4	>4		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
14. Πλάτος περιοχής αναχαίτισης των προσπιπτόντων βράχων.	Β' Βαθμού / 0,045	>20	10-20	5-10	1-5	Καθόλου απόσταση	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
15. Δυνατότητα επέμβασης στο πρανές.	Β' Βαθμού / 0,045	Εφαρμόσιμο κάθε είδος προστασίας (ενεργητικά-παθητικά μέτρα βελτίωσης της βραχόμαζας)	Μεγάλη δυνατότητα επέμβασης-Αρκετά εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας	Εφαρμογή ορισμένων μόνο μέτρων προστασί-ας	Μικρή δυνατότητα επέμβασης-Ελάχιστα εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας	Αδύνατη η επέμβαση στο πρανές κατ' οποιονδήποτε τρόπο	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	

Β. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ							
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	**ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΤΑΞΗ Ή ΒΑΘΜΟΣ / ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**					**ΒΑΘΜΟΣ**
16. Εκτιμώμενη αξία κατασκευών κατάντη του πρανούς - Εκτιμώμενες συνέπειες πιθανής κατάπτωσης.	Α' Βαθμού / 0,075	Μηδαμινή - Ανυπαρξία ανθρώπων, υπαρχόντων ή μελλοντικών κατασκευών	Χαμηλή - Χώροι ελάχιστης προσέλευσης, διέλευσης κοινού - Μικρή πιθανότητα κατασκευής νέων κατασκευών	Μέτρια - περιστασιακή παρουσία ανθρώπων - Υπό κατασκευή κτίσματα	Υψηλή – συχνή παρουσία ανθρώπων - Πολυάριθμα κτίρια	Ανεκτίμητη - Χώροι συγκέντρωσης κοινού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας - Κτίσματα υψίστης αξίας	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	

Γ. ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ							
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	**ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΤΑΞΗ Ή ΒΑΘΜΟΣ / ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**	**ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**					**ΒΑΘΜΟΣ**
17. Εκτιμώμενος αριθμός επισφαλών τεμαχών	Β' Βαθμού / 0,045	Κανένα τέμαχος	1-5	5-10	>10		
Βαθμολογία		1	4	7	10		
18. Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Β' Βαθμού / 0,045	I	II	III			
Βαθμολογία		1	5	10			
19. Ιστορικό καταπτώσεων	Β' Βαθμού / 0,045	Λίγες έως καθόλου	Περιστασιακά	Αρκετές	Πολλές	Συνεχείς	
Βαθμολογία		1	2,5	5	7,5	10	
ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ							

Πίνακας 2.1.2. Παράμετροι και βαθμολογία επικινδυνότητας (Marinos et al. RHRS)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	I	II	III	IV	V
ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ **(Με το βαθμό βαρύτητας)**	<20 (<2)	20-60 (2-4)	60-100 (4-6)	100-150 (6-8)	150-190 (8-10)
ΒΑΘΜΟΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	Πολύ μικρός	Μικρός	Μέτριος	Μεγάλος	Πολύ μεγάλος
ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	Δεν είναι απαραίτητη η χρήση μέτρων προστασίας	Χρήση μέτρων προστασίας αν κριθεί σκόπιμο	Μερική εφαρμογή μέτρων προστασίας	Κρίνεται απαραίτητη η χρήση μέτρων σταθεροποίησης του πρανούς και προστασίας των κατασκευών κατάντη αυτού	Επιβάλλεται άμεση προστασία των υφιστάμενων κατασκευών – Χρήση κάθε εφαρμόσιμου μέτρου σταθεροποίησης

Πίνακας 2.1.3. Τελική κατηγορία επικινδυνότητας και μέτρα προστασίας (Marinos et al. RHRS)

2.1.4. National Highway Institute's Rock fall Hazard Risk Assessment (NHI RHRS)

Το NHI RHRS πραγματεύεται την κατηγοριοποίηση πρανών σε δύο φάσεις διεργασίας (Pierson και Van Vickle, 1993). Η πρώτη φάση περιλαμβάνει μια προκαταρκτική εκτίμηση, όπου πρανή έχουν τη διαβάθμιση A, B ή C, η οποία βασίζεται αρχικά στην πιθανότητα η βραχόμαζα να φτάσει στο οδόστρωμα και στη συνέχεια σε ιστορικά περιστατικά καταπτώσεων. Τα πρανή που κατατάσσονται στην κατηγορία A είναι τα πιο επικίνδυνα και χαρακτηρίζονται με μια λεπτομερή αξιολόγηση στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράγοντες:

- Ύψος πρανούς
- Πλάτος οδού
- Αποτελεσματικότητα της τάφρου ανάσχεσης
- Μέσος κίνδυνος του οχήματος
- Απόσταση ορατότητας – αντίδρασης/ Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης
- Γεωλογικός χαρακτήρας
- Μέγεθος τεμάχους/ Όγκος κατάπτωσης ανά περιστατικό
- Κλιματολογικοί παράγοντες/ Παρουσία νερού
- Ιστορικά περιστατικά καταπτώσεων

Οι παράγοντες που επηρεάζονται από τις γεωλογικές συνθήκες σε ένα πρανές οδοποιίας είναι ο γεωλογικός χαρακτήρας και το μέγεθος του τεμάχους. Ο γεωλογικός χαρακτήρας προσδιορίζει κατά πόσον ο τύπος κατολισθήσεων ελέγχεται από τη γεωλογική δομή ή τη διαφορική διάβρωση. Το μέγεθος του τεμάχους ελέγχεται από τον τύπο της βραχόμαζας, τις δομικές συνθήκες, όπως το μήκος και την απόσταση των διακλάσεων, και τις μεθόδους κατασκευής των πρανών οδοποιίας.

Η κατηγορία των γεωλογικών χαρακτήρων στο NHI RHRS (Pierson και Van Vickle, 1993) αξιολογεί τις γεωλογικές συνθήκες που συμβάλλουν στην εμφάνιση των καταπτώσεων στα πρανή οδοποιίας. Η κατηγορία των γεωλογικών χαρακτήρων στο NHI RHRS (Pierson και

Van Vickle, 1993), εξετάζει δύο περιπτώσεις (Πίνακας 2.1.3.1.). Η “Περίπτωση 1" περιλαμβάνει δύο παράγοντες: τη δομή του πετρώματος και τη τριβή της βραχόμαζας. Η δομική κατάσταση επιχειρεί να περιγράψει τη συσχέτιση του σχετικού προσανατολισμού και του μήκους των διακλάσεων στο πρανές οδοποιίας (Pierson και Van Vickle, 1993). Ασυνεχείς διακλάσεις ορίζονται αυτές με μήκος μικρότερο από 3.3 m, ενώ συνεχείς διακλάσεις ορίζονται αυτές με μήκος μεγαλύτερο από 3.3 m. Η τριβή της βραχόμαζας περιγράφει την ομαλότητα της επιφάνειας των διακλάσεων.

Οι ασυνέχειες που πληρούνται με άργιλο και είναι ολισθηρές τους αποδίδεται η μεγαλύτερη επικινδυνότητα, επειδή απαιτείται λιγότερη διατμητική τάση, για την υπέρβαση του συντελεστή τριβής. Η "Περίπτωση 2" εξετάζει δύο παράγοντες: τη δομική κατάσταση και τη διαφορά στο ρυθμό διάβρωσης. Η δομική κατάσταση περιγράφει τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της διάβρωσης ενός πρανούς οδοποιίας, και η διαφορά στο ρυθμό διάβρωσης περιγράφει τα χαρακτηριστικά του ρυθμού σχηματισμού επιφανειακής διάβρωσης (Pierson και Van Vickle, 1993), όπως προκύπτει από το ανάγλυφο, λόγω της αποσάθρωσης σε ένα μέτωπο πρανούς.

Γεωλογικά χαρακτηριστικά	**Χαμηλός κίνδυνος → Υψηλός κίνδυνος**			
Περίπτωση 1				
Δομή πετρώματος	Ασυνεχείς «γέφυρες», ευνοϊκός προσανατολισμός	Ασυνεχείς «γέφυρες», τυχαίος προσανατολισμός	Ασυνεχείς «γέφυρες», δυσμενής προσανατολισμός	Ασυνεχείς «γέφυρες», δυσμενής προσανατολισμός
Τριβή βράχου	Τραχιά, ανώμαλη	Κυματοειδής	Επίπεδη	Με άργιλο ή ολισθηρή
Περίπτωση 2				
Δομή πετρώματος	Λίγα χαρακτηριστικά διαφορικής διάβρωσης	Περιστασιακά χαρακτηριστικά διαφορικής διάβρωσης	Πολλά χαρακτηριστικά διαφορικής διάβρωσης	Πάρα πολλά χαρακτηριστικά διαφορικής διάβρωσης
Διαφορά στη διάβρωση	Μικρή διαφορά	Μέτρια διαφορά	Μεγάλη διαφορά	Ακραία διαφορά

Πίνακας 2.1.4. Παράμετροι και βαθμολογία επικινδυνότητας (NHI RHRS). Η Περίπτωση 1 αναφέρεται στις καταπτώσεις που σχετίζονται με τη δομική αστοχία, ενώ η Περίπτωση 2 αφορά τις καταπτώσεις που σχετίζονται με τη αστοχία λόγω διαφορικής διάβρωσης.

2.1.5. Tennessee Geologic Character Scoring System- (TennRHRS)

Ο Τομέας Μεταφορών του Τεννεσί ανέπτυξε ένα σύστημα εκτίμησης της επικινδυνότητας για βραχώδη πρανή το 2005. Το σύστημα του Τεννεσί είναι παρόμοιο με το σύστημα NHI. Παρόλα αυτά, τροποποιήθηκαν (3) τρεις κατηγορίες για την ακριβέστερη κατηγοριοποίηση των πρανών. Όπως και σε άλλα συστήματα σε κάθε παράμετρο του TRHRS αντιστοιχεί και μία βαθμολογία η οποία αυξάνεται εκθετικά από τους τρεις (3) έως τους ογδόντα ένα (81) βαθμούς.

Στο TennRHRS λαμβάνονται υπόψη πέντε (5) λειτουργίες καταπτώσεων: α) επίπεδη, β) σφήνας, γ) ανατροπή, δ) διαφορική διάβρωση και ε) ροή υλικού, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συνδυασμούς έξι (6) χαρακτηριστικών: περίσσεια, μέγεθος τεμάχους, κλίση, τριβή, ανάγλυφο και σχήμα τεμάχους. Η σχετική ποικιλία των τρόπων κατάπτωσης εκφράζεται ως το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του μετώπου του πρανούς όπου μπορεί να συντελεστούν οι τρόποι μεταφοράς. Στο Tennessee RHRS, το μέγεθος του τεμάχους ανήκει στα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Καθώς η επικινδυνότητα των καταπτώσεων αυξάνεται με την κλίση, η τριβή, η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό συνάρτηση της τραχύτητας, ελέγχει κατά πόσον η βραχόμαζα αστοχεί. Η τριβή πρώτης (επίπεδη ή κυματοειδής), καθώς και δεύτερης τάξης (ακατέργαστη ή λεία) αξιολογούνται σε ένα προφίλ παράλληλα με την πιθανή κατεύθυνση κίνησης της βραχώδους μάζας. Η τραχύτητα πρώτης τάξης (μακροκλίμακα) θεωρείται ότι έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην διατμητική αντοχή της βραχόμαζας. Η αστοχία λόγω ανατροπής απαιτεί οι ασυνέχειες να βυθίζονται στο μέτωπο του πρανούς (Norrish and Wyllie, 1996). Παρόλα αυτά ο βαθμός του απότομου ανάγλυφου των ασυνεχειών έχει συνήθως μικρή επίδραση σε αυτό το μηχανισμό κατάπτωσης. Επομένως η τραχύτητα του ανάγλυφου των ασυνεχειών δε λαμβάνεται υπόψη στο Tennessee RHRS για το μηχανισμό της ανατροπής. Επιπλέον, καθώς το παρεμβαλλόμενο φύλλο ολίσθησης έχει πολύ μικρό ποσοστό στην αντίσταση στην ανατροπή, η τριβή δε λαμβάνεται υπόψη στο Tennessee RHRS για το μηχανισμό ανατροπής.

Κάθε χαρακτηριστικό του συστήματος Tennessee βαθμολογήθηκε σύμφωνα με την προσέγγιση του NHI χρησιμοποιώντας τέσσερις κατηγορίες. Για τη ροή εδάφους, μόνο τρεις κατηγορίες χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμολόγηση, διότι έγινε αντιληπτό ότι η χρήση της τέταρτης κατηγορίας θα υπερεκτιμούσε την επικινδυνότητα. Ο τύπος της βραχόμαζας, η διασπασιμότητα, και το πάχος του εδαφικού στρώματος θα μπορούσαν να επηρεάσουν

το μέγεθος του τεμάχους, και η λιθολογική διακύμανση θα μπορούσε να επηρεάσει τον τρόπο και την περίσσεια της κατολίσθησης.

Στην αξιολόγηση των πρανών λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

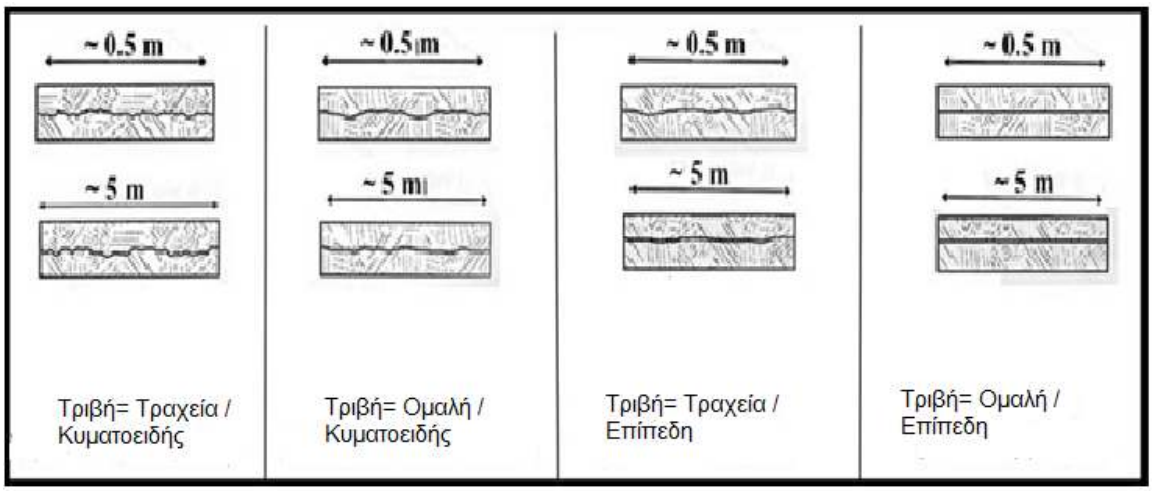
- Ύψος πρανούς
- Αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης
- Πάχος της οδού
- Γεωλογικά Χαρακτηριστικά
- Μέγεθος τεμάχους/ όγκος ανά περιστατικό κατάπτωσης
- Συχνότητα καταπτώσεων
- Κλίμα και παρουσία νερού στο πρανές
- Μέσος κίνδυνος οχήματος
- Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης

Τρόποι κατάπτωσης	**Συχνότητα**	**Μέγεθος τεμάχους**	**Κλίση**	**Τριβή**	**Αποτόνωση**	**Σχήμα τεμάχους**
Επίπεδη	x	x	x	x		
Σφηνοειδής	x	x	x	x		
Ανατροπή	x	x				
Διαφορική διάβρωση	x	x			x	
Ροή Υλικού	x	x				x

Πίνακας 2.1.5. Τρόποι κατάπτωσης και χαρακτηριστικά του συστήματος βαθμονόμησης Tennessee. Το x σημαίνει ότι το κριτήριο λαμβάνεται υπόψη στον εκάστοτε τρόπο κατάπτωσης.

Επίπεδη κατάπτωση				
Συχνότητα	<10%	10÷20%	20÷30%	>30%
Βαθμολογία	3	9	27	81
Μέγεθος τεμάχους	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Βαθμός απότομου ανάγλυφου	0÷20˚	20÷40˚	40÷60˚	>60˚
Βαθμολογία	2	5	14	41
Τριβή (micro/macro)	Τραχύς/ Κυματοειδής	Ομαλός/ Κυματοειδής	Τραχύς/ Επίπεδος	Ομαλός/ Επίπεδος
Βαθμολογία	2	5	14	41
Κατάπτωση σφήνας				
Συχνότητα	<10%	10÷20%	20÷30%	>30%
Βαθμολογία	3	9	27	81
Μέγεθος τεμάχους	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Βαθμός απότομου ανάγλυφου	0÷20˚	20÷40˚	40÷60˚	>60˚
Βαθμολογία	2	5	14	41
Τριβή (micro/macro)	Τραχύς/ Κυματοειδής	Ομαλός/ Κυματοειδής	Τραχύς/ Επίπεδος	Ομαλός/ Επίπεδος
Βαθμολογία	2	5	14	41
Ανατροπή				
Συχνότητα	<10%	10÷20%	20÷30%	>30%
Βαθμολογία	3	9	27	81
Μέγεθος τεμάχους	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Διαφορική διάβρωση				
Συχνότητα	<10%	10÷20%	20÷30%	>30%
Βαθμολογία	3	9	27	81
Μέγεθος τεμάχους	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Ανάγλυφο	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Ροή υλικού				
Συχνότητα	<10%	10÷20%	20÷30%	>30%
Βαθμολογία	3	9	27	81
Μέγεθος τεμάχους	<0.3 m	0.3÷0.9 m	0.9÷1.8 m	>1.8 m
Βαθμολογία	3	9	27	81
Σχήμα τεμάχους	Ορθογωνικό	Πολυεδρικό	Στρογγυλό	-
Βαθμολογία	3	9	27	-

Πίνακας 2.1.6. Παράμετροι των Γεωλογικών Χαρακτηριστικών και βαθμολογία επικινδυνότητας (TennRHRS)



Εικόνα 2.1.4.1. Οπτικό βοήθημα για τη βαθμονόμηση της τριβής. Οι όροι αναφέρονται σε μίκρο και μάκρο προφίλ τριβής αντίστοιχα (τροποποιημένο από τον Barton, 1973).

2.1.6. Three Gorges Rockfall Risk Assessment System (ASRFR)

Το σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας ASRFR περιλαμβάνει 15 παράγοντες, μεταξύ των οποίων επτά (7) παράγοντες για τη διακινδύνευση και οκτώ (8) παράγοντες για τις επιπτώσεις. Το μέγεθος του τεμάχους, οι συνοριακές συνθήκες ασταθούς βραχόμαζας, ο παράγοντας αποσάθρωσης (φυσική αποσάθρωση και χημική διάβρωση), η αντοχή του άρρηκτου βράχου (SIR), το δυνητικό υψόμετρο κατολίσθησης (PRA), η δομή της βραχόμαζας, η δυνητική τροχιά κατολίσθησης (PRMP), τα εμπόδια στο πρανές (OS), η κατανομή κορημάτων (SD), το σχήμα του τεμάχους (BS) και η παρουσία νερού στο βράχο μπορούν συχνά να μετρηθούν ή να περιγραφούν στη μελέτη πεδίου. Μερικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται συνήθως δεν υιοθετήθηκαν, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή είναι τόσο μικρή ώστε μερικοί παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις δε διαφέρουν ή μερικοί παράγοντες εκπροσωπούνται από άλλον παράγοντα, όπως η τεκτονική δομή. Οι οκτώ (8) παράγοντες που αφορούν τις επιπτώσεις είναι σχεδιασμένοι ειδικά για αυτό το σύστημα αξιολόγησης.

2.1.6.1. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακινδύνευσης

Το συνολικό βάρος των παραγόντων, που πιθανόν να προκαλέσουν κατολίσθηση (W) ορίστηκε με την παρακάτω εξίσωση:

W = γενικό βάρος του παράγοντα i - σχετική βαρύτητα του παράγοντα i (1)

Μετά τον υπολογισμό των συνολικών βαρών για κάθε παράγοντα κινδύνου για πιθανές κατολισθήσεις, αυτά τα βάρη προστίθενται και η συνολική αξία είναι η αρχική τιμή του κινδύνου. Όταν προστεθούν όλα τα βάρη των παραγόντων των επιπτώσεων των πιθανών κατολισθήσεων προκύπτει ότι η συνολική αξία είναι η αρχική τιμή των επιπτώσεων. Μετά από επεξεργασία της κάθε εν δυνάμει κατάπτωσης, όλες οι τιμές κίνδυνου και επιπτώσεων ομαλοποιούνται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Έτσι, η τιμή H μπορεί να θεωρηθεί ως η σχετική πιθανότητα της εμφάνισης επικινδυνότητας, και η C τιμή ως η πιθανότητα για τις συνέπειες. Σύμφωνα με το International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Luo et al. 1998), ισχύει ότι R = H – C, για την εύρεση της τελικής τιμής του κινδύνου. Επιλέγονται οι ανώτερες αποδεκτές τιμές R, έτσι ώστε να μπορούν να διαιρεθούν σε περίπου τρία ίσα μέρη. Επομένως, οι κίνδυνοι κατηγοριοποιούνται σε τρεις ζώνες, αντίστοιχα, που αντιπροσωπεύουν υψηλό κίνδυνο (33 τοποθεσίες), μεσαίο κίνδυνο (33 τοποθεσίες) και χαμηλό κίνδυνο (38 τοποθεσίες). Οι περισσότερες από αυτές τις επικίνδυνες μάζες βράχου έχουν υψηλότερη αντοχή άρρηκτου βράχου και το δυναμικό τους για κατάπτωση είναι αρκετά χαμηλότερο από εκείνο των περιοχών υψηλού κινδύνου. Ορισμένες τοποθεσίες έχουν υψηλό δείκτη επικινδυνότητας, αλλά χαμηλό δείκτη επιπτώσεων, και μερικές έχουν χαμηλό δείκτη επικινδυνότητας, αλλά υψηλό δείκτη επιπτώσεων. Οι περιοχές της ζώνης χαμηλού κινδύνου χαρακτηρίζονται από χαμηλούς δείκτες επικινδυνότητας και επιπτώσεων, αλλά έχουν απόκρημνη τοπογραφία και απότομα μέτωπα. Σε περίπτωση που υπάρχουν κάποια ενεργή δραστηριότητα όπως η διάβρωση ή η ανθρώπινη επέμβαση, μπορεί στο μέλλον να γίνουν ζώνες μεσαίου ή και υψηλού κινδύνου.

Σχήμα 2.1.1. Σχηματική παρουσίαση των παραγόντων των επιπτώσεων του ASRFR.

Παράγοντες επικινδυνότητας (Η)					
Μέγεθος τεμάχους	Μεγάλο μέγεθος τεμάχους και μέση απόσταση ασυνεχειών>1.5m				0.25
	Μεσαίο μέγεθος τεμάχους και μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.8m				0.5
	Μικρό μέγεθος τεμάχους και μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.3m				0.75
	Μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.15m				1
Συνοριακές συνθήκες ασταθούς βραχόμαζας	Διαμορφώνεται τρισδιάστατο όριο τεμάχους, ενεργό				1
	Διαμορφώνεται τρισδιάστατο όριο τεμάχους, μη ενεργό				0.8
	Τεμάχη με τέσσερεις πλευρές				0.6
	Τεμάχη με τρεις πλευρές				0.4
	Τεμάχη με δυο πλευρές				0.2
Ανθρώπινη δραστηριότητα	Έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. τεχνητά πρανή, ορυχεία)				1
	Μέτρια ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. επίδραση της φόρτισης)				0.75
	Ανεπαίσθητη ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. μεταφορά)				0.5
	Μηδενική ανθρώπινη δραστηριότητα				0.25
Χαρακτηριστικά διάβρωσης	Πλήρης διάβρωση, διαφορική διάβρωση είναι εμφανής στην περιοχή, επικρατεί η χημική διάβρωση				1
	Αρκετή διάβρωση, διαφορική διάβρωση κατά τμήματα, επικρατεί η χημική διάβρωση				0.75
	Μέτρια διάβρωση, ελάχιστη διαφορική διάβρωση, επικρατεί μικρότερη χημική διάβρωση				0.5
	Ελάχιστη διάβρωση, ο ρυθμός της διάβρωσης είναι πολύ χαμηλός				0.25
Αντοχή άρρηκτου βράχου (MPa)	50	40	30	20	10
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Δομή βραχόμαζας	Παχιά στρώματα	Στρώσεις	Λεπτή στρωμάτωση		Φύλλωση
	0.25	0.5	0.75		1
Νερό στο μέτωπο πρανούς	Ξηρό	Με υγρασία	Υγρό	Με μικρή ροή	Μεγάλη ροή
	0.2	0.4	0.6	0.8	1

Πίνακας 2.1.7. Οι παράγοντες διακινδύνευσης και οι αντίστοιχες βαθμολογίες τους (ASRFR).

Παράγοντες επιπτώσεων (C)					
Συχνότητα διερχόμενων πλοίων και αποβάθρες κατά μήκος του ποταμού	Προβλήτα	Προσωρινή Προβλήτα		6 min/S	12 min/S
	1	0.75		0.5	0.25
Τροχιά της κατάπτωσης	Γραμμική	20	40	60	80
		0.2	0.4	0.8	1
	Παραβολική				
		0.8	0.6	0.4	0.2
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης	Πολύ περιορισμένη. Ο λόφος ή η βλάστηση μειώνουν την ορατότητα.				1
	Περιορισμένη. Οι άνθρωποι μπορούν να δουν κάποιο τμήμα της πιθανής κατάπτωσης.				0.75
	Οι άνθρωποι μπορούν να δουν την πιθανή κατάπτωση, αλλά όχι την πιθανή τροχιά της.				0.5
	Χωρίς κανένα εμπόδιο, ο οδηγός μπορεί να δει ολόκληρη την κατάπτωση και την πιθανή τροχιά της.				0.25
Μέγεθος τεμάχους	Μεγάλου μεγέθους τέμαχος και μέση απόσταση ασυνεχειών > 1.5 m				1
	Μεσαίου μεγέθους τέμαχος και μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.8 m				0.75
	Μικρού μεγέθους τέμαχος και μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.3 m				0.5
	Μέση απόσταση ασυνεχειών περίπου 0.15 m				0.25
Πιθανό υψόμετρο έναρξης των καταπτώσεων (m)	10	30	60	90	> 120
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Κατανομή κορημάτων	Συγκεντρωμένα κορήματα		Διασκορπισμένα κορήματα		Καθόλου κορήματα
	0.3		0.6		1
Πιθανό σχήμα του όγκου κατάπτωσης	Πλακοειδές		Κυβικό		Σφαιρικό
	0.3		0.6		1
Εμπόδια στο πρανές	Τεράστιοι βράχοι και μεγάλα δέντρα	Δέντρα	Πόες	Γρασίδι	Καθόλου εμπόδια
	0.2	0.4	0.6	0.8	1

Πίνακας 2.1.8. Οι παράγοντες επιπτώσεων και οι αντίστοιχες βαθμολογίες τους (ASRFR).

2.1.7. Modification and statistical analysis of the Colorado Rock fall Hazard Rating System

Το Colorado RHRS περιέχει τέσσερεις (4) διαφορετικές κατηγορίες που συμβάλλουν στην εκδήλωση καταπτώσεων: οι συνθήκες του πρανούς, οι κλιματικές συνθήκες, οι γεωλογικές συνθήκες και οι συνθήκες ασυνέχειας. Υπάρχει μια πέμπτη κατηγορία που βαθμολογείται ξεχωριστά για τον κίνδυνο και αποτελείται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στο σύστημα αυτό είναι γενικά εκείνες που έχουν γίνει δεκτές και έχουν επικυρωθεί από άλλες υπηρεσίες μεταφορών της πολιτείας του Colorado.

1. ***Συνθήκες πρανούς***

1.1. Ύψος πρανούς

1.2. Συχνότητα καταπτώσεων

1.3. Μέση κλίση πρανούς

1.4. Γενικοί παράγοντες εκκίνησης του φαινομένου

1.5. Αποτελεσματικότητα τάφρου ανάσχεσης

2. ***Κλιματολογικές συνθήκες***

2.1. Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης

2.2. Κύκλος παγετού/ τήξης

2.3. Διήθηση / Νερό

2.4. Προσανατολισμός πρανούς

3. ***Γεωλογικές συνθήκες***

3.1. Ιζηματογενή πετρώματα: *Βαθμός απόκλισης*

3.2. Ιζηματογενή πετρώματα: *Δείκτης αποσάθρωσης*

3.3. Ιζηματογενή πετρώματα: *Βαθμός διαστρωμάτωσης*

3.4. Κρυσταλλικό πέτρωμα: *Χαρακτήρας βραχόμαζας*

3.5. Κρυσταλλικό *πέτρωμα*: Βαθμός προεξοχής

3.6. Κρυσταλλικό *πέτρωμα*: Βαθμός διάβρωσης

3.7. Ασυνέχειες: Μέγεθος τεμάχους/ Όγκος

3.8. Ασυνέχειες: Αριθμός των συνόλων

3.9. Ασυνέχειες: Εμμονή και προσανατολισμός

3.10. Ασυνέχειες: Άνοιγμα

3.11. Ασυνέχειες: Κατάσταση αποσάθρωσης

3.12. Ασυνέχειες: Τριβή

3.13. Block-in-matrix: Πολλαπλασιαστής / *Block-in-matrix*

3.14. Block-in-matrix: Μέγεθος τεμάχους

3.15. Block-in-matrix: Σχήμα τεμάχους

3.16. *Block-in-matrix: B*λάστηση

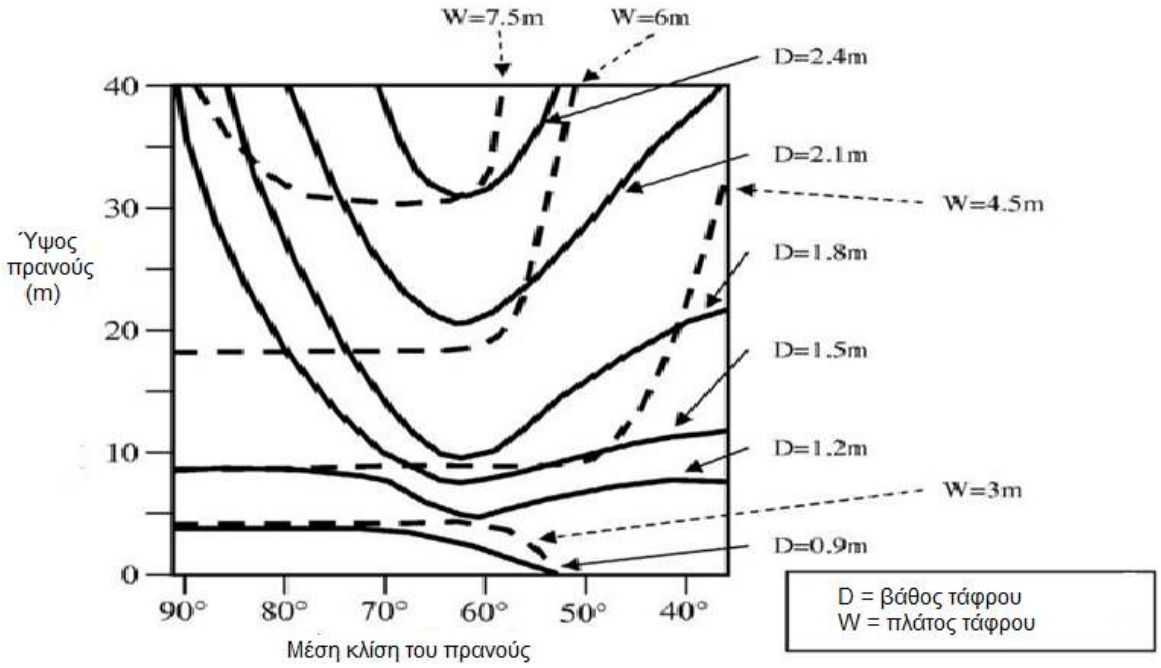
4. Κυκλοφοριακές συνθήκες

4.1. *Απόσταση ορατότητας*

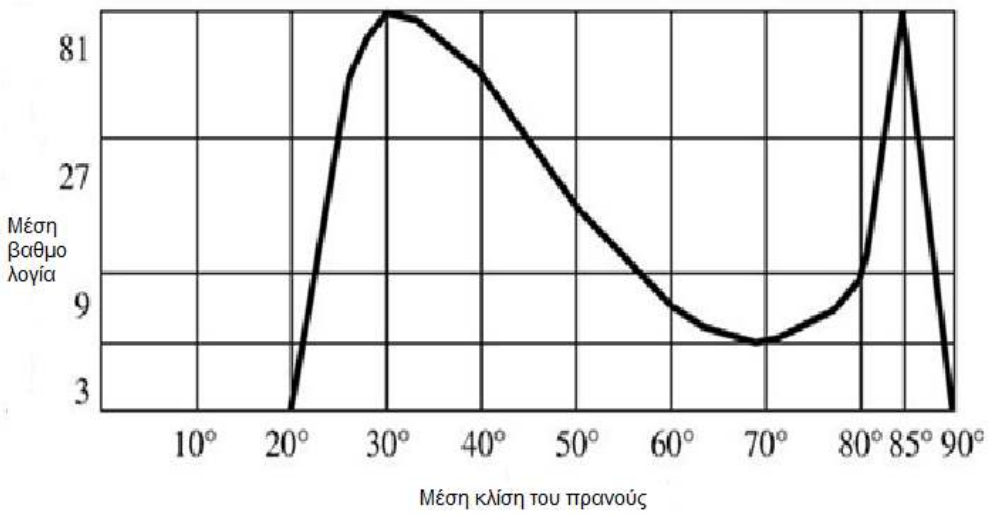
4.2. Μέσος κίνδυνος οχήματος

4.3. Αριθμός ατυχημάτων

Η κατηγορία block-in-matrix περιλαμβάνει κολλουβιακές αποθέσεις, αποθέσεις από ροή υλικού και από παγετώνες, όπου η διάβρωση του μητρικού υλικού και η επακόλουθη ανατροπή των μεγάλων τεμαχών τείνουν να ελέγξουν την κατάπτωση.



Εικόνα 2.1.2 Ritchie (1963): Παραδοχές σχεδίασης τάφρων, όσον αφορά το κατάλληλο πλάτος και βάθος για διάφορες τιμές υψών και κλίσεων του πρανούς.



Εικόνα 2.1.3. Η βαθμολογία για τη μέση κλίση του πρανούς, ως συνάρτηση της μέσης κλίσης του πρανούς (τροποποιημένο από Maerz et al., 2005).

			3 βαθμοί	9 βαθμοί	27 βαθμοί	81 βαθμοί
Πρανές	**Ύψος πρανούς**		7.5÷15 m	15÷22.5 m	22.5÷30 m	>30 m
	Συχνότητα βραχοπτώσεων		>2 έτη	1÷2 έτη	Ετήσια, εποχιακά	Ετήσια/σοβαρά περιστατικά
	Μέση τιμή της γωνίας του πρανούς		0÷2	2÷4	4÷8	>8
	Γενικοί παράγοντες εκκίνησης		Κανένας (λείο πρανές)	Ασήμαντος (<0.6 m επιφ. διακύμανση)	Πολλά (0.6÷1.8 m επιφ. διακύμανση)	Πάρα πολλοί(>1.8 m επιφ. διακύμανση)
	Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης		95%÷100 % (1η τάξη)	65%÷94% (2η τάξη)	30%÷64% (3η τάξη)	<30% (4η τάξη ≥ Πάρα πολλοί παράγοντες εκκ.)
Κλιματολογικοί παράγοντες	**Ετήσια βροχόπτωση**		<250 mm	250÷500 mm	500÷900 mm	>900 mm
	Ετήσιοι κύκλοι παγετού/τήξης		1÷5	6÷10	11÷15	>16
	Διήθηση/ Νερό		Ξηρό	Υγρό/ Νωπό	Κορεσμός	Τρεχούμενο νερό
	Προσανατολισμός πρανούς		Β	Α, Δ, ΒΑ, ΒΔ	ΝΑ, ΝΔ	Ν
Γεωλογικές συνθήκες	**Ιζηματογενή πετρώματα**	**Βαθμός απόκλισης**	0.0÷0.3 m	0.3÷0.6 m	0.6÷1.2 m	>1.2 m
		Δείκτης αποσάθρωσης	6	5	3÷4	1÷2
		Βαθμός διαστρωμάτωσης	1÷2 ασθενείς στρώσεις, <15 cm	1÷2 ασθενείς στρώσεις, >15 cm	>2 ασθενείς στρώσεις, <15 cm	>2 ασθενείς στρώσεις, > 15 cm
	Κρυσταλλικά πετρώματα	**Χαρακτήρας βραχόμαζας**	Ομογενής	Μικρές ασυνέχειες	Ζώνες διάτμησης σχιστολίθου< 15 cm	Πιγματίτες μικρής αντοχής/μαρμαρυγίες/ ζώνες διάτμησης> 15 cm
		Βαθμός προεξοχής	0.0÷0.3 m	0.3÷0.6 m	0.6÷1.2 m	> 1.2 m

		Βαθμός διάβρωσης	Υγιής	Ελαφρια αποσάθρωση	Μέτρια αποσάθρωση	Πολύ έντονη αποσάθρωση
	Ασυνέχειες	**Μέγεθος τεμάχους/ Όγκος**	<0.3 m / <0.75 m³	0.3-0.6 m / 0.75÷2.3 m³	0.6-1.5 m / 2.3÷7.6 m³	>1.5 m / >7.6 m³
		Αριθμός των συνόλων	0	1	2	>2
		Εμμονή, προσανατολισμός	<3 m κλίση προς το πρανές	>3 m κλίση προς το πρανές	<3 m, το αντίρροπη απο το πρανές	>3 m, αντίρροπη απο το πρανές
		Άνοιγμα	Κλειστό	0.1÷1 mm	1÷5 mm	> 5 mm
		Κατάσταση αποσάθρωσης	Υγιής	Ελαφρια αποσάθρωση	Πλήρωση με ασύνδετο υλικό	Αργιλικό υλικό πλήρωσης
		Τριβή	Τραχεία	Κυματοειδής	Επίπεδη	Αργιλικό υλικό πλήρωσης
	Block in matrix	**Μέγεθος τεμάχους (x3)**	< 0.3 m	0.3÷0.6 m	0.6÷1.5 m	> 1.5 m
		Σχήμα τεμάχους (x3)	Ορθογωνικό	Τεμαχισμένο	Τεμαχισμένο έως ακανόνιστο	Ομαλό
		Βλάστηση (x3)	Πλήρης βλάστηση	Ακανόνιστη βλάστηση	Μεμονωμένα φυτά	Καθόλου
Συνολική βαθμολογία διακινδύνευσης :						
Κυκλοφορια κοί παράγοντες	**Απόσταση ορατότητας**		> 80%	60%÷80%	40%÷60%	< 40%
	Μέσος κίνδυνος οχήματος		0%÷24 %	25%÷49%	50%÷74%	>75%
	Αριθμός ατυχημάτων		0÷2	3÷5	6÷8	>9
Συνολική βαθμολογία κινδύνου :						

Πίνακας 2.1.9. Παράμετροι και βαθμολογία επικινδυνότητας (Colorado RHRS)

Σε μια προσπάθεια για την κατάταξη των πρανών σε κατηγορίες επικινδυνότητας, οι Santi et al (2008) συνέταξαν τον ακόλουθο πίνακα, σύμφωνα με τον οποίο τα πρανή κατατάσσονται σε κατηγορίες επικινδυνότητας ανάλογα με το πέτρωμα από το οποίο αποτελούνται και τη συνολική βαθμολογία που συγκέντρωσαν.

Κρυσταλλικά τεχνητά πρανή			
Συνολική βαθμολογία	0÷549	550÷699	≥ 700
Κατάταξη επικινδυνότητας	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Κωδικός	3	2	1
Αριθμός πρανών	31	44	31
Κρυσταλλικά ολικά πρανή			
Συνολική βαθμολογία	0÷699	700÷799	≥ 800
Κατάταξη επικινδυνότητας	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Κωδικός	3	2	1
Αριθμός πρανών	15	21	15
Block-in-matrix πρανή			
Συνολική βαθμολογία	0÷449	450÷599	≥ 600
Κατάταξη επικινδυνότητας	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Κωδικός	3	2	1
Αριθμός πρανών	10	14	11

Πίνακας 2.1.10. Τελική κατάταξη των πρανών ως προς την επικινδυνότητα με βάση το σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008).

2.1.8. WSDOT's Unstable Slope Management Program (USMS)

Σκοπός αυτού του προγράμματος είναι η μείωση του κινδύνου καταπτώσεων κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων της Ουάσινγκτον. Η μελέτη για την εξαγωγή αυτού του συστήματος ξεκίνησε το 1995. Το σύστημα αυτό εστιάζει στην εξισορρόπηση μεταξύ της επικινδυνότητας και του κινδύνου για τα πιο επικίνδυνα πρανή (τεχνητά και συνολικά πρανή) για τη λήψη των αποδοτικότερων και οικονομικότερων μέτρων προστασίας.

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη τόσο για την κατάταξη των πρανών όσο και για την βαθμολογία της επικινδυνότητας είναι:

- Μέση ημερήσια κυκλοφορία
- Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης- ορατότητα
- Επίδραση της κατάπτωσης στην οδό
- Μέσος κίνδυνος οχήματος
- Συχνότητα καταπτώσεων
- Ζημία οδοστρώματος
- Ετήσιο κόστος συντήρησης
- Ατυχήματα την τελευταία δεκαετία
- Ύψος πρανούς
- Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης
- Πλάτος οδού
- Μέγεθος τεμάχους/ όγκος κατάπτωσης

Κατηγορία	3 βαθμοί	9 βαθμοί	27 βαθμοί	81 βαθμοί
Όγκος κατάπτωσης-αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	Μικρή κατάπτωση-καλή συγκράτηση	Μέτρια κατάπτωση-Εύλογη συγκράτηση	Σημαντική κατάπτωση-Μικρή συγκράτηση	Σημαντική κατάπτωση - Μηδενική συγκράτηση
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	< 5,000	5,000÷20,000	20,000÷40,000	> 40,000
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης-Ορατότητα	Επαρκής	Μέτρια	Περιορισμένη	Πολύ περιορισμένη
Επίδραση της κατάπτωσης στην οδό	< 15.24 m	15.24÷60.95 m	60.95÷152.4 m	> 152.4 m
Εμπέδηση οδοστρώματος	Μόνο το έρεισμα	1/2 της οδού	3/4 της οδού	Όλη η οδός
Μέσος κίνδυνος οχήματος	< 25% του χρόνου	25%÷50% του χρόνου	50%÷75% του χρόνου	> 75% του χρόνου
Ζημία οδοστρώματος	Ελάχιστη-μη ορατή	Μέτρια- ο οδηγός πρέπει να ελαττώσει ταχύτητα	Σοβαρή- ο οδηγός πρέπει να σταματήσει	Τεράστια-απροσπέλαστη η οδός
Συχνότητα καταπτώσεων	Καμία κατάπτωση τα τελευταία 5 έτη	1 περιστατικό τα τελευταία 5 έτη	1 περιστατικό ανά έτος	Παραπάνω από 1 περιστατικό ανά έτος
Ετήσιο κόστος συντήρησης	< 5,000 $	5,000÷10,000 $	10,000÷50,000 $	> 50,000 $
Οικονομικός παράγοντας	Χωρίς παράκαμψη	Μικρές παρακάμψεις< 4.8 km	Μεγάλες παρακάμψεις > 4.8 km	Αποκλειστική πρόσβαση- όχι παρακάμψεις
Ατυχήματα την τελευταία δεκαετία	0÷1	2÷3	4÷5	>5

Πίνακας 2.1.11 Παράμετροι και βαθμολογία για την κατάταξη πρανών (WSDOT's USMS)

Κατηγορία	3 βαθμοί	9 βαθμοί	27 βαθμοί	81 βαθμοί
Ύψος πρανούς	<7.5 m	7.5÷15 m	15÷22.5 m	>22.5 m
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	Καλή	Μέτρια	Περιορισμένη	Καθόλου
Συνολικό πλάτος οδού	< 12.2 m	9.75 m	7.32 m	< 7.32 m
Συχνότητα καταπτώσεων	Λίγες καταπτώσεις	Περιστασιακές καταπτώσεις	Πολλές καταπτώσεις	Συνεχείς καταπτώσεις
Συχνότητα συντήρησης ανά έτος	< 1	1÷3	4÷5	> 5
Μέγεθος τεμάχους	< 0.3 m	0.3÷0.61 m	0.61÷0.91 m	> 0.91 m
Όγκος αποσπώμενων τεμαχών ανά έτος	< 2.3 m^3	2.3÷4.6 m^3	4.6÷7.65 m^3	> 7.65 m^3
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	< 500	500÷2750	2751÷5000	> 5000

Πίνακας 2.1.12. Παράμετροι και βαθμολογία επικινδυνότητας (WSDOT's USMS)

2.1.9. CN Rock fall Hazard Risk Management System

Το CN RHRA έχει σχεδιαστεί (1996-1997) για να βαθμολογήσει τον κίνδυνο εκτροχιασμού από τα τεχνητά πρανή των σιδηροδρόμων, ή και τα φυσικά πρανή βράχου που μπορεί να είναι ορατά από τον δρόμο. Ακολουθεί ένα δένδρο λήψης αποφάσεων όσον αφορά το συγκεκριμένο ποιοτικό σύστημα βαθμονόμησης.

Έναρξη: Απόφαση χρήσης proactive risk management για τη σωστή διευθέτηση του κεφαλαίου/προϋπολογισμού για τη σταθεροποίηση των πρανών. Δημιουργία της ομάδας διαχείρισης κινδύνου CN/BGC/OA.

Πρωταρχική ανάλυση: Διαπίστωση ότι η κατάπτωση βραχόμαζας αποτελεί σημαντική πηγή κινδύνου. Αρχική διαμόρφωση της βάσης δεδομένων.

Υπολογισμός κινδύνου: Ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την εκτίμηση του κινδύνου και της επικινδυνότητας των καταπτώσεων βραχόμαζας και εφαρμογή σε όλα τα βραχώδη πρανή. Ανάπτυξη του πρωτοκόλλου της συχνότητας των επιθεωρήσεων και εφαρμογή σε ετήσια διάταξη. (Συχνότητα ετήσια, <3 έτη, <5 έτη, <10 έτη)

Αξιολόγηση κινδύνου: Κατάταξη των περιοχών με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης και τον κίνδυνο και διάθεση του ετήσιου κεφαλαίου για τη σταθεροποίηση των πρανών με τη μεγαλύτερη βαθμολογία.

Έλεγχος κινδύνου: Διάκριση των εφικτών μέτρων ελέγχου του κινδύνου για τις περιοχές που έχουν προτεραιότητα (κάνναβος, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, συστήματα αναχαίτισης, συστήματα προειδοποίησης). Αξιολόγηση των μέτρων όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, το κόστος και τον κίνδυνο.

Εφαρμογή: Εφαρμογή των επιλεγμένων μέτρων ελέγχου του κινδύνου.

Παρακολούθηση-Εξέλιξη: Αναβαθμολόγηση των βραχωδών πρανών για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων ελέγχου του κινδύνου. Επανάληψη της διαδικασίας κάθε χρόνο ξεκινώντας με επιθεωρήσεις.

Risk communication: Βαθμολόγηση και περιστατικά καταπτώσεων βραχόμαζας, επιθεώρηση και ολοκλήρωση αναφορών και δημοσίευσή τους στο δίκτυο.

Η εξίσωση (1) παρέχει τη θεμελιώδη διατύπωση για τον κίνδυνο. Οι σημειώσεις i έως iii παρέχουν τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται για την RHRA, οι οποίοι ακολουθούν τα πρότυπα των Wong, et. al. (1998):

Κίνδυνος = Πιθανότητα εκδήλωσης της επικινδυνότητας x Ευπάθεια x Συνέπεια (1)

Επικινδυνότητα = Βραχόπτωση

Πιθανότητα εκδήλωσης της επικινδυνότητας = Συχνότητα βραχοπτώσεων, (RF) (Rockfall Frequency)

Ευπάθεια = (V_{spat} * V_{temp} * V_{loss}) = Επικινδυνότητα εκτροχιασμού, (DH) (Derailment Hazard)

όπου:

- Vspat = η πιθανότητα της επίδρασης του φαινομένου στο χώρο- probability of spatial impact (στη συγκεκριμένη περίπτωση, η πιθανότητα να φτάσουν στη σιδηροτροχιά τεμάχη βράχου)
- Vtemp = η πιθανότητα της επίδρασης του φαινομένου στο χρόνο- probability of temporal impact (στη συγκεκριμένη περίπτωση, η πιθανότητα πρόσκρουσης του τρένου με τεμάχη βράχου και εκφράζεται ως ο συντελεστής αποφυγής (AF), (Avoidance Factor))
- Vloss = η πιθανότητα απώλειας (στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δεδομένη επίδραση της κατολίσθησης στον εκτροχιασμό των τρένων).
- Επίπτωση = Συντελεστής Επίπτωσης,(CF),(Consequence Factor) = Δριμύτητα της απώλειας

Κίνδυνος εκτροχιασμού λόγω κατάπτωσης (DRR) = (RF) x (DR x (AF)) x (CF) (2)

Ο Κίνδυνος Εκτροχιασμού (DR) (Derailment Risk), αποτελεί ένα μέτρο της πιθανότητας εκτροχιασμού δεδομένης της παρουσίας ενός συγκεκριμένου όγκου βραχοτεμαχίων σε συγκεκριμένη θέση και περιλαμβάνει τις έννοιες Vspat και Vloss.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το σύστημα υπολογίζεται ο κίνδυνος το τρένο να συναντήσει τεμάχη βραχόμαζας κατά τη διαδρομή του και όχι ο κίνδυνος πρόσκρουσης της βραχόμαζας κατά την κατάπτωσή της στο τρένο. Αυτή η θεώρηση γίνεται διότι το δεύτερο γεγονός έχει πολύ λιγότερες πιθανότητες να συμβεί σε σχέση με το πρώτο.

Ο κίνδυνος εκτροχιασμού (DR) είναι μια συνάρτηση της πιθανότητας κατάπτωσης ορισμένης βραχόμαζας, της πιθανότητας να φθάσουν τα τεμάχη στην τροχιά του τρένου και της πιθανότητας αυτά τα τεμάχη να έχουν γεωμετρία τέτοια, που να καθίσταται επικίνδυνη για τα τρένα.

DR = j [PVn * (PTVn) * (PF|Vn,Pn) * (PD|Vn,Pn)] (3)

όπου:

- PVn = η σχετική πιθανότητα ενός δεδομένου όγκου βράχου να βρίσκεται στο πρανές.
- PT|Vn = η πιθανότητα ενός όγκου “n” βράχου να αποκολληθεί από το πρανές και να φτάσει στο σιδηρόδρομο.
- PF|Vn,Pn = η πιθανότητα ένα τμήμα του όγκου με συγκεκριμένο μέγεθος να φτάσει στην τροχιά του τρένου. Αυτό αποτελεί μια προσέγγιση του συνολικού μεγέθους των κορημάτων της επικείμενης κατάπτωσης.
- PD|Vn,Pn = η πιθανότητα εκτροχιασμού από ένα δεδομένο όγκο βράχου, ο οποίος έχει πέσει στο σιδηρόδρομο.

Καθώς ο κίνδυνος για τον εκτροχιασμό των τρένων αυξάνεται με την αύξηση του όγκου κατάπτωσης, για τον προσδιορισμό της τιμής του DR έγιναν υπολογισμοί για τρεις διαφορετικούς αρχικούς όγκους.

$V1<1m^3$, $1m^3<V2<3m^3$ και $V3>3m^3$

Ως αρχικός όγκος Vn, ορίζεται ως ο όγκος του βράχου, ο οποίος είτε λόγω δυσμενή προσανατολισμού των ασυνεχειών είτε λόγω διαφόρων άλλων παραγόντων μπορεί να αποκολληθεί.

Η βάση δεδομένων RHRA υπολογίζει την τιμή του κινδύνου εκτροχιασμού (DH). Αυτό είναι ένα μέτρο της πιθανότητας να προκληθεί εκτροχιασμός σε περίπτωση πρόσκρουσης του τρένου με συντρίμμια από ένα συγκεκριμένο όγκο απελευθέρωσης καταπτώσεων με μια αναμενόμενη κατανομή μεγέθους τεμαχών στο

επίπεδο της τροχιάς. Αυτό είναι μόνο ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον μετριασμό της κατανομής των καταπτώσεων. Ωστόσο, η αριθμητική τιμή (DH) δεν κρίνει το πόσο συχνά οι εν λόγω καταπτώσεις είναι εφικτές και δεν εξετάζει τις πιθανές συνέπειες για την αμαξοστοιχία μετά από τον εκτροχιασμό. Χωρίς αυτούς τους παράγοντες, η βαθμολόγηση αξιολογεί την πιθανότητα η αμαξοστοιχία να εκτροχιαστεί σε περίπτωση που συμβεί κατολίσθηση, αλλά δεν εκτιμά τον κίνδυνο καταπτώσεων σε σχέση με τα τρένα. Η βάση δεδομένων αξιολόγησης κατολισθήσεων περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα των κατολισθήσεων (οι εκτιμήσεις γίνονται κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης, και βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα που συλλέγονται από το προσωπικό συντήρησης της γραμμής), και των συνεπειών τους (βαθμολογείται με τέσσερα επίπεδα σοβαρότητας), αλλά η ένταξη αυτών των παραμέτρων σε έναν υπολογισμό του κινδύνου δεν έγινε κατά τη διάρκεια της αρχικής υλοποίησης του συστήματος.

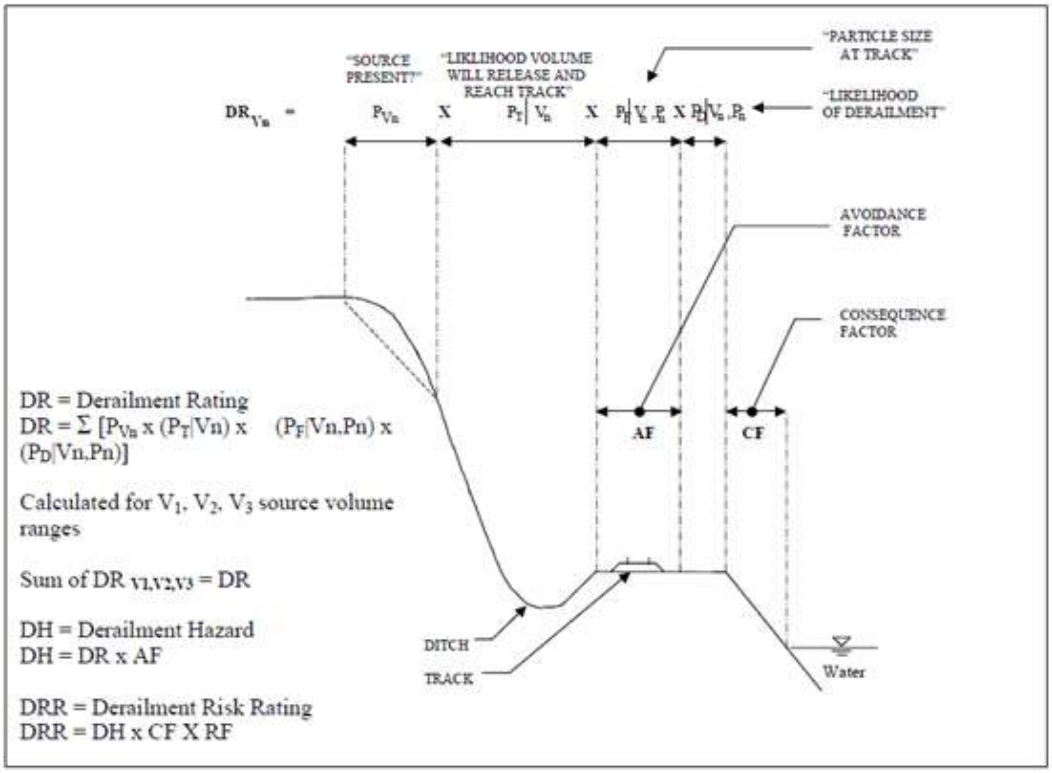
Η ανάλυση χρησιμοποιεί βαθμωτά ισοδύναμα (τιμές μεταξύ 0 και 1) για καθεμία από τις εκτιμήσεις συχνότητας κατολισθήσεων και εκτιμήσεις των συνεπειών και πολλαπλασιάζει τη βαθμολογία DH από αυτή τη βαθμονόμηση, ώστε να καθοριστεί η βαθμολογία του κινδύνου εκτροχιασμού (DRR). Ο πίνακας 1 συνοψίζει τις επιλεγμένες βαθμονομήσεις. Γενικά στην αξιολόγηση λήφθηκαν υπόψη τα πρανή με τα δυσμενέστερα χαρακτηριστικά.

Συχνότητα καταπτώσεων	**Επιπτώσεις**		
Κατηγορίες βαθμονόμησης	**Υπολογισμός βαθμονόμησης του κινδύνου**	**Αξία βαθμολόγησης**	**Υπολογισμός βαθμονόμησης του κινδύνου**
< Μηνιαία (περισσότερες από 11 ανά έτος)	1	D	1
< Ετήσια (1 μέχρι 11 ανά έτος)	0.8	C	0.7
< 10 Ετήσια (1 ανά έτος μέχρι 1 ανά 10 έτη)	0.6	B	0.4
> 10 Ετήσια (< 1 ανά 10 έτη)	0.6	A	0.2

Πίνακας 2.1.13. Βαθμονόμηση των επιπτώσεων και της συχνότητας για τη συνολικό κίνδυνο εκτροχιασμού (CN RHRS).

DH	DR	P_{Vn} Σ	Relative probability of a source volume of rock belonging to one of three categories: $V_1<1m^3$, $1m^3<V_2<3m^3$, and $V_3>3m^3$. The whole slope area in an interval is proportioned among the three volume ranges.
		$P_T\|V_n$ X	For each source volume, the likelihood it will release and reach the track. A function of: Geology – favors stability or not; Mitigation (e.g. bolts) – effective or not. Barriers (e.g. ditch, bench) – effective or not.
		$P_F\|V_n,P_n$ Σ	The relative probability of the largest particle dimension from the source volume falling into one of three categories: $P_1<0.3m$, $0.3m<P_2<1m$, and $P_3>1m$. Similar to P_{Vn}, it is a relative measure and the summation of $(P_F\|Vn,P_1)$ through $(P_F\|Vn,P_3)$ is always unity.
			This term recognizes that for similar source volumes, cobble size rock on the track from a fall of more closely jointed rock mass is less hazardous than large boulders from a fall of more widely jointed rock mass. Example: <0.3m = 0.15 is worse than <0.3m = 0.70m >0.3m, <1.0m = 0.70 >0.3m, <1.0m = 0.15 >1.0m = 0.15 >1.0m = 0.15
		$P_D\|V_n,P_n$	Probability of a derailment given a certain volume of rock of a certain particle size distribution has reached the track. Primarily considers: a) lateral deflection space: is there room for the train to push the rock aside? b) concentration of debris: concentrated debris is worse than scattered; c) particle shape: slab shaped particles are more likely to wedge under a locomotive and derail it; and d) high impact energy: assumed to break the rail and the central traffic control circuit (CTC), sending a warning through the signals system.
	AF	TSF X	Train Speed Factor: Function of train kinetic energy (i.e. proportional to the square of posted track speed). Trains are more likely to derail at higher impact speeds.
		SDF	Slide Detector Fence factor: Presence of this rockfall warning device lowers the likelihood that a train will strike rockfall debris.
X CF			Consequence factor: Severity of consequence is determined by: proximity to water, distance between the track and track embankment crest, the presence of railway or other infrastructure (tunnels, bridges, highways, dwellings), and the likelihood that cargo would reach the water body. Four levels (A = least severe, through D = most severe) each with numeric value between 0 and 1.0.
X RF			Rockfall Frequency: four ranges considered, each with a numeric scalar value between 0 and 1.0.
= DRR			

Σχήμα 2.1.4. Τα απαιτούμενα στάδια για τον υπολογισμό του κινδύνου εκτροχιασμού και οι ορισμοί των βασικότερων εννοιών.



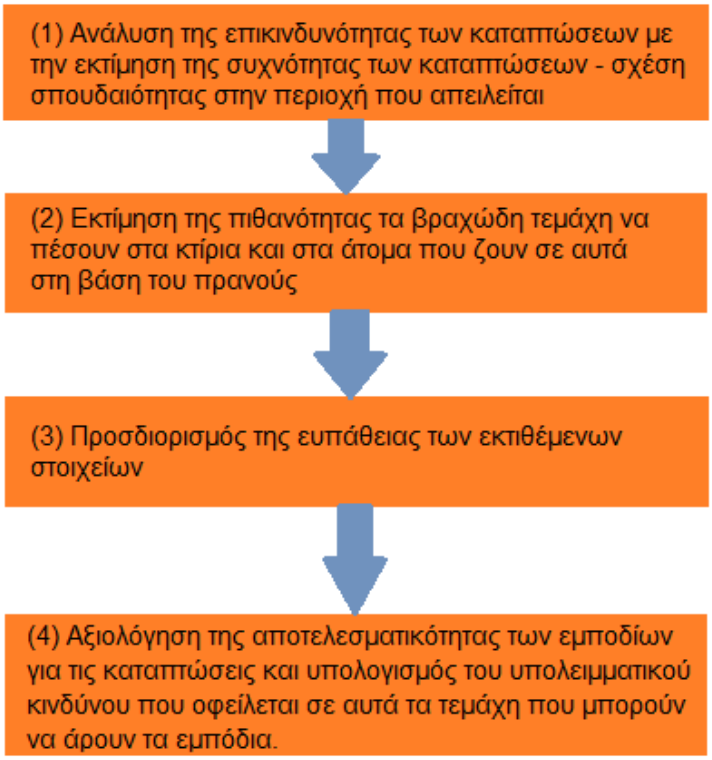
Σχήμα 2.1.5. Σχηματική παρουσίαση του υπολογισμού της τιμής του κινδύνου εκτροχιασμού.

2.1.10. Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area

Αυτό το ποιοτικό σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας βραχωδών πρανών συντάχθηκε το 2005 για το πρανές Sol`a d'Andorra, στο Πριγκιπάτο της Ανδόρας. Το Πριγκιπάτο της Ανδόρας είναι μια μικρή χώρα των 468 km², που βρίσκεται στην καρδιά των Πυρηναίων μεταξύ Γαλλίας και Ισπανίας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η απόλυτη τιμή του κινδύνου δεν είναι τόσο σημαντική όσο η σχετική τιμή. Στους αυτοκινητοδρόμους η ανάλυση επικινδυνότητας γίνεται με βάση τη σχετική τιμή του κινδύνου και με σκοπό να εντοπιστούν τα πιο επικίνδυνα πρανή για καταπτώσεις, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας (Fell et al. 2005). Αντίθετα σε αστικές περιοχές για την ανάλυση της επικινδυνότητας απαιτείται η χρήση της απόλυτης τιμής του κινδύνου για την αποφυγή οποιασδήποτε μη αντιστρέψιμης ζημίας ή απώλειας. Στο παρόν σύστημα η έννοια της κατολίσθησης καλύπτει ένα φάσμα όγκων μεταξύ ορισμένων dm³ και 104 m³.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει τα ακόλουθα στάδια:



Στη συνέχεια υπολογίζονται η ετήσια απώλεια της αξίας της ακίνητης περιουσίας, *R*(prop), και η πιθανότητα απώλειας της ζωής P(LOL), Fell et al. (2005):

$R(\text{prop}) = P(\text{L}) \times P(\text{T:L}) \times P(\text{S:T}) \times V(\text{prop:S}) \times E$ (1)

όπου P(L) είναι η συχνότητα των γεγονότων κατολίσθησης μιας περιοχής με δεδομένη σπουδαιότητα
P(T: L): είναι η πιθανότητα ο όγκος κατάπτωσης να φτάσει το στοιχείο που είναι σε κίνδυνο
P(S: T): είναι η χρονική-χωρική πιθανότητα του στοιχείου που είναι σε κίνδυνο

V(prop: S): είναι η ευπάθεια του στοιχείου που βρίσκεται σε κίνδυνο σε σχέση με το κατολισθητικό συμβάν

E: είναι το στοιχείο σε κίνδυνο (π.χ. η αξία ή η τρέχουσα καθαρή αξία της περιουσίας/του ακινήτου).

Η ετήσια πιθανότητα ένα άτομο μπορεί να χάσει τη ζωή του, P(LOL), υπολογίζεται από:

$P(\text{LOL}) = P(\text{L}) \times P(\text{T:L}) \times P(\text{S:T}) \times V(\text{D:T})$ (2)

όπου V(D:T) είναι η ευπάθεια ενός ατόμου σε σχέση με το κατολισθητικό γεγονός και P(L), P(T:L) και P(S:T) όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

2.1.10.1. Κίνδυνος για τις κατασκευές- Risk to property

Ο κίνδυνος για τις κατοικημένες περιοχές, λόγω των φαινομένων κατάπτωσης, χωρίς τη χρήση κάποιων μέτρων προστασίας προσδιορίζεται με βάση την ακόλουθη έκφραση:

$R(\text{U}) = P(\text{R}) \times P(\text{T:R}) \times P(\text{S:T}) \times V(\text{prop:S})$ (4)

Όπου

- *R*(U) είναι η ετήσια ζημία της αξίας του ακινήτου για το πρανές, χωρίς να έχουν ληφθεί μέτρα προστασίας
- *P*(R) είναι η συχνότητα των καταπτώσεων για ένα συγκεκριμένο όγκο και προκύπτει από ιστορικά δεδομένα στην περιοχή απελευθέρωσης

- *P*(T:R) είναι η πιθανότητα τα αποσπώμενα τεμάχη να φθάσουν στα όρια του οικισμού
- *P*(S:T) είναι χρονική-χωρική πιθανότητα των εκτιθέμενων κτιρίων - is the temporal spatial probability of the exposed buildings
- *V*(prop:S) είναι η ευπάθεια των εκτιθέμενων κτιρίων στα περιστατικά καταπτώσεων- is the vulnerability of the exposed buildings to the rockfall event.

2.1.10.2. Κίνδυνος για τους ανθρώπους- Risk to persons

Για την περίπτωση που εξετάζεται ο κίνδυνος για τους ανθρώπους, για να συμβεί το περιστατικό θα πρέπει να συμπέσουν χρονικά και χωρικά οι άνθρωποι και τα τεμάχη του βράχου.

Θεωρήθηκαν δύο τύποι για τον κίνδυνο στους ανθρώπους : α) Ο ατομικός κίνδυνος, ο οποίος εκφράζεται με την πιθανότητα ένα συγκεκριμένο άτομο να χάσει τη ζωή του/της μέσα σε ένα έτος. β) Ο συλλογικός κίνδυνος, ο οποίος εκφράζεται ως η πιθανότητα ένα ή περισσότερα άτομα να χάσουν τη ζωή τους, λόγω των καταπτώσεων μέσα σε ένα έτος.

2.1.10.2.1. Ατομικός κίνδυνος- Individual risk

Ο ατομικός κίνδυνος καθορίστηκε για ένα μόνο άτομο, το οποίο βρίσκεται εντός του κτιρίου. Όπως και στον κίνδυνο για τις κατασκευές, θεωρήθηκε ότι για οποιοδήποτε περιστατικό κατάπτωσης μόνο ένα τέμαχος μπορεί να φτάσει στα όρια του οικισμού.

$$P(\mathrm{ILOL}) = \sum_{i=1}^{k} P(R)_i \times P(\mathrm{T:R}) \times P(\mathrm{S:T})\, P(\mathrm{T:P}) \times P(\mathrm{S:P})_i \times V(\mathrm{D:T}) \quad (5)$$

Όπου k είναι ο αριθμός των τεμαχών με τάξη μεγέθους αντίστοιχη με αυτή που λαμβάνεται υπόψη για καταπτώσεις και

- *P*(S:T) είναι η χρονική-χωρική πιθανότητα να προσκρούσει η βραχόμαζα σε ένα συγκεκριμένο κτίριο
- *P*(T:P) είναι η χρονική πιθανότητα ένα συγκεκριμένο άτομο να βρίσκεται σε κτίριο (διαμέρισμα, σε σπίτι ή σε αποθήκη)

- *P*(S:P) είναι η χωρική πιθανότητα ένα συγκεκριμένο άτομο να βρίσκεται στην τροχιά του βράχου όταν προσκρούει στην περιουσία του
- *V*(D:T) είναι ευπάθεια για το άτομο και *P*(R) και *P*(T:R) όπως ορίστηκαν στην Εξίσωση (4).

Η συχνότητα των καταπτώσεων, P(R), και η χωρική πιθανότητα της πρόσκρουσης, P(S:P), εξαρτώνται από το μέγεθος του τεμάχους.

Η χρονική-χωρική πιθανότητα να γίνει η πρόσκρουση στο συγκεκριμένο κτίριο στο οποίο βρίσκεται το άτομο *P*(S:T), ορίζεται ως το μήκος του κτιρίου (*L*B) διαιρεμένο με το μήκος of the development line (*L*D):

$P(S.T)_1 = LB/LD$ (6)

Ο ατομικός κίνδυνος εξαρτάται από το μέγεθος του τεμάχους. Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα πρόσκρουσης.

Για τη χρονική πιθανότητα P(T:P) αναπτύχθηκαν δύο (2) σενάρια: (I) Άτομα που βρίσκονται στο χώρο εργασίας τους και (II) άτομα που βρίσκονται στον τόπο κατοικίας τους.

Και στις δύο περιπτώσεις, ο κίνδυνος εκτιμάται για τη μέση και τη μέγιστη έκθεση των ατόμων στον εκάστοτε χώρο, σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

(I) Χρόνος παραμονής στους χώρους εργασίας:

Μέση έκθεση στο χώρο:

$$\frac{\frac{8hwork}{day} \times \frac{5days}{week} \times \frac{48weeks}{year}}{24 \times 365 \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{year}}} = 0.22$$

Μέγιστη έκθεση:

$$\frac{\frac{12\mathbf{hwork}}{\mathbf{day}} \times 5 \frac{\mathbf{days}}{\mathbf{week}} \times 48 \frac{\mathbf{weeks}}{\mathbf{year}}}{24 \times 365 \frac{h}{year}} = 0.33$$

(ΙΙ) Χρόνος παραμονής σε κατοικίες:

Μέση έκθεση στο χώρο:

14 h / 24 h = 0.58

Μέγιστη έκθεση:

20 h / 24 h = 0.83

2.1.10.2.2. Συλλογικός κίνδυνος

Η πιθανότητα να χαθούν μία ή περισσότερες ζωές μέσα σε ένα έτος λαμβάνεται από την τιμή *P*(LOL:B) με την πιθανότητα πρόσκρουσης σε ένα κτίριο μέσα σε ένα έτος (το οποίο δίδεται από τις τιμές των *P*(R), *P*(T:R) και *P*(S:T)):

$$P(\mathrm{LOL}) = \sum_{i=1}^{k} P(\mathrm{R})i \times P(\mathrm{T:R}) \times P(\mathrm{S:T}) \times P(\mathrm{LOL:B})i \quad (7)$$

όπου *k* είναι ο αριθμός των τεμαχών με τάξη μεγέθους που καθορίζεται από τα πρανή κορημάτων που βρίσκονται στο πεδίο.

Στοιχεία	**Τρωτότητα (0÷1)**
Άνθρωποι	
Τέμαχος ≤1m³	0.1
Τέμαχος 1 ÷ 5 m³	0.2
Τέμαχος >5m³	0.3
Άνθρωποι	
Εντός κτιρίων	0.8
Εκτός κτιρίων	1.0

Πίνακας 2.1.14. Τρωτότητα για τους ανθρώπους για διάφορα σενάρια

2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Συντάσσονται πίνακες: α) συγκεντρωτικοί και για τα εννέα (9) συστήματα βαθμονόμησης, και β) με όλες τις παραμέτρους όλων των ποσοτικών συστημάτων, εκτός του NHI, το οποίο δεν έχει σαφή αριθμητική βαθμολόγηση των παραμέτρων του. Για το σύστημα Tennessee για λόγους σύγκρισης επιλέχθηκε ένας τρόπος κατάπτωσης, η επίπεδη κατάπτωση.

2.2.1 Γενικές παρατηρήσεις

Από τους συγκεντρωτικούς πίνακες, που συντάχθηκαν για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των εννέα συστημάτων, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

❖ *Για κάθε σύστημα ξεχωριστά:*

1. Οι υφιστάμενες παράμετροι στο Oregon RHRS (Pierson et al 1990) δεν επαρκούν για την περιγραφή των ποικίλων γεωλογικών συνθηκών, που οδηγούν σε καταπτώσεις βράχων. Το σύνολο των γεωλογικών συνθηκών εντάσσεται σε μία κατηγορία «Περίπτωση 1: Δομικές συνθήκες». Αυτή όμως η βαθμονόμηση μπορεί να είναι παραπλανητική, διότι σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται και οι γεωλογικές παράμετροι που αναφέρονται στις μη δομικές συνθήκες. Επιπλέον οι παράμετροι για τη διαφορική διάβρωση, περιλαμβάνονται στην κατηγορία «Περίπτωση 2: Δομικές συνθήκες» αν και αυτές δε σχετίζονται καθόλου με τη γεωλογική δομή της βραχόμαζας. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα άμεσης κατάταξης των πρανών ως προς την επικινδυνότητα. Υπάρχουν ωστόσο αρκετές παράμετροι, η βαθμονόμηση και η τιμή των οποίων εξαρτάται από την κρίση του μελετητή. Αυτό δηλαδή συνεπάγεται την ύπαρξη υποκειμενικότητας κατά την εφαρμογή του συστήματος.

2. Το NHI RHRS πραγματεύεται την κατηγοριοποίηση πρανών σε δύο φάσεις διεργασίας (Pierson και Van Vickle, 1993). Η πρώτη φάση περιλαμβάνει μια προκαταρκτική εκτίμηση, όπου πρανή έχουν τη διαβάθμιση A, B ή C, η οποία βασίζεται αρχικά στην πιθανότητα η βραχόμαζα να φτάσει στο οδόστρωμα και στη συνέχεια σε ιστορικά περιστατικά καταπτώσεων. Τα πρανή που κατατάσσονται στην κατηγορία A είναι τα πιο επικίνδυνα και αυτά αξιολογούνται από το σύστημα στη δεύτερη φάση διεργασίας.

3. Το TennRHRS (Vandewater et al 2005) βασίζεται στο NHI RHRS και μοιάζει αρκετά με αυτό. Σύμφωνα με τους Vandewater et al. (Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XI, No. 2, May 2005) η παράμετρος για το γεωλογικό χαρακτήρα σε αυτό το σύστημα παρουσιάζει υψηλότερη βαθμολογία, αλλά αυτή η διαφορά καταδεικνύει τη σημασία της βαθμολόγησης όλων των πιθανών τρόπων κατάπτωσης. Πλεονεκτεί επιπλέον έναντι της αντίστοιχης παραμέτρου στο NHI RHRS, διότι αποφεύγεται η αμφίσημη ορολογία, λαμβάνεται υπόψη η ποικιλία των πιθανών τρόπων κατάπτωσης και σε συγκεκριμένες θέσεις λαμβάνεται υπόψη η σχετική ποικιλία των τρόπων κατάπτωσης, η οποία εκφράζεται ως το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του μετώπου του πρανούς όπου μπορεί να συντελεστούν οι τρόποι μεταφοράς.

4. Στο σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας ASRFR (Bolin et al. 2009) μερικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται συνήθως δεν υιοθετήθηκαν, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή είναι τόσο μικρή ώστε μερικοί παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις δε διαφέρουν ή μερικοί άλλοι εκπροσωπούνται από άλλον παράγοντα, όπως η τεκτονική δομή. Οι οκτώ (8) παράγοντες που αφορούν τις επιπτώσεις είναι σχεδιασμένοι ειδικά για αυτό το σύστημα αξιολόγησης. Το βασικό μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν είναι γενικευμένο και επομένως δε μπορεί να εφαρμοστεί σε πρανή άλλων περιοχών.

5. Το Colorado RHRS (Santi et al. 2008) περιέχει τέσσερεις (4) διαφορετικές κατηγορίες που συμβάλλουν στην εκδήλωση καταπτώσεων: οι συνθήκες του πρανούς, οι κλιματικές συνθήκες, οι γεωλογικές συνθήκες και οι συνθήκες ασυνέχειας. Υπάρχει μια πέμπτη κατηγορία που βαθμολογείται ξεχωριστά για τον κίνδυνο και αποτελείται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Σε αυτό το σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας οι ασυνέχειες λαμβάνονται υπόψη στη βαθμολόγηση για τα κρυσταλλικά και τα ιζηματογενή πετρώματα, όχι όμως στα block in matrix υλικά. Επίσης, θεωρείται ότι οι βράχοι που αποτελούνται από κρυσταλλικά πετρώματα ολισθαίνουν λόγω των δομικών χαρακτηριστικών, ενώ αυτοί που

συντελούνται από ιζηματογενή πετρώματα αστοχούν, λόγω διαφορικής διάβρωσης.

6. Οι γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς δε χρησιμοποιούνται στο σύστημα WSDOT's USMS (WSDOT 2007). Αντίθετα, κυρίως οικονομικοί παράγοντες ορίζουν αυτό το σύστημα. Είναι το μόνο σύστημα στο οποίο συντάσσεται πρόγραμμα κόστους- κέρδους. Για το λόγο αυτό είναι δε δίνεται προτεραιότητα στα πρανή με την υψηλότερη βαθμολογία. Η κατηγοριοποίηση των πρανών γίνεται με βάση τη λειτουργικότητα της οδού. Τα πρανή που αντιστοιχούν σε κύριους οδικούς άξονες έχουν προτεραιότητα σε σχέση με αυτά που συγκεντρώνουν υψηλότερη βαθμολογία για την επικινδυνότητα, αλλά έχουν χαρακτηρίζονται από μικρότερη μέση ημερήσια κυκλοφορία.

7. Στο σύστημα CN RHRS (Abbott et al. 1998) δε γίνεται εκτίμηση για τις τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες μετά τον εκτροχιασμό. Η βαθμολόγηση αξιολογεί ουσιαστικά την πιθανότητα η αμαξοστοιχία να εκτροχιαστεί σε περίπτωση κατάπτωσης, αλλά δεν εκτιμά τον κίνδυνο καταπτώσεων σε σχέση με τα διερχόμενα τρένα.

8. Το QRA (J. Corominas et al. 2005) είναι το μόνο σύστημα στο οποίο υπολογίζεται ξεχωριστά ο κίνδυνος για τις κατασκευές και ο κίνδυνος για τους ανθρώπους. Γίνεται ωστόσο ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών για τον υπολογισμό του κινδύνου, το οποίο μπορεί τελικά να υπερεκτιμά τον πραγματικό κίνδυνο και καθιστά το σύστημα δύσχρηστο.

❖ *Για το σύνολο των συστημάτων:*

1. Η πλειοψηφία των συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας, που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1 αναφέρονται σε τεχνητά πρανή. Εξαίρεση αποτελούν τα συστήματα Marinos et al (2005), modified Colorado RHRS (Santi et al. 2008) και CN RHRS (Abbott et al. 1998), τα οποία αφορούν φυσικά πρανή, συνδυασμό φυσικών και τεχνητών πρανών, και φυσικά και τεχνητά πρανή αντίστοιχα.

2. Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα συστήματα είναι ποσοτικά, καθώς επιτρέπουν εύκολη και ταχεία κατηγοριοποίηση των πρανών ως προς την επικινδυνότητα σε σχέση με τα ποιοτικά συστήματα (CN RHRS, QRA RHRS). Αντίθετα, τα ποιοτικά συστήματα

παράγουν πολύ πιο έγκυρα αποτελέσματα, διότι οι παράμετροι και οι εξισώσεις ορίζονται καλύτερα.

3. Τα συστήματα Marinos et al. RHRS (Marinos et al. 2005) και Colorado RHRS (Santi et al 2008) είναι τα μοναδικά εξεταζόμενα συστήματα, τα οποία διαθέτουν τελική κατάταξη των πρανών ως προς την επικινδυνότητα με βάση τη συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνεται.

4. Στους πίνακες βαθμονόμησης των περισσότερων συστημάτων δεν αναγράφονται τα επιμέρους βάρη για κάθε παράμετρο. Εξαίρεση αποτελεί το σύστημα Marinos et al (2005). Αυτό το χαρακτηριστικό ωστόσο κάνει πιο χρονοβόρα τη διαδικασία της βαθμολόγησης και επιτρέπει πιθανά λάθη στον υπολογισμό της βαθμολογίας.

5. Στα ποσοτικά συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), NHI RHRS (NYDOT 1993), TennRHRS (Vandewater et al. 2005), Colorado RHRS (Santi et al 2008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007) η βαθμονόμηση ακολουθεί το εκθετικό σύστημα με τις τέσσερεις τιμές 3, 9, 27 και 81. Το εκθετικό σύστημα αντιπροσωπεύει τη συνέχεια των βαθμολογιών από 1 έως 100 και επιτρέπει μια γρήγορη αναγνώριση των πιο επικίνδυνων πρανών με ένα ευρύ πεδίο αριθμητικών τιμών (Pierson et al. 1990). Στα υπόλοιπα δύο εξεταζόμενα ποσοτικά συστήματα Marinos et al. (2005) και ASRFR (Bolin et al. 2009), η βαθμολόμηση του εκάστοτε παράγοντα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 έως 10 και 0 έως 1 αντίστοιχα.

6. Ως προς τον αριθμό των παραμέτρων που ανήκουν τα εξεταζόμενα συστήματα, ισχύει ότι το Colorado RHRS εξετάζει το μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων, καθώς περιλαμβάνει 28 παραμέτρους. Ακολουθούν τα συστήματα Marinos et al με 19 παραμέτρους, το ASRFR με 15, τα Oregon RHRS και WSDOT's USMS με 12 παραμέτρους, και τέλος τα NHI RHRS και TennRHRS με εννέα (9) παραμέτρους.

7. Οι Santi et al. (Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System, 2008) επιχείρησαν να μειώσουν το μεγάλο αριθμό των παραμέτρων στο Colorado RHRS, ώστε να γίνεται μια προκαταρτική εκτίμηση της συνολικής βαθμολογίας με τη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων σε μαθηματικές εξισώσεις. Μετά από στατιστική επεξεργασία οι παράμετροι κατατάχθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό κατά τον οποίο επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, ακόμη και με αυτές τις εξισώσεις, απαιτείται εμπειρία του μηχανικού, προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός αστάθειας του βραχώδους πρανούς και να κριθεί ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των

διαφόρων παραμέτρων σε ένα συγκεκριμένο πρανές. Επομένως κρίνεται σημαντική η χρήση του συνόλου ή των περισσότερων από τις παραμέτρους του συστήματος για την αξιολόγηση των πρανών.

8. Τα περισσότερα συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας στη βιβλιογραφία αφορούν τη βαθμολόγηση πρανών κατά μήκος των οδών. Σε περίπτωση εκτίμησης κατά μήκος των οδών, η μέθοδος ποσοτικής ανάλυσης των κινδύνων έχει τα ακόλουθα βασικά μειονεκτήματα:

   I. Η γεωλογική δομή και η κατάσταση των πρανών δε λαμβάνονται υπόψη κατά τη βαθμολόγηση. Πράγματι, για τον υπολογισμό της συχνότητας των κατολισθήσεων, βασιζόμαστε κατά κύριο λόγο στα ιστορικά δεδομένα, την εμπειρία, τις παρατηρήσεις και την κρίση των εμπειρογνωμόνων. Τα ιστορικά στοιχεία είναι σπάνια διαθέσιμα για παλιούς δρόμους και, εξ ορισμού δεν είναι διαθέσιμα για τους νεόδμητους. Από την άλλη πλευρά, παρατηρήσεις και τεχνική κρίση συνεπάγονται υποκειμενικότητα και μεγάλη εμπειρία.

   II. Η ποσοτική ανάλυση ασχολείται μόνο με την απώλεια της ζωής και τις υλικές ζημιές. Θα έπρεπε ωστόσο να υπάρχει θεώρηση η οποία να λαμβάνει υπόψη τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις που οφείλονται σε διακοπή της κυκλοφορίας και άλλα.

   III. Ένας αριθμός απλουστευτικών παραδοχών σχετικά με την κυκλοφορία και τις κατολισθήσεις είναι απαραίτητος. Για παράδειγμα, υποτίθεται ότι η κίνηση είναι ομοιόμορφη στο χρόνο και στο χώρο, ανεξάρτητα από κατολισθήσεις, και ότι κάθε όχημα έχει το μέσο μήκος όλων των οχημάτων.

Έρευνες που διενεργήθηκαν από τον Bateman (2003), για να καθοριστεί ποια συστήματα κατάταξης κινδύνου χρησιμοποιούνται από τα αμερικανικά πρακτορεία μεταφορών κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα περισσότερα από τα συστήματα έχουν είτε υιοθετήσει ή τροποποιήσει το RHRS (Pierson και Van Vickle 1993) ή έχουν χρησιμοποιήσει συνδυασμός αυτού και του συστήματος του Wyllie (1987). Η παρακάτω κριτική εξέταση των συστημάτων αναδεικνύει σοβαρές ανεπάρκειες και λανθασμένες πρακτικές, οι οποίες έχουν άμεσες επιπτώσεις στην αξιοπιστία τους. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν το εκθετικό σύστημα βαθμολόγησης.

Επιπλέον, όσον αφορά το εκθετικό σύστημα βαθμολόγησης, οι Pierson και Van Vickle (1993) υποστηρίζουν ότι η διάκριση των πιο επικίνδυνων πεδίων παρέχεται

από ταχεία αύξηση της βαθμολογίας. Αυτό είναι μόνο εν μέρει αληθές, καθώς σε αυτά τα συστήματα βαθμολόγησης τα κριτήρια για πολύ υψηλό κίνδυνο μπορεί να αντιστοιχούν σε χαμηλές βαθμολογίες. Για παράδειγμα:

i. Ένα μεγάλο βραχώδες πρανές ύψους 15 m αντιμετωπίζεται θετικά, παρά το γεγονός ότι, ανάλογα με την κλίση, μπορεί να αποφέρει μεγάλες τροχιές κατολίσθησης (βλ. Pierson et al. 2001),

ii. Ένας βράχος 0.3 m ή 0.6 m πάνω στην οδό αντιμετωπίζεται ευνοϊκά, παρά το γεγονός ότι μπορεί να αποτελέσει αίτιο ενός σοβαρού τροχαίου ατυχήματος,

iii. Ένας δρόμος πλάτους 13.2 m ή 10.8 m αντιμετωπίζεται ευνοϊκά παρά το γεγονός ότι ένας βράχος πάνω σε αυτόν αποτελεί δυνητικό κίνδυνο, ανεξάρτητα από το συνολικό πλάτος αυτοκινητοδρόμου,

iv. Η τάφρος αναχαίτισης που έχει μέτρια ή περιορισμένη αποτελεσματικότητα αντιμετωπίζεται θετικά, παρά το γεγονός ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη πιθανότητα τα πετρώματα να πέσουν επάνω στην οδό και να προκαλέσουν ατύχημα,

v. Τμήματα βράχου που αποκολλώνται από το πρανές συχνά ή πολύ (συχνά κριτήριο αξιολόγησης πολλές πτώσεις και περιστασιακές πτώσεις, αντίστοιχα) αντιμετωπίζονται ευνοϊκά σε σχέση με το πραγματικό επίπεδο κινδύνου για τους ταξιδιώτες.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο τύπος αστοχίας δεν ορίζεται ή, όπου διευκρινίζεται, η κατάσταση της βραχόμαζας περιγράφεται ανεπαρκώς. Τέλος, αν και το νερό γενικά θεωρείται ότι αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αστοχία, ακόμα και σε περιοχές επιρρεπείς σε σεισμό, σχετίζεται με τους παράγοντες αστάθειας, οι οποίοι ασκούν ελάχιστη επιρροή στα υφιστάμενα ποιοτικά συστήματα (περίπου 10%) ή αγνοούνται πλήρως.

Παρά τη σημασία των αποστάσεων, που διανύουν τα εδαφικά τμήματα, για τις συνέπειες στους ταξιδιώτες και στην κυκλοφορία, η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της τάφρου αναχαίτισης βασίζεται συνήθως σε τεχνική κρίση και εμπειρία. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα υφιστάμενα συστήματα αξιολογούν τις συνέπειες για κάθε κατηγορία (κυκλοφορία, την ασφάλεια του ανθρώπου, οικονομία κλπ.) στην ίδια βάση, είτε ως μοναδικός παράγοντας συνέπειας ή ως μια σύνθεση της επικινδυνότητας με τους παράγοντες των συνεπειών. Αν ωστόσο συντελεστεί μια αποτυχία των γεωτεχνικών στοιχείων σε ένα αυτοκινητόδρομο

(όρυγμα ή επίχωμα)η οποία δεν έχει απαραίτητα αντίκτυπο στην ασφάλεια των ταξιδιωτών (π.χ. όπου υπάρχει επαρκής ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης), μπορεί να προκαλέσει σοβαρές αρνητικές κοινωνικές-οικονομικές επιπτώσεις.

Οι ακόλουθες παράμετροι: ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης (PDSD), μέσος κίνδυνος οχήματος (AVR), μέση ημερήσια κυκλοφορία (ADT) και συνολικό πλάτος οδού (RW) είναι με διαφορά οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι παράγοντες συνεπειών των υφιστάμενων συστημάτων. Όσον αφορά τον παράγοντα PDSD, όπως αυτός ορίζεται από Pierson και Van Vickle (1993), η πραγματική απόσταση ορατότητας (AASHTO 2004) συγκρίνεται με την απόσταση απόφασης-ορατότητας Decision Sight Distance (AASHTO 2004). Το τελευταίο είναι ένα υπολογιστικό μήκος (και συνεπώς, συντηρητικό), το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το πραγματικό (AASHTO 2004).

Ενδεικτικά, σε οριζόντιο δρόμο ο λόγος DSD / SSD είναι ίσος με 1.3 για ταχύτητα του οχήματος ίση με 120 km / h και 2.3 για 50 km / h (Pantelidis 2009b). Έτσι, με βάση τον PDSD παράγοντα, πολλά μη επικίνδυνα πεδία φαίνεται να είναι επικίνδυνα. Από τα τρία σενάρια που θεωρούνται γενικές περιπτώσεις: i) πτώση βράχου σε ένα κινούμενο όχημα, ii) η επίπτωση ενός κινούμενου οχήματος σε έναν πεσμένο βράχο και iii) η επίπτωση της πτώσης ενός βράχου σε σταθμευμένο όχημα, το δεύτερο είναι το πιο πιθανό λάβει χώρα (Bunce et al. 1997). Επομένως, ο μέσος κίνδυνος του οχήματος (βλ.Pierson και Van Vickle 1993) υποεκτιμά τους πραγματικούς κινδύνους. Τέλος, όσον αφορά τον παράγοντα του πλάτους της οδού, ένας πλατύς δρόμος δεν είναι απαραιτήτως ασφαλής δρόμος και όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την γεωμετρία του πρανούς (ύψος και κλίση), το κλείσιμο ενός δρόμου είναι δυνατό, ακόμη και αν ο δρόμος είναι πολύ πλατύς.

Όσον αφορά την ποσοτική κατανομή των συνεπειών μιας ενεργητικής γεωτεχνικής αστοχίας κατά μήκος μιας εθνικής οδού, κάποια συστήματα εστιάζουν αποκλειστικά στην ασφάλεια των ταξιδιωτών, αγνοώντας πιθανές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, ενώ τα υπόλοιπα συνδυάζουν τις συνέπειες της οποιασδήποτε κατηγορίας για την παραγωγή μιας μόνο βαθμολογίας κινδύνου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση του κινδύνου, καθώς οι συνέπειες από πολλές κατηγορίες δεν είναι απαραίτητα εξίσου σοβαρές.

2.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στα συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας

Με βάση τον πίνακα σύγκρισης των συστημάτων επιλέγονται τα τέσσερα (4) συστήματα με τις περισσότερες κοινές παραμέτρους. Πρόκειται για τα συστήματα: 1) Oregon RHRS (Pierson et al. 1990), 2) the modified Colorado RHRS (Santi et al. 2008), 3) WSDOT's Unstable Slope Management Program (USMS) (WSDOT 2007) και 4) Marinos et al. (2005)

Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της διακύμανσης της συνολικής βαθμολογίας, σε αυτό το στάδιο δε λήφθηκε υπόψη η βαθμολογία του συστήματος Marinos et al. (2005). Τα τρία συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), the modified Colorado RHRS (Santi et al 2008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007) αφορούν κυρίως τεχνητά πρανή οδοποιίας, ενώ το σύστημα Marinos et al. (2005) αφορά φυσικά πρανή και δεν περιέχει παραμέτρους για την κυκλοφορία στην οδό. Επομένως δε μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων (4) συστημάτων.

Προκειμένου να γίνει μια εποπτική σύγκριση των τριών συστημάτων συντάσσονται δεκαπέντε (15) προβλήματα, τα οποία πρακτικά αφορούν ένα συγκεκριμένο πρανές. Σε καθένα από αυτά τα προβλήματα γίνεται η βαθμολόγηση και με τα τρία (3) συστήματα και μεταβάλλεται μία παράμετρος, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται το μέγεθος κατά το οποίο η μεταβολή μιας παραμέτρου επηρεάζει τη συνολική βαθμολογία και άρα τη συνολική διακινδύνευση.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να μεταβληθούν σε κάθε πρόβλημα προέκυψαν από τη σύγκριση των ποσοτικών συστημάτων. Οι παράμετροι που είναι κοινές στα περισσότερα συστήματα θεωρήθηκαν ως οι πιο σημαντικές για διερεύνηση.

Ακολουθούν πίνακες με τις παραμέτρους των προβλημάτων, τις παραδοχές των τιμών τους και το εύρος τους.

Παράμετροι	Τιμές	Σύστημα ταξινόμησης
΄Ψος του πρανούς	30 m	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	Μέτρια	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Συχνότητα καταπτώσεων	Αρκετές	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Μέγεθος επισφαλών τεμαχών	2.5 m^3	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης	50%	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Μέσος κίνδυνος οχήματος	50%	Oregon RHRS, Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Αριθμός ατυχημάτων	0÷2	Colorado RHRS, WSDOT's USMS
Τραχύτητα ασυνεχειών	Κυματοειδής	Oregon RHRS, Colorado RHRS
Συνολικό πλάτος της οδού	8.5 m	Oregon RHRS, WSDOT's USMS
Κλίμα και παρουσία του νερού στο πρανές	Μέτριες βροχοπτώσεις-Μέτριοι περίοδοι παγετού-Περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές	Oregon RHRS
Άνοιγμα ασυνεχειών	>5 mm	Colorado RHRS
Μέση κλίση	40˚	Colorado RHRS
Κατάσταση ασυνεχειών	Ασυνεχείς διακλάσεις-Ευμενής προσανατολισμός	Oregon RHRS
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	2751÷5000 οχήματα	WSDOT's USMS
Ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων	250÷500 mm	Colorado RHRS

Πίνακας 2.2.1. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται ανά πρόβλημα, οι αρχικές τιμές τους και τα συστήματα ταξινόμησης από τα οποία λαμβάνονται.

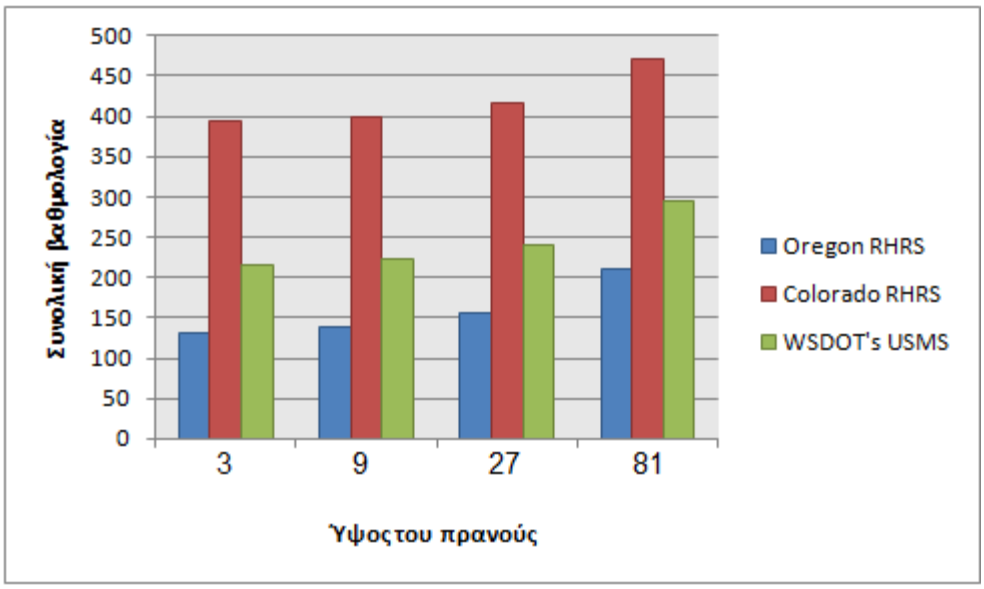
Παράμετροι	Τιμές	Σύστημα ταξινόμησης
Γενικοί παράγοντες εκκίνησης	Πολλοί	Colorado RHRS
Εμμονή των ασυνεχειών	<3 m	Colorado RHRS
Κατάσταση αποσάθρωσης	Ενδείξεις στην επιφάνεια	Colorado RHRS
Ζημία οδοστρώματος	Μέτρια- Ο οδηγός πρέπει να ελαττώσει ταχύτητα	WSDOT's USMS
Συχνότητα συντήρησης της οδού ανά έτος	1÷3 φορές	WSDOT's USMS
Οικονομικός παράγοντας	Μικρές παρακάμψεις	WSDOT's USMS
Ετήσιο κόστος συντήρησης	5000÷10000 $	WSDOT's USMS
Επίδραση της κατάπτωσης στην οδό- πλάτος κατάληψης	<15.24 m	WSDOT's USMS
Αριθμός των συνόλων των ασυνεχειών	2	Colorado RHRS
Ετήσιοι κύκλοι παγετού/τήξης	6÷10	Colorado RHRS
Διήθηση- Νερό	Υγρό - Νωπό	Colorado RHRS
Προσανατολισμός του πρανούς	ΒΑ, ΝΔ	Colorado RHRS

Πίνακας 2.2.2. Οι παράμετροι που παραμένουν σταθερές και τα συστήματα ταξινόμησης από τα οποία λαμβάνονται.

Παράμετροι	Τιμές	Εύρος παραμέτρων	Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων
Ύψος του πρανούς	30 m	7.5-15 m, 15-22.5 m , 22.5-30 m, >30 m	3, 9, 27, 81
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	Μέτρια	Καλή, Μέτρια, Περιορισμένη, Καθόλου	3, 9, 27, 81
Συχνότητα καταπτώσεων	Αρκετές	Ελάχιστες, Περιστασιακές, Αρκετές, Συνεχείς	3, 9, 27, 81
Μέγεθος επισφαλών τεμαχών	2.5 m^3	<0.75 m^3, 0.75÷2.30 m^3, 2.30÷7.60 m^3, >7.60 m^3	3, 9, 27, 81
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης	50%	>80%, 60÷80%, 40÷60%, <40%	3, 9, 27, 81
Μέσος κίνδυνος οχήματος	50%	0-24%, 25-49%, 50-74%, >75%	3, 9, 27, 81
Αριθμός ατυχημάτων	0÷2	0÷2, 3÷5, 6÷8, >9	3, 9, 27, 81
Τραχύτητα ασυνεχειών	Κυματοειδής	Σκληρή- Ανώμαλη, Κυματοειδής, Επίπεδη, Αργιλικό υλικό πλήρωσης	3, 9, 27, 81
Συνολικό πλάτος της οδού	8.5 m	>12.2 m, 9.75÷12.2 m, 7.32÷9.75 m, <7.32 m	3, 9, 27, 81
Κλίμα και παρουσία του νερού στο πρανές	Μέτριες βροχοπτώσεις-Μέτριοι περίοδοι παγετού-Περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές	Χαμηλές έως μέτριες βροχοπτώσεις-καθόλου παγετοί και νερό, Μέτριες βροχοπτώσεις- μέτριοι περίοδοι παγετού-περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές, Υψηλές βροχοπτώσεις-μεγάλοι περίοδοι παγετού-συνεχής παρουσία του νερού στο πρανές, Υψηλές βροχοπτώσεις και μεγάλοι περίοδοι παγετού ή συνεχής παρουσία νερού στο πρανές και μεγάλοι περίοδοι παγετού	3, 9, 27, 81
Άνοιγμα ασυνεχειών	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Κλειστό, 0.1÷1 mm, 1÷5 mm, >5 mm	3, 9, 27, 81
Μέση κλίση	40˚	Προκύπτει από διάγραμμα	3, 9, 27, 81
Κατάσταση ασυνεχειών	Ασυνεχείς διακλάσεις-Ευμενής προσανατολισμός	Ασυνεχείς διακλάσεις-ευμενής προσανατολισμός, Ασυνεχείς διακλάσεις-τυχαίος προσανατολισμός, Ασυνεχείς διακλάσεις-δυσμενής προσανατολισμός, Συνεχείς διακλάσεις-δυσμενής προσανατολισμός	3, 9, 27, 81
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	2751÷5000 οχήματα	<500, 500÷2750, 2751÷5000, >5000	3, 9, 27, 81
Ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων	250÷500 mm	<250 mm, 250÷500 mm, 500÷900 mm, >900 mm	3, 9, 27, 81

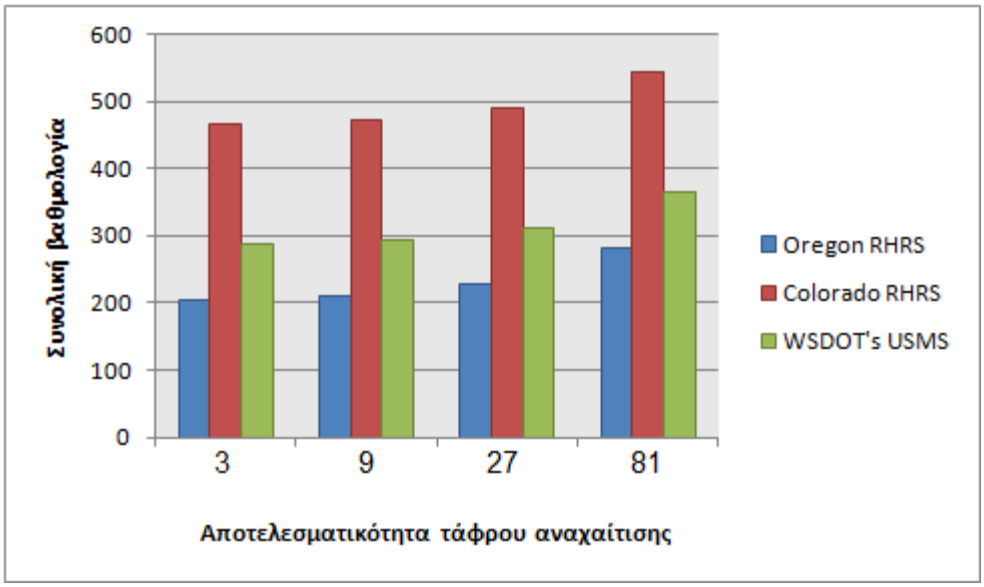
Πίνακας 2.2.3. Οι παράμετροι, οι οποίες μεταβάλλονται για τα δεκαπέντε (15) προβλήματα, οι αρχικές τους τιμές και το εύρος διακύμανσής τους. Οι παράμετροι οι οποίες είναι κοινές μεταξύ και των τριών (3) συστημάτων υπογραμμίζονται.

- *Πρόβλημα 1:* Μεταβάλλεται το ύψος του πρανούς καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



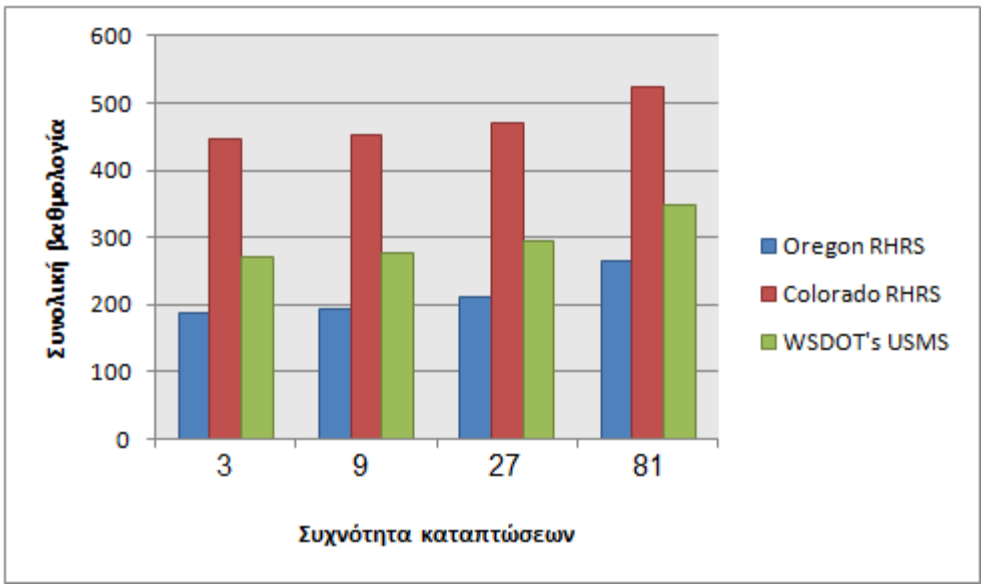
Σχήμα 2.2.1. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στο ύψος του πρανούς. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 2:* Μεταβάλλεται η αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



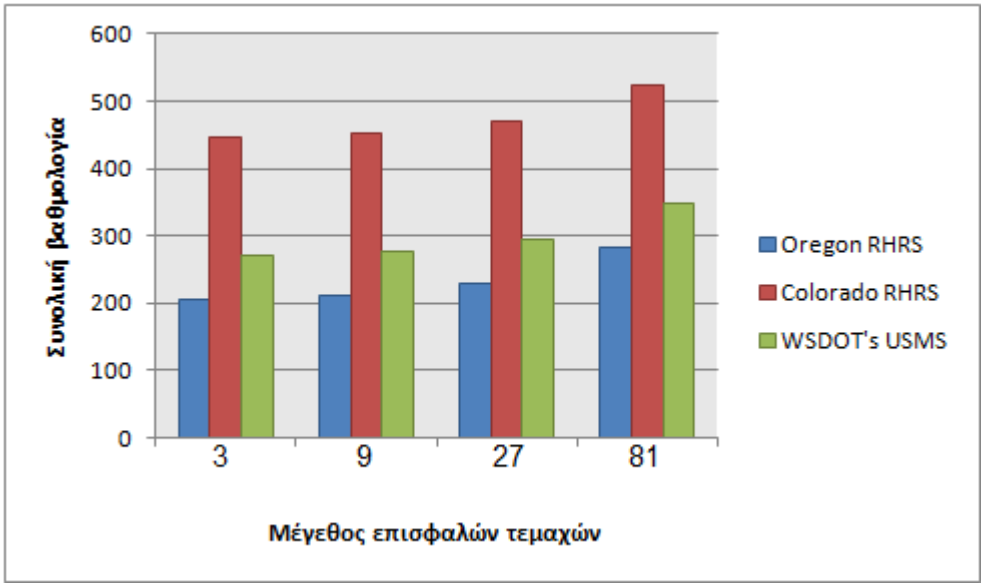
Σχήμα 2.2.2. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στην αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 3:* Μεταβάλλεται η συχνότητα των καταπτώσεων καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



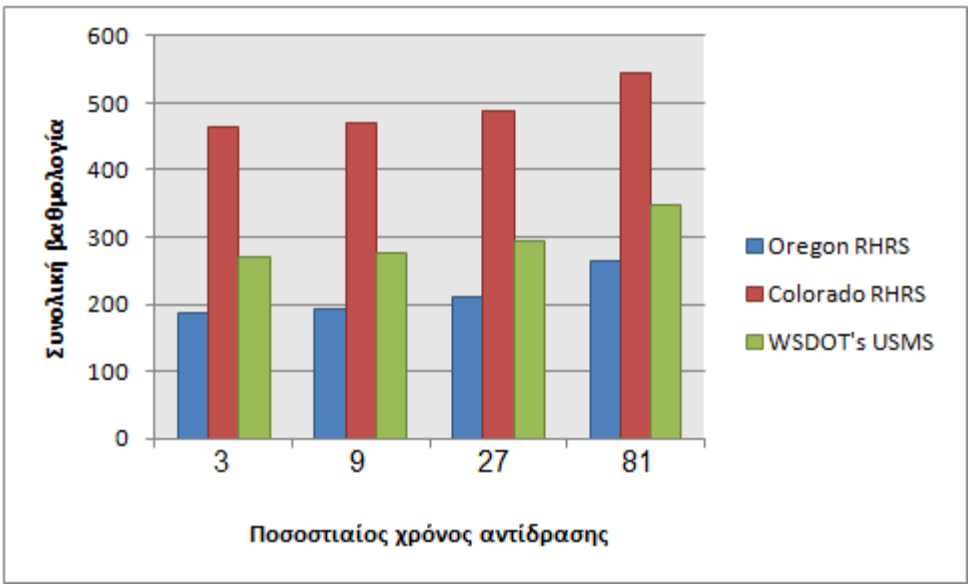
Σχήμα 2.2.3. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στη συχνότητα καταπτώσεων. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 4:* Μεταβάλλεται το μέγεθος των επισφαλών τεμαχών καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



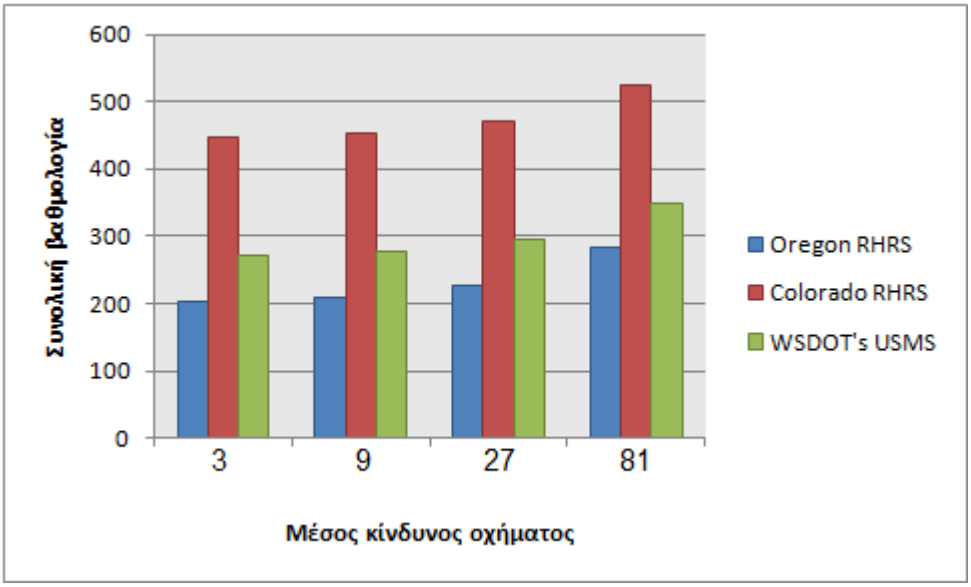
Σχήμα 2.2.4. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στο μέγεθος των επισφαλών τεμαχών. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 5:* Μεταβάλλεται ο ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



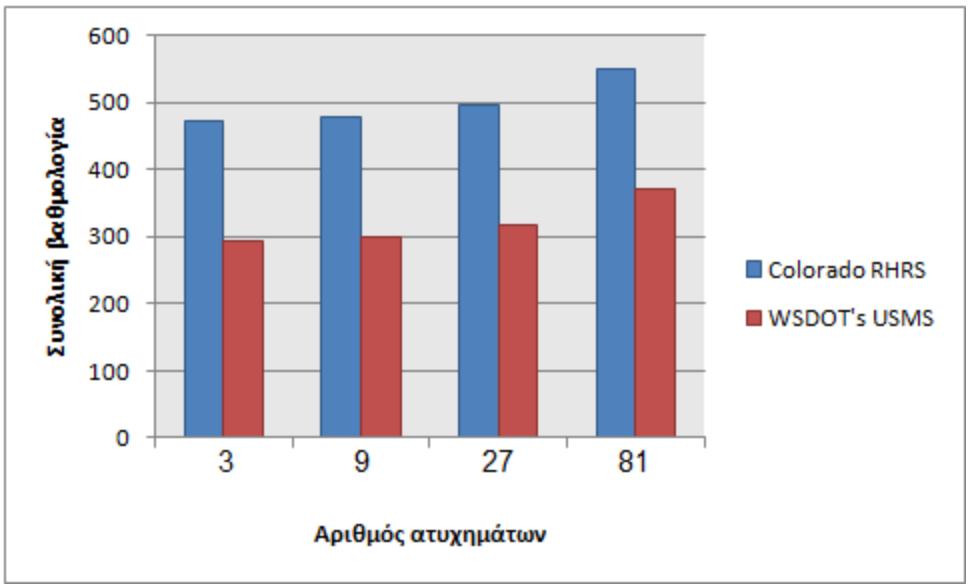
Σχήμα 2.2.5. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στον ποσοστιαίο χρόνο αντίδρασης. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 6:* Μεταβάλλεται ο κίνδυνος του οχήματος καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



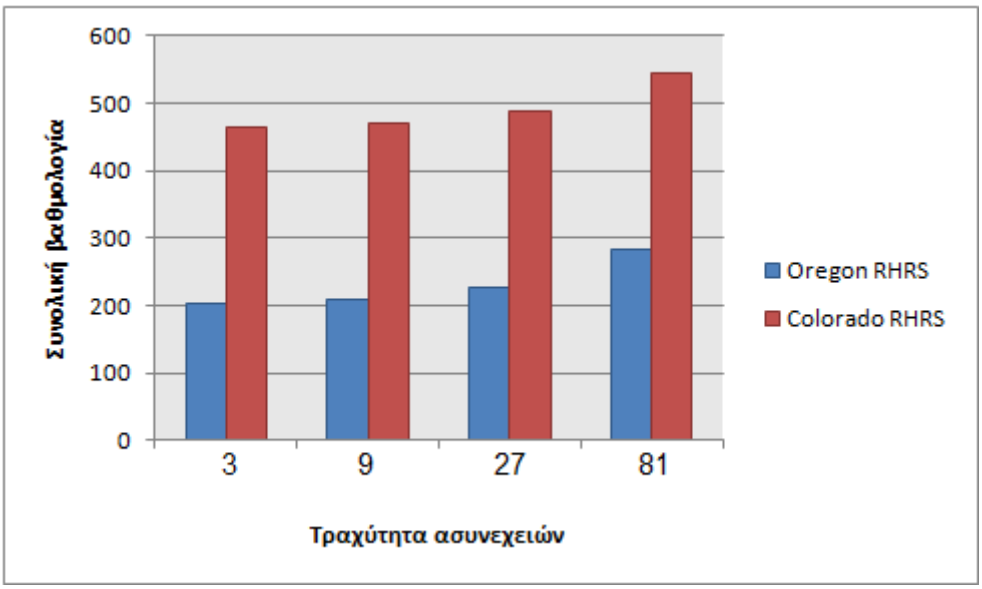
Σχήμα 2.2.6. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στον μέσο κίνδυνο του οχήματος. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 7:* Μεταβάλλεται ο αριθμός ατυχημάτων καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



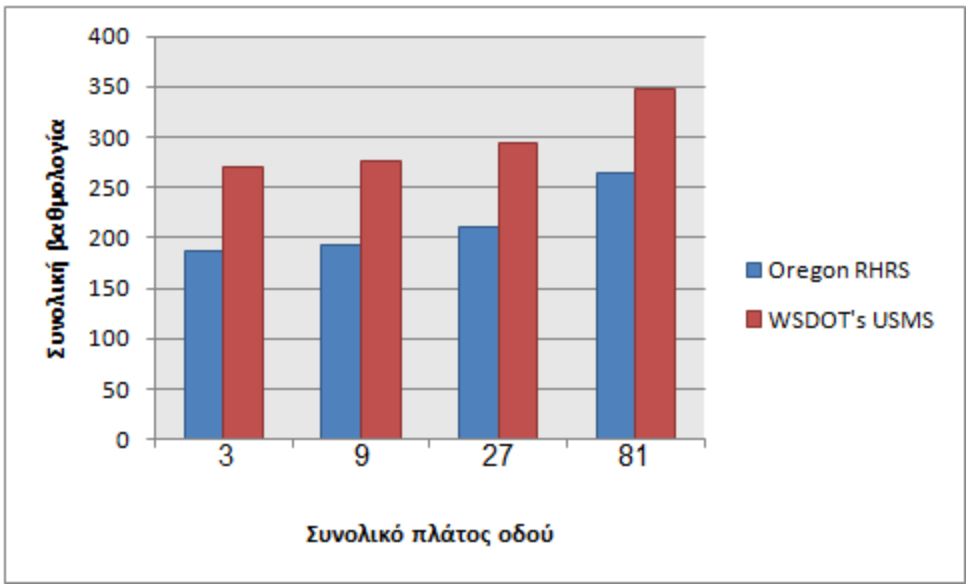
Σχήμα 2.2.7. Η συνολική βαθμολογία για τα συστήματα Colorado RHRS και WSDOT's USMS για μεταβαλλόμενες τιμές στον αριθμό ατυχημάτων. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 8:* Μεταβάλλεται η τραχύτητα των ασυνεχειών καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



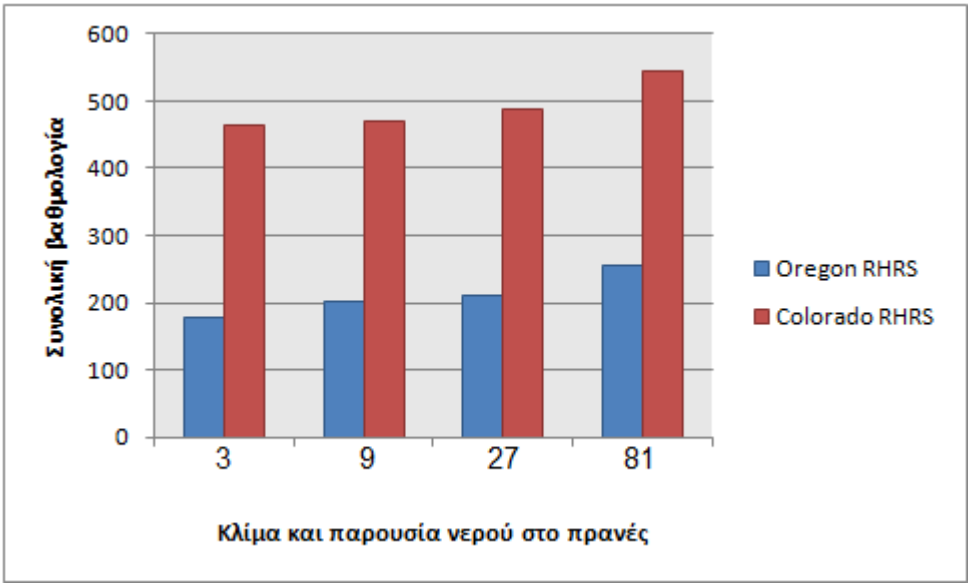
Σχήμα 2.2.8. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στην τραχύτητα των ασυνεχειών. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 9:* Μεταβάλλεται το συνολικό πλάτος της οδού καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



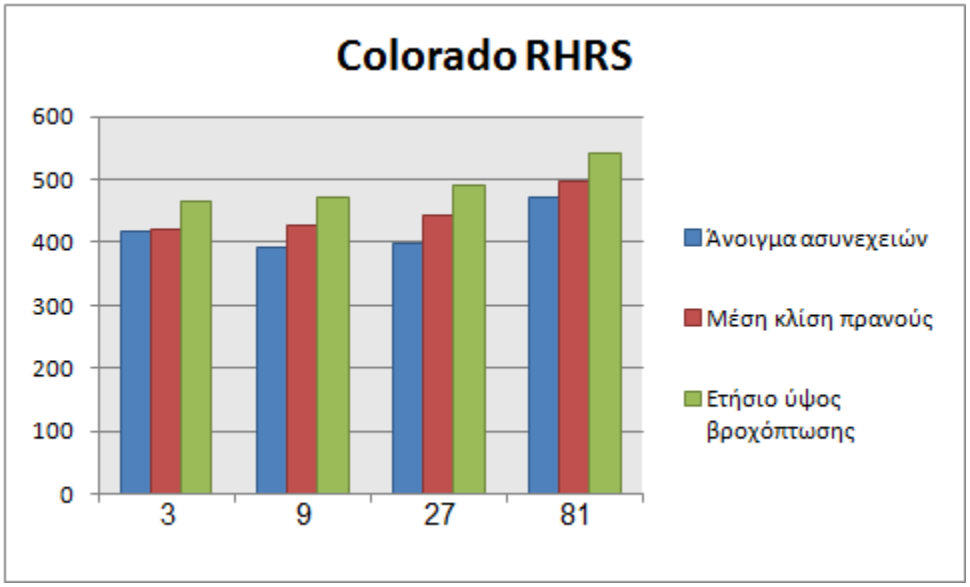
Σχήμα 2.2.9. Η συνολική βαθμολογία και για τα τρία (3) συστήματα για μεταβαλλόμενες τιμές στο συνολικό πλάτος της οδού. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 10:* Μεταβάλλεται το κλίμα/παρουσία νερού στο πρανές καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



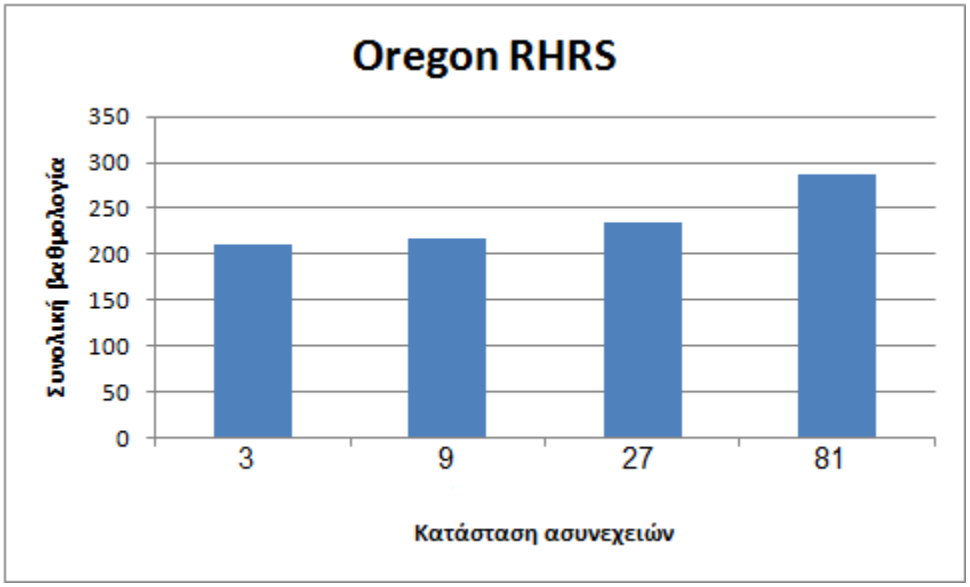
Σχήμα 2.2.10. Η συνολική βαθμολογία για τα συστήματα Oregon RHRS και Colorado RHRS για μεταβαλλόμενες τιμές στο κλίμα και την παρουσία νερού στο πρανές. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Προβλήματα 11, 12, 13:* Μεταβάλλονται το άνοιγμα των ασυνεχειών, η μέση κλίση του πρανούς και το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



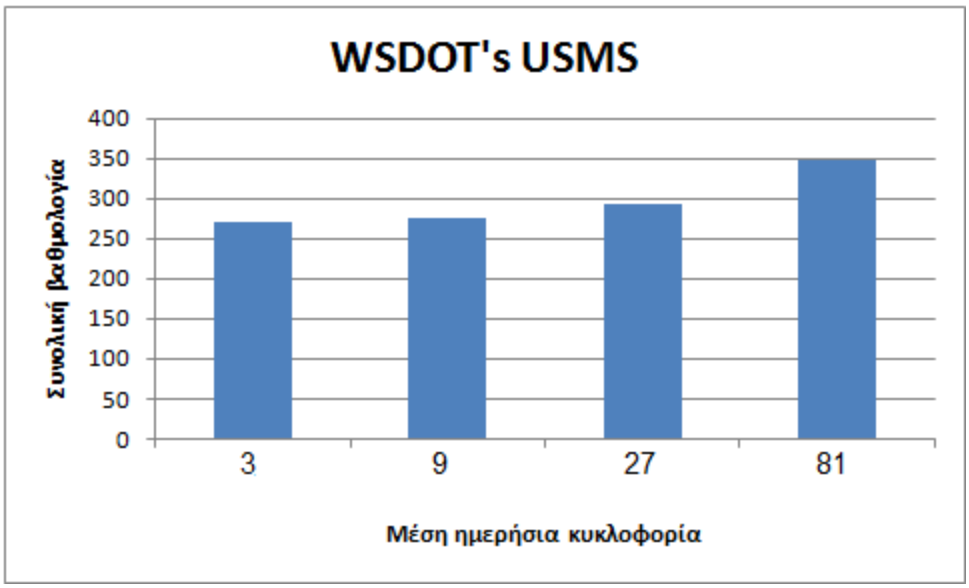
Σχήμα 2.2.11. Η συνολική βαθμολογία για το σύστημα Colorado RHRS για μεταβαλλόμενες τιμές στο άνοιγμα των ασυνεχειών, στη μέση κλίση του πρανούς και στο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *Πρόβλημα 14:* Μεταβάλλεται η κατάσταση των ασυνεχειών καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



Σχήμα 2.2.12. Η συνολική βαθμολογία για το σύστημα Oregon RHRS για μεταβαλλόμενες τιμές στην κατάσταση των ασυνεχειών. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

- *<u>Πρόβλημα 15:</u>* Μεταβάλλεται η μέση ημερήσια κυκλοφορία καθ' όλο το δυνατό εύρος τιμών.



Σχήμα 2.2.13. Η συνολική βαθμολογία για το σύστημα WSDOT's USMS για μεταβαλλόμενες τιμές στη μέση ημερήσια κυκλοφορία. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση συμπεραίνεται ότι:

- Ανεξάρτητα του προβλήματος που εξετάζεται η κατάταξη για τα τρία συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας παραμένει σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα που συγκεντρώνει τη μέγιστη βαθμολογία είναι το τροποποιημένο Colorado RHRS (Santi et al 2008) και έπονται τα συστήματα, WSDOT's USMS (WSDOT 2007) και Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα αξιολογεί διαφορετικό αριθμό παραμέτρων. Για την ακρίβεια το Oregon RHRS βαθμονομεί δέκα (10) παραμέτρους, το WSDOT's USMS βαθμονομεί δεκαπέντε (15) παραμέτρους και το Colorado RHRS είκοσι μία (21) παραμέτρους.

- Στα συστήματα Colorado RHRS (Santi et al 2008), WSDOT's USMS (WSDOT 2007) και Oregon RHRS (Pierson et al 1990) η βαθμονόμηση ακολουθεί το εκθετικό σύστημα με τις τέσσερεις τιμές 3, 9, 27 και 81. Το εκθετικό σύστημα αντιπροσωπεύει τη συνέχεια των βαθμολογιών από 1 έως 100 και επιτρέπει μια γρήγορη αναγνώριση των πιο επικίνδυνων πρανών με ένα ευρύ πεδίο αριθμητικών τιμών (Pierson et al. 1990). Επίσης, σε όλα τα ανωτέρω συστήματα

οι συντελεστές βαρύτητας ανά παράμετρο δεν υπολογίζονται ξεχωριστά, αλλά υπεισέρχονται στην τελική τιμή της βαθμολογίας, μετά από ανάλυση των επιμέρους βαρών, χωρίς να φαίνεται αυτό κάπου.

- Σε κάθε πρόβλημα παρατηρήθηκε ότι η συνολική βαθμολογία του WSDOT's USMS (WSDOT 2007) είναι ισοδύναμη με του Oregon RHRS (Pierson et al 1990), καθώς και ότι η συνολική βαθμολογία του Colorado RHRS (Santi et al 2008) προκύπτει σχεδόν ισοδύναμη με αυτή του Oregon RHRS (Pierson et al 1990).

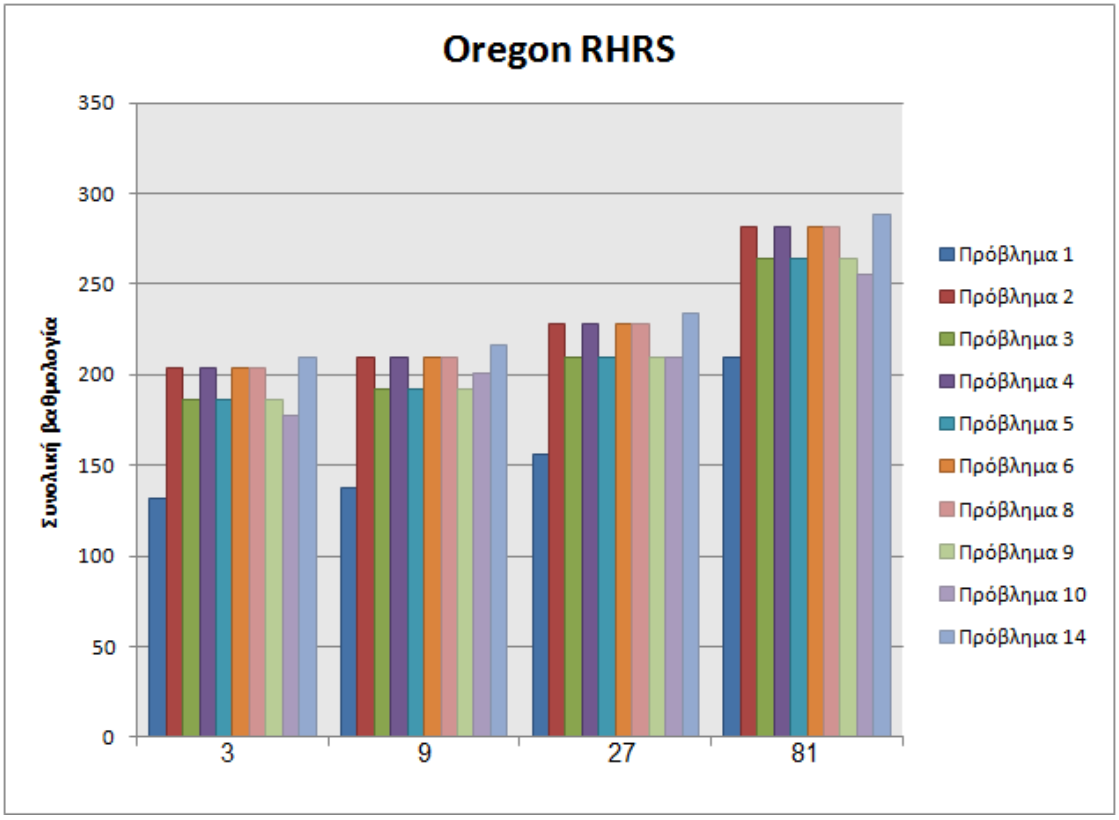
- Στα τρία αυτά συστήματα λαμβάνονται υπόψη και παράμετροι, οι οποίες αφορούν τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα για αυτήν την κατηγορία των παραμέτρων αποτελεί τις όποιες παραδοχές γίνονται για τις τιμές τους, διότι χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα.

- Όπως προαναφέρθηκε το τροποποιημένο Colorado RHRS (Santi et al 2008) διαθέτει πίνακα κατάταξης των πρανών σε κατηγορίες επικινδυνότητας, ανάλογα με τη συνολική βαθμολογία. Οι Santi et al ωστόσο συνέταξαν αυτούς τους πίνακες για τα block-in-matrix και τα κρυσταλλικά υλικά. Στο πρανές που εξετάζεται όμως μελετώνται οι ασυνέχειες. Για την κατάταξη των Θέσεων ως προς την επικινδυνότητα έγινε η απλουστευτική παραδοχή ότι η τελική κατάταξη μπορεί να προσομοιωθεί με εκείνη των block-in-matrix. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της τελικής βαθμολογίας για την κατάταξη ως προς την επικινδυνότητα, αφαιρούνται από τη συνολική βαθμολογία του συστήματος οι τιμές των παραμέτρων κινδύνου, δηλαδή του συνολικού αριθμού των ατυχημάτων, του μέσου κινδύνου του οχήματος και του ποσοστιαίου χρόνου αντίδρασης.

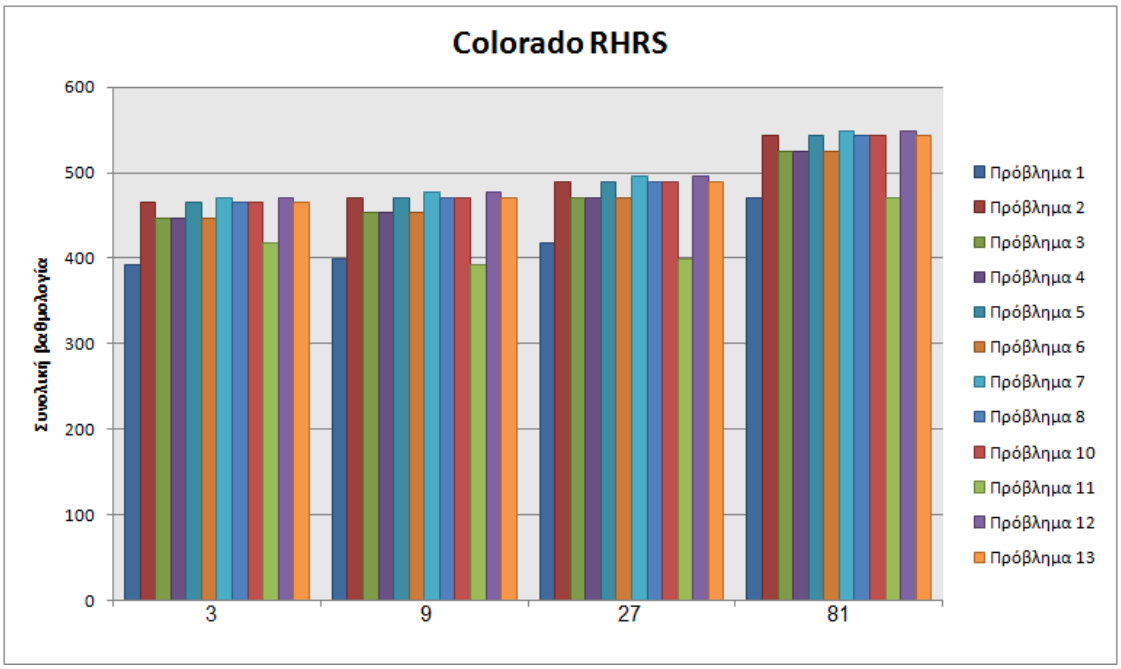
- Τέλος η διακύμανση της τελικής βαθμολογίας ανά πρόβλημα δε διαφέρει ιδιαίτερα, καθώς η τιμή που λαμβάνει κάθε φορά η εξεταζόμενη παράμετρος είναι μία από τις ακόλουθες: 3,9,27,81. Εξαίρεση αποτελεί η βαθμονόμηση της παραμέτρου «μέση κλίση του πρανούς» στο Colorado RHRS (Santi et al 2008) η οποία προκύπτει από διάγραμμα, ως αποτέλεσμα συνεχούς συνάρτησης.

Ακολουθούν ιστογράμματα με τα οποία γίνεται έλεγχος κατά πόσο η διακύμανση των τιμών μιας παραμέτρου μπορεί να επηρεάσει, τη συνολική βαθμολογία, ώστε να βρεθούν οι κρίσιμες παράμετροι. Οι τιμές 1, 2, 3 και 4 στον οριζόντιο άξονα

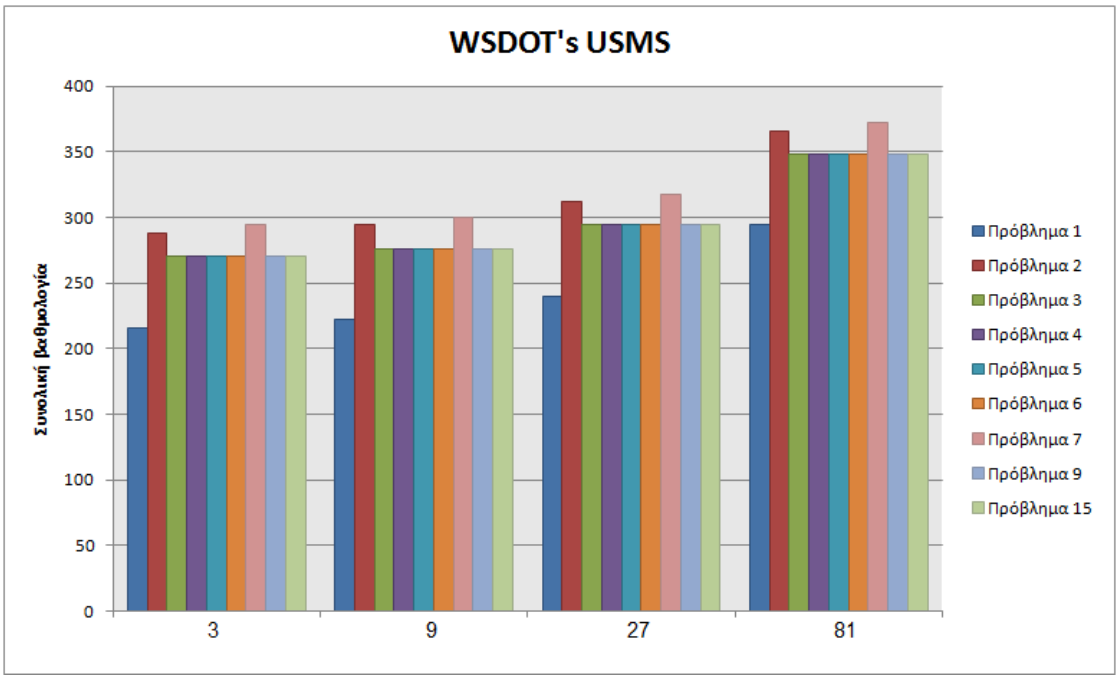
αντιπροσωπεύουν τις τιμές 3, 9, 27 και 81 αντίστοιχα που λαμβάνει η εκάστοτε παράμετρος, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές.



Σχήμα 2.2.14. Η διακύμανση της συνολικής βαθμολογίας ανά πρόβλημα για το σύστημα Oregon RHRS (Pierson et al 1990).



Σχήμα 2.15. Η διακύμανση της συνολικής βαθμολογίας ανά πρόβλημα για το σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008).



Σχήμα 2.2.16. Η διακύμανση της συνολικής βαθμολογίας ανά πρόβλημα για το σύστημα WSDOT’s USMS (WSDOT 2007).

Βάσει των Σχημάτων 2.2.14. ,2.2.15. και 2.2.16. προκύπτει ότι η μέγιστη βαθμολογία σε κάθε σύστημα προκύπτει ως εξής:

- *Oregon RHRS (Pierson et al 1990):* Η υψηλότερη βαθμολογία συγκεντρώνεται στο πρόβλημα 14, δηλαδή για τη μεταβολή της κατάστασης των ασυνεχειών και συγκεκριμένα για τη μέγιστη τιμή αυτής της παραμέτρου, δηλαδή το 81. Σημειώνεται ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν σταθερές τιμές, ίσες με αυτές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.3.

- *Colorado RHRS (Santi et al 2008):* Η υψηλότερη βαθμολογία συγκεντρώνεται στο πρόβλημα 7, δηλαδή για τη μεταβολή του αριθμού των ατυχημάτων και συγκεκριμένα για τη μέγιστη τιμή αυτής της παραμέτρου, δηλαδή το 81. Σημειώνεται ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν σταθερές τιμές, ίσες με αυτές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.3.

- *WSDOT's USMS (WSDOT 2007):* Ομοίως, η υψηλότερη βαθμολογία συγκεντρώνεται στο πρόβλημα 7, δηλαδή για τη μεταβολή του αριθμού των ατυχημάτων και συγκεκριμένα για τη μέγιστη τιμή αυτής της παραμέτρου, δηλαδή το 81. Σημειώνεται ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν σταθερές τιμές, ίσες με αυτές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.3.

2.2.3. Εφαρμογή του συστήματος Marinos et al. (2005)

Στον πίνακα που ακολουθεί διατυπώνονται οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων που μεταβάλονται στο σύστημα Marinos et al. (2005) και το εύρος της βαθμολογίας των παραμέτρων με ή χωρίς βαρύτητα.

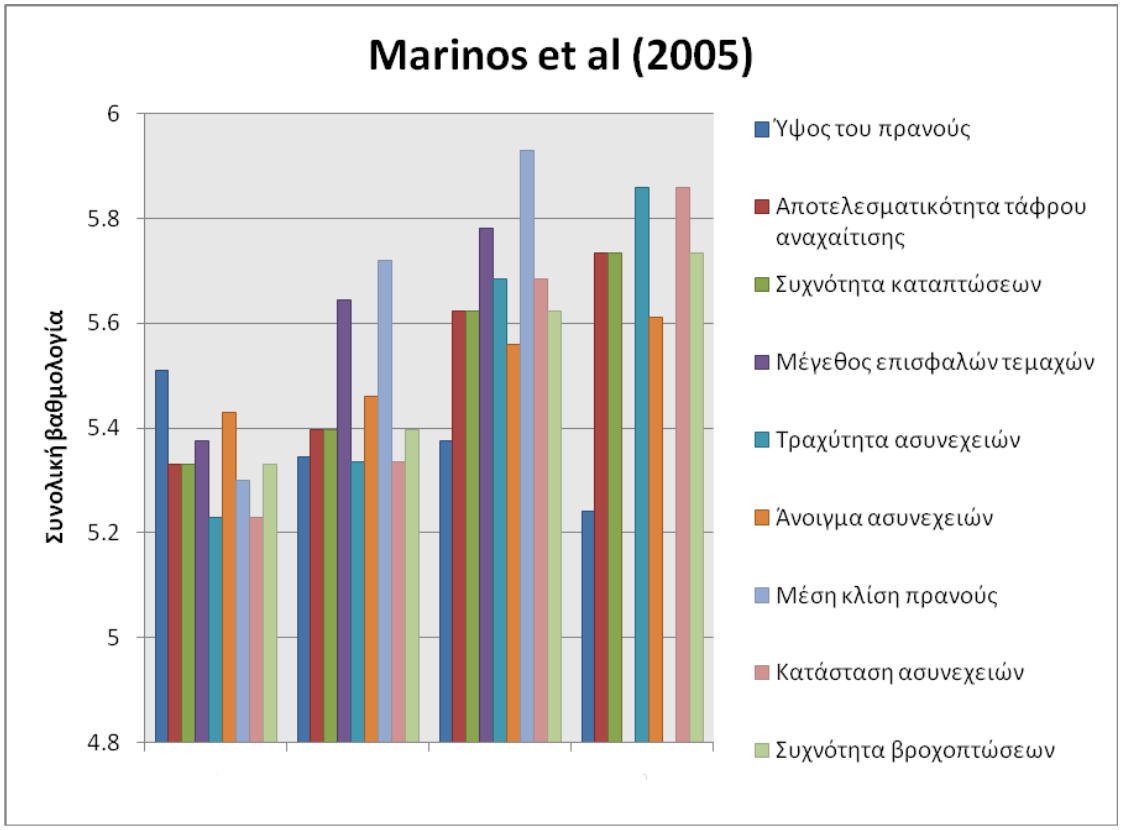
Παράμετροι	**Τιμές**	**Εύρος παραμέτρων**	**Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων (χωρίς βαρύτητα)**	**Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων (με βαρύτητα)**
Ύψος του πρανούς	30 m	<10 m, 10÷30 m, 30÷60 m, >60 m	1, 4, 7, 10	0.045, 0.18, 0.315, 0.45
Κατάσταση ασυνεχειών-Συνέχεια ασυνεχειών	Μέση 3÷10 m	Πολύ μικρή <1 m, Μικρή 1÷3 m, Μέση 3÷10 m, Υψηλή 10÷20 m, Πολύ υψηλή >20 m	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.07, 0.175, 0.35, 0.525, 0.7
Άνοιγμα ασυνεχειών	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Πολύ κλειστές <0.25 mm, Κλειστές 0.25÷2.5 mm, Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm, Πολύ πλατιές 10÷100 mm, Εξαιρετικά πλατιές 100÷1000 mm	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2
Μέση κλίση	40˚	<30˚, 30˚÷50˚, 50˚÷80˚, >80˚	1, 4, 7, 10	0.07, 0.28, 0.49, 0.7
Συχνότητα καταπτώσεων	Αρκετές	Λίγες έως καθόλου, Περιστασιακές, Αρκετές, Πολλές, Συνεχείς	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	5÷10 m	>20 m, 10÷20 m, 5÷10 m, 1÷5 m, Καθόλου	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45
Μέγεθος επισφαλών τεμαχών	2.5 m^3	<1 m^3, 1÷2.5 m^3, 2.5÷4 m^3, >4 m^3	1, 4, 7, 10	0.045, 0.18, 0.315, 0.45
Τραχύτητα ασυνεχειών	Κυματοειδής	Τραχεία-κλιμακωτή, Ολισθηρή-λεία κλιμακωτή, Κυματοειδής, Τραχεία επίπεδη, Ολισθηρή-λεία επίπεδη	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.07, 0.175, 0.35, 0.525, 0.7
Συχνότητα βροχοπτώσεων	Συχνά	Σπάνια έως καθόλου, σε αραιά χρονικά διαστήματα, συχνά, σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθ'όλη τη διάρκεια του έτους	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45

Πίνακας 2.2.5. Παράμετροι του συστήματος Marinos et al (2005).

Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται οι παράμετροι οι οποίες παραμένουν σταθερές κατά την παραμετρική ανάλυση, καθώς και οι τιμές τους.

Παράμετροι	**Τιμές**
Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	III
Προσανατολισμός των ασυνεχειών	Μέτριος
Υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών	Στιφρή άργιλος >5 mm
Εκτιμώμενη αξία των κατασκευών κατάντη του πρανούς	Μέτρια-Περιστασιακή παρουσία ανθρώπων-Υπό κατασκευή κτίσματα
Δυνατότητα επέμβασης στο πρανές	Μεγάλη δυνατότητα επέμβασης-Αρκετά εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας
Ικανότητα στράγγισης του πετρώματος	Μικρή
Θέση εκκίνησης των καταπτώσεων στο πρανές	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς
Αριθμός των επισφαλών τεμαχών	5÷10
Διαπερατότητα του πετρώματος	Μέτριας διαπερατότητας
Απόσταση των ασυνεχειών	Μέτρια απόσταση 200÷1000 mm

Πίνακας 2.2.6. Οι αμετάβλητες παράμετροι της ανάλυσης και οι τιμές τους.



Σχήμα 2.2.17. Η συνολική βαθμολογία για κάθε πρόβλημα με βάση το σύστημα Marinos et al. (2005). Οι τιμές στον οριζόντιο άξονα 1,2,3,4 αντιπροσωπεύουν τη διακύμανση της εκάστοτε παραμέτρου όταν οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές.

Σε όλες τις περιπτώσεις, δηλαδή για την εφαρμογή όλων των διαθέσιμων προβλήματων, η συνολική βαθμολογία προκύπτει πάντα μεγαλύτερη του 5.2. Η μέγιστη τιμή της συνολικής βαθμολογίας προκύπτει για τη μέγιστη τιμή της κλίσης του πρανούς, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές (δηλαδή λαμβάνουν τις αρχικές τιμές από τον πίνακα 2.2.6.) και είναι ίση με 5.93.

Επομένως, βάσει της κατηγοριοποίησης που γίνεται στο σύστημα Marinos et al. (2005) το εξεταζόμενο πρανές σε κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από μέτρια έως υψηλή επικινδυνότητα.

Ο κύριος λόγος που το σύστημα Marinos et al. (2005) συγκεντρώνει την χαμηλότερη βαθμολογία είναι διότι η βαθμονόμηση σε αυτό το σύστημα ακολουθεί τελείως διαφορετικό πρότυπο σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα. Τα υπόλοιπα συστήματα εφαρμόζουν την εκθετική βαθμολόγηση, κατά το πρότυπο του Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Στο Marinos et al. (2005), αντίθετα, κάθε παράμετρος μπορεί να

βαθμολογηθεί με τιμές από 1 έως 10 και έπειτα να συμμετάσχει στη βαθμονόμηση, πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή βαρύτητας, που εκτιμάται ανά περίπτωση.

Τέλος, και στα τρία συστήματα που χρησιμοποιούν την εκθετική βαθμολόγηση, καθώς και στο σύστημα Marinos et al. (2005) φαίνεται η απότομη αύξηση της συνολικής βαθμολογίας, καθώς αυξάνεται η τιμή μιας παραμέτρου. Αυτό οδηγεί σε μια πιο γρήγορη εκτίμηση των πρανών αυξημένης επικινδυνότητας.

2.2.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε ανάλυση και σύγκριση εννέα (9) συστημάτων, ώστε να βρεθούν τα πιο εύχρηστα και αξιόπιστα. Η πλειοψηφία των υφιστάμενων συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας χρησιμοποιεί ποσοτικές μεθόδους υπολογισμού, διότι με αυτόν τον τρόπο γίνεται ταχύτερη και πιο εύκολη η κατάταξη των πρανών. Αναφέρονται επίσης κυρίως σε τεχνητά πρανή οδοποιίας και χρησιμοποιούν το εκθετικό σύστημα βαθμολόγησης κατά το μοντέλο του Pierson (1990) στο Oregon RHRS, το οποίο και αποτελεί το σύστημα στο οποίο βασίζονται όλα τα επόμενα. Μόνο δύο συστήματα διαφέρουν ως προς τη βαθμονόμηση και αυτά είναι το Marinos et al RHRS (2005) και το ASRFR (Bolin et al 2009), τα οποία σχεδιάστηκαν για φυσικά πρανή και οι τιμές τους κυμαίνονται από 1 έως 10 και από 0 έως 1 αντίστοιχα.

Μετά από παραμετρική σύγκριση επιλέχθηκαν τα τέσσερα πιο αντιπροσωπευτικά συστήματα ως προς τις παραμέτρους που βαθμονομούν και έγινε περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση. Τα συστήματα που επιλέγησαν είναι το Oregon RHRS (Pierson et al 1990), το Marinos et al RHRS (2005), το τροποποιημένο Colorado RHRS (Santi et al 2008) και το WSDOT's USMS (WSDOT 2007). Με την επίλυση δεκαπέντε προβλημάτων σε ένα συγκεκριμένο πρανές επιχειρήθηκαν να βρεθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τη συνολική βαθμολογία ανά σύστημα. Για το σκοπό αυτό έγινε πλήθος παραδοχών και απλουστεύσεων. Παρότι σε κάθε σύστημα η συνολική βαθμολογία δεν κυμαίνεται στα ίδια όρια, διαπιστώθηκε ότι το πρανές σε κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από μέτρια επικινδυνότητα.

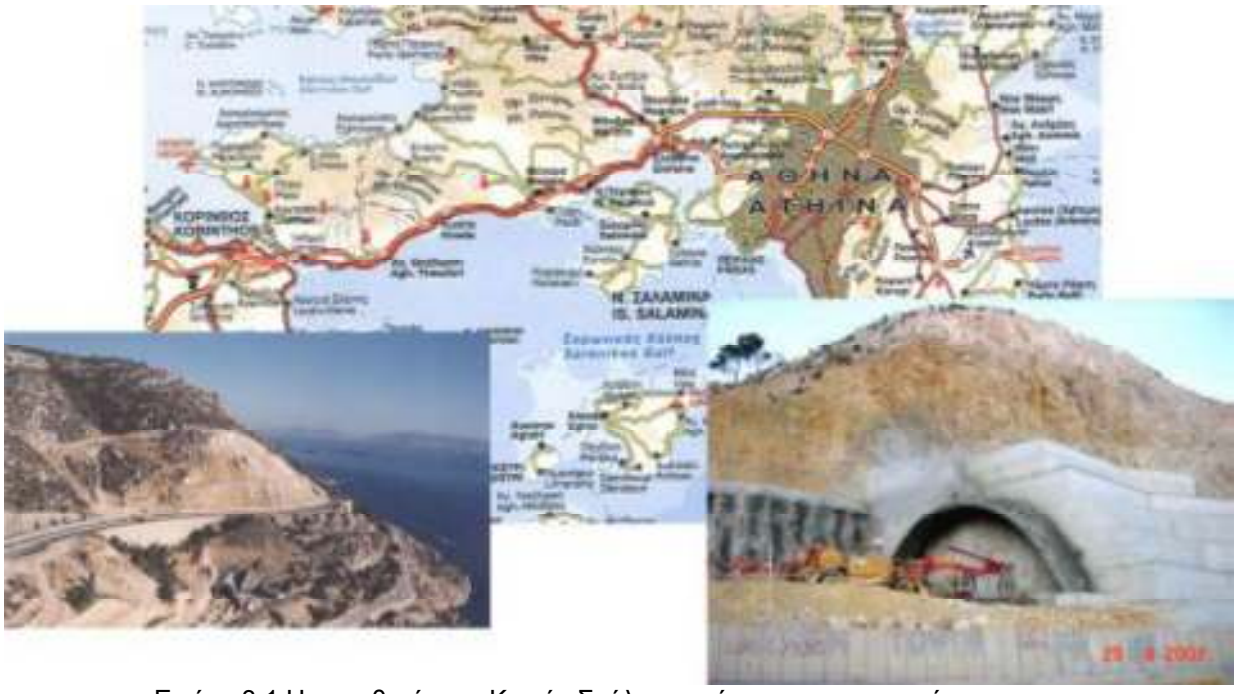
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΚΑΚΙΑΣ ΣΚΑΛΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται κατηγοριοποίηση των πρανών της Κακιάς Σκάλας και βαθμολόγησή τους με βάση τα συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), Colorado RHRS (Santi et al 20008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007), τα οποία αξιολογούν πρανή οδοποιίας. Στη συνέχεια εκτελείται παραμετρική ανάλυση για την εύρεση της ευαισθησίας της συνολικής βαθμολογίας σε σχέση με τη μεταβολή των παραμέτρων που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα.

Το τμήμα του αυτοκινητόδρομου «Αθήνα-Κόρινθος-Πάτρα» περιλαμβάνει την περιοχή της «Κακιάς Σκάλας», η οποία ονομάστηκε από την ομώνυμη περιοχή και απέχει 50 km περίπου από την Αθήνα. Το πρανές της Κακιάς Σκάλας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πρανούς στο οποίο συντελούνται αρκετά συχνά καταπτώσεις βράχων. Για την κατασκευή του αυτοκινητόδρομου έγινε βελτίωση των υποδομών της παλαιάς Εθνικής οδού καθώς και η διάνοιξη σηράγγων κατά μήκος του πρανούς. Οι πληροφορίες για το ανάγλυφο του πρανούς και τα χαρακτηριστικά ανά Χιλιομετρική Θέση (Χ.Θ.) λαμβάνονται από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ.



Εικόνα 3.1.Η τοποθεσία της Κακιάς Σκάλας και άποψη του πρανούς

3.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η περιοχή κοντά στις εισόδους της σήραγγας ΑΣ1 δομείται από εδαφικά υλικά και τεχνητές αποθέσεις, καθώς και από ασβεστόλιθους με μέτρια έως υψηλή τεκτονική καταπόνηση. Οι ασβεστόλιθοι είναι μαργαϊκοί με σημαντική πρωτογενή συγκέντρωση αργιλικού υλικού. Επιπλέον, στο σύνολό της η βραχόμαζα παρουσιάζει στοιχεία εδαφικά, λόγω της έντονης κατάκλασης των ασβεστολίθων, που ευνοήθηκε και από τη σύστασή τους. Ο έντονος κερματισμός και η κατάκλαση των ασβεστολίθων γίνεται ορατός και από την πληθώρα των συστημάτων ασυνεχειών. Παρατηρούνται ακόμα ζώνες μυλωνιτιωμένου υλικού σημαντικού πάχους, που αποτελείται από αργιλώδη άμμο. Οι ασβεστόλιθοι στην πλειοψηφία τους είναι διαπερατοί σχηματισμοί και ο σχηματισμός στο πόδας του πρανούς είναι μέτρια διαπερατός. Η τεκτονική δομή της περιοχής κοντά στις εισόδους της σήραγγας χαρακτηρίζεται από ρηξιγενείς ζώνες με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η ευρύτερη περιοχή του έργου χαρακτηρίζεται από ζώνη αυξημένης σεισμικότητα, κατηγορίας ΙΙ. Η κύρια ζώνη του ρήγματος στην περιοχή της

Κακιάς Σκάλας, που είναι περίπου 15 km, θεωρείται ως ενεργή από γεωτεκτονική άποψη.

Το έδαφος στην περιοχή της σήραγγας ΑΣ1, χαρακτηρίζεται από μέτρια έως απότομα κεκλιμένο πλαγιές και απότομους βράχους. Στο τμήμα του έργου μεταξύ των δυτικών στομίων των σηράγγων ΑΣ1 και των ανατολικών στομίων των σηράγγων ΑΣ2 η ασβεστολιθική βραχόμαζα είναι έντονα τεκτονισμένη κατά θέσεις, με οικογένειες συστημάτων ασυνεχειών.

Διαπιστώνεται ότι η ανάπτυξη στις ανώτερες υψομετρικές θέσεις ασβεστολιθικών εξάρσεων και παρακατακόρυφων πρανών αποτελεί κατά κανόνα βασική προϋπόθεση εκδήλωσης βραχοπτώσεων.

Πιο αναλυτικά, η βραχόμαζα αποτελείται από:

- ελαφρά έως εντατικά κατακλαστικούς ασβεστόλιθους,
- κροκαλοπαγή και
- λατυποπαγή

Εικόνα 3.2. Τμήμα του πρανούς της Κακιάς Σκάλας.

3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε κατηγοριοποίηση των δοθέντων τομών σε πέντε (5) κατηγορίες ανάλογα με την αλλαγή στα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου (ύψος του πρανούς, κλίση κλπ).

- Θέση 1: Περιλαμβάνει τις Χ.Θ. 1+627.23, 1+950.00, 2+100.00, 2+337.03, 2+777.14, 3+203.55, 3+395.463, 4+948.14, και 5+077.27
- Θέση 2: Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 2+200.00
- Θέση 3: Περιλαμβάνει τις Χ.Θ. 2+477.49, 5+525.75, 5+606.76, 5+836.72 και 5+933.87
- Θέση 4: Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 5+756.19
- Θέση 5: Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 4+134.60

Όπου, τα στοιχεία για το ύψος, τη μέση κλίση του πρανούς, την αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης και το μέγεθος των επισφαλών τεμαχών ελήφθησαν από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ.

Θέση 1				
Χ.Θ.	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης**	**Μέγεθος επισφαλών τεμαχών**
1+647.23	45.00	62˚	Μέτρια	2.5 m³
1+950.00	47.00	60˚	Μέτρια	2.5 m³
2+100.00	50.00	82˚	Μέτρια	2.5 m³
2+337.03	41.00	53˚	Μέτρια	2.5 m³
2+777.14	32.00	34˚	Μέτρια	2.5 m³
3+203.55	40.00	45˚	Μέτρια	2.5 m³
3+395.463	40.00	30˚	Μέτρια	2.5 m³
4+948.14	60.00	50˚	Μέτρια	2.5 m³
5+077.27	36.00	35˚	Μέτρια	2.5 m³

Πίνακας 3.1. Στοιχεία από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ για τις Χ.Θ. που υπάγονται στη Θέση 1.

Θέση 2				
Χ.Θ.	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης**	**Μέγεθος επισφαλών τεμαχών**
2+200.00	50.00	45˚	Καλή	2.5 m³

Πίνακας 3.2. Στοιχεία από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ για τις Χ.Θ. που υπάγονται στη Θέση 2.

Θέση 3				
Χ.Θ.	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης**	**Μέγεθος επισφαλών τεμαχών**
2+477.49	24.00	45˚	Μέτρια	2.5 m³
5+525.75	18.00	26˚	Μέτρια	2.5 m³
5+606.76	22.00	47˚	Μέτρια	2.5 m³
5+836.72	23.00	49˚	Μέτρια	2.5 m³
5+933.87	29.00	29˚	Μέτρια	2.5 m³

Πίνακας 3.3. Στοιχεία από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ για τις Χ.Θ. που υπάγονται στη Θέση 3.

Θέση 4				
Χ.Θ.	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης**	**Μέγεθος επισφαλών τεμαχών**
5+756.19	13.00	34˚	Μέτρια	2.5 m³

Πίνακας 3.4. Στοιχεία από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ για τις Χ.Θ. που υπάγονται στη Θέση 4.

Θέση 5				
Χ.Θ.	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης**	**Μέγεθος επισφαλών τεμαχών**
4+134.60	40.00	28˚	Μέτρια	2 m³

Πίνακας 3.5. Στοιχεία από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ για τις Χ.Θ. που υπάγονται στη Θέση 5.

Στην περιοχή της Κακιάς Σκάλας διέρχεται ο αυτοκινητόδρομος «Αθήνα- Κόρινθος- Πάτρα» και τα εξεταζόμενα πρανή βαθμολογούνται με βάση τα συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), Colorado RHRS (Santi et al 20008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007), τα οποία αφορούν πρανή οδοποιίας.

Ακολουθούν οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων κατά μήκος του πρανούς:

- **Κοινές παράμετροι και στα τρία (3) συστήματα:**
  - *Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης:* 50%
  - *Μέσος κίνδυνος οχήματος:* 50%
  - *Συχνότητα καταπτώσεων:* Πολλές

- **Παράμετροι του Oregon RHRS (Pierson et al 1990):**
  - *Τραχύτητα* ασυνεχειών: Κυματοειδής
  - *Συνολικό πλάτος οδού* : 10 m
  - *Κλίμα και παρουσία νερού στο πρανές:* Μέτριες βροχοπτώσεις- Μέτριοι περίοδοι παγετού- Περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές
  - *Κατάσταση ασυνεχειών:* Ασυνεχείς διακλάσεις – Δυσμενής προσανατολισμός

- **Colorado RHRS (Santi et al 20008):**
  - *Τραχύτητα* ασυνεχειών: Κυματοειδής
  - *Διήθηση- Νερό:* Υγρό- Νωπό
  - *Κλίμα και παρουσία νερού στο πρανές:* Μέτριες βροχοπτώσεις- Μέτριοι περίοδοι παγετού- Περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές
  - *Ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων:* 250÷500 mm
  - *Αριθμός ατυχημάτων:* 4÷5

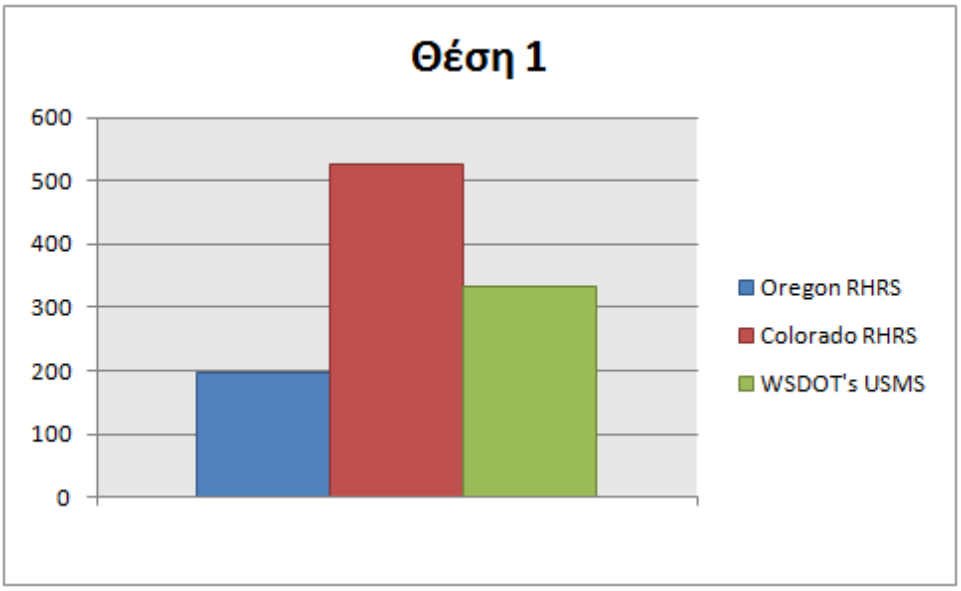
- *Εμμονή*- προσανατολισμός: >3 m and clips into slope
- *Βαθμός διαστρωμάτωσης:* 1÷2weak interbeds,<15cm (δεν εμφανίζεται διαστρωμάτωση)
- *Ετήσιοι κύκλοι παγετού-τήξης :* 6÷10
- *Προσανατολισμός του πρανούς:* ΒΑ, ΝΔ
- *Αριθμός των συνόλων ασυνεχειών:* >2
- *Άνοιγμα ασυνεχειών:* 1÷5 mm
- *Κατάσταση αποσάθρωσης:* Φρέσκια
- *Δείκτης αποσάθρωσης (Jar slake):* 6 (δεν υπάρχουν ίχνη αποσάθρωσης)
- *Βαθμός απόκλισης – Ιζηματογενή :* 0.3÷0.6 m
- *Γενικοί παράγοντες εκκίνησης:* Ασήμαντοι (<0.6m επιφανειακή διακύμανση)

- **WSDOT's USMS (WSDOT 2007):**
  - *Συνολικό πλάτος οδού* : 10 m
  - *Μέση ημερήσια κυκλοφορία :* 2751÷5000 οχήματα
  - *Αριθμός ατυχημάτων:* 4÷5
  - *Συχνότητα συντήρησης ανά έτος :* 1÷3
  - *Οικονομικός παράγοντας :* Μικρές παρακάμψεις < 4.8 m
  - *Ετήσιο κόστος συντήρησης:* 10000÷50000 $ (7000÷35000 €)
  - *Ζημία οδοστρώματος :* Μέτρια- Ο οδηγός πρέπει να ελαττώσει ταχύτητα
  - *Επίδραση της κατάπτωσης στην οδό :* 15.24÷61 m
  - *Roadway impendence :* *½ της οδού*

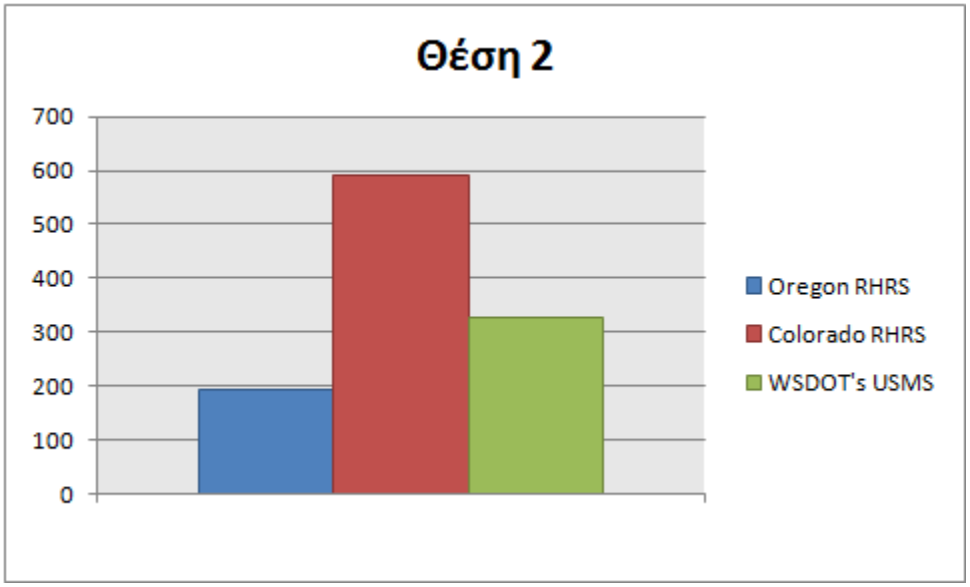
Εικόνα 3.3. Τμήμα του πρανούς της Κακιάς Σκάλας.

3.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

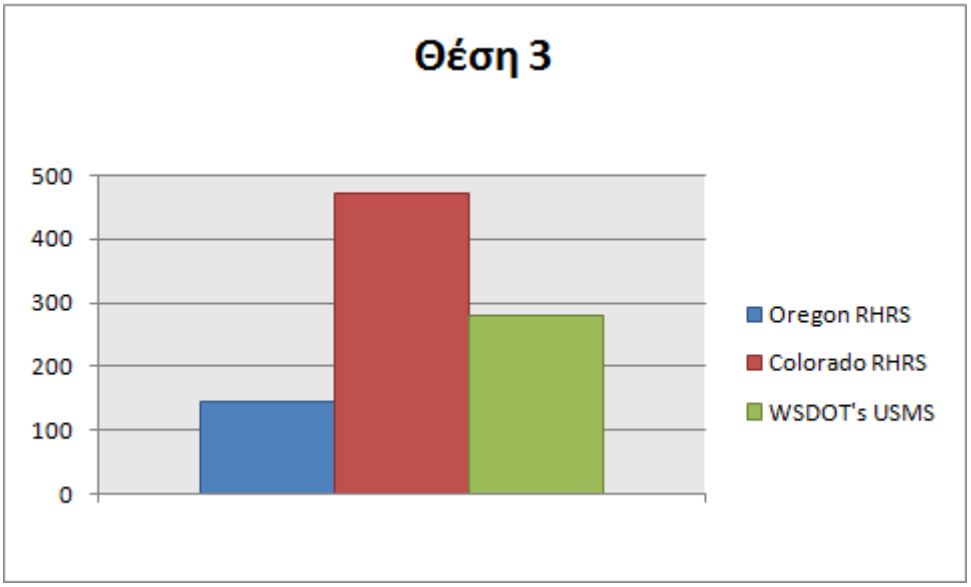
Παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις πέντε (5) θέσεις, που αναφέρθηκαν παραπάνω.



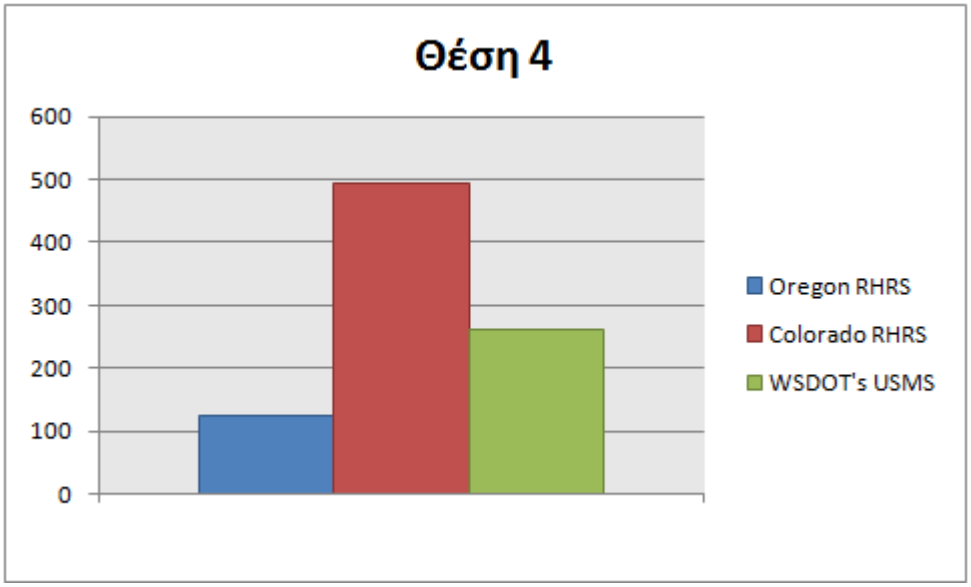
Σχήμα 3.1. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS στη Θέση 1.



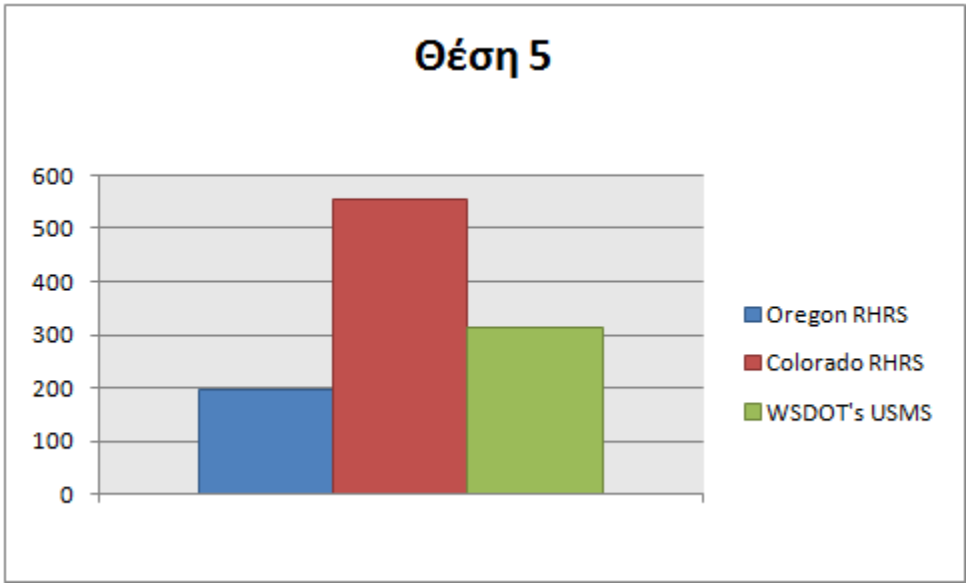
Σχήμα 3.2. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS στη Θέση 2.



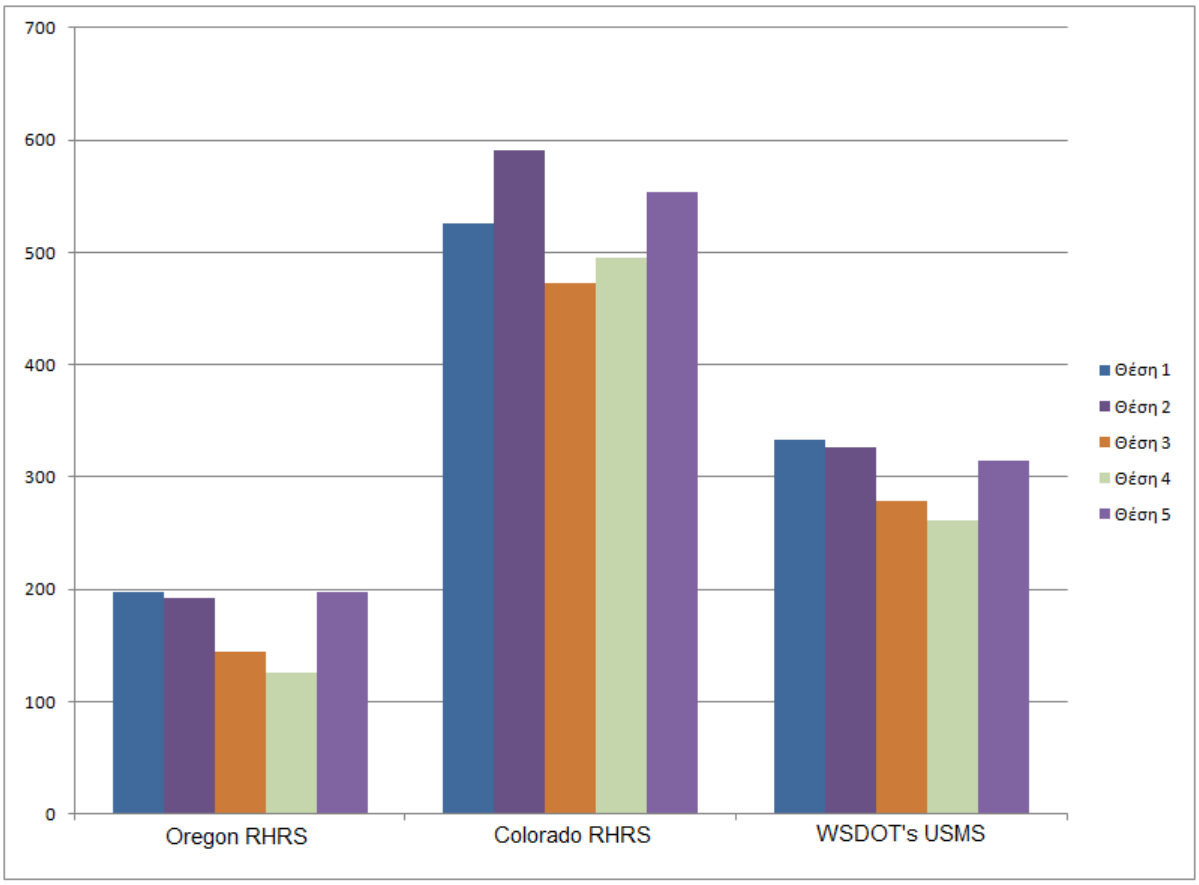
Σχήμα 3.3. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS στη Θέση 3.



Σχήμα 3.4. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS στη Θέση 4.



Σχήμα 3.5. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS στη Θέση 5.



Σχήμα 3.6. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS και στις πέντε (5) θέσεις.

Σκοπός της ανάλυσης του πρανούς της Κακιάς Σκάλας είναι η κατάταξη επικινδυνότητας ανά Θέση. Όπως προαναφέρθηκε μόνο το Marinos et al. (2005) και το τροποποιημένο Colorado RHRS (Santi et al 2008) από τα εξεταζόμενα συστήματα κατατάσσουν τα πρανή σε κατηγορίες επικινδυνότητας, ανάλογα με τη συνολική βαθμολογία. Οι Santi et al ωστόσο συνέταξαν αυτούς τους πίνακες για τα block-in-matrix και τα κρυσταλλικά υλικά. Στο πρανές της Κακιάς Σκάλας όμως επικρατούν τα ιζηματογενή υλικά. Για την κατάταξη των Θέσεων ως προς την επικινδυνότητα έγινε η απλουστευτική παραδοχή ότι η τελική κατάταξη στα ιζηματογενή υλικά μπορεί να προσομοιωθεί με εκείνη των block-in-matrix. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της τελικής βαθμολογίας για την κατάταξη ως προς την επικινδυνότητα, αφαιρούνται από τη συνολική βαθμολογία του συστήματος οι τιμές των παραμέτρων κινδύνου, δηλαδή του συνολικού αριθμού των ατυχημάτων, του μέσου κινδύνου του οχήματος και του ποσοστιαίου χρόνου αντίδρασης.

Στη συνέχεια, παρατίθεται ο πίνακας για την κατάταξη της επικινδυνότητας στα block-in-matrix υλικά, έτσι όπως συντάχθηκε από τους Santi et al (2008).

Block-in-matrix πρανή			
Συνολική βαθμολογία	0÷449	450÷599	≥ 600
Κατάταξη επικινδυνότητας	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή

Πίνακας 3.6 Κατάταξη επικινδυνότητας για τα block-in-matrix πρανή (Santi et al. Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System, 2008)

Ακολουθεί η κατάταξη των Θέσεων του πρανούς της Κακιάς Σκάλας, με βάση την παραδοχή που έγινε, για την τελική βαθμολογία που υπολογίζεται στο Colorado RHRS.

Θέση	**Τελική βαθμολογία**	**Κατάταξη επικινδυνότητας**
1	463	Μέτρια
2	528	Μέτρια
3	410	Χαμηλή
4	432	Χαμηλή
5	491	Μέτρια

Πίνακας 3.7 Κατάταξη επικινδυνότητας

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, που παριστάνονται στα σχήματα 3.1. έως και 3.6. παρατηρείται ότι:

1. Στο σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008) συγκεντρώνονται οι υψηλότερες βαθμολογίες. Αντίθετα, οι χαμηλότερες βαθμολογίες παρατηρούνται στο Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα αξιολογεί διαφορετικό αριθμό παραμέτρων. Για την ακρίβεια το Oregon RHRS βαθμονομεί δέκα (10) παραμέτρους, ενώ το WSDOT's USMS βαθμονομεί δεκαπέντε (15) παραμέτρους και το Colorado RHRS είκοσι μία (21) παραμέτρους.

2. Ο μικρός αριθμός των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στο Oregon RHRS πιθανώς να μην καλύπτει την πολυπλοκότητα του προβλήματος στην εκάστοτε θέση.

3. Το σύστημα WSDOT's USMS μειονεκτεί έναντι των υπόλοιπων δύο, καθώς δε λαμβάνει υπόψη τις γεωλογικές παραμέτρους του εκάστοτε πρανούς και επικεντρώνεται στις παραμέτρους, που αφορούν τις κυκλοφοριακές συνθήκες, οι οποίες γενικά χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα.

4. Το Colorado RHRS είναι το μόνο από τα τρία συστήματα, το οποίο αξιολογεί σε ικανοποιητικό βαθμό τόσο τις παραμέτρους που περιγράφουν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, όσο και αυτές που περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Εμφανίζει ωστόσο ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το ότι το πλήθος των παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της συνολικής βαθμολογίας είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να καθιστά δύσχρηστο το σύστημα και ότι η περιγραφή των παραμέτρων και η βαθμονόμησή τους επιδέχονται βελτίωση, για την εξάλειψη των υποκειμενικών κρίσεων.

5. Τα πρανή με τη μεγαλύτερη βαθμολογία ανήκουν στις θέσεις 1, 2 και 5, και επομένως χαρακτηρίζονται ως τα πιο επικίνδυνα για καταπτώσεις τεμαχών βράχου. Αντίθετα, τα πρανή με τη μικρότερη βαθμολογία και άρα με μικρότερη συγκριτικά επικινδυνότητα ανήκουν στις θέσεις 3 και 4. Δηλαδή, σημειώνεται μία κανονικότητα και συμφωνία στα αποτελέσματα των αναλύσεων και στα τρία συστήματα. Αυτό οφείλεται αφενός στο ότι τα συστήματα βασίζονται στο εκθετικό πρότυπο βαθμολόγησης που προτάθηκε από τους Pierson et al (1990), και αφετέρου στο γεγονός ότι οι περισσότερες παράμετροι λαμβάνουν παρόμοιες

τιμές ανά σύστημα, διότι εξετάζεται ένα συγκεκριμένο πρανές. Εξαίρεση αποτελεί η βαθμονόμηση της παραμέτρου «μέση κλίση του πρανούς» στο Colorado RHRS (Santi et al 2008) η οποία προκύπτει από διάγραμμα, ως αποτέλεσμα συνεχούς συνάρτησης.

6. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη η συμβολή της βλάστησης και της φυτικής γης ως παράγοντες επιβράδυνσης και αναχαίτισης των βραχοπτώσεων, όπως και η ύπαρξη των αιγοπροβάτων στην περιοχή για βοσκή ως παράγοντας έναρξης των καταπτώσεων και χαλάρωσης των επιφανειακώς ευρισκόμενων βραχωδών τεμαχών.

7. Επίσης, δε λήφθηκε υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας (εκσκαφές) και η σπουδαιότητα των κατασκευών κατάντη του πρανούς, καθώς κατάντη βρίσκεται η Κινέττα, μια περιοχή με αρκετές εξοχικές κατοικίες.

8. Τέλος, ισχύει ότι τα τελικά αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τις παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που χαρακτηρίζονται με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα εξ ορισμού είναι όσες περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες και όσες βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία (π.χ. συχνότητα καταπτώσεων) και στην κρίση του μελετητή (π.χ. μέγεθος επισφαλών τεμαχών, τραχύτητα των ασυνεχειών). Από αβεβαιότητα χαρακτηρίζονται και τα στοιχεία που λήφθηκαν από τις τομές στη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ, καθώς υπολογίστηκαν το μέσο ύψος και η μέση κλίση του πρανούς, οπότε είναι πιθανό να υπερεκτιμήθηκε το τελικό αποτέλεσμα.

Εικόνα 3.4. Η μορφολογία του πρανούς σε είσοδο σήραγγας.

3.5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν την κυκλοφορία, τα ιστορικά στοιχεία και την κρίση του μελετητή χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα. Για το λόγο αυτό, ακολουθήθηκε μια επιπλέον παραμετρική ανάλυση στις Θέσεις 2 και 3, οι οποίες προηγουμένως συγκέντρωσαν τις μεγαλύτερες και τις μικρότερες βαθμολογίες αντίστοιχα. Σκοπός της παραμετρικής ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζει η διακύμανσή των παραμέτρων αυτών τη συνολική βαθμολογία και επομένως την κατάταξη του πρανούς ως προς την επικινδυνότητά του.

3.5.1 Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους της κυκλοφορίας

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, πραγματοποιείται διερεύνηση ως προς την παράμετρο «μέσος κίνδυνος οχήματος», διότι αποτελεί παράμετρο κοινή και στα τρία συστήματα ταξινόμησης, και εμφανίζει ίδια αρχική τιμή και εύρος τιμών με την παράμετρο «ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης». Η συνολική βαθμολογία που αντιστοιχεί στην τιμή 27 αποτελεί το αποτέλεσμα της αρχικής εκτίμησης.

3.5.2 Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους από ιστορικά στοιχεία

Σε αυτό το παράδειγμα, πραγματοποιείται διερεύνηση ως προς την παράμετρο «συχνότητα καταπτώσεων», η οποία αποτελεί παράμετρο που προκύπτει από ιστορικά στοιχεία και είναι κοινή και στα τρία συστήματα ταξινόμησης. Η συνολική βαθμολογία που αντιστοιχεί στην τιμή 27 αποτελεί το αποτέλεσμα της αρχικής εκτίμησης. Εμφανίζει ακόμα την ίδια αρχική τιμή και εύρος τιμών με τις παραμέτρους κυκλοφορίας.

3.5.3. Παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους που απαιτούν την κρίση του μελετητή

Σε αυτήν την περίπτωση, πραγματοποιείται διερεύνηση ως προς την παράμετρο «τραχύτητα ασυνεχειών», η οποία αποτελεί παράμετρο κοινή στα συστήματα Oregon RHRS και Colorado RHRS, και εμφανίζει ενδιαφέρον, καθώς η βαθμονόμησή της διαφέρει μεταξύ των δύο συστημάτων και η βαθμολόγησή της βασίζεται στην κρίση του μελετητή. Η συνολική βαθμολογία που αντιστοιχεί στην τιμή 9 αποτελεί το αποτέλεσμα της αρχικής εκτίμησης.

3.5.4 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

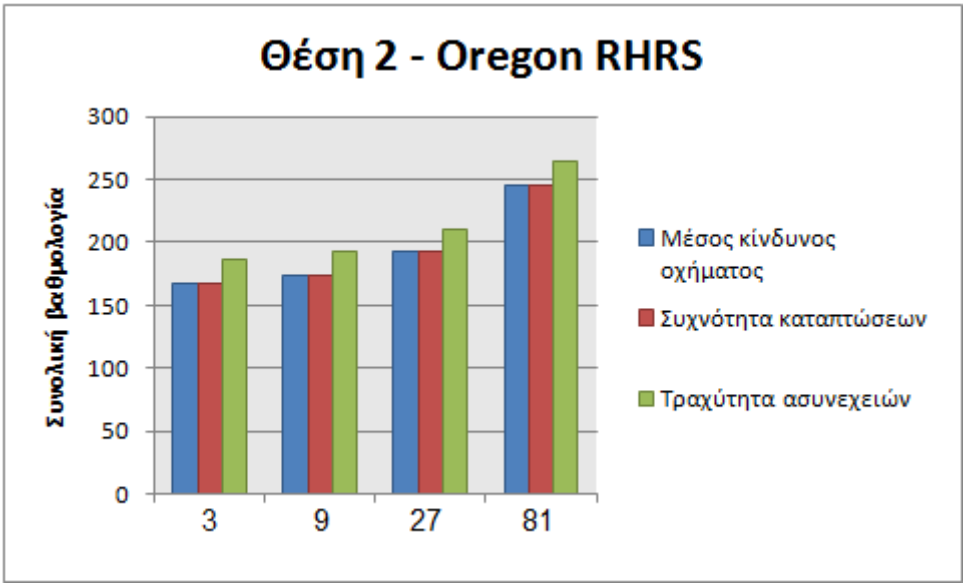
Τα αποτελέσματα της εκάστοτε ανάλυσης παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες και σχήματα. Στα κελιά κάθε πίνακα αναγράφεται η συνολική βαθμολογία ανά παράμετρο και ανά σύστημα. Για κάθε Θέση συντάσσεται διαφορετικός πίνακας. Στα σχήματα παρουσιάζονται γραφικά τα τελικά αποτελέσματα για τη διευκόλυνση της σύγκρισης.

Παράμετροι	**Θέση 2**											
	Oregon RHRS				**WSDOT's USMS**				**Colorado RHRS**			
Μέσος κίνδυνος οχήματος	168	174	192	246	303	309	327	381	567	573	591	645
Συχνότητα καταπτώσεων	168	174	192	246	303	309	327	383	567	573	591	647
Τραχύτητα ασυνεχειών	186	192	210	264	-	-	-	-	585	591	609	665

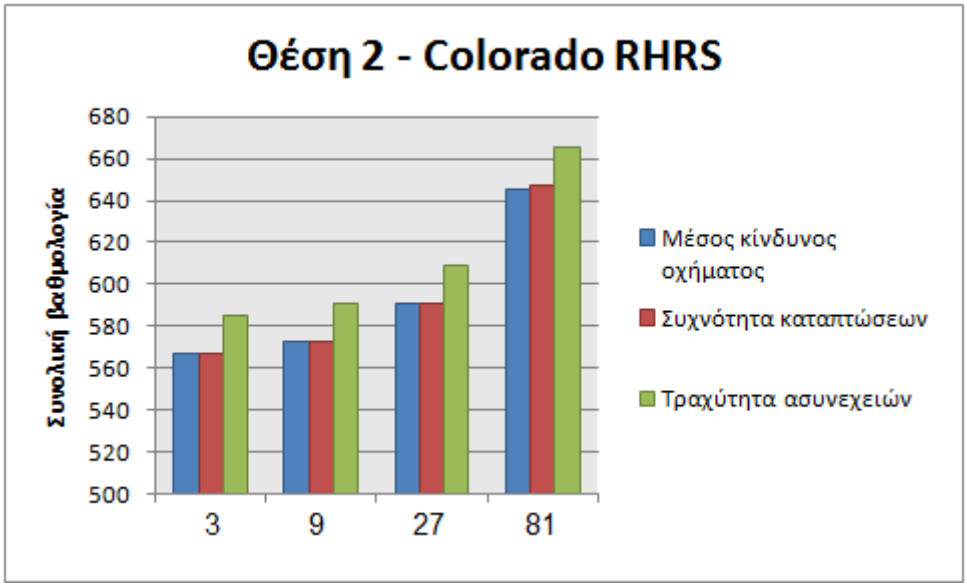
Πίνακας 3.6. Η συνολική βαθμολογία ανά παράμετρο και ανά σύστημα στη Θέση 2.

Παράμετροι	**Θέση 3**											
	Oregon RHRS				**WSDOT's USMS**				**Colorado RHRS**			
Μέσος κίνδυνος οχήματος	120	126	144	198	255	261	279	333	449	455	473	527
Συχνότητα καταπτώσεων	120	126	144	198	255	261	279	335	449	455	473	529
Τραχύτητα ασυνεχειών	138	144	162	216	-	-	-	-	467	473	491	547

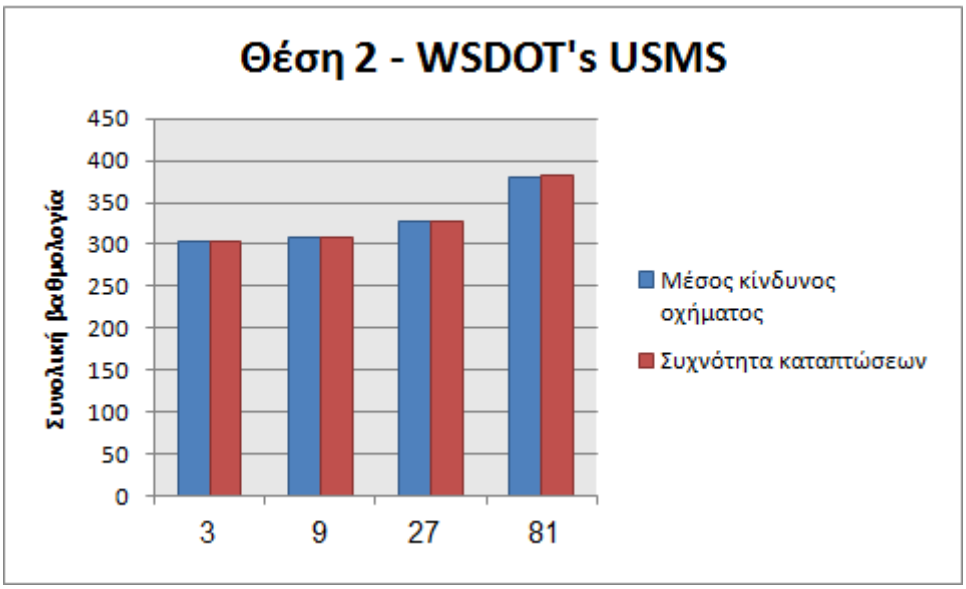
Πίνακας 3.7. Η συνολική βαθμολογία ανά παράμετρο και ανά σύστημα στη Θέση 3.



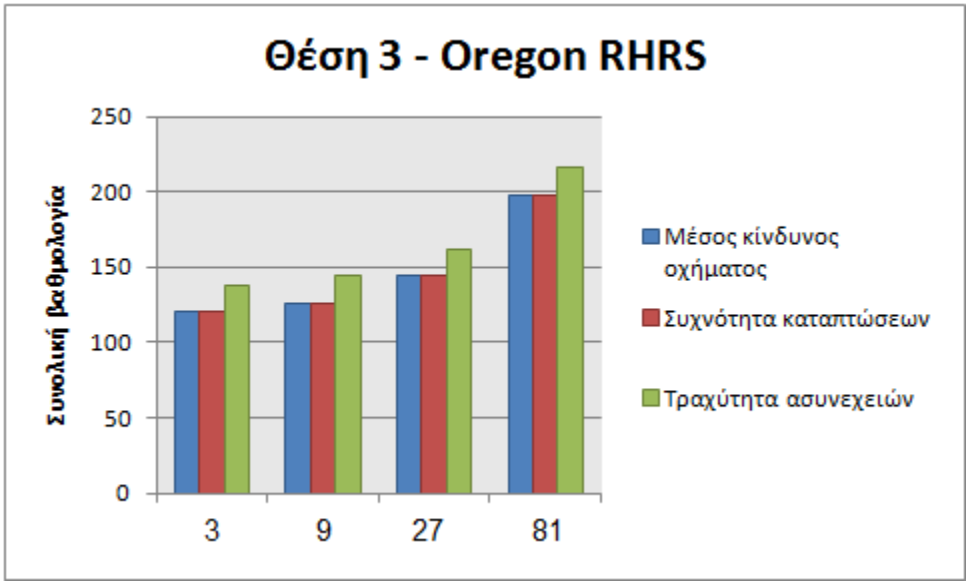
Σχήμα 3.7. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 2 με βάση το σύστημα Oregon RHRS (Pierson et al 1990).



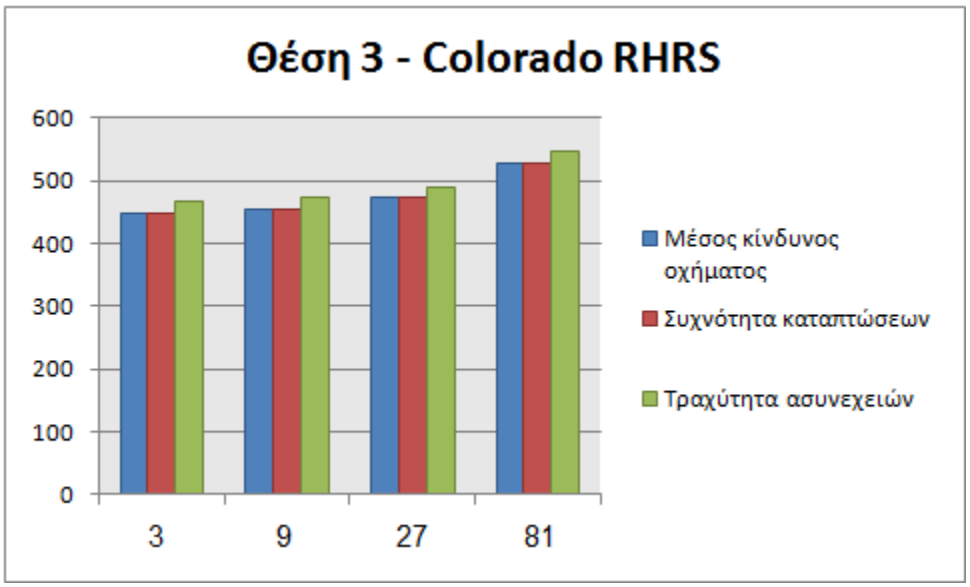
Σχήμα 3.8. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 2 με βάση το σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008).



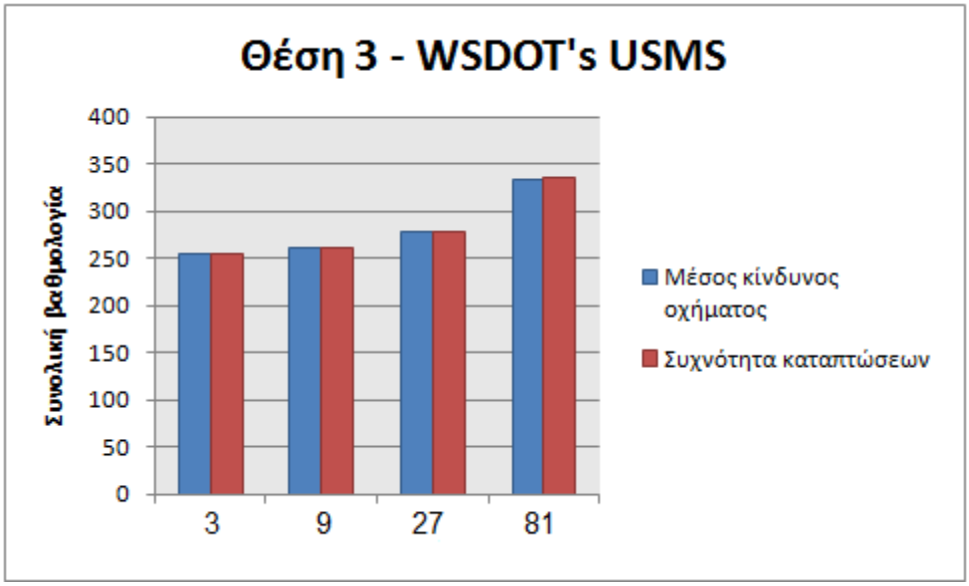
Σχήμα 3.9. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 2 με βάση το σύστημα WSDOT's USMS (WSDOT 2007).



Σχήμα 3.10. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 3 με βάση το σύστημα Oregon RHRS (Pierson et al 1990).



Σχήμα 3.11. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 3 με βάση το σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008).



Σχήμα 3.12. Συνολική βαθμολογία στη Θέση 3 με βάση το σύστημα WSDOT's USMS (WSDOT 2007).

Με βάση τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι:

1) Η Θέση 3 συγκεντρώνει σε κάθε περίπτωση υψηλότερη βαθμολογία από τη Θέση 2, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από υψηλή επικινδυνότητα. Σε κάθε περίπτωση η κατάταξη επικινδυνότητας για το Colorado RHRS παραμένει σταθερή, και ίδια με αυτή στην παράγραφο 3.4, δηλαδή η Θέση 2 χαρακτηρίζεται από χαμηλή επικινδυνότητα και η Θέση 3 από μέτρια επικινδυνότητα.

2) Και στις δύο Θέσεις η συνολική βαθμολογία για τις παραμέτρους «μέσος κίνδυνος οχήματος» και «συχνότητα καταπτώσεων» προκύπτει πάντοτε η ίδια. Οι δύο αυτές παράμετροι διαθέτουν την ίδια αρχική τιμή (27) και το ίδιο εύρος τιμών (3,9,27,81), επομένως είναι αναμενόμενο να συγκεντρώνουν την ίδια βαθμολογία σε κάθε περίπτωση της παραμετρικής ανάλυσης.

3) Σε κάθε περίπτωση η συνολική βαθμολογία που προκύπτει από τη διακύμανση της παραμέτρου «τραχύτητα ασυνεχειών» είναι εμφανώς μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζει μικρότερη αρχική τιμή (9) από αυτή των υπολοίπων παραμέτρων που μεταβάλλονται, οι οποίες κατά την ανάλυση για την τραχύτητα παραμένουν σταθερές και ίσες με 27.

Εικόνα 3.5. Άποψη της παλαιάς και της νέας Εθνικής οδού στο πρανές της Κακιάς Σκάλας.

3.7 *ΣΥΝΟΨΗ*

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των συστημάτων Oregon RHRS (Pierson et al 1990), Colorado RHRS (Santi et al 20008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007) στο πρανές της Κακιάς Σκάλας είναι ο χωρισμός των Θέσεων σε ζώνες επικινδυνότητας ως προς τις καταπτώσεις. Για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας έγιναν αρκετές παραδοχές για τις παραμέτρους των συστημάτων, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα ως προς τη συνολική βαθμολογία. Με σκοπό τη διερεύνηση της ευπάθειας της τελικής βαθμολογίας σε σχέση με τις παραμέτρους αυτές, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση. Ανεξαρτητα από τις μεταβολές των παραμέτρων που συνήθως χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, διαπιστώθηκε ότι η τελική κατάταξη των Θέσεων του πρανούς παραμένει σταθερή. Δηλαδή οι Θέσεις του πρανούς χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως μέτρια επικινδυνότητα.

Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι πολλοί παράγοντες που πιθανόν να επηρεάζουν σημαντικά την κατάταξη του πρανούς δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Για παράδειγμα αγνοήθηκαν: η συμβολή της βλάστησης και της φυτικής γης ως παράγοντες επιβράδυνσης και αναχαίτισης των βραχοπτώσεων, η ύπαρξη των αιγοπροβάτων στην περιοχή για βοσκή ως παράγοντας έναρξης των καταπτώσεων και χαλάρωσης των επιφανειακώς ευρισκόμενων βραχωδών τεμαχών, ο ανθρώπινος παράγοντας (εκσκαφές) και η σπουδαιότητα των κατασκευών κατάντη του πρανούς, καθώς κατάντη βρίσκεται η Κινέττα, μια περιοχή με αρκετές εξοχικές κατοικίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το παράδειγμα του πρανούς της Μονεμβάσιας και γίνεται κατάταξη αυτού με βάση το σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας Marinos et al (2005). Η περιοχή της Μονεμβάσιας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας περιοχής στην οποία παίζουν σημαντικό ρόλο οι καταπτώσεις. Η Κάτω Πόλη κατοικείται και φιλοξενεί και αρκετούς τουρίστες, παρότι ο κίνδυνος καταπτώσεων είναι αρκετά υψηλός. Οι καταπτώσεις βράχων είναι ένα φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται στην περιοχή από την αρχαιότητα.

Στα ανατολικά παράλια της Λακωνικής χερσονήσου, 20 ναυτικά μίλια από το ακρωτήριο Μαλέας και 84 από τον Πειραιά στέκεται η Μονεμβάσια. Μια στενή λωρίδα γης και γέφυρα μήκους 130 m, την ενώνει με την στεριά. Από το γεγονός της μόνης αυτής δυνατότητας σύνδεσής της με την ξηρά, πήρε και το όνομα της Μονεμβασιά (μόνη έμβαση). Ο βράχος της Μονεμβάσιας είναι το αποτέλεσμα ενός ισχυρότατου σεισμού που τοποθετείται χρονολογικά γύρω στο Νοέμβριο του 375 μ.Χ. Η σεισμική δόνηση προκάλεσε μεγάλες αλλαγές στη γεωλογική διαμόρφωση του τοπίου. Τα παράλια της Λακωνικής χερσονήσου και ιδιαίτερα της περιοχής Επιδαύρου Λιμηράς, υπέστησαν καθίζηση. Στη Μονεμβάσια η καθίζηση έλαβε χώρα στα κράσπεδα του βράχου και μόνο προς τη δυτική πλευρά του, οπότε και τα νερά της θάλασσας τον κάλυψαν. Ο βράχος της Μονεμβάσιας έχει μήκος 1500 m περίπου και μέγιστο πλάτος 600 m, ενώ το ύψος του αγγίζει τα 100 m. Περιλαμβάνει τα δυο οχυρωμένα, αθέατα από την ξηρά, οικιστικά σύνολα, της Κάτω Πόλης, (η οποία καταλαμβάνει έκταση 7.500 m²) και της Άνω Πόλης, (έκτασης 120.000 m²) η οποία βρίσκεται στο κεκλιμένο πλάτωμα της κορυφής. Το έδαφος είναι κατά βάση πετρώδες, άνυδρο και με αραιή βλάστηση.

Εικόνα 4.1. Γενική άποψη του βράχου της Μονεμβάσιας

4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ο κύριος γεωλογικός σχηματισμός που απαντάται στην περιοχή είναι οι ασβεστόλιθοι της Τρίπολης, οι οποίοι διαχωρίζονται σε ενστρώσεις ασβεστολίθων Ιουρασικής ηλικίας και άστρωτους ασβεστόλιθους Κρητιδικής ηλικίας. Το βραχώδες πρανές, το οποίο βρίσκεται πάνω από την ιστορική πόλη αποτελείται από κρητιδικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι εμφανίζουν καλή συμπεριφορά σχεδόν σε όλο το μήκος του πρανούς, έχουν υψηλό δείκτη GSI, με λίγες ασυνέχειες τυχαίου προσανατολισμού. Δύο μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες, με διεύθυνση Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ, τέμνουν τους σχηματισμούς, που αποτελούν το υψηλό ακρωτήριο.

Η ασβεστολιθική βραχώδης μάζα είναι μέτρια κερματισμένη και αποτελείται από αρκετά μεγάλες κατακόρυφες ρηγματώσεις, οι οποίες έχουν διεύθυνση παράλληλη στις ρηξιγενείς ζώνες, που συγκροτούν το μέτωπο του πρανούς. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι αρκετά μεγάλη (μεγαλύτερη του 1 m), καθώς και το μέγεθος των τεμαχών βράχου είναι μεγάλο έως πολύ μεγάλο. Σε ορισμένες θέσεις, κυρίως λόγω αποτόνωσης η βραχόμαζα είναι πολύ κερματισμένη και το μέγεθος των τεμαχών βράχου είναι μικρότερο, κυρίως στο ανώτατο τμήμα και στην κορυφή του πρανούς, όπου θεμελιώνονται τα τείχη της αρχαίας πόλης. Ο ασβεστόλιθος είναι

καρστικοποιημένος σε ορισμένες θέσεις και έχουν δημιουργηθεί καρστικά κενά μεγάλων διαστάσεων, τα οποία υποσκάπτουν το βραχώδες πρανές.

Η μορφολογία της περιοχής του κάστρου της Μονεμβάσιας είναι αρκετά έντονη με τα πρανή να χαρακτηρίζονται απότομα, διότι οι κλίσεις τους προσεγγίζουν και αρνητικές τιμές (κυρίως στο νότιο και στο βόρειο τμήμα). Συγκεκριμένα, στην περιοχή του οικισμού παρατηρείται ένα υψηλό πρανές ύψους έως και 55 m και κλίσεις από 70˚ έως και 90˚. Μετά τον πόδα αυτού και κατά μήκος του πρανούς η κλίση μειώνεται (20˚÷30˚), και δημιουργεί ένα φυσικό αναβαθμό στο ανάγλυφο. Σε αυτήν την περιοχή βρίσκεται ο οικισμός της παλαιάς πόλης της Μονεμβάσιας. Η μορφολογία προς το νότο γίνεται ξανά απότομη στην απόληξή της προς τη θάλασσα, όπου αναπτύσσεται πρανές ύψους 15 m με παρακατακόρυφη κλίση.

Στον πόδα περιμετρικά των υψηλών πρανών, εντοπίζονται κορήματα ασβεστολιθικής σύστασης τα οποία διαχωρίζονται με βάση τη συγκόλλησή τους που εξαρτάται κυρίως από την ηλικία τους.

Πιο συγκεκριμένα η εξεταζόμενη περιοχή δομείται από:

- Ασβεστόλιθοι δολομιτικοί, στρωματώδεις, Ιουρασικής ηλικίας (κλίση 20˚-30˚)
- Ασβεστόλιθοι δολομιτικοί, άστρωτοι, Κρητιδικής ηλικίας
- Κορήματα καλώς συγκολλημένα με μεγάλα μεγέθη ασβεστολιθικών τεμαχών
- Πρόσφατα κορήματα ασύνδετα έως ελαφρά συγκολλημένα ασβεστολιθικής σύστασης
- Υλικά καταπτώσεων βράχων ασβεστολιθικής σύστασης (διαστάσεις ογκόλιθων 4m*4m*5m)

Οι βασικότεροι παράγοντες που θέτουν σε κίνηση το μηχανισμό των κατολισθητικών φαινομένων, παρατίθενται παρακάτω:

- Εκδήλωση σεισμικής διέγερσης, που αποτελεί και τον σημαντικότερο παράγοντα όλων
- Έντονες βροχοπτώσεις και γενικά η παρουσία-δράση του νερού, η οποία επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό.
- Ενδεχόμενη ανθρώπινη παρέμβαση στην περιοχή ανάντη του πρανούς.

Με βάση τα ανωτέρω παρατηρούνται τέσσερεις (4) επικρατούντες μηχανισμοί αστοχίας:

- ***Υποσκαφή*** τμημάτων του πρανούς, λόγω αποσάθρωσης των υποκείμενων, με συνέπεια την αποκόλληση και κατάπτωση μεμονωμένων τεμαχών βραχόμαζας,
- ***Σταδιακή χαλάρωση*** της βραχόμαζας εξαιτίας της ύπαρξης παρακατακόρυφων ρωγμών και συστημάτων ασυνεχειών.
- ***Καρστικοποίηση*** των πετρωμάτων.
- ***Αποσάθρωση*** των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, η οποία προχωρά σε βάθος με την πάροδο του χρόνου.
- ***Διάβρωση*** των πετρωμάτων.

Οι δύο τελευταίοι μηχανισμοί μπορούν να αποτελέσουν μηχανισμούς αστοχίας, μόνο αν έχουν μακροχρόνια δράση. Αυτό οφείλεται στην αλλοίωση ορισμένων χαρακτηριστικών της βραχόμαζας που προκαλούν.

Εικόνα 4.2. Το πρανές της ιστορικής πόλης της Μονεμβάσιας

4.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η ευστάθεια του πρανούς ελέγχεται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες: α) την έλλειψη εμμονής στα επίπεδα των ασυνεχειών, η οποία οδηγεί σε αστοχία σε συγκεκριμένα τμήματα του πρανούς, β) την έλλειψη των ζωνών αδυναμίας, η οποία μπορεί να προκαλέσει αστοχίες μεγάλης κλίμακας, και γ) το μέτωπο του πρανούς είναι σε κατάσταση ηρεμίας, λόγω της μεγάλης γωνίας κλίσης του πρανούς.

Ο κύριος τρόπος αστοχίας είναι η κατάπτωση βράχων λόγω ανατροπής. Ωστόσο, μπορεί να συντελεστούν και καταπτώσεις επίπεδης αστοχίας ή αστοχίας σφήνας. Το ελάχιστο ύψος εκκίνησης των καταπτώσεων είναι 70 m από τον πόδα του πρανούς, και σε μερικές θέσεις φτάνει τα 100 m.

Το μέγεθος των ασταθών βραχωδών τεμαχών κυμαίνεται μεταξύ 1.5 m^3 μέχρι περίπου τα 30 m^3. Το μέγεθος των πιο επισφαλών για κατάπτωση τεμαχών κυμαίνεται μόνο μεταξύ 1.5 m^3 μέχρι 4 m^3 περίπου, εκτός της περιοχής μεταξύ των τομών Α και Β, όπου το μέγεθος μπορεί να φτάσει τα 30 m^3. Σε ορισμένες περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος των ασταθών τεμαχών μπορεί να ξεπεράσει τα 300 m^3.

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε διαχωρισμός του πρανούς με τη χρήση επτά (7) χαρακτηριστικών τομών Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ και Η. Σε κάθε θέση εφαρμόστηκε το σύστημα Marinos et al. (2005), διότι είναι το μόνο το οποίο αναφέρεται σε φυσικά πρανή και δεν αφορά αποκλειστικά πρανή οδοποιίας, όπως γίνεται συνήθως.

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται μεταξύ των θέσεων του πρανούς, είναι: α) το μέγεθος και ο αριθμός των βραχωδών τεμαχών, β) το άνοιγμα και η εμμονή των ασυνεχειών, γ) η θέση εκκίνησης των καταπτώσεων, δ) η αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης, και η ύπαρξη δομών ή ανθρώπινης δραστηριότητας στην περιοχή. Το ύψος του πρανούς και η μέση κλίση δεν εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις.

Ακολουθούν οι παραδοχές για τις δέκα (10) αμετάβλητες παραμέτρους κατά μήκος του πρανούς:

- *Τραχύτητα* ασυνεχειών: Κυματοειδής
- *Υλικό πλήρωσης :* Καθόλου
- *Προσανατολισμός των ασυνεχειών:* Μέτριος
- *Συνέχεια των ασυνεχειών:* Μέση 3÷10 m
- *Άνοιγμα των ασυνεχειών:* Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm
- *Συχνότητα των βροχοπτώσεων:* Συχνά
- *Διαπερατότητα του πετρώματος:* Μεγάλης διαπερατότητας
- *Ικανότητα στράγγισης του πετρώματος:* Μεγάλη
- *Σεισμικότητα:* Σύμφωνα με το νέο χάρτη ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (ΟΑΣΠ, 2004), η περιοχή της έρευνας ανήκει στη ζώνη Ι.
- *Συχνότητα:* Πολλές

Διατομή	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Συνολική βαθμολογία**	**Βαθμός επικινδυνότητας**
Α	48.0	68.2˚	4.775	Μέτριος
Β	42.3	72.9˚	5.900	Υψηλός
Γ	47.8	69.1˚	6.178	Υψηλός
Δ	36.3	76.9˚	5.818	Υψηλός
Ε	29.9	69.8˚	5.045	Μέτριος
Ζ	49.1	69.3˚	4.895	Μέτριος
Η	45.3	73.7˚	4.663	Μέτριος

Πίνακας 4.1. Τελική βαθμολογία και κατηγορία επικινδυνότητας Marinos et al. (2005)

Θέση	Αποτελεσματικότητα τάφρου				Θέση εκκίνησης καταπτώσεων			Αριθμός τεμαχών		Μέγεθος τεμαχών		
	>20 m	10÷20 m	5÷10 m	Καθόλου	Καταπτώσεις από θέσεις έως και τη μέση του πρανούς (H/2)	Καταπτώσεις από θέσεις έως και πριν το ανώτερο τμήμα (3H/2)	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	1÷5	5÷10	<1 m³	2.5÷4 m³	>4 m³
Α	■						■	■				■
Β				■			■		■			■
Γ				■			■	■				■
Δ				■		■		■				■
Ε		■					■	■			■	
Ζ			■		■				■			■
Η				■			■	■		■		

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Α

Θέση Α																				
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια**	**Άνοιγμα**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Χαμηλή-χώροι ελάχιστης προσέλευσης-μικρή πιθανότητα κατασκευής νέων κατασκευών	Μικρή δυνατότητα επέμβασης-δυσκολα εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μεγάλη απόσταση 1000÷6000 mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	50÷80	Πολλές	>20 m	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	1÷5	>4 m³	Κυματοειδής	
0.32	0.2	0.045	0.1875	0.338	0.113	0.11	0.34	0.35	0.1	0.3	0.07	0.5	0.34	0	0.45	0.18	0.45	0.35	4.775

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Β

Θέση Β																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια**	**Άνοιγμα**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επιφάνειων τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Υψηλή-συχνή παρουσία ανθρώπων-πολυάριθμα κτίρια	Αδύνατη η επέμβαση κατα οποιονδήποτε τρόπο	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μέτρια απόσταση 200-1000mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	>80	Πολλές	Καθόλου	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	5÷10	>4 m³	Κυματοειδής	
0.32	0.2	0.045	0.5625	0.45	0.113	0.11	0.23	0.35	0.1	0.3	0.07	0.7	0.34	0.5	0.45	0.32	0.45	0.35	5.900

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Γ

Θέση Γ																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια ασυνεχειών**	**Άνοιγμα ασυνεχειών**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Ανεκτίμητη-χώροι συγκέντρωσης κοινού-κτίσματα υψίστης αξίας	Κόστος η επέμβαση κατά οποιονδήποτε τρόπο	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Εξαιρετικά μεγάλη απόσταση >6000mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	>80	Πολλές	Καθόλου	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	1÷5	>4 m³	Κυματοειδής	
0.315	0.225	0.045	0.75	0.45	0.113	0.113	0.45	0.35	0.1	0.28	0.07	0.7	0.338	0.45	0.45	0.18	0.45	0.35	6.178

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Δ

Θέση Δ																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια ασυνεχειών**	**Άνοιγμα ασυνεχειών**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Ανεκτίμητη-χώροι συγκέντρωσης κοινού-κτίσματα υψίστης αξίας	Αδύνατη η επέμβαση κατά οποιονδήποτε τρόπο	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μέτρια απόσταση 200÷1000mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	>80	Πολλές	Καθόλου	Καταπτώσεις από θέσεις έως και πριν το ανώτερο τμήμα (3H/2)	1÷5	>4 m³	Κυματοειδής	
0.32	0.2	0.045	0.75	0.45	0.113	0.11	0.23	0.35	0.1	0.3	0.07	0.7	0.34	0.5	0.315	0.18	0.45	0.35	5.818

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Ε

Θέση Ε																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια**	**Άνοιγμα**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
10÷30	Συχνά	I	Υψηλή-συχνή παρουσία ανθρώπων-πολυάριθμα κτίρια	Μικρή δυνατότητα επέμβασης-ελάχιστα εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας	μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μέτρια απόσταση 200÷1000mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	>80	Πολλές	10÷20 m	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	1÷5	2.5÷4 m³	Κυματοειδής	
0.18	0.2	0.045	0.5625	0.338	0.113	0.11	0.23	0.35	0.1	0.3	0.07	0.7	0.34	0.1	0.45	0.18	0.32	0.35	5.045

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Z

Θέση Z																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια**	**Άνοιγμα**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Μέτρια-περιστασιακή παρουσία ανθρώπων-υπό κατασκευή κτίσματα	Μικρή δυνατότητα επέμβασης-ελάχιστα εφαρμόσιμα μέτρα προστασίας	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μέτρια απόσταση 200÷1000mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	50÷80	Πολλές	5÷10 m	Καταπτώσεις από θέσεις έως και τη μέση του πρανούς (H/2)	5÷10	>4 m³	Κυματοειδής	
0.32	0.2	0.045	0.375	0.338	0.113	0.11	0.23	0.35	0.1	0.3	0.07	0.5	0.34	0.2	0.18	0.32	0.45	0.35	4.895

ΘΕΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: ΔΙΑΤΟΜΗ Η

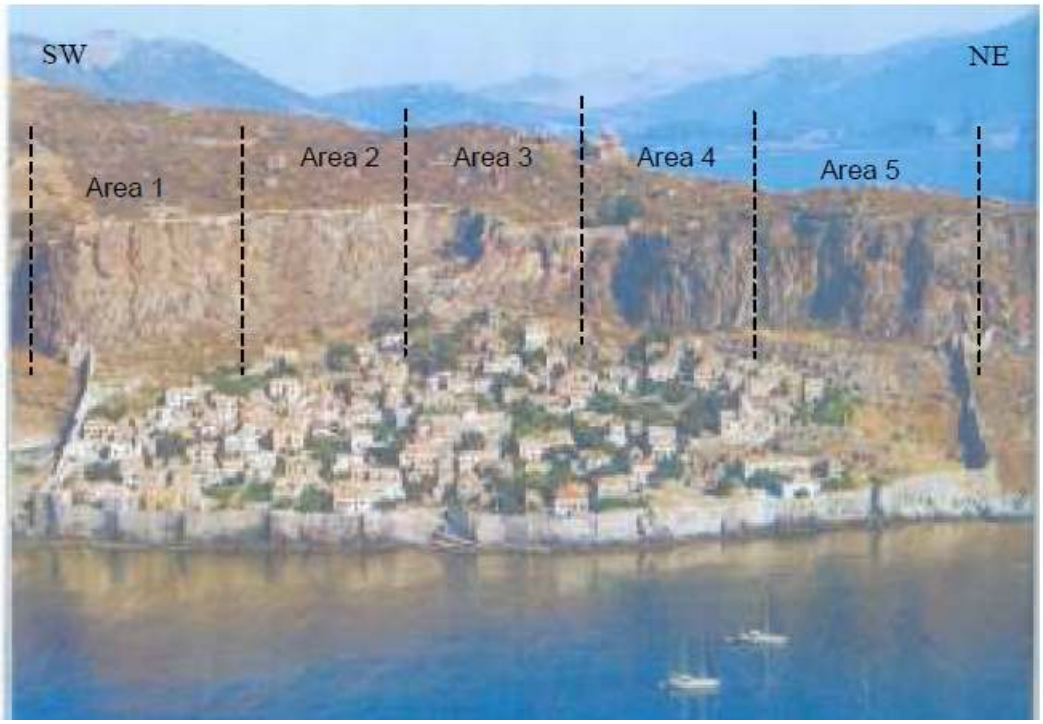
Θέση Η																			
Ύψος (m)	**Βροχοπτώσεις**	**Ζώνη σεισμ. επικινδυνότητας**	**Εκτιμώμενη αξία κατασκευών-εκτιμώμενες συνέπειες**	**Δυνατότητα επέμβασης**	**Στράγγιση**	**Διαπερατότητα**	**Απόσταση**	**Συνέχεια**	**Άνοιγμα**	**Προσανατολισμός**	**Υλικό πλήρωσης**	**Μέση κλίση**	**Συχνότητα**	**Αποτελεσματικότητα τάφρου**	**Θέση εκκίνησης καταπτώσεων**	**Αριθμός επισφαλών τεμαχών**	**Μέγεθος τεμαχών**	**Τραχύτητα ασυνεχειών**	**Συνολική βαθμολογία**
30÷60	Συχνά	I	Χαμηλή-χώροι ελάχιστης προσέλευσης-μικρή πιθανότητα κατασκευής νέων κατασκευών	Εφαρμογή ορισμένων μόνο μέτρων προστασίας	Μεγάλη	Μεγάλης διαπερατότητας	Μεγάλη απόσταση 1000÷6000 mm	Μέση 3÷10m	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Μέτρια	Καθόλου	50÷80	Πολλές	Καθόλου	Καταπτώσεις από όλο το ύψος του πρανούς	1÷5	<1 m³	Κυματοειδής	
0.32	0.2	0.045	0.1875	0.225	0.113	0.11	0.34	0.35	0.1	0.3	0.07	0.5	0.34	0.5	0.45	0.18	0.05	0.35	4.663

4.4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του συστήματος Marinos et al. (2005) είναι ένας χωρισμός σε ζώνες επικινδυνότητας για την εμφάνιση κατολισθήσεων. Οι περιοχές εμφανίζουν υψηλό και πολύ υψηλό κίνδυνο είτε λόγω της αύξησης του αριθμού των υφιστάμενων ασταθών τεμαχών ή της περιορισμένης δυνατότητας αναχαίτισης ή του συνδυασμού και των δύο.

Η περιοχή μεταξύ των τομών Β και Δ στο πόδα του πρανούς, παρουσιάζει υψηλή επικινδυνότητα, λόγω των πολυάριθμων ασταθών τεμαχών, των πιθανών μορφών αστοχίας και της ανθρώπινης δραστηριότητας (σκάλες προς την Άνω Πόλη).

Η περιοχή μεταξύ των τομών Ε και Ζ εμφανίζει μέτρια έως υψηλή επικινδυνότητα, λόγω της ευρείας περιοχής αναχαίτισης στο πόδας, το οποίο προσφέρει ιδανικές συνθήκες για την εγκατάσταση συστημάτων προστασίας. Η περιοχή μεταξύ των τομών Α και Β έχει πολύ περιορισμένο εύρος στην περιοχή αναχαίτισης και η εγκατάσταση των μέτρων προστασίας θα πρέπει να γίνει στον πόδα του πρανούς. Ωστόσο, η επικινδυνότητα είναι χαμηλή, καθώς οι επιπτώσεις των πιθανών καταπτώσεων αφορούν μόνο τις εγκαταλελειμμένες κατασκευές.



Εικόνα 4.3. Χωρισμός του πρανούς σε πέντε (5) ζώνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

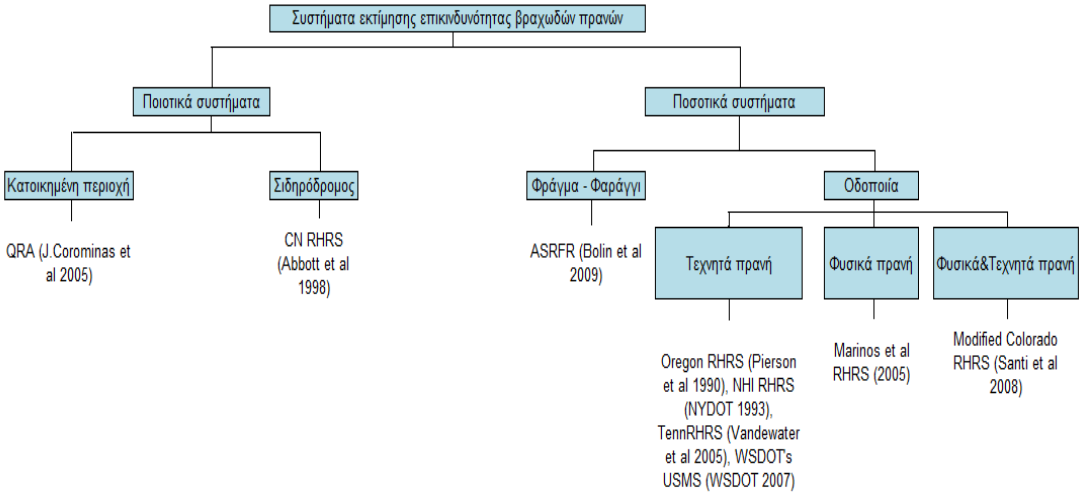
Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση βρέθηκε πληθώρα συστημάτων εκτίμησης της επικινδυνότητας σε βραχώδη πρανή. Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση εννέα (9) συστημάτων από τα οποία τα επτά πρώτα συστήματα χαρακτηρίζονται ως ποσοτικά και τα δύο τελευταία ως ποιοτικά, ανάλογα με τις μεθόδους ανάλυσης που χρησιμοποιούν.

1. *Oregon's Rockfall Hazard Risk Assessment (Pierson et al. 1990):* Τα περισσότερα συστήματα βασίζονται στο μοντέλο του Oregon RHRS (Pierson et al 1990), το οποίο σχεδιάστηκε για τη βαθμονόμηση δώδεκα (12) παραμέτρων σε τεχνητά πρανή οδοποιίας.
2. *Marinos et al. Rockfall Hazard Rating System (2005):* Το σύστημα Marinos et al (2005) παρέχει τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής σε όλα τα φυσικά πρανή. Βασίζεται σε δεκαεννέα (19) παραμέτρους, οι οποίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Κάθε κατηγορία έχει διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής στην επικινδυνότητα του πρανούς.
3. *National Highway Institute's Hazard Risk Assessment (New York Department of Transportation, 1993):* Το NHI RHRS περιλαμβάνει μια προκαταρκτική εκτίμηση, όπου πρανή έχουν τη διαβάθμιση A, B ή C, η οποία βασίζεται αρχικά στην πιθανότητα η βραχόμαζα να φτάσει στο οδόστρωμα και στη συνέχεια σε ιστορικά περιστατικά καταπτώσεων. Τα πρανή που κατατάσσονται στην κατηγορία A είναι τα πιο επικίνδυνα και αξιολογούνται λεπτομερώς από εννέα (9) παραμέτρους.
4. *Tennessee's Rockfall Hazard Risk Assessment (Vandewater et al. 2005*): Το TennRHRS περιλαμβάνει εννέα (9) παραμέτρους και καθώς βασίζεται στο NHI RHRS μοιάζει αρκετά με αυτό. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη πέντε (5) λειτουργίες καταπτώσεων: α) επίπεδη, β) σφήνας, γ) ανατροπή, δ) διαφορική διάβρωση και ε) ροή υλικού, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συνδυασμούς έξι (6)

χαρακτηριστικών: αριθμός τεμαχών, μέγεθος τεμάχους, κλίση, τριβή, ανάγλυφο και σχήμα τεμάχους.

5. *Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System (Bolin et al. 2009):* Το σύστημα ASRFR περιλαμβάνει 15 παραμέτρους, μεταξύ των οποίων επτά (7) παράγοντες για τη διακινδύνευση και οκτώ (8) παράγοντες για τις επιπτώσεις. Οι οκτώ (8) παράγοντες που αφορούν τις επιπτώσεις είναι σχεδιασμένοι ειδικά για αυτό το σύστημα αξιολόγησης.
6. *The Modified Colorado Hazard Risk Assessment (Santi et al. 2008):* Το Colorado RHRS περιέχει τέσσερεις (4) διαφορετικές κατηγορίες που συμβάλλουν στην εκδήλωση καταπτώσεων: οι συνθήκες του πρανούς, οι κλιματολογικές συνθήκες, οι γεωλογικές συνθήκες και η κατάσταση της ασυνέχειας. Υπάρχει μια πέμπτη κατηγορία που βαθμολογείται ξεχωριστά για τον κίνδυνο και αποτελείται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Ο αριθμός των παραμέτρων που εξετάζονται στο σύστημα αυτό είναι 28.
7. *WSDOT's Unstable Slope Management Program (Washington Department of Transportation, 2007):* Σκοπός αυτού του προγράμματος είναι η μείωση του κινδύνου καταπτώσεων κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων της Ουάσινγκτον. Με τη βαθμονόμηση δώδεκα (12) παραμέτρων εστιάζει στην εξισορρόπηση μεταξύ της επικινδυνότητας και του κινδύνου για τα πιο επικίνδυνα πρανή (τεχνητά και συνολικά πρανή) για τη λήψη των οικονομικότερων μέτρων προστασίας.
8. *Canadian (CN) Rockfall Hazard Risk Management System (Abbott et al. 1998):* Το CN RHRA σχεδιάστηκε (1996-1997) για τη βαθμολογία του κινδύνου εκτροχιασμού τραίνων σε τεχνητά πρανή σιδηροδρόμων, ή και σε φυσικά πρανή που μπορεί να είναι ορατά από τον δρόμο.
9. *Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area (Corominas et al. 2005):* Σε αυτό το ποιοτικό σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας βραχωδών πρανών υπολογίζεται ξεχωριστά ο κίνδυνος για τις κατασκευές και για τους ανθρώπους.

Στο ακόλουθο σχήμα γίνεται ταξινόμηση και κατηγοριοποίηση των εξεταζόμενων συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας, ανάλογα με τον τύπο του πρανούς και την εφαρμογή για την οποία προτάθηκαν (οδοποιΐα, σιδηρόδρομοι κλπ).



Σχήμα 5.1 Κατάταξη των εξεταζόμενων συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας.

5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

5.2.1 Γενικές παρατηρήσεις

Από τους συγκεντρωτικούς πίνακες, που συντάχθηκαν για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των εννέα συστημάτων, προκύπτουν τα εξής:

❖ Για το σύνολο των συστημάτων:

1) Η πλειοψηφία των συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας, που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1 αναφέρονται σε τεχνητά πρανή. Εξαίρεση αποτελούν τα συστήματα Marinos et al (2005), the modified Colorado RHRS (Santi et al. 2008) και CN RHRS (Abbott et al. 1998), τα οποία αφορούν φυσικά πρανή, συνδυασμό φυσικών και τεχνητών πρανών, και φυσικά και τεχνητά πρανή αντίστοιχα.

2) Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα συστήματα είναι ποσοτικά, καθώς επιτρέπουν εύκολη και ταχεία κατηγοριοποίηση των πρανών ως προς την επικινδυνότητα σε σχέση με τα ποιοτικά συστήματα (CN RHRS, QRA RHRS). Αντίθετα, τα ποιοτικά συστήματα παράγουν πολύ πιο έγκυρα αποτελέσματα, διότι οι παράμετροι και οι εξισώσεις δε χαρακτηρίζονται από υποκειμενικότητα.
3) Τα συστήματα Marinos et al. RHRS (Marinos et al. 2005) και Colorado RHRS (Santi et al 2008) είναι τα μοναδικά εξεταζόμενα συστήματα, τα οποία διαθέτουν τελική κατάταξη των πρανών ως προς την επικινδυνότητα με βάση τη συνολική βαθμολογία.
4) Τα περισσότερα συστήματα δεν έχουν συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους παραμέτρων. Εξαίρεση αποτελεί το σύστημα Marinos et al (2005).
5) Στα ποσοτικά συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), NHI RHRS (NYDOT 1993), TennRHRS (Vandewater et al. 2005), Colorado RHRS (Santi et al 2008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007) η βαθμονόμηση ακολουθεί το εκθετικό σύστημα με τις τέσσερεις τιμές 3, 9, 27 και 81. Το εκθετικό σύστημα αντιπροσωπεύει τη συνέχεια των βαθμολογιών από 1 έως 100 και επιτρέπει μια γρήγορη αναγνώριση των πιο επικίνδυνων πρανών με ένα ευρύ πεδίο αριθμητικών τιμών (Pierson et al. 1990). Στα υπόλοιπα δύο εξεταζόμενα ποσοτικά συστήματα, Marinos et al. (2005) και ASRFR (Bolin et al. 2009), η βαθμονόμηση του εκάστοτε παράγοντα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 έως 10 και 0 έως 1 αντίστοιχα.

❖ *Για κάθε σύστημα ξεχωριστά:*

1) Το πλεονέκτημα του Oregon RHRS (Pierson et al 1990) είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα άμεσης κατάταξης των πρανών ως προς την επικινδυνότητα. Υπάρχουν ωστόσο αρκετές παράμετροι, η βαθμονόμηση και η τιμή των οποίων εξαρτάται από την κρίση του μελετητή. Αυτό δηλαδή συνεπάγεται την ύπαρξη υποκειμενικότητας κατά την εφαρμογή του συστήματος.
2) Σύμφωνα με τους Vandewater et al. (2005) η παράμετρος για το γεωλογικό χαρακτήρα στο TennRHRS παρουσιάζει υψηλότερη βαθμολογία, αλλά αυτή η διαφορά καταδεικνύει τη σημασία της βαθμολόγησης όλων των πιθανών τρόπων κατάπτωσης. Πλεονεκτεί επιπλέον έναντι της αντίστοιχης παραμέτρου στο NHI RHRS (NYDOT 1993), διότι αποφεύγεται η αμφίσημη ορολογία, λαμβάνεται υπόψη η ποικιλία των πιθανών τρόπων κατάπτωσης και σε συγκεκριμένες θέσεις

λαμβάνεται υπόψη η σχετική ποικιλία των τρόπων κατάπτωσης, η οποία εκφράζεται ως το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του μετώπου του πρανούς όπου μπορεί να συντελεστούν οι τρόποι μετακίνησης τεμαχών.

3) Στο σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας ASRFR (Bolin et al. 2009) το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι γενικευμένο και επομένως δε μπορεί να εφαρμοστεί σε πρανή άλλων περιοχών.
4) Το Colorado RHRS (Santi et al. 2008) περιλαμβάνει αρκετά μεγάλο αριθμό παραμέτρων, ενώ προτείνεται απο τους ίδιους προκαταρτική εκτίμηση της συνολικής βαθμολογίας με τη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων σε μαθηματικές εξισώσεις. Ωστόσο, ακόμη και με αυτές τις εξισώσεις, απαιτείται εμπειρία του μηχανικού, προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός αστάθειας του βραχώδους πρανούς και να κριθεί ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων σε ένα συγκεκριμένο πρανές. Επομένως κρίνεται σημαντική η χρήση του συνόλου ή των περισσότερων από τις παραμέτρους του συστήματος για την αξιολόγηση των πρανών.
5) Στο σύστημα WSDOT's USMS (WSDOT 2007) δε χρησιμοποιούνται γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς. Αντίθετα, κυρίως οικονομικοί παράγοντες ορίζουν αυτό το σύστημα. Είναι το μόνο σύστημα στο οποίο συντάσσεται πρόγραμμα κόστους- κέρδους. Για το λόγο αυτό δε δίνεται προτεραιότητα στα πρανή με την υψηλότερη βαθμολογία και η κατηγοριοποίηση των πρανών γίνεται με βάση τη λειτουργικότητα της οδού.
6) Στο σύστημα CN RHRS (Abbott et al. 1998) δε γίνεται εκτίμηση για τις τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες μετά τον εκτροχιασμό αμαξοστοιχίας. Η βαθμολόγηση αξιολογεί ουσιαστικά την πιθανότητα η αμαξοστοιχία να εκτροχιαστεί σε περίπτωση κατάπτωσης, αλλά δεν εκτιμά τον κίνδυνο καταπτώσεων σε σχέση με τα διερχόμενα τρένα.
7) Το QRA (J. Corominas et al. 2005) είναι το μόνο σύστημα στο οποίο υπολογίζεται ξεχωριστά ο κίνδυνος για τις κατασκευές και ο κίνδυνος για τους ανθρώπους. Γίνεται ωστόσο ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών για τον υπολογισμό του κινδύνου, το οποίο μπορεί τελικά να υπερεκτιμά τον πραγματικό κίνδυνο και καθιστά το σύστημα δύσχρηστο.

5.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στα συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας

Με βάση τον πίνακα σύγκρισης των συστημάτων επιλέχθηκαν τα τέσσερα (4) συστήματα με τις περισσότερες κοινές παραμέτρους. Πρόκειται για τα συστήματα: 1) Oregon RHRS (Pierson et al. 1990), 2) the modified Colorado RHRS (Santi et al. 2008), 3) WSDOT's Unstable Slope Management Program (USMS) (WSDOT 2007) και 4) Marinos et al. (2005)

Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της διακύμανσης της συνολικής βαθμολογίας, σε αυτό το στάδιο δε λήφθηκε υπόψη η βαθμολογία του συστήματος Marinos et al. (2005). Τα τρία συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), the modified Colorado RHRS (Santi et al 2008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007) αφορούν κυρίως τεχνητά πρανή οδοποιίας, ενώ το σύστημα Marinos et al. (2005) αφορά φυσικά πρανή και δεν περιέχει παραμέτρους για την κυκλοφορία στην οδό. Επομένως δε μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ και των τεσσάρων (4) συστημάτων.

Για την εποπτική σύγκριση των συστημάτων συντάχθηκαν δεκαπέντε (15) προβλήματα, τα οποία πρακτικά αφορούν ένα συγκεκριμένο πρανές. Σε καθένα από αυτά τα προβλήματα γίνεται η βαθμολόγηση και με τα τρία (3) συστήματα και μεταβάλλεται μία παράμετρος, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται το μέγεθος κατά το οποίο η μεταβολή μιας παραμέτρου επηρεάζει τη συνολική βαθμολογία και άρα τη συνολική διακινδύνευση. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να μεταβληθούν σε κάθε πρόβλημα προέκυψαν από τη σύγκριση των ποσοτικών συστημάτων. Οι παράμετροι που είναι κοινές στα περισσότερα συστήματα θεωρήθηκαν ως οι πιο σημαντικές για διερεύνηση.

Στον πίνακα που ακολουθεί διατυπώνονται οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων που μεταβάλονται στα τρία (3) συστήματα, το εύρος των παραμέτρων και οι βαθμολογία τους. Οι παράμετροι που είναι κοινές στα τρία συστήματα υπογραμμίζονται.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Τιμές	Εύρος παραμέτρων	Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων
Ύψος του πρανούς	30 m	7.5÷15 m, 15÷22.5 m , 22.5÷30 m, >30 m	3, 9, 27, 81
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	Μέτρια	Καλή, Μέτρια, Περιορισμένη, Καθόλου	3, 9, 27, 81
Συχνότητα καταπτώσεων	Αρκετές	Ελάχιστες, Περιστασιακές, Αρκετές, Συνεχείς	3, 9, 27, 81
Μέγεθος επισφαλών τεμαχών	2.5 m^3	<0.75 m^3, 0.75÷2.30 m^3, 2.30÷7.60 m^3, >7.60 m^3	3, 9, 27, 81
Ποσοστιαίος χρόνος αντίδρασης	50%	>80%, 60÷80%, 40÷60%, <40%	3, 9, 27, 81
Μέσος κίνδυνος οχήματος	50%	0÷24%, 25÷49%, 50÷74%, >75%	3, 9, 27, 81
Αριθμός ατυχημάτων	0÷2	0÷2, 3÷5, 6÷8, >9	3, 9, 27, 81
Τραχύτητα ασυνεχειών	Κυματοειδής	Σκληρή- Ανώμαλη, Κυματοειδής, Επίπεδη, Αργιλικό υλικό πλήρωσης	3, 9, 27, 81
Συνολικό πλάτος της οδού	8.5 m	>12.2 m, 9.75÷12.2 m, 7.32÷9.75 m, <7.32 m	3, 9, 27, 81
Κλίμα και παρουσία του νερού στο πρανές	Μέτριες βροχοπτώσεις-Μέτριοι περίοδοι παγετού-Περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές	Χαμηλές έως μέτριες βροχοπτώσεις-καθόλου παγετοί και νερό, Μέτριες βροχοπτώσεις-μέτριοι περίοδοι παγετού-περιστασιακή παρουσία του νερού στο πρανές, Υψηλές βροχοπτώσεις-μεγάλοι περίοδοι παγετού-συνεχής παρουσία του νερού στο πρανές, Υψηλές βροχοπτώσεις και μεγάλοι περίοδοι παγετού ή συνεχής παρουσία νερού στο πρανές και μεγάλοι περίοδοι παγετού	3, 9, 27, 81
Άνοιγμα ασυνεχειών	Μέτρια πλατιές 2.5-10 mm	Κλειστό, 0.1÷1 mm, 1÷5 mm, >5 mm	3, 9, 27, 81
Μέση κλίση	40˚	Προκύπτει από διάγραμμα	3, 9, 27, 81
Κατάσταση ασυνεχειών	Ασυνεχείς διακλάσεις-Ευμενής προσανατολισμός	Ασυνεχείς διακλάσεις-ευμενής προσανατολισμός, Ασυνεχείς διακλάσεις-τυχαίος προσανατολισμός, Ασυνεχείς διακλάσεις-δυσμενής προσανατολισμός, Συνεχείς διακλάσεις-δυσμενής προσανατολισμός	3, 9, 27, 81
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	2751÷5000 οχήματα	<500, 500÷2750, 2751÷5000, >5000	3, 9, 27, 81
Ετήσιο ύψος βροχοπτώσεων	250÷500 mm	<250 mm, 250÷500 mm, 500÷900 mm, >900 mm	3, 9, 27, 81

Πίνακας 5.1 Οι παράμετροι, οι οποίες μεταβάλλονται για τα δεκαπέντε (15) προβλήματα, οι αρχικές τους τιμές και το εύρος διακύμανσής τους. Οι παράμετροι οι οποίες είναι κοινές μεταξύ και των τριών (3) συστημάτων υπογραμμίζονται.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση συμπεραίνεται ότι:

- Ανεξάρτητα του προβλήματος που εξετάζεται η κατάταξη για τα τρία συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας παραμένει σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα που συγκεντρώνει τη μέγιστη βαθμολογία είναι το modified Colorado RHRS (Santi et al 2008) και έπονται τα συστήματα, WSDOT's USMS (WSDOT 2007) και Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα αξιολογεί διαφορετικό αριθμό παραμέτρων.

- Στα συστήματα Colorado RHRS (Santi et al 2008), WSDOT's USMS (WSDOT 2007) και Oregon RHRS (Pierson et al 1990) η βαθμονόμηση ακολουθεί το εκθετικό σύστημα με τις τέσσερεις τιμές 3, 9, 27 και 81. Το εκθετικό σύστημα αντιπροσωπεύει τη συνέχεια των βαθμολογιών από 1 έως 100 και επιτρέπει μια γρήγορη αναγνώριση των πιο επικίνδυνων πρανών με ένα ευρύ πεδίο αριθμητικών τιμών (Pierson et al. 1990).

- Σε κάθε πρόβλημα παρατηρήθηκε ότι η συνολική βαθμολογία του WSDOT's USMS (WSDOT 2007) είναι ισοδύναμη με του Oregon RHRS (Pierson et al 1990), καθώς και ότι η συνολική βαθμολογία του Colorado RHRS (Santi et al 2008) προκύπτει σχεδόν ισοδύναμη με αυτή του Oregon RHRS (Pierson et al 1990).

- Στα τρία αυτά συστήματα λαμβάνονται υπόψη και παράμετροι, οι οποίες αφορούν τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα για αυτήν την κατηγορία των παραμέτρων είναι οι παραδοχές που γίνονται για τις τιμές τους, διότι χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα.

- Τέλος η διακύμανση της τελικής βαθμολογίας ανά πρόβλημα δε διαφέρει ιδιαίτερα, καθώς η τιμή που λαμβάνει κάθε φορά η εξεταζόμενη παράμετρος είναι μία από τις ακόλουθες: 3,9,27,81. Εξαίρεση αποτελεί η βαθμονόμηση της παραμέτρου «μέση κλίση του πρανούς» στο Colorado RHRS (Santi et al 2008) η οποία προκύπτει από διάγραμμα, ως αποτέλεσμα συνεχούς συνάρτησης.

Για λόγους σύγκρισης το εξεταζόμενο πρανές βαθμολογείται και με το Marinos et al RHRS (2005). Στον πίνακα που ακολουθεί διατυπώνονται οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων που μεταβάλονται στο σύστημα Marinos et al. (2005) και το εύρος της βαθμολογίας των παραμέτρων με ή χωρίς βαρύτητα.

Παράμετροι	**Τιμές**	**Εύρος παραμέτρων**	**Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων (χωρίς βαρύτητα)**	**Εύρος βαθμολογίας παραμέτρων (με βαρύτητα)**
Ύψος του πρανούς	30 m	<10 m, 10÷30 m, 30÷60 m, >60 m	1, 4, 7, 10	0.045, 0.18, 0.315, 0.45
Κατάσταση ασυνεχειών-Συνέχεια ασυνεχειών	Μέση 3÷10 m	Πολύ μικρή <1 m, Μικρή 1÷3 m, Μέση 3÷10 m, Υψηλή 10÷20 m, Πολύ υψηλή >20 m	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.07, 0.175, 0.35, 0.525, 0.7
Άνοιγμα ασυνεχειών	Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm	Πολύ κλειστές <0.25 mm, Κλειστές 0.25÷2.5 mm, Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm, Πολύ πλατιές 10÷100 mm, Εξαιρετικά πλατιές 100÷1000 mm	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2
Μέση κλίση	40˚	<30˚, 30˚÷50˚, 50˚÷80˚, >80˚	1, 4, 7, 10	0.07, 0.28, 0.49, 0.7
Συχνότητα καταπτώσεων	Αρκετές	Λίγες έως καθόλου, Περιστασιακές, Αρκετές, Πολλές, Συνεχείς	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45
Αποτελεσματικότητα τάφρου αναχαίτισης	5÷10 m	>20 m, 10÷20 m, 5÷10 m, 1÷5 m, Καθόλου	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45
Μέγεθος επισφαλών τεμαχών	2.5 m^3	<1 m^3, 1÷2.5 m^3, 2.5÷4 m^3, >4 m^3	1, 4, 7, 10	0.045, 0.18, 0.315, 0.45
Τραχύτητα ασυνεχειών	Κυματοειδής	Τραχεία-κλιμακωτή, Ολισθηρή-λεία κλιμακωτή, Κυματοειδής, Τραχεία επίπεδη, Ολισθηρή-λεία επίπεδη	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.07, 0.175, 0.35, 0.525, 0.7
Συχνότητα βροχοπτώσεων	Συχνά	Σπάνια έως καθόλου, σε αραιά χρονικά διαστήματα, συχνά, σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθ'όλη τη διάρκεια του έτους	1, 2.5, 5, 7.5, 10	0.045, 0.1125, 0.225, 0.3375, 0.45

Πίνακας 5.2 Παράμετροι του συστήματος Marinos et al (2005).

Παρατηρείται ότι συνολική βαθμολογία προκύπτει πάντα μεγαλύτερη του 5.2. Επομένως, βάσει της κατηγοριοποίησης που γίνεται στο σύστημα Marinos et al. (2005) το εξεταζόμενο πρανές σε κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από μέτρια έως υψηλή επικινδυνότητα.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές της μέγιστης βαθμολογίας ανά σύστημα, η κρίσιμη παράμετρος και η τιμή της κρίσιμης παραμέτρου. Σημειώνεται ότι οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούν τις αρχικές τους τιμές σε κάθε περίπτωση.

Σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας	**Μέγιστη βαθμολογία**	**Κρίσιμη παράμετρος**	**Τιμή παραμέτρου**
Oregon RHRS (Pierson et al 1990)	288	Κατάσταση ασυνεχειών	81
The modified Colorado RHRS (Santi et al 2008)	549	Αριθμός ατυχημάτων	81
WSDOT's USMS (WSDOT 2007)	372	Αριθμός ατυχημάτων	81
Marinos et al RHRS (2005)	5.93 (με βαρύτητα)	Μέση κλίση πρανούς	0.7 (με βαρύτητα)

Πίνακας 5.3 Η μέγιστη βαθμολογία που συγκεντρώνεται ανά σύστημα, οι κρίσιμες παράμετροι και η βαθμολογία τους.

Ο κύριος λόγος που το σύστημα Marinos et al. (2005) συγκεντρώνει την χαμηλότερη βαθμολογία είναι διότι η βαθμονόμηση σε αυτό το σύστημα ακολουθεί τελείως διαφορετικό πρότυπο σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα. Τα υπόλοιπα συστήματα εφαρμόζουν την εκθετική βαθμολόγηση, κατά το πρότυπο του Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Στο Marinos et al. (2005), αντίθετα, κάθε παράμετρος μπορεί να βαθμολογηθεί με τιμές από 1 έως 10 και έπειτα να συμμετάσχει στη βαθμονόμηση, πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή βαρύτητας, που εκτιμάται ανά περίπτωση. Τέλος, και στα τρία συστήματα που χρησιμοποιούν την εκθετική βαθμολόγηση, καθώς και στο σύστημα Marinos et al. (2005) φαίνεται η απότομη αύξηση της συνολικής βαθμολογίας, καθώς αυξάνεται η τιμή μιας παραμέτρου. Αυτό οδηγεί σε μια πιο γρήγορη εκτίμηση των πρανών αυξημένης επικινδυνότητας.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΚΑΚΙΑΣ ΣΚΑΛΑΣ

Το πρανές της Κακιάς Σκάλας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πρανούς στο οποίο συντελούνται αρκετά συχνά καταπτώσεις βράχων. Στην παρούσα εργασία γίνεται κατηγοριοποίηση των πρανών της Κακιάς Σκάλας και βαθμολόγησή τους με βάση τα συστήματα Oregon RHRS (Pierson et al 1990), Colorado RHRS (Santi et al 20008) και WSDOT's USMS (WSDOT 2007), τα οποία αξιολογούν πρανή οδοποιίας.

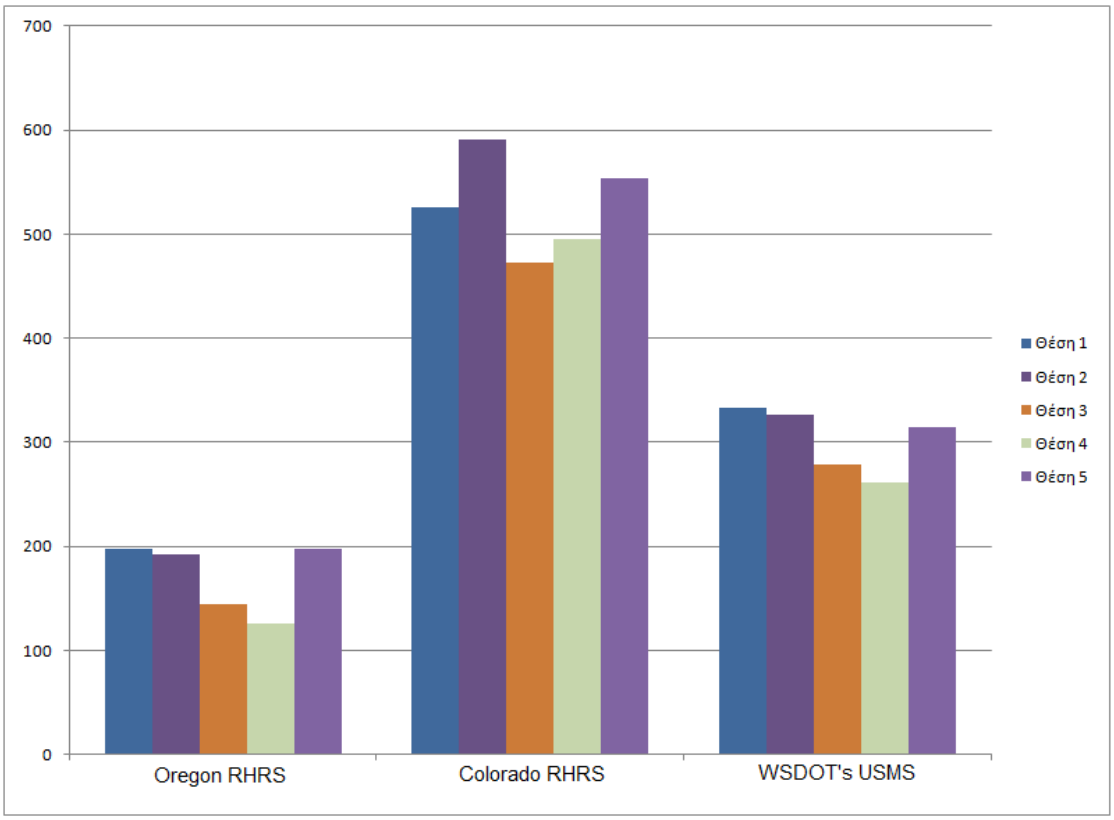
Οι πληροφορίες για το ανάγλυφο του πρανούς και τα χαρακτηριστικά ανά Χιλιομετρική Θέση (Χ.Θ.) λαμβάνονται από τη μελέτη της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕ.

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε κατηγοριοποίηση των δοθέντων τομών σε πέντε (5) κατηγορίες ανάλογα με την αλλαγή στα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου.

- <u>Θέση 1:</u> Περιλαμβάνει τις Χ.Θ. 1+627.23, 1+950.00, 2+100.00, 2+337.03, 2+777.14, 3+203.55, 3+395.463, 4+948.14, και 5+077.27
- <u>Θέση 2:</u> Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 2+200.00
- <u>Θέση 3:</u> Περιλαμβάνει τις Χ.Θ. 2+477.49, 5+525.75, 5+606.76, 5+836.72 και 5+933.87
- <u>Θέση 4:</u> Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 5+756.19
- <u>Θέση 5:</u> Περιλαμβάνει τη Χ.Θ. 4+134.60

Οι παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων και στις πέντε (5) Θέσεις του πρανούς της Κακιάς Σκάλας διατυπώνονται στην παράγραφο 3.3.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκεντρώνονται στο ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 3.6. Η συνολική βαθμολογία που συγκεντρώνουν τα συστήματα Oregon RHRS, Colorado RHRS και WSDOT's USMS και στις πέντε (5) θέσεις.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων συμπεραίνονται τα παρακάτω:

1. Στο σύστημα Colorado RHRS (Santi et al 2008) συγκεντρώνονται οι υψηλότερες βαθμολογίες. Αντίθετα, οι χαμηλότερες βαθμολογίες παρατηρούνται στο Oregon RHRS (Pierson et al 1990). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα αξιολογεί διαφορετικό αριθμό παραμέτρων. Ο μικρός αριθμός ωστόσο των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στο Oregon RHRS πιθανώς να μην καλύπτει την πολυπλοκότητα του προβλήματος στην εκάστοτε θέση.
2. Το σύστημα WSDOT's USMS μειονεκτεί έναντι των υπόλοιπων δύο, καθώς δε λαμβάνει υπόψη τις γεωλογικές παραμέτρους του εκάστοτε πρανούς και επικεντρώνεται στις παραμέτρους, που αφορούν τις κυκλοφοριακές συνθήκες, οι οποίες γενικά χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα.
3. Το Colorado RHRS είναι το μόνο από τα τρία συστήματα, το οποίο αξιολογεί σε ικανοποιητικό βαθμό τόσο τις παραμέτρους που περιγράφουν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, όσο και αυτές που περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Εμφανίζει ωστόσο ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το ότι το πλήθος των

παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της συνολικής βαθμολογίας είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να καθιστά δύσχρηστο το σύστημα και ότι η περιγραφή των παραμέτρων και η βαθμονόμησή τους επιδέχονται βελτίωση, για την εξάλειψη των υποκειμενικών κρίσεων.

4. Τα πρανή με τη μεγαλύτερη βαθμολογία ανήκουν στις θέσεις 1, 2 και 5, και επομένως χαρακτηρίζονται ως τα πιο επικίνδυνα για καταπτώσεις τεμαχών βράχου. Αντίθετα, τα πρανή με τη μικρότερη βαθμολογία και άρα με μικρότερη συγκριτικά επικινδυνότητα ανήκουν στις θέσεις 3 και 4. Δηλαδή, σημειώνεται μία κανονικότητα και συμφωνία στα αποτελέσματα των αναλύσεων και στα τρία συστήματα.
5. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η συμβολή της βλάστησης και της φυτικής γης ως παράγοντες επιβράδυνσης και αναχαίτισης των βραχοπτώσεων, όπως και η ύπαρξη των αιγοπροβάτων στην περιοχή για βοσκή ως παράγοντας έναρξης των καταπτώσεων και χαλάρωσης των επιφανειακώς ευρισκόμενων βραχωδών τεμαχών. Επίσης, δε λήφθηκε υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας (εκσκαφές) και η σπουδαιότητα των κατασκευών κατάντη του πρανούς, καθώς κατάντη βρίσκεται η Κινέττα, μια περιοχή με αρκετές εξοχικές κατοικίες.
6. Τέλος, ισχύει ότι τα τελικά αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τις παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που χαρακτηρίζονται με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα εξ ορισμού είναι όσες περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες και όσες βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία (π.χ. συχνότητα καταπτώσεων) και στην κρίση του μελετητή (π.χ. μέγεθος επισφαλών τεμαχών, τραχύτητα των ασυνεχειών). Για το λόγο αυτό, ακολουθήθηκε μια επιπλέον παραμετρική ανάλυση στις Θέσεις 2 και 3, οι οποίες προηγουμένως συγκέντρωσαν τις μεγαλύτερες και τις μικρότερες βαθμολογίες αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση.

1) Η Θέση 3 συγκεντρώνει σε κάθε περίπτωση υψηλότερη βαθμολογία από τη Θέση 2, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από υψηλή επικινδυνότητα.

2) Και στις δύο Θέσεις η συνολική βαθμολογία για τις παραμέτρους «μέσος κίνδυνος οχήματος» και «συχνότητα καταπτώσεων» προκύπτει πάντοτε η ίδια. Οι δύο αυτές παράμετροι διαθέτουν την ίδια αρχική τιμή (27) και το ίδιο εύρος τιμών (3,9,27,81), επομένως είναι αναμενόμενο να συγκεντρώνουν την ίδια βαθμολογία σε κάθε περίπτωση της παραμετρικής ανάλυσης.

3) Σε κάθε περίπτωση η συνολική βαθμολογία που προκύπτει από τη διακύμανση της παραμέτρου «τραχύτητα ασυνεχειών» είναι εμφανώς μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζει μικρότερη αρχική τιμή (9) από αυτή των υπολοίπων παραμέτρων που μεταβάλλονται, οι οποίες κατά την ανάλυση για την τραχύτητα παραμένουν σταθερές και ίσες με 27.

5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ

Η περιοχή της Μονεμβάσιας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας περιοχής στην οποία παίζουν σημαντικό ρόλο οι καταπτώσεις. Η Κάτω Πόλη κατοικείται και φιλοξενεί και αρκετούς τουρίστες, παρότι ο κίνδυνος καταπτώσεων είναι αρκετά υψηλός. Οι καταπτώσεις βράχων είναι ένα φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται στην περιοχή από την αρχαιότητα.

Βάσει μελετών παρατηρήθηκε ότι η ευστάθεια του πρανούς ελέγχεται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες: α) την έλλειψη εμμονής στα επίπεδα των ασυνεχειών, η οποία οδηγεί σε αστοχία σε συγκεκριμένα τμήματα του πρανούς, β) την έλλειψη των ζωνών αδυναμίας, η οποία μπορεί να προκαλέσει αστοχίες μεγάλης κλίμακας, και γ) το μέτωπο του πρανούς είναι σε κατάσταση ηρεμίας, λόγω της μεγάλης γωνίας κλίσης του πρανούς.

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε διαχωρισμός του πρανούς με τη χρήση επτά (7) χαρακτηριστικών τομών Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ και Η. Σε κάθε θέση εφαρμόστηκε το σύστημα Marinos et al. (2005), διότι είναι το μόνο το οποίο αναφέρεται σε φυσικά πρανή και δεν αφορά αποκλειστικά πρανή οδοποιίας, όπως γίνεται συνήθως.

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται μεταξύ των θέσεων του πρανούς, είναι: α) το μέγεθος και ο αριθμός των βραχωδών τεμαχών, β) το άνοιγμα και η εμμονή των ασυνεχειών, γ) η θέση εκκίνησης των καταπτώσεων, δ) η αποτελεσματικότητα της τάφρου αναχαίτισης, και η ύπαρξη δομών ή ανθρώπινης δραστηριότητας στην περιοχή. Το ύψος του πρανούς και η μέση κλίση δεν εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις.

Ακολουθούν οι παραδοχές για τις δέκα (10) αμετάβλητες παραμέτρους κατά μήκος του πρανούς:

- *Τραχύτητα* ασυνεχειών: Κυματοειδής
- *Υλικό πλήρωσης :* Καθόλου
- *Προσανατολισμός των ασυνεχειών:* Μέτριος
- *Συνέχεια των ασυνεχειών:* Μέση 3÷10 m
- *Άνοιγμα των ασυνεχειών:* Μέτρια πλατιές 2.5÷10 mm
- *Συχνότητα των βροχοπτώσεων:* Συχνά

- *Διαπερατότητα του πετρώματος:* Μεγάλης διαπερατότητας
- *Ικανότητα στράγγισης του πετρώματος:* Μεγάλη
- *Σεισμικότητα:* Σύμφωνα με το νέο χάρτη ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (ΟΑΣΠ, 2004), η περιοχή της έρευνας ανήκει στη ζώνη Ι.
- *Συχνότητα:* Πολλές

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του συστήματος Marinos et al. (2005) είναι ένας χωρισμός σε ζώνες επικινδυνότητας για την εμφάνιση κατολισθήσεων. Οι περιοχές εμφανίζουν υψηλό και πολύ υψηλό κίνδυνο είτε λόγω της αύξησης του αριθμού των υφιστάμενων ασταθών τεμαχών ή της περιορισμένης δυνατότητας αναχαίτισης ή του συνδυασμού και των δύο.

Διατομή	**Ύψος (m)**	**Μέση κλίση**	**Συνολική βαθμολογία**	**Βαθμός επικινδυνότητας**
Α	48.0	68.2˚	4.775	Μέτριος
Β	42.3	72.9˚	5.900	Υψηλός
Γ	47.8	69.1˚	6.178	Υψηλός
Δ	36.3	76.9˚	5.818	Υψηλός
Ε	29.9	69.8˚	5.045	Μέτριος
Ζ	49.1	69.3˚	4.895	Μέτριος
Η	45.3	73.7˚	4.663	Μέτριος

5.5 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Γενικά, οι κατολισθήσεις και οι καταπτώσεις βράχων 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. Όπως παρατηρήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας για τα βραχώδη πρανή. Τα περισσότερα από αυτά εξετάζουν τεχνητά πρανή οδοποιίας και χρησιμοποιούν ποσοτικές μεθόδους για την κατάταξη. Χρειάζονται επομένως συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας, που να αφορούν και φυσικά πρανή ή και συνδυασμό φυσικών και τεχνητών πρανών.

Όσον αφορά τα εξεταζόμενα συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας, εμφανίζουν ορισμένα μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή τους. Καθώς το εκάστοτε πρανές χαρακτηρίζεται από ξεχωριστά χαρακτηριστικά είναι αρκετά δύσκολο να συνταχθούν συστήματα επικινδυνότητας, τα οποία να προβλέπουν όλες τις πιθανές παραμέτρους και να τις βαθμονομούν με επαρκή αξιοπιστία. Επίσης, πολλές παράμετροι απαιτούν κρίση του μηχανικού - μελετητή, για τη βαθμονόμηση, και χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, διότι βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία και εκτιμήσεις. Κατά συνέπεια θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με επιφύλαξη και απαιτείται περαιτέρω μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων ανά σύστημα, ώστε να είναι πολύ πιο έγκυρα και αξιόπιστα τα τελικά αποτελέσματα.

Για την πλήρη κατανόηση της ευαισθησίας των παραμέτρων κάθε συστήματος θα πρέπει να έχει γίνει εφαρμογή αυτού σε πολύ μεγάλο αριθμό πρανών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό:

- Να γίνει βελτιστοποίηση και βαθμονόμηση της βαθμολογίας των παραμέτρων
- Να εισαχθούν συντελεστές βαρύτητας για κάθε παράμετρο, εφόσον κρίνεται απαραίτητο, και
- Να γίνει στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων σε σχέση με την συνολική βαθμολογία και να προσδιορισθούν εξισώσεις εξάρτησης για συγκεκριμένες συνθήκες.

Μπορεί επίσης να διερευνηθεί η δυνατότητα να γίνει μεγαλύτερη χρήση νομογραφημάτων για τον προσδιορισμό της βαθμολογίας μιας παραμέτρου, τα οποία να βασίζονται σε συναρτήσεις. Τέτοια περίπτωση αποτελεί η βαθμονόμηση της παραμέτρου «μέση κλίση πρανούς» στην τροποποιημένη μορφή του Colorado RHRS (Santi et al 2008).

Τέλος, η κατάταξη των πρανών ως προς την επικινδυνότητα συνδέεται αναπόφευκτα και με οικονομικούς παράγοντες. Το WSDOT's USMS είναι το μόνο από τα εξεταζόμενα συστήματα στο οποίο συντάσσεται πρόγραμμα κόστους - κέρδους. Σκοπός αυτού είναι η κατηγοριοποίηση των πρανών να γίνεται με βάση τη λειτουργικότητα του εκάστοτε τεχνικού έργου στα κατάντη. Τα πρανή που αντιστοιχούν σε κατασκευές με μεγάλη σπουδαιότητα θα πρέπει να έχουν προτεραιότητα σε σχέση με αυτά που συγκεντρώνουν υψηλότερη βαθμολογία για την επικινδυνότητα, αλλά χαρακτηρίζονται από μικρότερη σπουδαιότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CHRISTOPHER J. VANDEWATER, WILLIAM M. DUNNE, MATTHEW MAULDON, ERIC C. DRUMM, VANESSA BATEMAN, 2005, *Classifying and Assessing the Geologic Contribution to Rockfall Hazard*, Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XI, No.2
2. PAUL M. SANTI, CHRISTOPHER P. RUSSELL, JERRY D. HIGGINS, JESSICA I.SPRIET, 2008, *Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System*, Engineering Geology 104
3. HUANG BOLIN, CHEN LIDE, PENG XUANMING, LIU GUANNING, CHEN XIAOTING, DONG HAOGANG, LEI TANCI, 2009, *Assessment of the risk of rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China,* Landslides DOI 10.1007/s10346-009-0170-7.
4. G.P. GIANNI, *Rock Slope Stability Analysis*, 1992, Εγχειρίδιο του προγράμματος ROCKFALL, www.rocscience.com
5. HOEK E. *Analysis of rockfall hazards*, 2000, www.rocscience.com
6. SAROGLOU H., MARINOS P., TSIAMPAOS G., MARINOS V., *Rockfall hazard and risk for a high promontory: Monemvasia historical site*, Greece, National Technical University of Athens, Greece.
7. JORDI COROMINAS, RAMON COPONS, JOSE MOYA, JOAN M. VILAPLANA, JOAN ALTIMIR, JORDI AMIGO, 2005, *Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area*, Landslides DOI: 1007/s10346-005-0022-z.
8. LAWRENCE A. PIERSON, *The Rockfall Hazard Rating System*, 1991, Oregon Department of Transportation, USA.
9. LYSANDROS PANTELIDIS, *A critical review of highway slope instability risk assessment systems*, 2010, Springer- Verlag.
10. MARK PRITCHARD, MICHAEL PORTER, WAYNE SAVIGNY, IAN BRUCE, FRANCO OBONI, TIM KEEGAN, BRIAN ABBOTT, 1998, *CN Rockfall Hazard Risk Management System: Experience, Enhancements, and Future Directions*. 8th Congress, International Association of Engineering Geology, A Global View from the Pacific Rim, Vancouver British Canada.
11. WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2010, *WSDOT's Unstable Slope Management Program,* www.wsdot.wa.gov
12. FAUSTO GUZZETTI and PAOLA REICHENBACH, *Rockfalls and their hazard*.
13. ΒΟΓΙΑΤΖΗΣ Δ., ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Α., ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Γ., Β. ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ, ΚΑΝΤΗΡΑΝΗΣ Ν., ΦΙΛΙΠΠΙΔΗΣ Α., ΜΩΡΑΪΤΗ Ε. 2004, *Καταπτώσεις βράχων κατά το σεισμό της 14/8/03 και πιθανά μέτρα προστασίας στο ανάντη πρανές του χωριού Δρυμώνας του Δήμου Σφακιωτών, Ν. Λευκάδας*, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, Θεσσαλονίκη.
14. ΠΑΥΛΟΣ Γ. ΜΑΡΙΝΟΣ, *Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού Ι,ΙΙ*, Τυπογραφείο Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1993
15. ΠΑΥΛΟΣ Γ. ΜΑΡΙΝΟΣ, *Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας*, Τυπογραφείο Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1998.

16. ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ., Σχεδιασμός Υπογείων Έργων, Τυπογραφείο Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2002.
17. ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής, 7η έκδοση, Τυπογραφείο Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2002.
18. ΤΣΑΠΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, *Διπλωματική εργασία: Ευστάθεια βραχωδών πρανών- Το παράδειγμα της Μονεμβάσιας*, Αθήνα 2005.
19. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΠΕ, *«Αυτοκινητόδρομος – Αθηνών- Κορίνθου- Πατρών. Τμήμα Κακιάς Σκάλας»,* Αθήνα 2004.