

## Μεθοδολογία τριδιάστατης ανάλυσης βραχοπτώσεων λόγω σεισμού.

### Εφαρμογή στον σεισμό της Λευκάδας 14/08/2003, M=6.2 Three-Dimensional Analysis of Rockfalls Caused by Earthquakes. Case study of the Earthquake occurred on 14/08/2003 at Lefkada (M=6.2)

Στέφανος ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ<sup>1</sup>, Ιωάννης ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ<sup>2</sup>, Ιωάννης ΣΤΡΑΤΑΚΟΣ<sup>3</sup>, Μιχαήλ  
ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ<sup>4</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ** : Οι κατολισθήσεις υπό τη μορφή βραχοπτώσεων αποτελούν τη συχνότερη μορφή κατολισθήσεων στην Ελλάδα, ιδιαιτέρως μετά από σεισμό ή έντονες βροχοπτώσεις. Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην πράξη μελετά το φαινόμενο ως συνδυασμό των διαδικασιών της παραβολοειδούς κίνησης στον αέρα (βολή), της πρόσκρουσης στο έδαφος, της κύλισης και της ολίσθησης των βραχοτεμαχίων σε δυο διαστάσεις. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μεθοδολογία η οποία έχει αναπτυχθεί για τη μελέτη των βραχοπτώσεων στις τρεις διαστάσεις σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, η οποία παρέχει την τριδιάστατη απεικόνιση και προσομοίωση των βραχοπτώσεων ως προϊόν στοχαστικής ανάλυσης. Παράλληλα, προσφέρει εργαλεία στατιστικής επεξεργασίας των βραχοπτώσεων καθώς και διερεύνησης της αποτελεσματικότητας προστατευτικών μέτρων (π.χ. φράχτες), Με σενάρια αρχικών συνθηκών (αρχική ταχύτητα και θέση) μπορούν, επίσης, να παραχθούν χάρτες επικινδυνότητας σε περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος. Για την ανάδειξη των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας εφαρμόζεται ανάστροφη ανάλυση (back analysis) για τις εκτεταμένες βραχοπτώσεις που έλαβαν χώρα στο νησί της Λευκάδας μετά τον ισχυρό σεισμό M=6.2 της 14/08/2003. Εισάγονται πραγματικά δεδομένα μέγιστης εδαφικής ταχύτητας τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία των καταγραφών ισχυρής εδαφικής δόνησης από τον επιταχυνσιογράφο που είναι εγκατεστημένος στην πόλη της Λευκάδας. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αποτελέσματα αναλύσεων σε δυο διαστάσεις για να αναδειχθεί το πλεονέκτημα της τριδιάστατης ανάλυσης.

**ABSTRACT** : Rockfalls, in Greece, are considered to be one of the most common forms of landslide as well as the most common failure mode likely to be triggered by a seismic event or a heavy rainfall. The methodology usually followed is the two-dimensional (2-D) study of rockfalls as a combination of four main processes, namely: sliding and/or toppling, projectile motion, bouncing (impact) and rolling. In this paper, a methodology, developed in a GIS environment, is presented that can assess rockfall hazard by means of stochastic analysis in

<sup>1</sup> Υποψήφιος Διδάκτορας, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [stefanos@survey.ntua.gr](mailto:stefanos@survey.ntua.gr)

<sup>2</sup> Διευθυντής Ερευνών Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Ε.Α.Α., email: [i.kalog@gein.noa.gr](mailto:i.kalog@gein.noa.gr)

<sup>3</sup> Διδάκτορας Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής & ΣΤΕ, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [stratakos@gmail.com](mailto:stratakos@gmail.com)

<sup>4</sup> Καθηγητής, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [mgsakel@mail.ntua.gr](mailto:mgsakel@mail.ntua.gr)

a three-dimensional (3-D) framework. The methodology offers the 3-D visualization and animation of the produced rockfalls, as well as tools for studying rockfalls spatially and quantitatively. Barriers can be implemented and evaluated as a countermeasure for protecting settlements, monuments, or technical works. In order to evaluate the methodology as a tool assisting spatial analysis and planning and to acknowledge the advantage of 3-D rockfall analysis over 2-D analysis, we perform back analysis for the rockfalls induced by the earthquake of a magnitude  $M=6.2$  occurred on the 14/08/2003 at Lefkada island. Real data of the peak ground velocity obtained from the accelerograph located in the city of Lefkada are introduced.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχίων ή βραχοπτώσεις αποτελούν ένα πολύ συνηθισμένο φυσικό φαινόμενο, ειδικά στις ορεινές περιοχές, με μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας. Η μεγάλη ενέργεια, η μεγάλη κινητικότητα αλλά και η υψηλή χωρική και χρονική επαναληπτικότητα είναι τα κύρια χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν τις βραχοπτώσεις ως ένα από τους πιο μεγάλους φυσικούς κινδύνους διεθνώς, καθώς μπορούν να απειλήσουν ανθρώπινες ζωές, συγκοινωνιακά δίκτυα, οικισμούς, ιστορικά μνημεία και εγκαταστάσεις με σημαντικές κοινωνικοοικονομικές συνέπειες.

Οι Badger & Lowell (1992) από την εμπειρία τους στο Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων στην Πολιτεία Washington (Η.Π.Α.), αναφέρουν ότι κατά τη διάρκεια 30 ετών σημαντικός αριθμός ατυχημάτων και 6 θάνατοι οφείλονταν σε βραχοπτώσεις και ότι το 45% των προβλημάτων που εμφανίζονται σε ασταθείς πλαγιές αποδίδονται σε βραχοπτώσεις. Οι Hungr & Evans (1989) αναφέρουν ότι στον Καναδά από βραχοπτώσεις, ιδιαίτερα στην περιοχή της British Columbia, έχουν επέλθει 13 θάνατοι.

Στον ελληνικό χώρο, οι βραχοπτώσεις αποτελούν την συχνότερη μορφή κατολισθήσεων, αλλά και την συχνότερη μορφή αστοχίας η οποία προκαλείται λόγω ενός σεισμού (Ζιούρκας 1989, Κούκης & Ζιούρκας 1989). Συγκεκριμένα, οι Koukis et al (1994) αναφέρουν ότι το ποσοστό βραχοπτώσεων επί του συνόλου των αστοχιών σε βραχώδεις σχηματισμούς ανέρχεται σε 56%. Οι Ambraseys & Jackson (1990) αναφέρουν περιπτώσεις βραχοπτώσεων εξ' αιτίας σεισμών για την περίοδο 1890–1988, ενώ ως αποτελέσματα σεισμών αναφέρονται και στη μελέτη των Παπαζάχου & Παπαζάχου (2003). Ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται οι βραχοπτώσεις στα Γεράνια κατά το σεισμό των Αλκυονίδων (1981) και στον Ταΰγετο κατά το σεισμό της Καλαμάτας (1986). Οι Papadopoulos et al (2000) αναφέρουν βραχοπτώσεις προκαλούμενες από τον σεισμό της Αθήνας (1999). Τέλος, ο Καλογεράς (2003) αναφέρεται στις βραχοπτώσεις οι οποίες έπληξαν το νησί της Λευκάδας μετά τον ισχυρό σεισμό μεγέθους  $M=6.2$  την 14/08/2003.

Οι βραχοπτώσεις εκδηλώνονται όταν λόγω κάποιου γεγονότος προκαλείται αλλαγή στις δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο βραχοτεμάχιο, δυνάμεις που μπορεί να συνδέονται με κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα ή με κάποια κατασκευαστική δραστηριότητα. Τα γεγονότα που ενδέχεται να προκαλέσουν βραχοπτώσεις είναι η αύξηση της πίεσης του ύδατος στις διακλάσεις λόγω ισχυρής βροχόπτωσης, η συστολή–διαστολή του βράχου σε ήπια και ψυχρά κλίματα, η χημική αποσύνθεση του βράχου σε υγρά 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 σε βραχοπτώσεις κατά το διπλάσιο σε σχέση με τα κλιματικά και τα βιολογικά γεγονότα (Hoek, 1998).

Η πτώση αρχίζει με την αποκόλληση εδάφους ή βράχου από μια απότομη πλαγιά κατά μήκος της επιφάνειας με μικρή ή μηδενική διατμητική αντοχή. Η τροχιά που ακολουθεί έπειτα το βραχοτεμάχιο είναι συνδυασμός τεσσάρων κύριων διαδικασιών, της ολίσθησης και/ή της ανατροπής, της ελεύθερης πτώσης, της αναπήδησης λόγω κρούσης και της κύλισης. Η περιγραφή της εξέλιξης των βραχοπτώσεων στο χώρο και στο χρόνο στηρίζεται στους νόμους της μηχανικής (Wu 1985, Bozzolo & Pamini 1986) και μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλου βαθμού πολυπλοκότητα είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων είτε μέσω κινηματικών ή δυναμικών μοντέλων.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες ελέγχου της τροχιάς ενός βραχοτεμαχίου είναι η γεωμετρία του πρηνούς και ο τύπος της επιφάνειας του πρηνούς. Άλλοι παράγοντες όπως το μέγεθος και το σχήμα του βραχοτεμαχίου, τα χαρακτηριστικά τριβής της επιφάνειας των βραχομαζών και το αν το βραχοτεμάχιο θραύεται ή όχι κατά τη κρούση θεωρούνται μικρότερης σημαντικότητας (Hoek, 1998).

Οι βραχοπτώσεις αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή πτώσεων που ενεργοποιείται από σεισμό κυρίως σε λιγότερο συμπαγή υλικά (κροκαλοπαγή, τόφους, ψαμμίτες, κατακερματισμένους ασβεστόλιθους), ενώ στα πιο συμπαγή υλικά η θραύση γίνεται κατά μήκος των διακλάσεων. Οι πτώσεις εδαφικού υλικού γίνονται σε απότομα πρηνή (κλίση τουλάχιστον 40%) σε ελάχιστα συμπαγείς άμμους ή χάλικες ή αποσταθεροποιημένη άργιλο.

## **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ**

Η εκτίμηση του κινδύνου και της διακινδύνευσης βραχοπτώσεων είναι απαραίτητη τόσο για την εξασφάλιση της ασφάλειας, με τη λήψη προστατευτικών μέτρων, όσο και για θέματα χωροθέτησης κυρίως σε υπό ανάπτυξη ορεινές περιοχές. Ένας από τους πιο αξιόπιστους τρόπους εκτίμησης της επικινδυνότητας λόγω βραχοπτώσεων είναι η μοντελοποίηση του φαινομένου (rockfall modelling), καθώς με τη μοντελοποίηση μπορεί να επιτευχθεί η εκτίμηση της περιβάλλουσας (envelope) της τροχιάς του βραχοτεμαχίου, της μέγιστης απόστασης διαφυγής του (runout distance), της κατανομής των κινηματικών παραμέτρων κατά μήκος της τροχιάς που διαγράφει, της πιθανότητας να φτάσει σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία ένα βραχοτεμάχιο μιας συγκεκριμένης μορφής ("design block") κ.α. (Agliardi & Crosta, 2003).

Οι βραχοπτώσεις είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Αποτελούν παράδειγμα ενός σχετικά απλού μηχανικού συστήματος του οποίου η συμπεριφορά είναι απρόβλεπτη χωρικά και χρονικά, ακόμα και αν οι αρχικές συνθήκες, η κινητήρια δύναμη (π.χ. η βαρύτητα, ο σεισμός), η γεωμετρία του πρηνούς και η απώλεια ενέργειας κατά τη κρούση είναι γνωστά. Επομένως, η μοντελοποίησή τους είναι αντίστοιχα μια πολύπλοκη διαδικασία. Οι παράμετροι που ελέγχουν το φαινόμενο, όπως η θέση της περιοχής έναρξης του, το μέγεθος και το σχήμα των βραχοτεμαχίων, οι μηχανικές ιδιότητες του πρηνούς και του βραχοτεμαχίου και η τοπογραφία (Ritchie, 1963) είναι παράμετροι που δύσκολα μπορούν να προσδιοριστούν

επακριβώς λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας και της χωρικής μεταβλητότητάς τους μέσα στη περιοχή μελέτης.

Η υλοποίηση στοχαστικών αναλύσεων και προσομοιώσεων βασισμένων στη θεωρία των πιθανοτήτων έχει αποδειχτεί ως μια αποτελεσματική και αποδεκτή μέθοδος για την υπερνίκηση τέτοιων δυσκολιών. Έτσι, αρκετά μοντέλα προσομοίωσης βραχοπτώσεων χρησιμοποιούν τη τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo για να μεταβάλλουν τις παράμετρους που περιλαμβάνονται στην ανάλυση (μάζα, σχήμα, μέγεθος, συντελεστές τριβής και απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης, κλπ.).

Η αξιοπιστία των μαθηματικών μοντέλων κατάπτωσης βραχοτεμαχίου εξαρτάται κυρίως από την ικανότητά τους να συμπεριλάβουν την γεωμετρία του πρηνούς και την απώλεια ενέργειας κατά τη κρούση ή την κύλιση. Αυτό είναι πολύ δύσκολο λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας και της χωρικής μεταβλητότητας των σχετικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η απώλεια ενέργειας είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση ενός αριθμού παραμέτρων, όπως η κοκκομετρία, ο λόγος κενών, η περιεκτικότητα σε νερό των εδαφικών υλικών, η γεωμετρία του βραχοτεμαχίου και η δυναμική της κρούσης (Crosta & Agliardi, 2004), οι οποίες είναι δύσκολο να καθοριστούν επακριβώς. Επιπλέον, μια μέθοδος ανάλυσης είναι πάντοτε σε κάποιο βαθμό ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων που εμπεριέχει (Stevens, 1998).

### **Διδιάστατα και Τριδιάστατα Μοντέλα Προσομοίωσης Βραχοπτώσεων**

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα προσομοίωσης της κατάπτωσης βραχοτεμαχίου. Στη πλειοψηφία τους είναι διδιάστατα (2-D) και μελετούν τη τροχιά που θα ακολουθήσει ένα βραχοτεμάχιο κατά μήκος μιας επιλεγμένης τομής του φυσικού εδάφους ή του τεχνητού πρηνούς (η οποία διαμορφώνει το υπό μελέτη πρηνές), ή κατά μήκος της μέγιστης κλίσης ενός πρηνούς (π.χ. Σακελλαρίου et al 1995, Spang 1995, Kawamura et al 2003).

Παρόλο που μια διδιάστατη προσέγγιση προσομοίωσης βραχοπτώσεων είναι προτιμητέα από λειτουργικής και υπολογιστικής άποψης, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και οι επεκτάσεις αυτών σε γειτονικές περιοχές είναι υποκειμενική (Crosta & Locatelli, 2004), γεγονός που οφείλεται στο ότι η προσομοίωση σε ένα 2-D μοντέλο γίνεται κατά μήκος μιας καθορισμένης τομής χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την τριδιάστατη φύση της γεωμετρίας των πραγματικών πρηνών. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί ένα σοβαρό περιορισμό στη προσπάθεια δημιουργίας μιας αξιόπιστης προσομοίωσης βραχοπτώσεων.

Επιπροσθέτως, τα περισσότερα προγράμματα δουλεύουν λογικά καλά σε μικρές όμως περιοχές για τις οποίες είναι διαθέσιμη λεπτομερής θεματική πληροφορία (συμπεριλαμβανομένης και της τοπογραφίας). Σε μεγάλες, όμως, περιοχές, όπως μια επαρχία ή μια λεκάνη απορροής, που εκτείνονται από δεκάδες έως και εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα και για τις οποίες μπορεί να μην υπάρχει λεπτομερής θεματική πληροφορία, αποδεικνύονται ακατάλληλα για την εκτίμηση της επικινδυνότητάς τους έναντι του φαινομένου των βραχοπτώσεων (Guzzetti et al, 2002).

Η τριδιάστατη (3-D) προσέγγιση, αποτελεί την λύση στα δυο αυτά προβλήματα, επειδή πάνω από όλα λαμβάνει υπόψιν το τριδιάστατο της τοπογραφίας και το πώς αυτό επηρεάζει τις βραχοπτώσεις. Το σημαντικότερο τριδιάστατο χαρακτηριστικό (3-D effect) είναι η «εγκάρσια διασπορά» (“lateral dispersion”) (Crosta & Agliardi, 2004), που είναι ο λόγος της εγκάρσιας απόστασης που χωρίζει τις ακραίες τροχιές μιας κατάπτωσης προς το μήκος του πρηνούς (Azzoni et al, 1995). Η ύπαρξη της «εγκάρσιας διασποράς» καθιστά δύσκολη την a priori επιλογή της διαδρομής που θα ακολουθήσει ένα βραχοτεμάχιο εάν υιοθετηθεί μια 2-D προσέγγιση (Agliardi & Crosta, 2003). Μια τέτοια επιλογή είναι υποκειμενική και πιθανόν να οδηγήσει σε μη αποδεκτά σφάλματα.

Από την άλλη, ένα 3-D μοντέλο είναι αρκετά πιο πολύπλοκο απ’ ότι ένα 2-D μοντέλο γιατί απαιτεί εξισώσεις κίνησης του βραχοτεμαχίου και κρούσης αυτού στο έδαφος στον τριδιάστατο χώρο. Ιδιαίτερα οι τριδιάστατες εξισώσεις κρούσης, οι οποίες περιγράφουν την πρόσκρουση του βραχοτεμαχίου με το έδαφος ή τον φράκτη και την πορεία που θα ακολουθήσει μετά, είναι αρκετά πολύπλοκες με αποτέλεσμα δύσκολα να μπορούν να μοντελοποιηθούν.

## **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια μεθοδολογία η οποία έχει αναπτυχθεί για τη μελέτη των βραχοπτώσεων στις τρεις διαστάσεις αξιοποιώντας τις ποικίλες δυνατότητες των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Η μεθοδολογία προσφέρει τριδιάστατη εκτίμηση της επικινδυνότητας μιας περιοχής τόσο σε τοπική (μια φυσική πλαγιά ή ένα τεχνητό πρηνές) όσο και σε ευρύτερη κλίμακα (περιοχές μεγάλης έκτασης) μέσω της τριδιάστατης προσομοίωσης και απεικόνισης πλήθους βραχοπτώσεων.

Οι βραχοπτώσεις υπολογίζονται με τη χρήση ενός 3-D μοντέλου προσομοίωσης βραχοτεμαχίων (Χαραλάμπους, 2006) το οποίο μπορεί να προσομοιώσει τις τροχιές βραχοτεμαχίων με την υιοθέτηση μιας κινηματικής προσέγγισης και μιας στοχαστικής μοντελοποίησης μέσω της χρήσης της μεταβλητότητας των εμπλεκόμενων παραμέτρων και μέσω της πραγματοποίησης αριθμού βραχοπτώσεων από κάθε σημείο της περιοχής μελέτης.

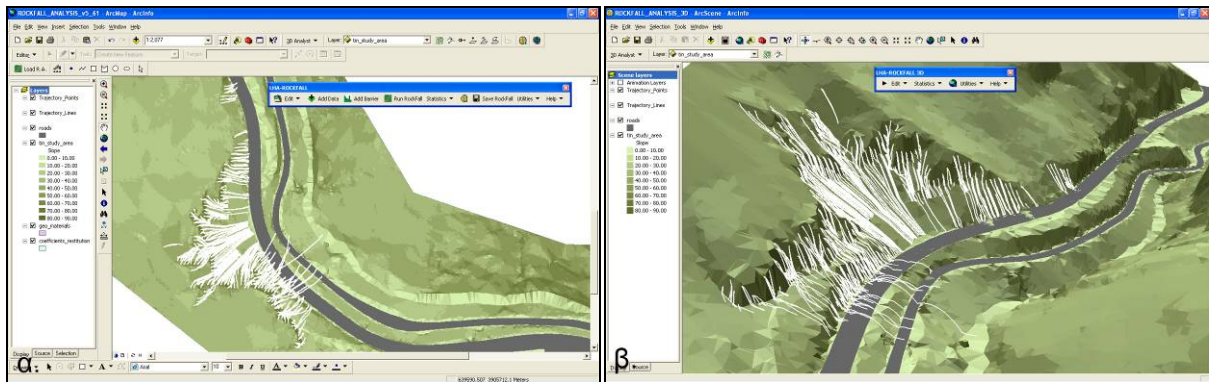
### **Η εφαρμογή *ROCKFALL ANALYSIS***

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας έναντι του φαινομένου των βραχοπτώσεων είναι ενσωματωμένη στην εφαρμογή *ROCKFALL ANALYSIS* (Χαραλάμπους 2006, Sakellariou et al 2006, Charalambous et al 2007) η οποία τρέχει μέσα στο περιβάλλον του ArcGIS της ESRI και είναι γραμμένη στη γλώσσα VBA στο προγραμματιστικό του περιβάλλον.

Η *ROCKFALL ANALYSIS* χωρίζεται σε δυο βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος, “ROCKFALL\_ANALYSIS.mxt,” (Σχήμα 1α) είναι template του προγράμματος ArcMap του ArcGIS το οποίο περιέχει τον κώδικα του προγράμματος. Μέσα από το μέρος αυτό επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των τριδιάστατων τροχιών των βραχοπτώσεων, με τη χρήση του 3-D μοντέλου προσομοίωσης βραχοτεμαχίων, και η απεικόνισή τους στις δυο διαστάσεις

(κεντρική προβολή). Επιπλέον, παράγονται και άλλα δεδομένα εξόδου, χωρικά και μη, αλλά και αποτελέσματα των στατιστικών εργαλείων τα οποία προσφέρει η εφαρμογή. Το “ROCKFALL\_ANALYSIS\_3D.sxd” (Σχήμα 1β) είναι το δεύτερο βασικό μέρος της εφαρμογής. Είναι αρχείο του προγράμματος ArcScene του ArcGIS και χρησιμοποιείται για την τριδιάστατη απεικόνιση και προσομοίωση των παραγομένων βραχοπτώσεων και για την τριδιάστατη απεικόνιση των άλλων δεδομένων εισόδου και εξόδου.

Η *ROCKFALL ANALYSIS* τρέχει σε κάθε μέρος με τη χρήση της αντίστοιχης μπάρας εργαλείων (Σχήμα 1). Εκτός από τις λειτουργίες οι οποίες παρέχονται από την εφαρμογή, το ArcMap και το ArcScene προσφέρουν μια τεράστια γκάμα χρήσιμων εργαλείων και λειτουργιών (π.χ., χαρτογράφηση, ανάλυση, εξαγωγή, εκτύπωση, κλπ.) που εξυπηρετούν σε μια πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη εκτίμηση της επικινδυνότητας λόγω βραχοπτώσεων.



**Σχήμα 1.** Στιγμιότυπα από τα δυο μέρη της εφαρμογής *ROCKFALL ANALYSIS*, αριστερά το *ROCKFALL\_ANALYSIS.mxt* (ArcMap) και δεξιά το *ROCKFALL\_ANALYSIS\_3D.sxd* (ArcScene).

### **Το Τριδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης Βραχοπτώσεων**

Το μοντέλο προσομοίωσης βραχοπτώσεων ασχολείται με τις καταπτώσεις ενός μεμονωμένου βραχοτεμαχίου (ο όγκος από  $10^2 - 10^2 \text{ m}^3$ ) και την κατάπτωση μάζας βράχου (όγκος από  $10^2 - 10^5 \text{ m}^3$ ), οι οποίες ορίζονται επίσης και ως «καταπτώσεις βραχοτεμαχίων» ή «βραχοπτώσεις» (“fragmental rockfalls”) (Hungr & Evans, 1988), όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ των βραχοτεμαχίων που πέφτουν θεωρείται μηδενική ή αμελητέα. Υιοθετείται μια κινηματική προσέγγιση, η οποία αντιμετωπίζει το κάθε βραχοτεμάχιο σαν μια σημειακή μάζα. Η προσέγγιση αυτή ενσωματώνει τις διαδικασίες της βολής, της αναπήδησης/κρούσης, της κύλισης και της ολίσθησης, στις τρεις διαστάσεις. Οι επιδράσεις του μεγέθους, του σχήματος και της ροπής αδρανείας του βραχοτεμαχίου λαμβάνονται υπόψιν μόνο κατά το στάδιο της κύλισης. Όταν, όμως, το βραχοτεμάχιο βρίσκεται στον αέρα η ταχύτητά του θεωρείται μεταφορική (η περιστροφική κίνηση του βραχοτεμαχίου αγνοείται). Αγνοείται, επίσης, και η επίδραση του αέρα (Erismann & Abele, 2001) και η θραύση των βραχοτεμαχίων.

Το μοντέλο έχει την δυνατότητα εκτέλεσης στοχαστικής ανάλυσης με τη χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo, όπου παράμετροι όπως το μέγεθος και η διεύθυνση της αρχικής ταχύτητας, η κλίση και ο προσανατολισμός κάθε πρανούς του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ), οι συντελεστές τριβής και οι συντελεστές απόσβεσης της ενέργειας λόγω

κρούσης, μπορούν να μεταβληθούν μέσα σε προκαθορισμένα όρια σύμφωνα με την κανονική κατανομή. Η στοχαστική ανάλυση μπορεί να επεκταθεί προσδίδοντας αβεβαιότητα στην πηγή έναρξης των βραχοπτώσεων. Η πηγή έναρξης μπορεί να οριστεί είτε σημειακά ή γραμμικά είτε επιφανειακά, στις δυο δε τελευταίες περιπτώσεις, πλήθος βραχοτεμαχίων μπορούν να ξεκινήσουν την πτώση τους από σημεία κατά μήκος της γραμμής ή στο εσωτερικό της επιφάνειας ανάλογα με την επιλεγμένη ανάλυση.

Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο χωρίζονται σε χωρικά και περιγραφικά. Τα χωρικά δεδομένα είναι τα εξής:

- Το ΨΜΕ μορφής TIN (Triangulated Irregular Network) το οποίο αναπαριστά το ανάγλυφο στις τρεις διαστάσεις χωρίς περιορισμούς στην ανάλυση.
- Το πολυγωνικό θεματικό επίπεδο (shapfile) το οποίο περιέχει τους συντελεστές τριβής του εδάφους.
- Το πολυγωνικό θεματικό επίπεδο το οποίο περιέχει τον κάθετο ( $R_n$ ) και τον εφαπτομενικό ( $R_t$ ) συντελεστή απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης του εδάφους. Οι συντελεστές αυτοί συσχετίζονται τις ταχύτητες του βραχοτεμαχίου πριν και μετά την κρούση.
- Η πηγή έναρξης των βραχοπτώσεων (σημειακή, γραμμική, επιφανειακή).
- Το μοντέλο έχει την δυνατότητα σχεδιασμού και εφαρμογής τριδιάστατων προστατευτικών φραχτών, κατακόρυφων ή κεκλιμένων, ως μέτρο προστασίας. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του φράχτη (θέση, γεωμετρία, χαρακτηριστικά τριβής, συντελεστές απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης) κατά των υπολογισμών των τροχιών των βραχοπτώσεων.

Τα απαιτούμενα περιγραφικά χαρακτηριστικά είναι το μέγεθος και η διεύθυνση της αρχικής ταχύτητας και η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας κατά την κάθετη στο πρηνές διεύθυνση η οποία αποτελεί το κατώφλι της ταχύτητας κάτω από το οποίο η διαδικασία παύει να είναι αναπήδηση (κρούση) και μετατρέπεται σε κύλιση, ολίσθηση ή στάση του βραχοτεμαχίου.

Η εφαρμογή έχει ως κύρια δεδομένα εξόδου (αποτελέσματα) την 3-D απεικόνιση των τροχιών των βραχοπτώσεων. Παράλληλα, όμως, παράγονται ποσοτικά δεδομένα τα οποία αφορούν άμεσα ή έμμεσα τις βραχοπτώσεις. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της *ROCKFALL ANALYSIS* είναι:

- Ένα 3-D σημειακό θεματικό επίπεδο το οποίο περιέχει όλα τα σημεία που υπολογίστηκαν κατά μήκος των τροχιών των βραχοπτώσεων. Στο κάθε σημείο αντιστοιχούν κάποια στοιχεία αποθηκευμένα στον Πίνακα Περιγραφικών Χαρακτηριστικών (ΠΙΠΕΧ) του θεματικού επιπέδου, όπως π.χ. στη βραχοπτώση που ανήκει η θέση (X,Y,Z) του βραχοτεμαχίου, το ύψος πάνω από το έδαφος στο οποίο βρίσκεται, η ταχύτητα σε αυτή τη θέση, ο χρόνος που πέρασε από την αρχή της βραχοπτώσης, κλπ. Στην περίπτωση όπου η διαδικασία είναι κύλιση ή ολίσθηση, παρέχονται επιπλέον πληροφορίες για την κλίση, τον προσανατολισμό, τη γωνία τριβής και τους συντελεστές κρούσης του πρηνούς στο οποίο προσπίπτει το βραχοτεμάχιο.

- Ένα 3-D γραμμικό θεματικό επίπεδο (shapefile) το οποίο περιέχει τις υπολογισμένες βραχοπτώσεις. Στον ΠΙΠΕΧ του επιπέδου παρέχονται οι πληροφορίες σχετικά με το μήκος και τη χρονική διάρκεια της κάθε βραχόπτωσης.
- Ένας πίνακας με στατιστικά στοιχεία για κάθε βραχόπτωση (π.χ. συνολική οριζόντια και κάθετη μετάθεση του βραχοτεμαχίου, συνολική διάρκεια και μήκος της βραχόπτωσης, μέγιστη ταχύτητα και μέγιστο ύψος πάνω από το έδαφος) και ένας πίνακας με στατιστικά στοιχεία για το σύνολο των βραχοπτώσεων (π.χ. ελάχιστο και μέγιστο μήκος και ύψος πάνω από το έδαφος, ελάχιστη και μέγιστη διάρκεια).
- Μια τριδιάστατη προσομοίωση (animation) των υπολογισμένων βραχοπτώσεων.

### Αρχικές Συνθήκες

Κάθε βραχοτεμάχιο ξεκινά την πτώση του από ένα σημείο  $(X_0, Y_0, Z_0)$  της περιοχής έναρξης, πάνω στην επιφάνεια του εδάφους ή από ένα ύψος πάνω από αυτή, με μια μεταθετική αρχική ταχύτητα  $V_0(V_{0x}, V_{0y}, V_{0z})$ . Αν η αρχική ταχύτητα θεωρηθεί ως μη μηδενική, τότε παρέχεται η δυνατότητα μελέτης του φαινομένου των βραχοπτώσεων ως συνέπεια ενός σεισμικού φαινομένου.

### Αναπήδηση/Κρούση

Όταν η ταχύτητα  $V$  είναι μεγαλύτερη από τη  $V_{min}$ , τότε το βραχοτεμάχιο ακολουθεί, λόγω της βαρύτητας, μια παραβολοειδή τροχιά στον αέρα μέχρις ότου να προσκρούσει στο έδαφος ή στον προστατευτικό φράχτη. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 + V_x \cdot dt \\ Y_1 &= Y_0 + V_y \cdot dt \\ Z_1 &= Z_0 + V_z \cdot dt - \frac{1}{2} \cdot g \cdot dt^2 \end{aligned} \quad (1)$$

όπου το σημείο 0 αναφέρεται στο σημείο  $(X_0, Y_0, Z_0)$  από το οποίο ξεκίνησε η παραβολοειδής κίνηση του βραχοτεμαχίου με ταχύτητα  $\vec{V}_0$ , και το σημείο 1 αναφέρεται στο σημείο (είτε στον αέρα είτε στο έδαφος) στο οποίο θα βρίσκεται το βραχοτεμάχιο μετά από απειροστή μεταβολή χρόνου  $dt$ . Η ταχύτητα που θα έχει το βραχοτεμάχιο στη θέση 1 έχει συνιστώσες  $\vec{V}_1 = (V_{x1}, V_{y1}, V_{z1})$  και μέγεθος  $V_1$ :

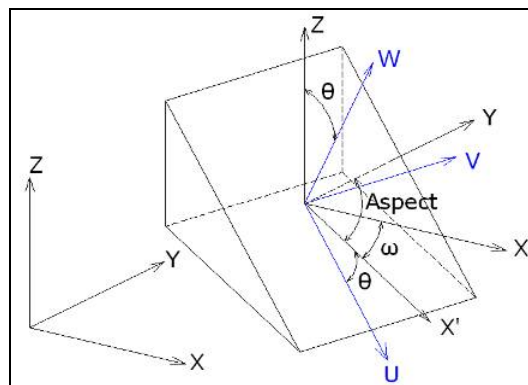
$$\begin{aligned} V_{x1} &= V_{x0} = (V_0 \cdot \cos(a_0)) \cdot \cos(\theta_0) \\ V_{y1} &= V_{y0} = (V_0 \cdot \cos(a_0)) \cdot \sin(\theta_0) \\ V_{z1} &= V_{z0} - g \cdot Dt = V_0 \cdot \sin(a_0) - g \cdot Dt \\ V_1 &= \sqrt{V_{x1}^2 + V_{y1}^2 + V_{z1}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ισούται με  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

Η κρούση (ή πρόσκρουση) θεωρείται η πιο πολύπλοκη, αβέβαιη και η λιγότερο κατανοητή διαδικασία μιας βραχόπτωσης (Broili, 1973), καθώς η απώλεια ενέργειας είναι πολύπλοκη συνάρτηση ενός αριθμού παραμέτρων, όπως η κοκκομετρική καμπύλη, ο λόγος κενών, η περιεκτικότητα των εδαφικών υλικών σε νερό, η γεωμετρία του βραχοτεμαχίου και η δυναμική της κρούσης, των οποίων η συσχέτιση με την απώλεια ενέργειας είναι δύσκολο να



καθοριστεί επακριβώς. Συνήθως, όλες οι επιδράσεις λόγω πλαστικής παραμόρφωσης του υποβάθρου και η γεωμετρική διαμόρφωση της κρούσης συμπεριλαμβάνονται σε «συναρτήσεις κρούσης» (“contact functions”), οι οποίες συσχετίζουν τη κινηματική (συναρτήσει της ταχύτητας) ή τη δυναμική (συναρτήσει της ενέργειας) των βραχοτεμαχίων πριν και μετά την κρούση (Agliardi & Crosta, 2003). Τέτοιες εκφράσεις εκφράζονται ως συντελεστές τριβής και ως συντελεστές απόσβεσης της ενέργειας, αναφερόμενες συνήθως σαν σταθερές υλικών. Στο προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιούνται οι πιο κοινοί ορισμοί των συντελεστών απόσβεσης αναγόμενοι στον τριδιάστατο χώρο ( $R_t$  και  $R_n$ ). Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι οι τιμές των συντελεστών αυτών οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν σε ένα μοντέλο, θα πρέπει να λαμβάνονται από επιτόπου δοκιμές στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 2.** Η συσχέτιση μεταξύ των δυο συστημάτων καρτεσιανών συντεταγμένων του μοντέλου προσομοίωσης βραχοπτώσεων: το Καθολικό Σύστημα Συντεταγμένων (XYZ) και το Τοπικό Σύστημα Συντεταγμένων (UVW) (Χαραλάμπους, 2006).

Κατά την πρόσκρουση, χάνεται ένα ποσό της ενέργειας και η διεύθυνση της κίνησης της βραχοπτώσεως αλλάζει ανάλογα με τις τριδιάστατες γεωμετρικές (κλίση, προσανατολισμός) και μηχανικές ιδιότητες ( $R_t$ ,  $R_n$ ) του πρανούς ή του προστατευτικού φράχτη. Όταν υπολογίζεται το σημείο ( $X_{imp}$ ,  $Y_{imp}$ ,  $Z_{imp}$ ) και η ταχύτητα κρούσης ( $V_{X_{imp}}$ ,  $V_{Y_{imp}}$ ,  $V_{Z_{imp}}$ ), τότε η ταχύτητα μετασχηματίζεται από το Καθολικό Σύστημα Συντεταγμένων XYZ στο Τοπικό Σύστημα Συντεταγμένων UVW του πρανούς στο οποίο προσέκρουσε το βραχοτεμάχιο. Το Σύστημα UVW (Σχήμα 2) ορίζεται με αρχή των αξόνων του το σημείο πρόσκρουσης, με άξονα U εφαπτόμενο στο πρανές και προς την κατεύθυνση της μέγιστης του κλίσης (προσανατολισμός), με άξονα W κάθετο στο πρανές και άξονα V τέτοιο ώστε να συμπληρώνει το Σύστημα UVW (κάθετος στο επίπεδο UW βάσει της φοράς ενός δεξιόστροφου κοχλίου). Το διάνυσμα της ταχύτητας πρόσκρουσης στο Σύστημα UVW είναι:

$$\begin{pmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{pmatrix} = [R] \cdot \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} \quad (3)$$

όπου  $[R]$  είναι ο Πίνακας Μετασχηματισμού:

$$[R] = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \cdot \cos(\omega) & \cos(\theta) \cdot \sin(\omega) & -\sin(\theta) \\ -\sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ \sin(\theta) \cdot \cos(\omega) & \sin(\theta) \cdot \sin(\omega) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Ο μετασχηματισμός αποτελείται από δυο στροφές (Σχήμα 2): τη στροφή του Συστήματος XYZ γύρω από τον άξονα Z υπό γωνία  $\omega = \text{Προσανατολισμός} - 90^\circ$ , και μια στροφή του συστήματος που προκύπτει από την προηγούμενη στροφή γύρω από τον άξονα V υπό γωνία  $\theta$  ίση προς την γωνία κλίσης πρανούς.

Το επόμενο βήμα είναι η απομείωση της ταχύτητας πρόσκρουσης, σύμφωνα με τους συντελεστές απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης, με τη χρήση της εξίσωσης 5:

$$\begin{pmatrix} V_{U\_after} \\ V_{V\_after} \\ V_{W\_after} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_t \\ R_t \\ -R_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{U\_before} \\ V_{V\_before} \\ V_{W\_before} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Τέλος, η μετά την κρούση ταχύτητα (post-impact velocity) υπολογίζεται με τον μετασχηματισμό της ταχύτητας πίσω στο Καθολικό Σύστημα XYZ μέσω της εξίσωσης 6:

$$\begin{pmatrix} V_{X\_new} \\ V_{Y\_new} \\ V_{Z\_new} \end{pmatrix} = [R]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} V_{U\_after} \\ V_{V\_after} \\ V_{W\_after} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Η κάθετη στο πρανές συνιστώσα της μετά τη πρόσκρουση ταχύτητας,  $V_{W\_after}$ , συγκρίνεται έπειτα με την  $V_{min}$ . Αν ισχύει  $V_{W\_after} > V_{min}$  τότε η αναπήδηση του βραχοτεμαχίου συνεχίζεται, ενώ εάν  $V_{W\_after} < V_{min}$  τότε το βραχοτεμάχιο ξεκινά να κυλά ή να ολισθαίνει κατά μήκος της μέγιστης κλίσης του πρανούς στο οποίο βρίσκεται.

### Ολίσθηση και Κύλιση

Ο συντελεστής τριβής του εδάφους και η γωνία κλίσης του πρανούς καθορίζουν αν η κίνηση θα είναι κύλιση ή ολίσθηση. Θεωρώντας ότι τα βραχοτεμάχια έχουν κυκλικό σχήμα με ακτίνα R και μάζα m, τότε κύλιση προκύπτει όταν η γωνία κλίσης του πρανούς  $\theta$  είναι μικρότερη της  $\theta_{max}$ :

$$\theta_{max} = \text{Arc tan}((7/2) \cdot \mu_s) \quad (7)$$

όπου  $\mu_s$  = ο συντελεστής τριβής. Όταν η γωνία κλίσης του πρανούς  $\theta$  είναι μεγαλύτερη της  $\theta_{max}$  τότε η κίνηση που θα λάβει χώρα είναι η ολίσθηση.

Η επίδραση της κύλισης ή της ολίσθησης στο προτεινόμενο μοντέλο εκφράζεται μέσω της σταθεράς K (Hoek, 1987) η οποία χρησιμοποιείται στην εξίσωση 8 για τον υπολογισμό της ταχύτητας αναπήδησης από το πρανές.

$$V_{EXIT} = \sqrt{V_{0UV} - 2 \cdot s \cdot g \cdot K} \quad (8)$$

όπου  $V_{0uv}$  η αρχική ταχύτητα του βραχοτεμαχίου επαπτόμενη στο πρανές και  $s$  η απόσταση από την αρχική θέση μέχρι τη τελική θέση πάνω στο πρανές κατά μήκος της μέγιστης κλίσης. Όταν έχουμε ολίσθηση τότε για τον υπολογισμό της σταθεράς  $K$  χρησιμοποιείται η εξίσωση 9, όπου  $\phi$  η γωνία τριβής, ενώ όταν έχουμε κύλιση τότε χρησιμοποιείται η εξίσωση 10:

$$K = \pm \sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi \quad (9)$$

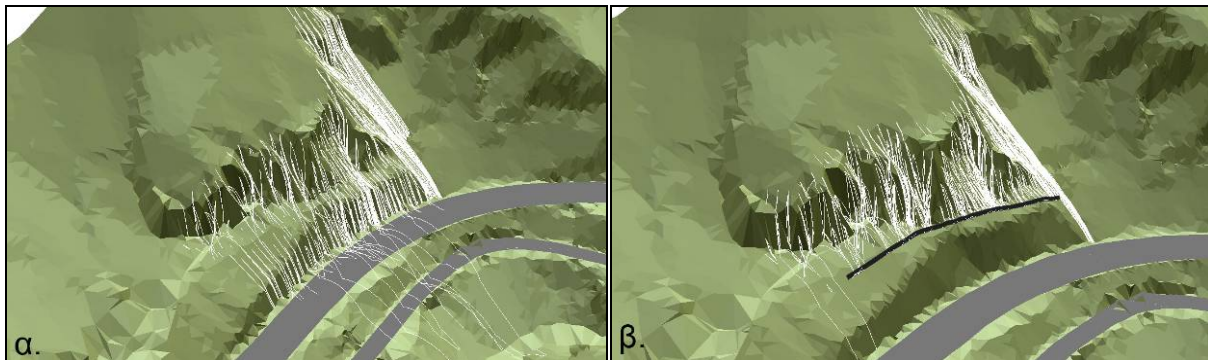
$$K = \pm (5/7) \cdot \sin \theta \quad (10)$$

Το πρόσημο είναι '+' εάν η αρχική ταχύτητα είναι ίση με μηδέν ή εάν η διεύθυνση της είναι προς τα κάτω και '-' εάν η διεύθυνση της ταχύτητας είναι προς τα πάνω.

### Προστατευτικοί Φράχτες

Η ενσωμάτωση προστατευτικών φραχτών ως μέτρο προστασίας π.χ. ενός οδικού τμήματος, ενός οικισμού ή ενός μνημείου, είναι αναμφίβολα ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τους μηχανικούς, καθώς διευρύνει τις δυνατότητες σχεδιασμού ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές (Σχήμα 3). Οι φράχτες έχουν την ίδια επίδραση στις βραχοπτώσεις όπως κάθε άλλο πρανές του εδάφους. Δημιουργούνται μέσα στην ίδια την εφαρμογή και σχεδιάζονται με παράμετρος, υλικού ( $R_t$ ,  $R_n$ ,  $\phi$ ) και γεωμετρικές (προσανατολισμός, γωνία κλίσης, ύψος), όπως στα πρανή.

Συνεπώς, ο μηχανικός μεταβάλλοντας τον σχεδιασμό ενός εισαγόμενου προστατευτικού φράχτη μέσα από την εφαρμογή *ROCKFALL ANALYSIS*, μπορεί να διερευνήσει τόσο τη βέλτιστη χωροθέτησή του όσο και την αντοχή του έτσι ώστε να πληροί με επάρκεια όλα τα κριτήρια ασφάλειας και προστασίας.



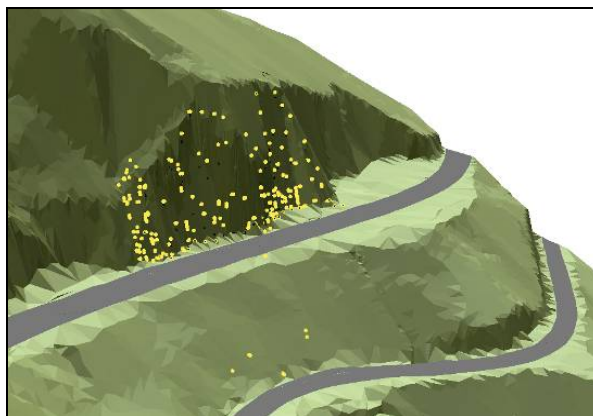
**Σχήμα 3.** Σενάριο προσομοίωσης βραχοπτώσεων στο οποίο έγινε χρήση προστατευτικού φράχτη.  
**Τριδιάστατη Απεικόνιση και Προσομοίωση**

Το δεύτερο βασικό μέρος της εφαρμογής, το "ROCKFALL\_ANALYSIS\_3D.sxd" (Σχήμα 1) παρέχει τη δυνατότητα της τριδιάστατης οπτικοποίησης των υπολογισμένων βραχοπτώσεων. Το περιβάλλον του ArcScene, μέσα στο οποίο έχει αναπτυχθεί, επιτρέπει την διαχείριση και την ανάλυση όλων των τριδιάστατων χωρικών δεδομένων, αλλά και τη δημιουργία ρεαλιστικών σκηνών στις οποίες οι χρήστες μπορούν να πλοηγηθούν και να αλληλεπιδράσουν με τα δεδομένα.

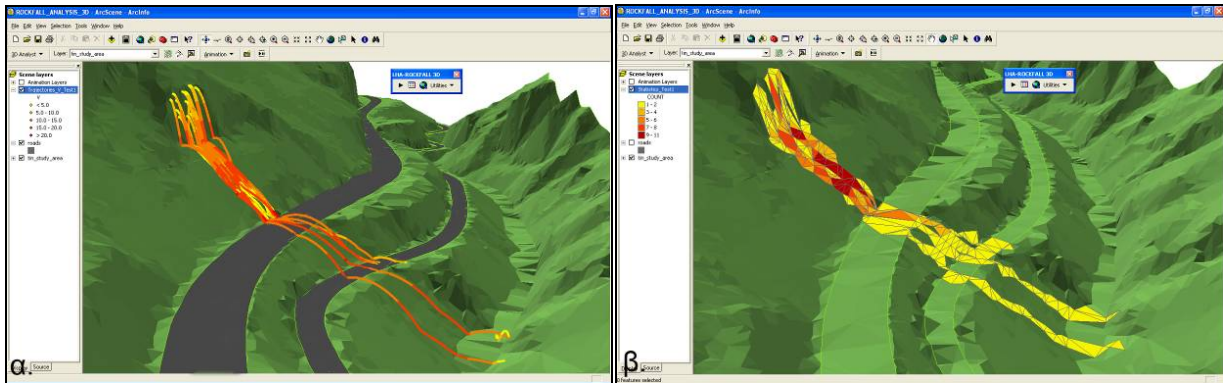
Στο ίδιο μέρος, υπάρχει η σημαντική δυνατότητα δημιουργίας τριδιάστατης προσομοίωσης (3-D animation) των βραχοπτώσεων που έχουν υπολογιστεί, συντελώντας σε μια πιο ολοκληρωμένη αντίληψη του φαινομένου (Σχήμα 4). Μια τριδιάστατη προσομοίωση παρουσιάζει τα βραχοτεμάχια να πέφτουν κατά μήκος των τροχιών τους σύμφωνα με την υπολογισμένη χρονική διάρκειά τους.

### Εργαλείο Χωρικής Ανάλυσης και Σχεδιασμού

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι του φαινομένου των βραχοπτώσεων θεωρείται πλέον απαραίτητη όταν έχουμε να κάνουμε με τον σχεδιασμό υποδομών, οικισμών ή εγκαταστάσεων σε ορεινές περιοχές. Εξυπηρετεί σε μεγάλο βαθμό τη χωροταξία, τον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου (οδικό τμήμα, φράγμα, κλπ.) ή προστατευτικών μέτρων. Η εφαρμογή *ROCKFALL ANALYSIS* προσφέρει τις δυνατότητες οι οποίες την καθιστούν ως εργαλείο χωρικής ανάλυσης και σχεδιασμού, στο στάδιο λήψης αποφάσεων και σχεδιασμού για σκοπούς χωροθέτησης, ελέγχου και προστασίας, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Εκτός από τις προαναφερόμενες δυνατότητες, η εφαρμογή προσφέρει στους μηχανικούς επιπλέον εργαλεία, με σκοπό να τους βοηθήσει στη μελέτη των βραχοπτώσεων με ένα πιο ποσοτικοποιημένο τρόπο. Για παράδειγμα, ένα εργαλείο συμβολίζει τις βραχοπτώσεις ανάλογα με την ταχύτητα που έχουν τα βραχοτεμάχια κατά μήκος των τροχιών (Σχήμα 5α). Ένα άλλο εργαλείο δημιουργεί ένα πολυγωνικό θεματικό επίπεδο με την υποπεριοχή η οποία έχει πληγεί από τις βραχοπτώσεις (Σχήμα 5β). Η περιοχή αυτή ορίζεται από τα τρίγωνα τα οποία έχουν διασχίσει οι βραχοπτώσεις, για τα οποία παρέχονται ένας αριθμός δεδομένων, όπως το πλήθος των βραχοπτώσεων που έχουν διασχίσει κάθε ένα από αυτά και την μέγιστη ταχύτητα και το μέγιστο ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.



**Σχήμα 4.** Η τριδιάστατη προσομοίωση βραχοπτώσεων στην εφαρμογή *ROCKFALL ANALYSIS*.



**Σχήμα 5. α.** Συμβολισμός των βραχοπτώσεων ανάλογα με τη ταχύτητα των βραχοτεμαχίων κάθε στιγμή της βραχόπτωσης. **β.** Η υποπεριοχή η οποία έχει πληγεί από τις βραχοπτώσεις. Τα τρίγωνα συμβολίζονται ανάλογα με τον αριθμό των βραχοπτώσεων που διέσχισαν το κάθε ένα από αυτά.

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΛΕΥΚΑΔΑ

Για την ανάδειξη των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας εφαρμόστηκε ανάστροφη ανάλυση (back analysis) για τις εκτεταμένες βραχοπτώσεις που έλαβαν χώρα στο νησί της Λευκάδας μετά τον ισχυρό σεισμό της 14/08/2003 με μέγεθος  $M=6.2$ . Πρώτος στόχος είναι η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων της τριδιάστατης μοντελοποίησης των βραχοπτώσεων έναντι της διδιάστατης και σε ποιες περιπτώσεις η δεύτερη είναι επαρκής. Ο δεύτερος και ο κυριότερος στόχος είναι η ανάδειξη της χρησιμότητας των επίγειων σαρωτών (Laser Scanners) στην αποτύπωση του αναγλύφου των υπό μελέτη φυσικών και τεχνητών πρηνών για την κατασκευή του ΨΜΕ.

### Δεδομένα

Το επίκεντρο του ισχυρού σεισμού μεγέθους  $M=6.2$  που έπληξε το νησί της Λευκάδας τοποθετείται στις δυτικές ακτές της νήσου ( $\varphi=38.76^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=20.60^\circ\text{E}$ ). Ο σεισμός αποδίδεται σε σεισμογόνο ρήγμα οριζόντιας μετάπτωσης (Harvard 2003, USGS 2003), το οποίο στο παρελθόν έχει δώσει ισχυρούς σεισμούς. Η ισχυρή σεισμική δόνηση καταγράφηκε από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ (Λευκάδα, Πρέβεζα, Αμφιλοχία, κλπ.), και του ΕΑΑ (Πρέβεζα, Πάτρα, Αργοστόλι και Ληξούρι). Η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης καταγράφηκε στην πόλη της Λευκάδας και είχε τιμή  $0.41g$  κατά την οριζόντια συνιστώσα και  $0.19g$  κατά την κατακόρυφη συνιστώσα και οι αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας υπολογίστηκαν σε  $0.32\text{ m/s}$  και  $0.10\text{ m/s}$  (ΙΤΣΑΚ, 2004).

Από σχετική ανάλυση των καταγραφών που έγινε (ΙΤΣΑΚ, 2004) προκύπτει ότι χαρακτηριστικό των καταγραφών είναι η μεγάλη διάρκεια της ισχυρής κίνησης του σεισμού και το ότι η καταγραφή στη Λευκάδα είναι σημαντικά ενισχυμένη σε φασματικό περιεχόμενο σε σχέση με την αντίστοιχη στη Πρέβεζα. Στις παραπάνω παρατηρήσεις ρόλο παίζουν η επιφανειακή γεωλογία, οι δυναμικές ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων, η σεισμική διάρρηξη και ο τρόπος ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων.

Η περιοχή της μελέτης ανήκει εξ' ολοκλήρου στην Ιόνια ζώνη και πέραν των αλλουβιακών αποθέσεων στην παράκτια ζώνη, απαντώνται παχυστρωματώδεις λευκοί νηριτικοί ασβεστόλιθοι της σειράς Παντοκράτορα και δολομίτες (προς το βόρειο τμήμα) και πλακώδεις



έως λεπτοπλακώδεις πελαγικοί ασβεστόλιθοι με λεπτές ενδιαστρώσεις πυριτολίθων και πυριτικών σχιστολίθων της σειράς Βιγλών (νότιο τμήμα) (ΙΓΜΕ, 1963).

Οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατολισθήσεων και βραχοπτώσεων παρατηρήθηκαν κατά μήκος του δυτικού οδικού άξονα Λευκάδας – Τσουκαλάδων – Αγ. Νικήτα – Καλαμισίου – Χορτάτων – Δράγανου – Γιαλού – Εγκρεμνών – Πόρτο Κασίκι σε λεπτοπλακώδεις και κατακερματισμένους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς με κατά περιπτώσεις ενδιαστρώσεις μαργαϊκών σχιστολίθων (ΙΤΣΑΚ, 2004). Οι αστοχίες αυτές των φυσικών πρηνών διέκοψαν την κυκλοφορία κατά μήκος του οδικού άξονα (Τσουκαλάδες – Αγ. Νικήτας) (Σχήμα 6α) ενώ δημιουργήθηκε κίνδυνος σε πολυσύχναστες παραλίες (Πευκούλια, Αγ. Νικήτας).

Στην περιοχή αυτή (Τσουκαλάδες – Αγ. Νικήτας) έχουν ληφθεί προστατευτικά μέτρα, όπως προστατευτικοί φράχτες από σκυρόδεμα είτε από πλέγμα είτε και από τα δυο. Με τη χρήση του Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού (GPS) έχουν καταγραφεί οι θέσεις δεκαοχτώ προστατευτικών φρακτών (Σχήμα 6α). Στη συνέχεια, αποτυπώθηκαν με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Laser HDS2500 έξι φυσικά πρηνή τα οποία θεωρήθηκαν επικίνδυνα (Σχήμα 6β). Η ανάλυση με την οποία αποτυπώθηκαν τα πρηνή είναι 1 cm.



**Σχήμα 6. α.** Η περιοχή στην οποία παρατηρήθηκαν οι περισσότερες και οι πιο επικίνδυνες βραχοπτώσεις. Απεικονίζονται, επίσης, και οι προστατευτικοί φράχτες οι οποίοι έχουν αποτυπωθεί με τη χρήση GPS. **β.** Χαρακτηριστικό πρηνές που επιλέχθηκε για αποτύπωση με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Laser HDS2500.

### Επεξεργασία Δεδομένων, Εφαρμογή Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα

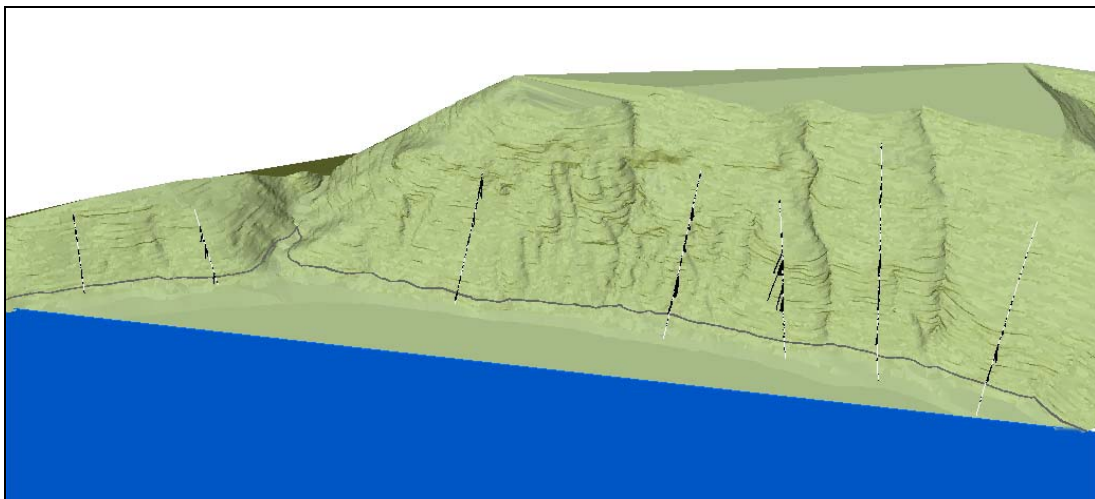
Ο Καλογεράς (2006) πραγματοποίησε δοκιμές βραχοπτώσεων σε δυο διαστάσεις σε επτά τυπικές τομές στην περιοχή Πευκούλια, όπου συνήθως σημειώνονται βραχοπτώσεις και όπου κατά το σεισμό της 14/8/2003 το οδικό τμήμα Τσουκαλάδες – Αγ. Νικήτας έκλεισε εξαιτίας των εκτεταμένων βραχοπτώσεων. Για την αναπαράσταση των τομών χρησιμοποιήθηκαν φύλλα τοπογραφικού χάρτη 1:5000 με ισοδιάσταση 4 m της Γεωγραφικής

Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ). Χρησιμοποιήθηκαν δυο προγράμματα, το Rockfall (Σακελλαρίου et al, 1995) και το RocFall (Stevens, 1998). Όπως σε κάθε πρόγραμμα διδιάστατης προσομοίωσης βραχοπτώσεων, οι βραχοπτώσεις εκτελούνται κατά μήκος τομών, ακολουθώντας, δηλαδή, μια πορεία σε ένα επίπεδο κάθετο στο έδαφος, χωρίς να υπολογίζεται ότι τα βραχοτεμάχια δύνανται να αποκλίνουν από την πορεία αυτή.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκτελέστηκαν οι ίδιες με τις πιο πάνω δοκιμές στις τρεις, όμως, διαστάσεις με τη χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης της επικινδυνότητας έναντι του φαινομένου των βραχοπτώσεων. Για να δημιουργηθεί το τριδιάστατο ΨΜΕ (Σχήμα 7), ψηφιοποιήθηκαν οι ισοϋψείς των ίδιων φύλλων χάρτη, διατηρώντας έτσι την ίδια ακρίβεια αναγλύφου. Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, οι ίδιες τιμές παραμέτρων: συντελεστές απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης  $R_i=0.8$  και  $R_n=0.4$ , συντελεστής τριβής  $\varphi=0.4$ , αρχική ταχύτητα  $V_x=V_y=0.3$  m/s και  $V_z=0.1$  m/s ( $V_0= 0.44$  m/s,  $\alpha_0=13.4^\circ$ ) και, τέλος,  $V_{min}=0.01$ m/s. Δείγμα των τριδιάστατων δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η προτεινόμενη διαδικασία στα πρηνή τα οποία αποτυπώθηκαν με τη χρήση του Laser Scanner. Τα στάδια που έλαβαν χώρα είναι τα εξής:

- Κατασκευάστηκε το ΨΜΕ των φυσικών πρηνών (Σχήμα 8) με κατάλληλο λογισμικό. Κάθε σάρωση παρήγαγε νέφος σημείων βάσει της επιλεγμένης ανάλυσης και στις περιπτώσεις όπου για την αποτύπωση ενός πρηνούς χρειάστηκε πλήθος σαρώσεων τότε απαραίτητη θεωρήθηκε η κατασκευή του ψηφιδωτού των αντίστοιχων νεφών σημείων με την κατάλληλη επικάλυψη (registration) μεταξύ τους (το μέσο τετραγωνικό σφάλμα έπρεπε να είναι μέσα στα θεμιτά όρια).



**Σχήμα 7.** Ένα δείγμα των τριδιάστατων δοκιμών βραχοπτώσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος των τυπικών τομών.



**Σχήμα 8.** Ένα από τα φυσικά πρανή τα οποία αποτυπώθηκαν με τη χρήση Laser Scanner και το αντίστοιχο ΨΜΕ. Για την αποτύπωση του πρανούς απαιτήθηκαν τρεις σαρώσεις.

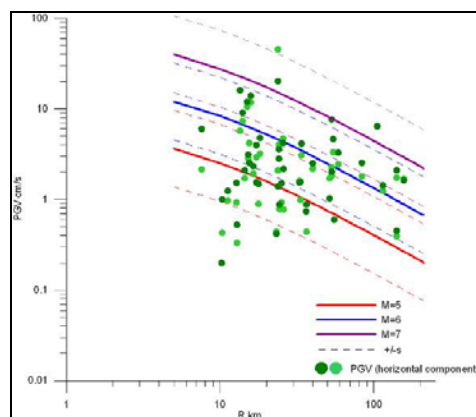
- Για την επιλογή τιμών ταχύτητας οι οποίες να αντιστοιχούν όσο το δυνατόν καλύτερα στην εδαφική ταχύτητα για το συγκεκριμένο σεισμό χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (Skarlatoudis et al, 2003).

$$\log PGV = -1.47 + 0.52 \cdot M - 0.93 \cdot \log(R^2 + h^2)^{1/2} + 0.077 \cdot F + 0.11 \cdot S \pm 0.303 \quad (11)$$

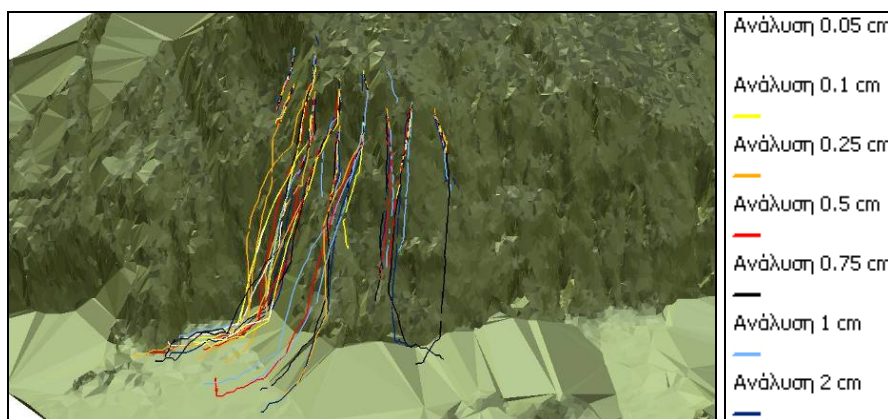
Η εξίσωση αυτή αποτελεί την εμπειρική σχέση πρόβλεψης της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $PGV$  σε cm/s σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού  $M$ , την εστιακή απόσταση  $R$  (km), το εστιακό βάθος  $h$  (km), τη σταθερά  $F$  η οποία αφορά στην επίδραση του μηχανισμού του ρήγματος του σεισμού, και τη σταθερά  $S$  η οποία αφορά στις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η επιλογή της σχέσης αυτής έγινε αφού πρώτα ελέγχθηκε η καταλληλότητά της για την περιοχή της Λευκάδας με τη κατασκευή του διαγράμματος του Σχήματος 9. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται οι καμπύλες της εξίσωσης 11 για  $M=5, 6$  και  $7$ ,  $F=1$  (για μηχανισμό ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης) και  $S=2$  (θεωρείται ότι το έδαφος είναι σαθρό). Σημειώνονται επίσης και τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα  $\pm\sigma$ . Αν προβληθούν στο ίδιο διάγραμμα και οι τιμές των οριζόντιων ταχυτήτων των διαφόρων σεισμών που έχουν καταγραφεί στην Λευκάδα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι καμπύλες είναι αντιπροσωπευτικές για την Λευκάδα και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν λοιπόν χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 11 για την περίπτωση του σεισμού του 2003 και μεταβληθεί η τιμή της εστιακής απόστασης ανάλογα με τη θέση του φυσικού πρανούς, τότε μπορεί να εκτιμηθεί η μέγιστη εδαφική ταχύτητα στην θέση εκείνη. Για παράδειγμα το πρανές του Σχήματος 8 απέχει 5.63 km από το επίκεντρο του σεισμού (εστιακό βάθος 15 km) και η εκτιμώμενη ταχύτητα είναι  $0.57 \text{ m/s} \pm 0.303$ .



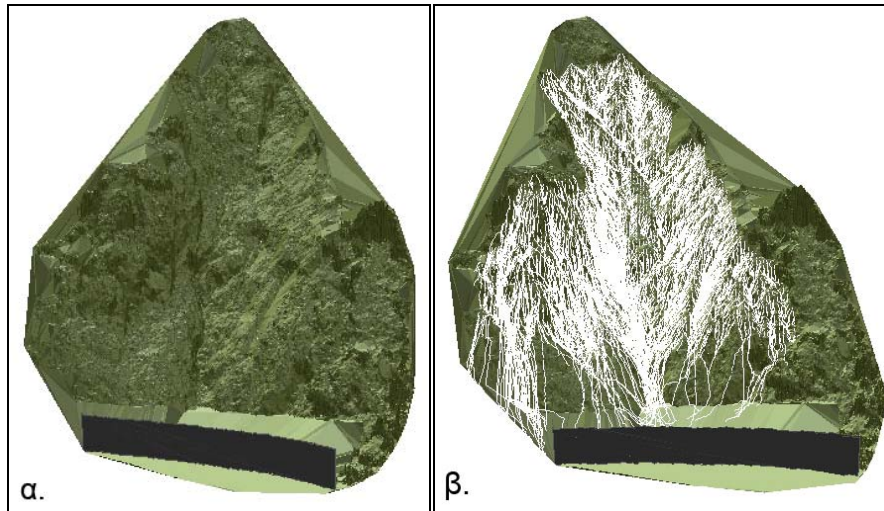
- Για την προσομοίωση των βραχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι προαναφερόμενες τιμές των συντελεστών τριβής και απόσβεσης της ενέργειας λόγω κρούσης.
- Για το φυσικό πρανές του Σχήματος 8 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές βραχοπτώσεων μεταβάλλοντας την ανάλυση του ΨΜΕ για να μελετηθεί η επίδραση της ακρίβειας του αναγλύφου στο προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης των βραχοπτώσεων. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν επτά ΨΜΕ ανάλυσης όπου η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κορυφών των τριγώνων (point spacing) ήταν 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1 και 2 cm αντίστοιχα (η ελάχιστη αυτή απόσταση προκύπτει να είναι μικρότερη από την ανάλυση του επίγειου σαρωτή λόγω της επικάλυψης των επιμέρους σαρώσεων). Για την κατασκευή των ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε ο τριγωνισμός Delaunay. Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου για τις δοκιμές παρέμειναν αναλλοίωτα. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται δείγμα των δοκιμών αυτών.
- Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές βραχοπτώσεων για σκοπούς ελέγχου της επάρκειας του υπάρχοντος φράχτη στο φυσικό πρανές του Σχήματος 6β. Στο Σχήμα 11α απεικονίζεται το ΨΜΕ του πρανούς αυτού όπως έχει παραχθεί από τρεις σαρώσεις με το Laser Scanner, ενώ στο Σχήμα 11β απεικονίζεται δείγμα των δοκιμών αυτών.



**Σχήμα 9.** Διάγραμμα των καμπύλων της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV) βάσει της εξίσωσης 8 (Skarlatoudis et al, 2003) για μεγέθη σεισμού  $M=5$ ,  $M=6$  και  $M=7$ ,  $F=1$  και  $S=2$ . Ως σημεία απεικονίζονται οι οριζόντιες ταχύτητες των διαφόρων σεισμών που έχουν καταγραφεί στη Λευκάδα.



**Σχήμα 10.** Δείγμα βραχοπτώσεων με τις ίδιες αρχικές συνθήκες αλλά με διαφορετική ανάλυση ΨΜΕ.



**Σχήμα 11.** α. Το ΨΜΕ του φυσικού πρανούς του Σχήματος 6α. β. Δοκιμές ελέγχου της επάρκειας του προστατευτικού φράχτη.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Οι τροχιές των βραχοπτώσεων οι οποίες έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του προτεινόμενου τριδιάστατου μοντέλου κατά μήκος των τυπικών τομών του Σχήματος 7 αναδεικνύουν την πραγματική επίδραση του πραγματικού τριδιάστατου ανάγλυφου στις βραχοπτώσεις. Απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα αυτό η εγκάρσια διασπορά και η απόκλιση των τροχιών από την διεύθυνση των τυπικών τομών, που είναι η διεύθυνση που θα ακολουθούσαν οι βραχοπτώσεις εάν υιοθετούσε κανείς μια 2-D προσέγγιση. Τα αποτελέσματα, επομένως, των αναλύσεων των βασισμένων σε 2-D μοντέλα προσομοίωσης βραχοπτώσεων αποκλίνουν, χωρίς αμφιβολία, από τη πραγματικότητα και καθίσταται δύσκολη η a priori επιλογή της διαδρομής που θα ακολουθήσει ένα βραχοτεμάχιο εάν υιοθετηθεί μια 2-D προσέγγιση, μια υποκειμενική επιλογή που μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτά σφάλματα. Δεν καταργείται, όμως, η χρήση των 2-D μοντέλων προσομοίωσης βραχοπτώσεων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετά ικανοποιητική απόδοση κυρίως σε τεχνητά πρανή, αλλά και σε ομαλά φυσικά πρανή, όπου οι επιφάνειες είναι ομαλές. Σε φυσικό όμως ανάγλυφο, όπου δεν ισχύει κάτι τέτοιο, θεωρούνται μειωμένης ακρίβειας και δεν συνιστάται η χρησιμοποίησή τους (Σχήμα 7).

Η ακρίβεια μιας μελέτης επικινδυνότητας έναντι βραχοπτώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου. Όσον αφορά στο ανάγλυφο, παρατηρώντας το Σχήμα 10 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ακρίβεια των βραχοπτώσεων εξαρτάται πάρα πολύ από την ακρίβεια του ΨΜΕ. Όσο πιο λεπτομερές είναι αυτό, τόσο πιστότερες είναι οι βραχοπτώσεις. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναδειχθεί η τεράστια συμβολή των επίγειων σαρωτών (Laser Scanners) στην παραγωγή ενός ακριβούς και αξιόπιστου ΨΜΕ. Σε ένα φυσικό περιβάλλον όπου οι συχνές κατολισθήσεις και βραχοπτώσεις λόγω βροχοπτώσεων ή σεισμών μεταβάλλουν σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα το φυσικό ανάγλυφο, οι επίγειοι σαρωτές έρχονται να προσφέρουν την δυνατότητα άμεσης, επίκαιρης, εύκολης και γρήγορης αποτύπωσης της ισχύουσας κατάστασης, σε αντίθεση με τους χάρτες ισουψών καμπύλων που υστερούν σε ακρίβεια και ενημερότητα.

Ένα σεισμικό φαινόμενο μπορεί να αποτελέσει την αιτία έναρξης βραχοπτώσεων. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν πραγματικά δεδομένα μέγιστης εδαφικής ταχύτητας που παράγονται από την επεξεργασία των καταγραφών των επιταχυνσιογράφων της περιοχής. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μελετηθεί το φαινόμενο των βραχοπτώσεων όταν αυτό έχει προκληθεί από ένα συγκεκριμένο σεισμό (μεθοδολογία ανάστροφης ανάλυσης), ή ακόμα να παραχθούν σενάρια αρχικών συνθηκών με βάση τους σεισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς στην περιοχή και έτσι να παραχθούν χάρτες επικινδυνότητας.

Συνεπώς, η χρήση αξιόπιστων δεδομένων, που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την πραγματικότητα θεωρείται απαραίτητη, είτε αυτά αφορούν το ανάγλυφο της περιοχής είτε την γεωλογία, τους σεισμούς κ.α. Στην επίτευξη του στόχου αυτού μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά οι επιτόπου έρευνες και δοκιμές.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας έναντι του φαινομένου των βραχοπτώσεων μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία και τις περιπτώσεις όπου κατασκευάστηκαν προστατευτικοί φράχτες (Σχήμα 11) και να διερευνηθεί έτσι η αποτελεσματικότητα και η επάρκεια υφιστάμενων φραχτών. Από την άλλη, μπορεί η μεθοδολογία αυτή να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο χωρικού σχεδιασμού στη ανάγκη χωροθέτησης και σχεδιασμού νέων προστατευτικών χαρτών για σκοπούς προστασίας περιοχών ειδικού ενδιαφέροντος (π.χ. ιστορικά μνημεία, συγκοινωνιακά έργα και οικισμοί).

Τέλος, αναφέρουμε ότι, η εφαρμογή ROCKFALL ANALYSIS έχοντας όλες τις δυνατότητες οι οποίες αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο χωρικής ανάλυσης και σχεδιασμού, στο στάδιο λήψης αποφάσεων και σχεδιασμού για σκοπούς χωροθέτησης, ελέγχου και προστασίας, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Υπάρχουν, όμως, περιθώρια βελτίωσης. Απαιτείται η ενσωμάτωση μιας πιο εκτενούς στοχαστικής ανάλυσης του φαινομένου καθώς θεωρείται ως ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης της αβεβαιότητας η οποία χαρακτηρίζει τις σχετικές με το φαινόμενο παραμέτρους. Επιπροσθέτως, πρέπει να διερευνηθούν σε βάθος οι διαδικασίες της αναπήδησης, κρούσης και θραύσης του βραχοτεμαχίου κατά την βραχόπτωσή του ούτως ώστε το προτεινόμενο μοντέλο να αποδίδει πιο πιστά και ρεαλιστικά το φαινόμενο των βραχοπτώσεων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η έρευνα υποστηρίχθηκε από το πρόγραμμα ΕΠΕΑΕΚ II – ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ το οποίο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75 %) και από Εθνικούς Πόρους (25 %).

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Agliardi F., and Crosta, G. B. (2003), “High resolution three-dimensional numerical modelling of rock falls”, *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 40(4), 455–471.

- Ambraseys N.N. and Jackson J.A. (1990), Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988. *Geophys. J. Int.*, 101, 663-708.
- Azzoni A., La Barbera G., and Zaninetti A. (1995), "Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model", *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Geomech Abstr, 32(7), 709-24.
- Badger T.C., and Lowell S. (1992), "Rockfall Control Washington State". In *Rockfall Prediction and Control and Landslide Case Histories, Transportation Research Record*, National Research Council, Washington, No 1342, pp 14-19.
- Bozzolo D., Pamini R., and Hutter K. (1988), "Rockfall analysis—a mathematical model and its test with field data", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, vol. 1, 555-563.
- Broilli L., (1973,) "In situ tests for the study of rockfall", *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8 (1), 105-111 (in Italian).
- Charalambous S., and Sakellariou M. (2007), "GIS-Based Rockfall Hazard Assessment in Support of Decision Making", *11th ISRM Congress, Special Session on Rockfalls*, Lisbon, Portugal.
- Crosta G. B., and Agliardi F. (2004), "Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol 4, 583-598.
- Crosta G., and Locatelli C. (1999), "Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo". In: *Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni*. Genova: Glauco Brigatti, 259-86 [in Italian].
- Erismann T. H., and Abele G. (2001), "*Dynamics of Rockslides and Rockfalls*", Springer-Verlag, Berlin.
- Guzzetti F., Crosta G. B., Detti R., and Agliardi F. (2002), "STONE: a computer program for the three- dimensional simulation of rockfalls", *Computers and Geosciences*, 28 (9), 1081-1095.
- Hoek E. (1987), "*RockFall - A Program for the Analysis of Rockfalls from Slopes*". Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
- Hoek E. (1998). "*Rock Engineering – The application of Modern Techniques to Underground Design*", Notes from a short course by Dr Evert Hoek. Kochen & Cella, Brazil (also available from <http://www.rocscience.com>).
- Hungr O., and Evans S. G. (1988), "Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards", *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1, 685-690.
- Hungr O. and Evans S.G. (1989), Engineering aspects of rockfall hazard in Canada. *Geological Survey of Canada*, Open File 2061, 102 pages.
- ΙΓΜΕ (1963). Φύλλο Λευκάδα 1:50000.
- ΙΤΣΑΚ (2004), "Ο σεισμός της Λευκάδας (M=6.2), 14 Αυγούστου 2003 – Ισχυρή εδαφική δόνηση – Συνέπειες του σεισμού στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον", *ΤΕΕ*, σελ 78.
- Καλογεράς Ι., (2006), Μελέτη του Φαινομένου της Πτώσης Βραχοτεμαχίων Λόγω Σεισμού. Η Περίπτωση Του Σεισμού της Λευκάδας (14/8/2003, M=6.2), Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος «Θεωρία παραμορφώσεων στις κλίμακες φλοιού και τεχνικών έργων», *Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»*, ΣΑΤΜ,ΕΜΠ,
- Kawamura K., Nishioka M., and Kubota K. (2003), "Hazard map analysis of discontinuous rock slope based on actual tests of rock block fallings", *Journal of Geotechnical Engineering*, 736/III-63: 39-50 (in Japanese)
- Κούκης Γ., και Ζιούρκας Κ. (1989), "Κατολισθητικές κινήσεις στον Ελληνικό χώρο – Στατιστική Θεώρηση", *Ορυκτός Πλούτος*, 58/ 39-58.
- Koukis, G., Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N. (1994). Slope movements in Greek territory: A statistical approach. 7th International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam.
- Ζιούρκας, Κ., (1989) "Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Παν. Πατρών.
- Papadopoulos G.A., Drakatos G., Papanastassiou D., Kalogeras I., and Stavrakakis G. (2000), "Preliminary results about the catastrophic earthquake of 7 September 1999 in Athens", Greece. *Seismological Research Letters* 71, 318-329.
- Παπαζάχος Β. και Παπαζάχου Κ. (2003), "Οι σεισμοί της Ελλάδας". *Εκδόσεις Ζήτη*, σελ 286.

- Ritchie A.M. (1963), "Evaluation of rock fall, its control", HRB, *Highway Research Record*, Vol. 17, 13–28.
- Σακελλαρίου Μ., Κοζάνης Σ., και Γουλάκος Σ., (1995). "Το πρόβλημα των καταπτώσεων βραχοτεμαχίων και η αντιμετώπισή τους σε συγκοινωνιακά έργα", *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Οδοποιίας*, Λάρισα, 263–272.
- Sakellariou M., Ferentinou M., Charalambous S., (2006), "An Integrated GIS tool for seismic induced Landslide Hazard Mapping", *1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva.
- Spang R. M. (1995), "Optimized Rockfall protection by ROCK-FALL", *Proceedings of 8th ISRM congress*, Tokyo, 1233–1242.
- Skarlatoudis A. A., Papazachos C. B., Margaritis B. N., Theodoulidis N., Papaioannou C. H., Kalogeras I., Scordilis E. M., and Karakostas V. G. (2003), "Empirical peak ground motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93, 2591-2603
- Stevens W. D. (1998), "RocFall. A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls", *Master Thesis, University of Toronto*, Canada.
- Wu S. S., (1985), "Rockfall evaluation by computer simulation", *Transportation Research Board*, Washington, DC, 1031, 1–5.
- Χαραλάμπους Σ. (2006), "Προγραμματισμός ελέγχου αστοχίας έναντι σφήνας και κατάπτωσης βραχοτεμαχίου σε περιβάλλον ΓΣΠ", *Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.*, Αθήνα.
- <http://neic.usgs.gov>
- <http://www.seismology.harvard.edu>