

# Ο Κίνδυνος των Κατολισθήσεων και η Διαχείρισή του με μεθόδους Γεωπληροφορικής

Μιχαήλ Σακελλαρίου, Μαρία Φερεντίνου, Στέφανος Χαραλάμπους  
*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής & Στοιχείων Τεχνικών Έργων*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκδήλωση φαινομένων αστάθειας σε φυσικά ή και διαμορφωμένα πρανή είναι αποτέλεσμα της μεταβολής των τοπικών γεωμορφολογικών, υδρολογικών, γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών, οι οποίες οφείλονται στη δράση του γεωδυναμικού καθεστώτος, στη σεισμική δραστηριότητα, στη συχνότητα και την ένταση του υετού, στην επίδραση της βλάστησης, σε ανθρωπογενείς διεργασίες, καθώς και σε όλους εκείνους τους παράγοντες οι οποίοι χαρακτηρίζουν ένα γεωπεριβάλλον.

Κατά συνέπεια το ενδιαφέρον των Γεωλόγων και των Μηχανικών στράφηκε στην ανάπτυξη τεχνικών και μεθοδολογιών ζωνοποίησης ευρύτερων περιοχών ως προς τον μελλοντικό κίνδυνο εκδήλωσης κατολισθήσεων. Χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης οι οποίες αναδεικνύουν την συμβολή των εμπλεκόμενων παραμέτρων και εξάγουν τον αναμενόμενο βαθμό κινδύνου ως αποτέλεσμα των εκάστοτε συνθηκών που επικρατούν στο υπό μελέτη γεωπεριβάλλον.

Ο ρόλος του Αγρονόμου Τοπογράφου Μηχανικού είναι σημαντικός τόσο κατά το στάδιο της εκτίμησης του κινδύνου (Hazard), όσο και κατά το στάδιο της διαχείρισης της επικινδυνότητας (Risk) και τον σχεδιασμό έργων αντιμετώπισης. Η Συμβολομετρία INSAR, η Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση, η Γεωδαισία, η Δορυφορική Γεωδαισία και η ψηφιοποίηση με σαρωτές laser είναι εργαλεία αναγνώρισης, αποτύπωσης και παρακολούθησης των εδαφικών κινήσεων. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αποδεικνύεται ότι έχουν σημαντικό ρόλο στην διαχείριση της επικινδυνότητας και στην λήψη αποφάσεων με τη δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων και χωρικής κατανομής του συντελεστή ασφαλείας ως μέτρου ευστάθειας, της μόνιμης μετατόπισης που ενδεχομένως προκαλείται λόγω σεισμού και της πρόβλεψης των τροχιών που διαγράφουν βραχοτεμάχια κατά την πτώση τους.

Στην συγκεκριμένη εργασία περιγράφονται δύο μοντέλα εκτίμησης του κινδύνου τα οποία συνδυάζουν την εφαρμογή εργαλείων χωρικής ανάλυσης όπως τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Τα προτεινόμενα εργαλεία συμβάλλουν στην κατανόηση της φύσης και του μηχανισμού εξέλιξης των κατολισθήσεων και εισάγουν ολιστικά μοντέλα εκτίμησης του κινδύνου. Επιπλέον, εκτιμάται ότι η εφαρμογή τους είναι χρήσιμη στο στάδιο λήψης απόφασης και σχεδιασμού μεγάλων τεχνικών έργων.

Γίνεται, επίσης, ειδική αναφορά στο μηχανισμό αστοχίας υπό μορφή βραχοπτώσεων και παρουσιάζεται μεθοδολογία εκτίμησης του κινδύνου και διαχείρισης της διακινδύνευσης σε περιβάλλον ΓΣΠ.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιβάλλον (Γεωλογία και Κλίμα) αφορά κυρίως σε μια σχέση αλληλεπίδρασης μεταξύ του ανθρώπου και του χώρου που τον περιβάλλει. Πρόκειται αφ' ενός για την εκμετάλλευση από την ανθρώπινη κοινότητα του ορυκτού πλούτου, της εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων με την κατασκευή φραγμάτων και την κατασκευή συγκοινωνιακών υποδομών.

Εξ' άλλου θέτει σε κίνδυνο την κοινωνία μέσω επιζήμιων γεωλογικών φαινομένων δημιουργώντας μη ευνοϊκές συνθήκες για ανάπτυξη. Οι δύο μορφές αυτών των γεωπαραγόντων οριοθετούν τις περιβαλλοντικές γεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής οι οποίες δημιουργούν στον άνθρωπο οφέλη ή προβλήματα. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων γίνεται μέσω ορθολογικής διαχείρισης με σκοπό πάντα την προστασία του περιβάλλοντος.

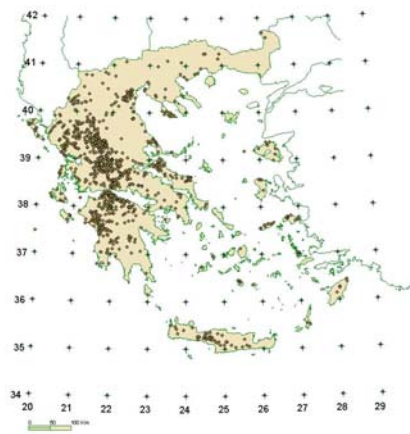
Η επιτυχής χρήση των νέων τεχνολογιών πληροφορικής αποτελεί σήμερα αναπόσπαστο εργαλείο για την εκτίμηση των συνθηκών που επικρατούν σε ένα γεωπεριβάλλον το οποίο απειλείται ή και καταστρέφεται, είτε από φαινόμενα ρύπανσης είτε από φαινόμενα αστάθειας. Το ενδιαφέρον των γεωεπιστημόνων στράφηκε στην ανάπτυξη μοντέλων για την εκτίμηση της χωρικής διασποράς των γεωκινδύνων και στην συνέχεια την υιοθέτηση μέτρων θεραπείας.

Οι κατολισθήσεις αποτελούν φαινόμενα με συνέπειες καταστροφικές για το φυσικό και το δομημένο περιβάλλον. Η κατανόηση του μηχανισμού τους είναι σημαντική για την πρόβλεψη και αντιμετώπιση τους, είτε με την πλήρη αποσόβηση του κινδύνου είτε με την κατάρτιση κατάλληλων μέτρων προστασίας και αποκατάστασης. Εντάσσονται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών και είναι απόρροια κατάλυσης ισορροπίας εδαφικών ή βραχωδών πρηνών, φυσικών ή τεχνητών. Πρόκειται για ένα πολυμεταβλητό - πολυπαραμετρικό πρόβλημα, η επίλυση του οποίου απαιτεί την συνδρομή των επιστημονικών κλάδων της Γεωλογίας, της Τεχνικής Γεωλογίας, της Βραχομηχανικής, της Εδαφομηχανικής και Εδαφοδυναμικής, σε συνδυασμό με την εφαρμογή εργαλείων ανάλυσης χώρου, όπως τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) και εργαλείων υπολογιστικής νοημοσύνης όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ).

Η συχνότητα κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο φαίνεται στην Εικόνα 1.

Στον Πίνακα 1 δίνεται παραστατικά η διαδικασία αλληλεπίδρασης των βασικών παραγόντων που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου, καθώς και οι επιδράσεις που έχει αυτό στους ίδιους παράγοντες.

Η δυσκολία κατανόησης του φαινομένου προέρχεται τόσο από τους παράγοντες που δίνουν το έναυσμα της κίνησης (σεισμός, νετός, κ.α), όσο και από τη δομή και τη σύνθεση του γεωυλικού το οποίο κατολισθαίνει. Ο προσδιορισμός του κινδύνου έναντι κατολίσθησης αποτελεί επίσης, σύνθετο πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας του φυσικού συστήματος και της δυσκολίας προσδιορισμού όλων των απαραίτητων δεδομένων εισόδου στα μοντέλα πρόβλεψης.



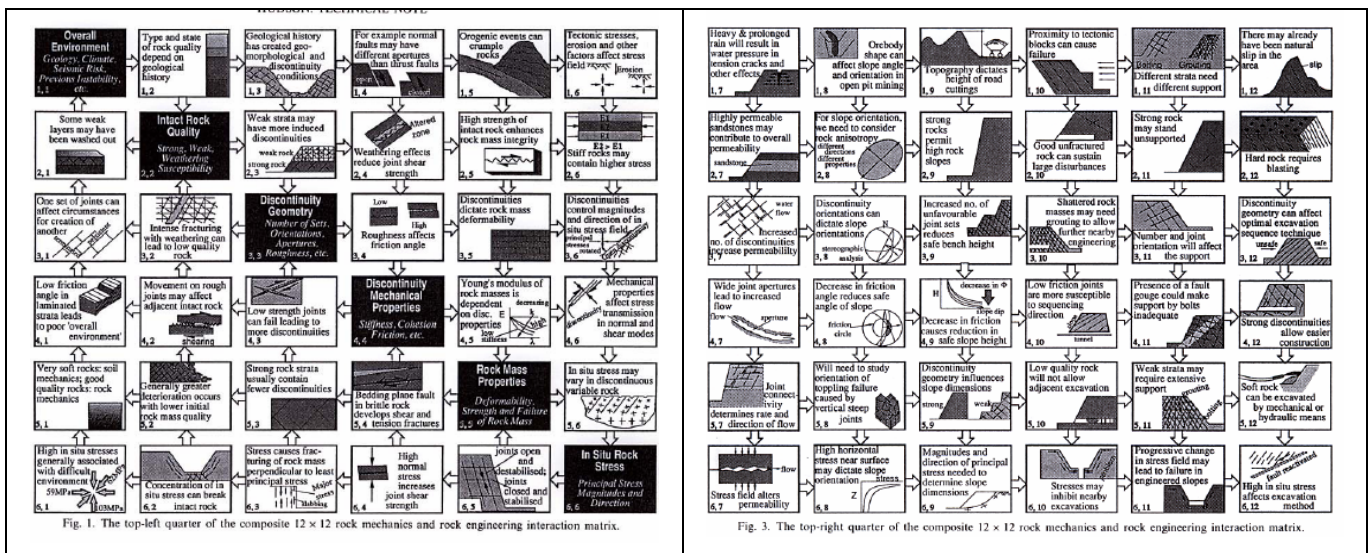
Εικόνα 1. Κατανομή των κατολισθήσεων στην Ελλάδα

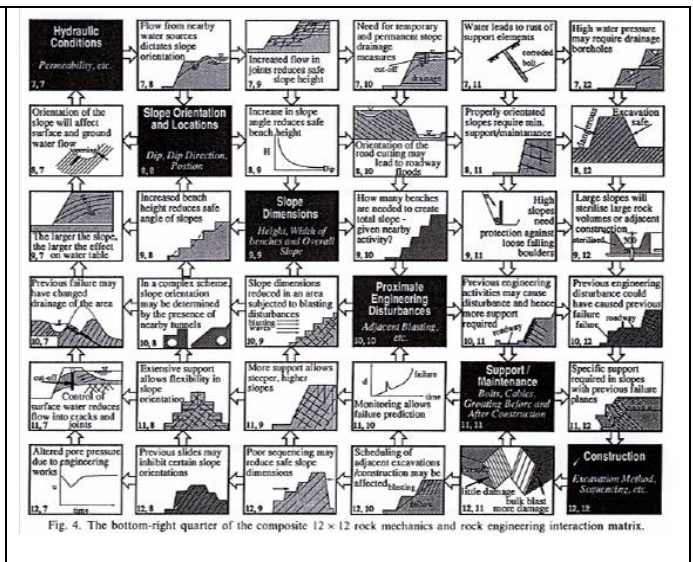
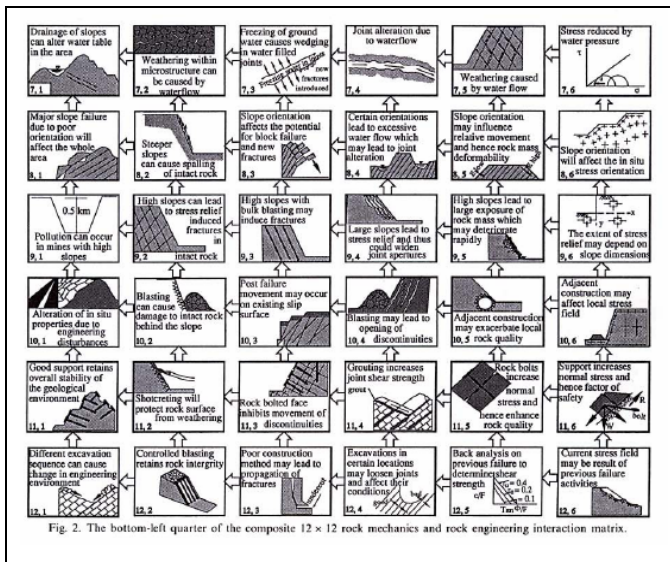
Πίνακας 1, Πίνακας αλληλεπίδρασης βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την κατασκευή και επηρεάζονται από αυτή.

|  |  |   |   |  |
|--|--|---|---|--|
| <b>Εντοπισμός θέσης, <math>F_1(t)</math></b><br><br><b>1.1</b>           | Η Γεωλογία, το ανάγλυφο και οι φυσικές διεργασίες διαφοροποιούνται από θέση σε θέση.<br><b>1.2</b> | $\downarrow \rightarrow$  | $\downarrow \rightarrow$  | Επιρροή θέσης στο Τεχνικό έργο<br><br><b>1.5</b>           |
| Οι φυσικές διεργασίες μεταβάλλουν το ανάγλυφο και τη θέση.<br><b>2.1</b> | <b>Γεωγραφική Πληροφορία-Φυσικό Περιβάλλον-Τοπίο, <math>F_2(t)</math></b><br><b>2.2</b>            | $\downarrow \rightarrow$  | $\downarrow \rightarrow$  | Επιρροή περιβάλλοντος-Φυσικοί Κίνδυνοι<br><br><b>2.5</b>   |
| $\uparrow$<br><br><b>3.1</b>   | $\leftarrow \uparrow$  | <b>Χρήσιες Γης-Δραστηριότητες <math>F_3(t)</math></b><br><b>3.3</b> | $\downarrow \rightarrow$  | Επιρροή δομημένου περιβάλλοντος στο έργο<br><br><b>3.5</b> |
| $\uparrow$<br><br><b>4.1</b>   | $\leftarrow \uparrow$  | $\leftarrow \uparrow$   | <b>Σχεδιασμός – Χωροθέτηση Έργου, <math>F_4(t)</math></b><br><b>4.4</b> | Σκοπιμότητα έργου<br><br><b>4.5</b>                        |
| Επιρροή έργου στη «θέση»<br><br><b>5.1</b>                               | Επιπτώσεις στο Περιβάλλον από Έργα<br><b>5.2</b>   | Επιρροή έργου στο ήδη δομημένο περιβάλλον<br><b>5.3</b>             | Επιρροή έργου στην ανάπτυξη της περιοχής<br><b>5.4</b>                  | <b>Τεχνικό Έργο <math>F_5(t)</math></b><br><b>5.5</b>      |

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα γίνει παρουσίαση μεθοδολογιών οι οποίες αναλύουν το πρόβλημα της εκτίμησης του κινδύνου κατολισθήσεων. Στόχος είναι η ζωνοποίηση του υπαίθριου χώρου σε ομοιογενείς “περιοχές” ανάλογα με τον αναμενόμενο βαθμό κινδύνου. Πρόκειται για ένα χωρικό σύστημα στήριξης λήψης αποφάσεων κατά την φάση του σχεδιασμού, τεχνικών έργων. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης εμφανίζεται σε χάρτες εκτίμησης κινδύνου. Παρουσιάζεται ως ποσοτική έκφραση του αναμενόμενου βαθμού κινδύνου, μέσω της χωρικής διαφοροποίησης του συντελεστή ασφαλείας ή ως ποιοτική έκφραση του βαθμού κινδύνου, μέσω της χωρικής διαφοροποίησης αυτού. Η πολυπλοκότητα και πολυπαραμετρικότητα του προβλήματος παρουσιάζεται ως μητρώο αλληλεπίδρασης (interaction matrix) στον «άτλαντα» (Πίνακας 2) που εισήγαγε ο Hudson το 1992.

Πίνακας 2, Μητρώο αλληλεπίδρασης Πρανών (Hudson, 1992).





## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

### 2.1 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), κατά τον Burrough (1998) ορίζουν «ένα δυναμικό σύνολο από εργαλεία για τη συλλογή, αποθήκευση, μετασχηματισμό, ενημέρωση, διαχείριση, ανάκληση, ανάλυση και παρουσίαση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο, για κάποιους συγκεκριμένους σκοπούς».

Στην εργασία αυτή, αποσκοπώντας στην ανάδειξη της χρησιμότητας των ΓΣΠ σε θέματα εκτίμησης της καταλληλότητας ενός γεωπεριβάλλοντος, όπως μια κατολισθαίνουσα περιοχή, παρουσιάζονται δύο μοντέλα προσδιορισμού κινδύνου κατολισθήσεων. Τα μοντέλα εκτίμησης κινδύνου έναντι κατολισθήσεων που αναπτύχθηκαν παρέχουν μια προκαταρκτική ένδειξη της ζώνης επιρροής μετά από δράση στατικής ή/και δυναμικής φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψιν τους παράγοντες οι οποίοι χαρακτηρίζουν ένα συγκεκριμένο γεωπεριβάλλον. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί η δυνατότητα ανάλυσης αλλαγών που δίνεται μέσω της χρήσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Οι παράγοντες μπορούν να προστίθενται στο μοντέλο είτε ως στατικές είτε ως δυναμικές συνιστώσες, ενσωματώνοντας κατά περίπτωση τις εμπλεκόμενες παραμέτρους μπορεί να γίνει σύγκριση με παλαιότερες ή μεταγενέστερες εικόνες και να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με περιοχές από τις οποίες μετακινήθηκε υλικό σε άλλες στις οποίες αποτέθηκε υλικό κατολισθαίνον.

### 2.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Η προσέγγιση του προβλήματος των κατολισθήσεων μέσω των μοντέλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ), έχει μεγάλη προοπτική εφαρμογής στο συγκεκριμένο πεδίο, λόγω της φύσης του φαινομένου και της πολυπλοκότητας αυτού. Είναι σημαντική η δυνατότητα ολιστικής προσέγγισης, του προβλήματος και η ταυτόχρονη ενσωμάτωση στο μοντέλο ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων. Τα ΤΝΔ επιδεικνύουν χαρακτηριστικά δημιουργικής ικανότητας, αντίληψης και κρίσης. Πρόκειται για απλοποιημένες μορφές, των βιολογικών νευρωνικών δικτύων καθώς διατηρούν αρκετές από τις λειτουργίες και την οργάνωση η οποία έχει παρατηρηθεί στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η λέξη νευρώνας – νευρώνιο - δηλαδή το θεμελιώδες νευρικό κύτταρο είναι ένας όρος δανεισμένος από την επιστήμη της βιολογίας. Κύρια χαρακτηριστικά των νευρώνων

είναι ότι αντιδρούν σε ερεθίσματα του εξωτερικού περιβάλλοντος, επεξεργάζονται και μεταφέρουν ερεθίσματα και πληροφορίες, επικοινωνούν με μια σειρά συνάψεων με άλλα νευρώνια.

Ταυτόχρονα διατηρούν την πολυπλοκότητα του συστήματος το οποίο μοντελοποιούν γιατί έχουν και αυτά σύνθετη οργάνωση (Cilliers, 1999). Βεβαίως δεν αποτελούν ακόμη, εναλλακτικές μεθόδους των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης και μοντελοποίησης, Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν συστήματα με ικανότητα μάθησης. Η βασική αρχή της επαγωγικής μάθησης είναι ότι η γνώση που προκύπτει υποστηρίζεται από τα παραδείγματα. Οι μεθοδολογίες μάθησης - εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

Εκπαίδευση με εποπτεία (supervised learning).

Τα ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιούν μοντέλα επιβλεπόμενης μάθησης υλοποιώντας τον αλγόριθμο back-propagation (οπισθόδρομης μετάδοσης σφάλματος).

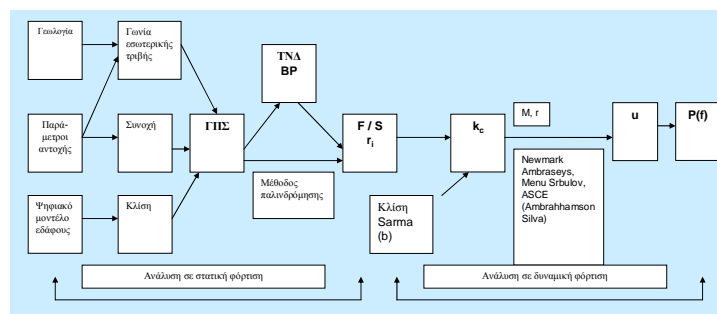
Εκπαίδευση χωρίς εποπτεία (unsupervised learning).

Τα ΤΝΔ που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία υλοποιούν τον αλγόριθμο Kohonen (Self Organizing Maps) (Kohonen, 1996).

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Το πρόγραμμα “Landslide Hazard Estimation Tool” (Φερεντίνου, 2004, Χαραλάμπους, 2006, 2007a, 2007b), αποτελεί ένα ενιαίο ολοκληρωμένο εργαλείο ανεπτυγμένο σε περιβάλλον ArcGIS (Arc/Info Workstation, ArcMap, AcScene), το οποίο εκτελεί λειτουργίες κατάλληλες για την εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων.

Στο (Σχήμα 1) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος για την ανάπτυξη του γεωτεχνικού μοντέλου εκτίμησης του κινδύνου.



Σχήμα 1. Γεωτεχνικό μοντέλο εκτίμησης κινδύνου.

Αρχικά δημιουργείται το εξωτερικό μοντέλο της βάσης το οποίο προϋποθέτει τον καθορισμό του προβλήματος και του αντικειμενικού σκοπού. Ως πρόβλημα θεωρούμε την εκτίμηση του κινδύνου έναντι κατολισθήσεων μέσα από τη δημιουργία μοντέλων εκτίμησης του κινδύνου τόσο σε στατικές όσο και δυναμικές συνθήκες. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας να συμβεί μια κατολίσθηση στο μέλλον μέσω της εκτίμησης της τιμής του συντελεστή ασφαλείας, ή της πιθανότητας. Σε εννοιολογικό επίπεδο γίνεται ο προσδιορισμός των απαιτούμενων θεματικών επιπέδων μαζί με τα αντίστοιχά τους περιγραφικά χαρακτηριστικά, ο καθορισμός της κλίμακας μελέτης και του συστήματος αναφοράς.

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής τροφοδοτεί το πρόγραμμα για την αναπαράσταση του αναγλύφου. Το τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα της περιοχής ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία και της ανάγκες της εκάστοτε μελέτης μπορεί να αφορά σε στοιχεία για το είδος :

- Των γεωλογικών σχηματισμών:
- Τις οικογένειες ασυνεχειών
- Τα Ρήγματα
- Το χαρακτηρισμό των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν στο πρηνές.

### 3. 1 Εκτίμηση Συντελεστή Ασφαλείας και των Μόνιμων Μετατοπίσεων λόγω σεισμού

Το στάδιο της ανάλυσης αποτελεί την κεντρική και την πιο σημαντική λειτουργία του προγράμματος. Αναφέρεται στην ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων με κατάλληλη διαχείριση της γεωγραφικής βάσης δεδομένων με σκοπό τον προσδιορισμό του κινδύνου έναντι κατολισθήσεων. Η διερεύνηση της ευστάθειας πραγματοποιείται μέσω της εκτίμησης του συντελεστή ασφαλείας ή του καθεστώτος ευστάθειας, και δίνει τις παρακάτω δυνατότητες στο χρήστη:

την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας στα πρηνή της περιοχής μελέτης,

την εκτίμηση των αναμενόμενων μόνιμων μετατοπίσεων των πρηνών της ίδιας περιοχής λόγω ενός σεισμού.

Ο Συντελεστής Ασφαλείας μπορεί να υπολογιστεί μέσω προσεγγιστικής σχέσης (1) η οποία έχει προκύψει με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως μία συνάρτηση της γεωμετρίας του πρηνούς καθώς και των παραμέτρων αντοχής του εδάφους ή των έντονα κατακερματισμένων μαλακών βράχων έναντι μιας πιθανής κυκλικής επιφάνειας αστοχίας.

$$F = 4.32 \cdot \left( \frac{c' \cdot \operatorname{cosec} \beta}{\gamma \cdot H} \right) + 1.22 \cdot (1 - r_u) \cdot \cot \beta \cdot \tan \phi' + 0.005 \quad (1)$$

όπου  $\beta$  η γωνία κλίσης του πρηνούς,  $H$  το ύψος του πρηνούς,  $r_u$  ο λόγος της πίεσης των πόρων,  $c'$  και  $\phi'$  οι ενεργές τιμές της συνοχής και της γωνίας τριβής του εδάφους αντίστοιχα και  $\gamma$  το ειδικό του βάρος. Στη περίπτωση εξέτασης της ευστάθειας έναντι μιας πιθανής επίπεδης επιφάνειας αστοχίας ( $c' = 0$ ), η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η (2).

$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται, επίσης, μέσω ΤΝΔ ανάστροφης τροφοδότησης, υλοποιώντας τον αλγόριθμο ανάστροφης τροφοδότησης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν σε περιβάλλον Matlab, ΤΝΔ ανάστροφης τροφοδότησης τα οποία εκπαιδεύτηκαν στο να εκτιμούν την αναμενόμενη τιμή του συντελεστή ασφάλειας  $F$  σε ένα πρηνές λόγω συγκεκριμένης γεωμετρίας και των παραμέτρων αντοχής (Φερεντίνου 2004, Sakellariou et al, 2005). Το αποτέλεσμα της εκπαίδευσης αποτελεί είσοδο για το πρόγραμμα “Landslide Hazard Estimation Tool”, το οποίο χρησιμοποιεί τις δυνατότητες που παρέχουν τα ΓΣΠ προκειμένου για την απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας στο σύνολο μιας περιοχής έρευνας.

Η σεισμική φόρτιση μπορεί να επιφέρει σημαντικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις, μόνιμες ή μη, στα πρηνή. Η εκτίμηση των μόνιμων μετατοπίσεων όπως υλοποιείται από το συγκεκριμένο λογισμικό, λόγω της επίδρασης σεισμικής φόρτισης ακολουθεί το μοντέλο του Newmark (1965) και πραγματοποιείται μέσω των μεθοδολογιών που προτείνονται από τους Ambraseys et al. (1988) και Ambraseys et al (1995). Προαπαιτούμενο για τις διαδικασίες εκτίμησης των μόνιμων μετατοπίσεων αποτελεί η εκτίμηση της κρίσιμης επιτάχυνσης  $k_c$  του πρηνούς, η οποία εκφράζει την σεισμική επιτάχυνση ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας που φέρει το πρηνές σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Είναι θεμελιώδης παράμετρος για τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων και συνδέεται με τον συντελεστή ασφαλείας του πρηνούς μέσω της εξίσωσης (3).

$$k_c = \frac{F - 1.0}{1.18 + \frac{0.66}{\tan \beta}} \quad (3)$$

Η δεύτερη εκ των δυο μεθοδολογιών (Ambraseys et al, 1995) θεωρείται ακριβέστερη για το λόγο ότι οι εκτιμήσεις των μόνιμων μετατοπίσεων εξαρτώνται επιπλέον από το μέγεθος του σεισμού  $M_s$  και από την εστιακή απόσταση  $r$  του σεισμού. Χρησιμοποιήθηκαν τα γραφήματα τα οποία περιγράφουν την εξασθένηση των μόνιμων μετατοπίσεων που προκαλούνται από ένα σεισμό με επιφανειακό μέγεθος  $M = 5.0, 6.0$  και  $7.0$  ως συνάρτηση της εστιακής απόστασης. Για την εκτίμηση των μετατοπίσεων χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (4):

$$\log(u) = -2.41 + 0.47 \cdot M_s - 0.010 \cdot r + \log \left[ \left( 1 - \frac{k_c}{k_m} \right)^{2.64} \cdot \left( \frac{k_c}{k_m} \right)^{-1.02} \right] + 0.58 \cdot p \quad (4)$$

όπου

$u$  = η μετατόπιση (μέγιστη αθροιστική ολίσθηση προκληθείσα από ένα συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός) εξ' αιτίας της κίνησης σε μία κατεύθυνση,

$M_s$  = το μέγεθος του σεισμού (επιφανειακό μέγεθος),

$r = \sqrt{d^2 + h^2}$ , με  $h$  = εστιακό βάθος και  $d$  = οριζόντια απόσταση της πηγής (σε km),

$k_c/k_m$  = ο λόγος της κρίσιμης επιτάχυνσης  $k_c$  προς τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού  $k_m$ , και

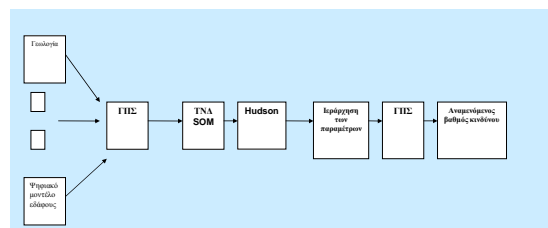
$p$  = η μεταβλητή που λαμβάνει τιμές βάσει της πιθανότητας υπέρβασης της μόνιμης μετατόπισης ( $p = 1.646$  για πιθανότητα υπέρβασης 5%).

#### 4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕΣΩ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Το μοντέλο το οποίο προτείνεται για την εκτίμηση του κινδύνου μέσω ποιοτικών χαρακτηριστικών θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως black box model, σύμφωνα με τον διαχωρισμό κατά Carrara (1990), είναι όμως δυνατό να ενταχθεί και στην κατηγορία των ποιοτικών μεθόδων σύνθεσης δεικτών παραμετρικών χαρτών.

Στα πλαίσια της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιεί μεθόδους τεχνητών νευρωνικών δικτύων και το μητρώο αλληλεπίδρασης Hudson (1992) για την απόδοση των βαρών στις εξεταζόμενες παραμέτρους (Φερεντίνου, 2004, Sakellariou et al. 2005, Φερεντίνου κ.α 2006). Μέσω αυτού του μητρώου γίνεται επίσης ανάλυση των σχέσεων αιτίου - αποτελέσματος για το σύστημα πρηνές κατολίσθηση. Όπως είναι γνωστό μία κατολίσθηση σπάνια συνδέεται με μία και μόνο αιτία. Το μεγάλο εμπόδιο στη μελέτη των κατολισθήσεων είναι η αναγνώριση όλων των παραγόντων που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου, και ο προσδιορισμός των μεταξύ τους σχέσεων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διαδικασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων με μεθόδους εξερευνητικής ανάλυσης και αναδείχθηκαν συστοιχίες και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που εξετάζονται. Χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία απεικόνισης τα οποία παρέχει το SOM Toolbox προκειμένου να διερευνηθεί η εσωτερική δομή των δεδομένων. Για την ανάλυση μέσω του εργαλείου SOM Toolbox χρησιμοποιήθηκαν και τροποποιήθηκαν προγράμματα *scripts* στο περιβάλλον προγραμματισμού Matlab v.6.5.



Σχήμα 2. Μοντέλο εκτίμησης κινδύνου μέσω ποιοτικών παραμέτρων.

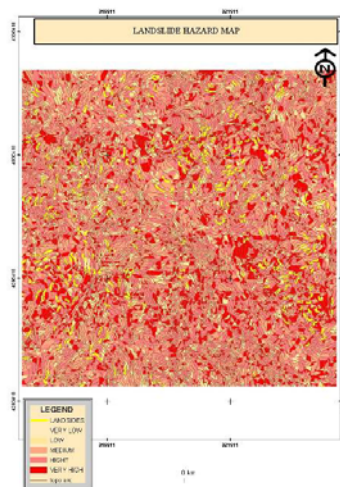
Στο (Σχήμα 2) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου εκτίμησης κινδύνου μέσω ποιοτικών παραμέτρων. Η ουσιαστική προσφορά της μεθόδου είναι ότι με την εφαρμογή της επιχειρείται η ανάδειξη συστοιχιών, δηλαδή διερευνάται η τάση των μεταβλητών η των δεδομένων για δημιουργία συστοιχιών. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα: Καθορισμός του προβλήματος και του αντικειμενικού σκοπού, προσδιορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων, προσδιορισμό των απαιτούμενων θεματικών επιπέδων, καθορισμό του συστήματος αναφοράς, σχεδίαση – ανάπτυξη βάσης δεδομένων, υπέρθεση θεματικών χαρτών, εφαρμογή μεθόδων εξερευνητικής ανάλυσης, απόδοση βαρών σε κάθε παράμετρο και δημιουργία χάρτη ο οποίος αποδίδει τον βαθμό κινδύνου.

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εφαρμογές της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε περιοχές έρευνας οι οποίες επιδεικνύουν υψηλή συχνότητα κατολισθήσεων.

Περιοχή στο Ν. Ευρυτανίας: Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε λόγω της αυξημένης συχνότητας συμβάντων κατολισθήσεων στην Ν. Ευρυτανίας. Τα πρωτογενή στοιχεία για την διεξαγωγή της παρούσας έρευνας αντλούνται από τον (Ζιούρκας 1989). Από τις δεκατέσσερις παραμέτρους οι οποίες μελετήθηκαν και περιγράφουν το συγκεκριμένο γεωπεριβάλλον προέκυψε ότι: Οι παράμετροι:

- υψόμετρο, μέσο ετήσιο ύψος βροχής και οι είδος μορφολογικού αναγλύφου είναι ισχυρές. Η πλέον κυρίαρχη παράμετρος είναι το υψόμετρο, και το μέσο ετήσιο ύψος βροχής, το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης και ο βαθμός ανθρωπογενούς επίδρασης στη βλάστηση ενώ η παράμετρος η λιγότερο κυρίαρχη ιεραρχείται η κλίση. Οι παράμετροι οι οποίες έχουν την μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης με το σύστημα η ανθρωπογενής επίδραση στη βλάστηση. Ο χάρτης εκτίμησης κινδύνου όπως προέκυψε για την περιοχή που εξετάστηκε στον Ν. Ευρυτανίας φαίνεται στο (Σχήμα 3). Μετά από σύγκριση του χάρτη βαθμού κινδύνου και του χάρτη αναγνώρισης κατολισθήσεων (Ζιούρκας 1989) στην περιοχή μελέτης προέκυψε ότι η πλειοψηφία των τμημάτων του μορφολογικού αναγλύφου στα οποία εκδηλώθηκαν κατολισθήσεις ανήκουν στην κατηγορία χαμηλού έως υψηλού βαθμού κινδύνου, σύμφωνα με την εκτίμηση του μοντέλου που προτάθηκε, για την περιοχή έρευνας. Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά από τη σύγκριση του χάρτη αναγνώρισης κατολισθήσεων όπως συντάχθηκε από τον Ζιούρκα (1989), και του χάρτη εκτίμησης του βαθμού κινδύνου όπως προέκυψε από το μοντέλο.

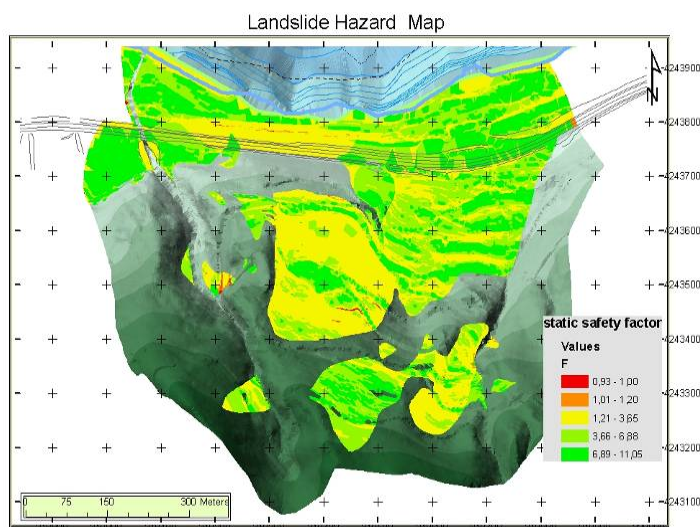


Σχήμα 3. Χάρτης εκτίμησης κινδύνου σε περιοχή του Νομού Ευρυτανίας

Πίνακας 3. Συγκριτικά αποτελέσματα χάρτη εκτίμησης επικινδυνότητας και χάρτη αναγνώρισης κατολισθήσεων.

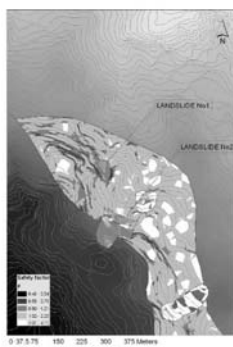
| Κατηγορία κινδύνου | Εμβαδό (km <sup>2</sup> ) | Αριθμός πολυγώνων στα οποία απαντούν κατολισθήσεις | Πυκνότητα κατολισθήσεων |
|--------------------|---------------------------|--|-------------------------|
| Πολύ χαμηλός       | 31                        | 140  | 4.52                    |
| Χαμηλός            | 39                        | 267  | 6.85                    |
| Μέτριος            | 43                        | 298  | 6.93                    |
| Υψηλός             | 33                        | 237  | 7.18                    |
| Πολύ υψηλός        | 14                        | 93   | 6.64                    |

- Περιοχή Παναγοπούλας: Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε για να εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία σε κλίμακα τεχνικού έργου, σε μια περιοχή η οποία έχει κατολισθήσει κατά το παρελθόν, μελετάται και παρακολουθείται επί σειρά ετών, και σήμερα έχουν υλοποιηθεί έργα σταθεροποίησης. Σύμφωνα με την ανάλυση αναδείχθηκαν δύο περιοχές οι οποίες επιδεικνύουν υψηλό βαθμό κινδύνου. Η μία ζώνη βρίσκεται στα ΒΔ της περιοχής και μετρήσεις αποκλισημέτρων επιβεβαιώνουν αυτό τον υπολογισμό, και η δεύτερη στο κέντρο της περιοχής εκεί που σημειώθηκε η παλαιά κατολίπηση. Στο (Σχήμα 4) παρουσιάζεται ο χάρτης εκτίμησης κινδύνου.



Σχήμα 4. Χάρτης εκτίμησης βαθμού κινδύνου στην περιοχή κατολίπησης της Παναγοπούλας.

- Περιοχή στο Ν. Καρδίτσας –χωριό Κερασιά. Η περιοχή βρίσκεται στο χωριό Κερασιά του Ν. Καρδίτσα, και πρόκειται για ένα οικισμό, ο οποίος απειλείται από κατολισθήσεις τα τελευταία 100 χρόνια. Μετά από επί τόπου επισκέψεις και παρατηρήσεις υπαίθρου χαρτογραφήθηκαν και αποτυπώθηκαν δύο ενεργές κατολισθήσεις. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη θέση για λόγους επικύρωσης και αξιολόγησης του μοντέλου σε μεγάλη κλίμακα και σε θέσεις ενεργών κατολισθήσεων. Επίσης σε συνδυασμό με την επίλυση ανάδρομων αναλύσεων, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι αντοχής των γεωυλικών που κατολισθαίνουν, με σκοπό μέσω την εκτίμηση μελλοντικών κινήσεων στην «γειτονιά» των υφιστάμενων (Matziaris et al.,2007). Στο (Σχήμα 5) που ακολουθεί παρουσιάζεται ο αναμενόμενος βαθμός κινδύνου.

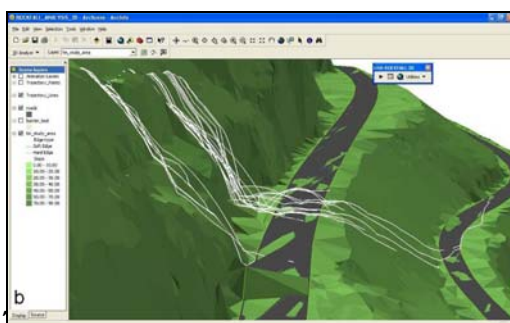


Σχήμα 5. Χάρτης εκτίμησης βαθμού κινδύνου στο χωριό Κερασιά.

## 6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

Μέσω της εφαρμογής η οποία αφορά στην τριδιάστατη προσομοίωση της κίνησης των βραχοτεμαχίων κατά το φαινόμενο των βραχοπτώσεων προσομοιώνεται πλέον πλήθος καταπτώσεων, και όχι μια μοναδική κατάπτωση, επιτρέπεται η προσθήκη φρακτών και έχουν γίνει βελτιώσεις στο περιβάλλον της εφαρμογής. Τέλος, έχει βελτιωθεί η τριδιάστατη προσομοίωση (animation) των βραχοπτώσεων, η οποία παρουσιάζει τα βραχοτεμάχια να ξεκινούν την πτώση τους από το σημείο εκκίνησης (βάσει των αρχικών δεδομένων), να κινούνται εκτελώντας τα διάφορα είδη κίνησης που ενδεχομένως θα λάβουν χώρα, στο αντίστοιχο τους χρονικό διάστημα, και τελικά να σταματάνε στο τελικό σημείο της κατάπτωσης.

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχίων, ή βραχοπτώσεις, 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. Είναι η συχνότερη μορφή κατολισθήσεων και η συχνότερη μορφή αστοχίας η οποία προκαλείται λόγω ενός σεισμού στην Ελλάδα. Η εκτίμηση του κινδύνου και της διακινδύνευσης βραχοπτώσεως είναι απαραίτητη τόσο για την εξασφάλιση της ασφάλειας, με τη λήψη προστατευτικών μέτρων, όσο και για θέματα χωροθέτησης σε υπό ανάπτυξη ορεινές περιοχές. Παρουσιάζεται ένα τριδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης βραχοπτώσεων ανεπτυγμένο σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ΓΣΠ, ως ένα εργαλείο εκτίμησης της επικινδυνότητας μιας περιοχής έναντι βραχοπτώσεων σε τοπική ή ακόμα και σε ευρύτερη κλίμακα. Με τη χρήση των δυνατοτήτων των ΓΣΠ επιτυγχάνεται στοχαστική ανάλυση των βραχοπτώσεων και προσφέρεται τριδιάστατη οπτικοποίηση και προσομοίωση τους. Στο (Σχήμα 6) που ακολουθεί φαίνεται η τροχιά βραχοτεμαχίου σε κατάπτωση.



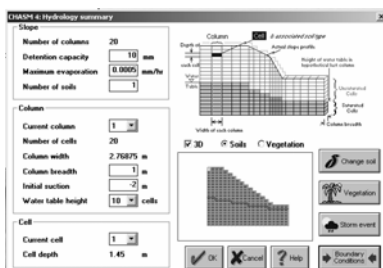
Σχήμα 6. Προσομοίωση βραχοπτώσεως.

## 7. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

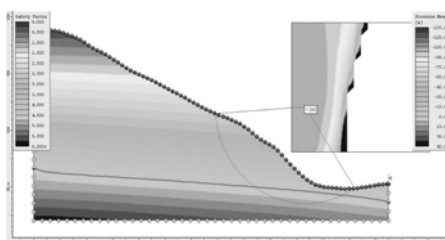
Για την μελέτη της επιρροής της βροχόπτωσης στο συγκεκριμένο πρανές χρησιμοποιήθηκε το συζευγμένο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας του πρανούς (CHASM). Το CHASM (Combined Hydrological And Stability Model, M.G. Anderson) είναι ένα σύνθετο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών, το οποίο υπολογίζει την χρονική μεταβολή της τιμής του συντελεστή ασφαλείας, επιτρέποντας τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και των χαρακτηριστικών της επιφάνειας αστοχίας για κάποιο επεισόδιο βροχόπτωσης. Υπολογίστηκε μια αρχική τιμή συντελεστή ασφαλείας 1.16. Το σενάριο το οποίο υποθέσαμε είχε διάρκεια 96 ωρών, διάρκεια βροχόπτωσης 24 ωρών και διαπιστώθηκε ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα ο συντελεστής ασφαλείας μειώθηκε σε 1.04. Ο συντελεστής ασφαλείας εξακολουθεί να μειώνεται και μετά το τέλος της βροχόπτωσης λόγω αρνητικών πιέσεων πόρων, οι οποίες αναπτύσσονται.

Στο (Σχήμα 7) παρουσιάζεται η οθόνη του προγράμματος CHASM, όπου εισάγονται τα δεδομένα.

Το προτεινόμενο εργαλείο εκτίμησης κινδύνου χρησιμοποιείται για έναν αναγνωριστικό έλεγχο και μια αρχική αξιολόγηση ως προς τον βαθμό κινδύνου. Σε επόμενο στάδιο επιλέγονται τα πρανή τα οποία χαρακτηρίζονται από το μοντέλο ως οριακά σταθερά με τιμές συντελεστή ασφαλείας  $1 < FS < 1.25$  και σε αυτά γίνεται λεπτομερέστερη ανάλυση. Οι αναλύσεις έγιναν με το πρόγραμμα Slide v5.0 και το Face2 v6.0 της Rocscience. Ο συντελεστής ασφαλείας όπως προσδιορίστηκε μετά τις αναλύσεις ευστάθειας με την αναλυτική μέθοδο και με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έδωσε τιμές 1.04 και 0.96 αντίστοιχα (Σχήμα 8). Τα παραπάνω αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με το μοντέλο της εκτίμησης του βαθμού κινδύνου σε επίπεδο αναγνώρισης.



Σχήμα 7. Σύνολο των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την ανάλυση με το πρόγραμμα CHASM.



Σχήμα 8. Ανάλυση ευστάθειας με το πρόγραμμα PHASE2.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η δυνατότητα εφαρμογής των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών σε θέματα ζωνοποίησης επικινδυνότητας και το αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό. Εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις τιμές των παραγόντων που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο και αφορούν τις ευπαθείς περιοχές. Διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν

κατολισθήσεις είτε μέσω αεροφωτογραφιών είτε από επί τόπου αποτύπωση, έχουν σημειωθεί στους χάρτες επιδεκτικότητας ως οι πιο επικίνδυνες.

Γίνεται με τον τρόπο αυτό σαφές ότι ένα ΓΣΠ. αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την ανάλυση δεδομένων πέρα από την παρουσίαση αυτών και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα προτεινόμενα μοντέλα προσδιορισμού του κινδύνου σε ένα γεωπεριβάλλον είναι χρήσιμα στο στάδιο του σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων σε μια πρώτη προσέγγιση του καθεστώτος ευστάθειας που επικρατεί σε μια περιοχή.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο αυτό συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς πόρους (25%) – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ) και ειδικότερα από το πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N., & Menu J., (1988): "Earthquake – Induced ground displacements", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 16, 985-1006.
- Ambraseys, N., & Srbulov, M., (1995): "Earthquake induced displacements of slopes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 14, 59-71.
- Anderson, M. G., Lloyd, D. M. & Othman, A 1994 Using a combined slope hydrology/slope stability model for cut slope design in the Tropics, *Malaysian J. Tropical Geog.*, 25, 1-10.
- Burrough, P.A., & Rachael A. Mc Donnel, (1998): "*Principles of Geographical Information Systems*", University Press, Oxford.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P., (1990): "*Geographical Information System and multivariate models in landslide hazard evaluation*", In. Proc of the 6th Int. Conf., Filed workshop on Landslides, Switzerland-Austria-Italy. 1, 17-28
- Charalambous St., Sakellariou M. (2007a): "Estimation of Rock Fall Hazard using a GIS-Based Three Dimensional Rock Fall Simulation Model", *Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII*, Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May, 2007, 1934-1946.
- Charalambous St., Sakellariou M. (2007β): "*GIS-Based Hazard Assessment in Support of Decision making*", 11th International Conference of International Society of Rock Mechanics (ISRM), Special Session, Lisbon, July 2007.
- Cilliers, P., (1999): "Complexity & Postmodernism", Rutledge, Taylor & Francis Group.
- Ferentinou M., M. Sakellariou (2005): "*Assessing landslide hazard on medium and large scales, using self-organizing maps*", in "Landslide Risk Management", Hungr, Fell, Couture and Eberhardt (eds.), Joint 2005 International Conference on Landslide Risk Management, Annual Vancouver Geotechnical Society Symposium, Taylor & Francis, pp. 639-648.
- Ferentinou M., Sakellariou M., Matziaris V., Charalambous S.(2006): "*An Introduced Methodology for Estimating Landslide Hazard for Seismic and Rainfall Induced Landslides in a Geographical Information System Environment*", 2006 ECI Conference on Geohazards, Lillehammer, Norway.
- Ferentinou M., Sakellariou M. (2007): "Computational intelligence tools for the prediction of slope performance", *Computers and Geotechnics*, Special Issue on "Neural networks and other biologically inspired computing methods", 34, pp 362-384.
- Hudson J.A., (1992): "*Rock Engineering systems: Theory and Practice*", Horwood, Chisesteractice
- Matziaris V., Ferentinou M., Angelopoulou O., Karanasiou S., Sakellariou M. (2007): "Landslide Hazard Analysis - A case study in Kerassia Village (Prefecture of Karditsa)", *Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII*, 2007, Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May 2007, 1710-1721.
- Newmark, N., (1965): "Effects of earthquakes, on dams and embankments" *Geotechnique*, vol.15, 139-160.
- Sakellariou M., Ferentinou M., (2005): "A study of slope stability prediction using neural networks", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2005; 24,(3):419 – 445.
- Sakellariou M., M. Ferentinou and St. Charalambous (2006): "*An Integrated Tool for Seismic Induced Landslide Hazard Mapping*", First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, September 2006, Geneva, Switzerland.
- Φερεντίνου, Μ., (2004): "*Εκτίμηση του Κινδύνου των Κατολισθήσεων με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα σε Περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων*", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- Φερεντίνου Μ., Σακελλαρίου Μ., (2006): "*Μελέτη Ευστάθειας Πρανών και Ιεράρχηση των Κρίσιμων Παραμέτρων μέσω του Αλγόριθμου SOM-Kohonen* 5ο Παν. Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, Ιούνιος 2006, Τόμος 3, 123-130.
- Χαραλάμπους, Σ., (2006): "*Προγραμματισμός Ελέγχου Αστοχίας Έναντι Σφήνας και Κατάπτωσης Βραχοτεμαχίου σε Περιβάλλον ΓΣΠ*", Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ "Γεωπληροφορική", Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.