

## ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΕΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Μπαθρέλλος Γ.<sup>1</sup>, Σκυλοδήμου Χ.<sup>1</sup>, Καλύβας Δ.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

<sup>2</sup>Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών,

Τμήμα Διαχείρισης Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Αγροτικής Γεωργικής Μηχανικής

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια να εντοπιστούν και να συνδυασθούν οι παράγοντες, που ελέγχουν τα κατολισθητικά φαινόμενα, στο ορεινό τμήμα του νομού Τρικάλων. Με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα συσχέτισης των παραμέτρων και συνολικής εκτίμησης της επικινδυνότητας για κατολισθήσεις. Τα δύο μοντέλα βασίστηκαν σε κανόνες λογικής και είναι το μοντέλο του μέγιστου παράγοντα (μοντέλο MaF) και το μοντέλο του πολλαπλού παράγοντα (μοντέλο MuF). Τα αποτελέσματά της εφαρμογής τους ήταν η παραγωγή δύο διαφορετικών χαρτών εκτίμησης της επικινδυνότητας για κατολισθήσεις, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον χωροταξικό σχεδιασμό και στον καθορισμό των χρήσεων γης. Το πρώτο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε χαρτογράφηση μικρής κλίμακας και στον αρχικό εντοπισμό ευάλωτων περιοχών σε κατολισθήσεις ενώ το μοντέλο MuF μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μέση και μεγάλης κλίμακας χαρτογράφηση περιοχών με κίνδυνο κατολισθήσεων.

### LANDSLIDES HAZARD MAPPING USING GIS-MODELS BASED ON LOGICAL RULES

Bathrellos G.<sup>1</sup>, Skilodimou H.<sup>1</sup>, Kalivas D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National and Kapodistrian University of Athens, Department of Geology and Geoenvironment

<sup>2</sup>Agricultural University of Athens,

Depart. of Natural Resources Management and Agricultural Engineering

### Abstract

In this study, an effort to identify and combine the factors which affect landslide occurrences was accomplished, in the mountainous part of Trikala Prefecture. The application of the GIS techniques supported the design and operation of two different models for correlating factors and the assessment of the overall estimation landslides hazard. The models are: the Maximum Factor Model (MaF) and the Multiple Factor Model (MuF); their compilation was made by simple logical operations. The results of the application of the two models were the generation of two different landslide hazard maps that may be used for the natural and urban planning and determination of land use zone. The MaF model locates the areas of maximum hazard and the priority areas for intensive studies; thus, it should operate in a small-scale landslide hazard mapping, whilst, the MuF models should be used in medium and large-scales mapping.

**Λέξεις κλειδιά:** χάρτες επικινδυνότητας για κατολισθήσεις,, ΓΣΠ, παράγοντες κατολισθησιμότητας.

**Key words:** Landslide Hazard Maps; GIS; instability factors

## 1. Εισαγωγή

Οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα τμήμα του γεωμορφολογικού κύκλου κατά τη διαμόρφωση του τοπογραφικού αναγλύφου και γίνονται επικίνδυνες όταν επηρεάζουν τις ανθρώπινες δραστηριότητες ή όταν οι ανθρώπινες δραστηριότητες προκαλούν τα φαινόμενα αυτά (Γκουρνέλλος et al., 2006). Στις ανεπτυγμένες χώρες πάνω από το 95% όλων των καταστροφών, οι οποίες προήλθαν από φυσικά φαινόμενα οφείλονται σε κατολισθήσεις (Hansen, 1984). Στην Ελλάδα, ο σημαντικότερος αριθμός κατολισθητικών φαινομένων εκδηλώνεται στο Δυτικό και Κεντρικό τμήμα της χώρας προκαλώντας σημαντικές ζημιές σε τμήματα των οικιστικών περιοχών και του οδικού δικτύου (Κούκης και Ρόζος, 1982).

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων είναι πολύ σημαντική στην πρόληψη, διαχείριση και αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών. Επιπλέον, αποτελεί ένα αναγκαίο παράγοντα για τον χωροταξικό σχεδιασμό των κρατών παγκοσμίως. (Λέκκας, 2000; Carrara et al., 2003). Η εκτίμηση της επικινδυνότητας των κατολισθητικών φαινομένων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θεματικών χαρτών με διαβαθμισμένα επίπεδα κινδύνου (Temesgen et al., 2001; Dai et al., 2002).

Στην παρούσα εργασία αρχικά γίνεται μία προσπάθεια για τον εντοπισμό των παραμέτρων, οι οποίες ελέγχουν τα κατολισθητικά φαινόμενα. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα συσχέτισης των παραμέτρων, βασισμένα σε κανόνες λογικής και σε συνδυασμό με Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, δημιουργήθηκαν δύο χάρτες επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων Τέλος συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων.

## 2. Γεωμορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης και βρίσκεται στην Δυτική Θεσσαλία, στην Κεντρική Ελλάδα και είναι το ορεινό τμήμα του νομού Τρικάλων (Σχήμα 1). Η έκτασή της είναι 1.631.21 τ.χλμ και το υψόμετρο της ορεινής περιοχής κυμαίνεται από 200 έως 2.204 μέτρα. Το ανάγλυφο απαρτίζεται από τους ορεινούς όγκους της οροσειράς της Νότιας Πίνδου, του Κόζιακα, των Χασίων και των Αντιχασίων. Η περιοχή διαρρέετο από τον άνω ρου του Πηνειού ποταμού και εμφανίζεται ένα καλά αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο με σημαντική επιφανειακή απορροή.



Σχήμα 1. Η περιοχή μελέτης

Οι αλπικοί σχηματισμοί, που δομούν την περιοχή ανήκουν σε τέσσερις λιθοστρωματογραφικές ενότητες: διακρίνονται στην ενότητα της Πίνδου, στην ενότητα του Κόζιακα, στην Υποπελαγονική ενότητα και στην Πελαγονική ενότητα. Επίσης απαντώνται

μολασσικοί σχηματισμοί της Μεσοελληνικής αύλακας, Νεογενείς σχηματισμοί και Τεταρτογενείς σχηματισμοί – αποθέσεις,. Τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης κυμαίνονται από 671,7 mm έως 1633,6 mm.

### 3. Δεδομένα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικοί χάρτες, κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, ο γεωλογικός χάρτης καθώς και ο χάρτης των τεκτονικών ασυνεχειών της περιοχής μελέτης κλίμακας 1:100.000 (Μπαθρέλλος, 2005), μετεωρολογικά δεδομένα από δέκα μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ, του ΥΠΕΧΩΔΕ και του Υπουργείου Γεωργίας, τα οποία περιλάμβαναν τις μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης για τη χρονική περίοδο 1973 – 2003. Επίσης πραγματοποιήθηκε εργασία υπαίθρου.

### 4. Μεθοδολογία

Μία βάση δεδομένων δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου ARC/GIS 9.0. Όλες οι γεω-πληροφορίες ψηφιοποιήθηκαν, αναλύθηκαν και εισήχθησαν στη βάση δεδομένων ως διαφορετικά επίπεδα πληροφοριών. Όλα τα επίπεδα ήταν σε μορφή διανυσματική (vector) και μετατράπηκαν σε ψηφιδωτά (raster) αρχεία με μέγεθος κυψελίδας (pixel cell size) 20x20 μέτρα.

#### 4.1 Χάρτης κατολισθήσεων

Αρχικά εντοπίστηκαν οι περιοχές – θέσεις, οι οποίες εμφανίζουν κατολισθητικά φαινόμενα και κατόπιν, ακολούθησε εργασία υπαίθρου, κατά την οποία πιστοποιήθηκαν οι κατολισθητικές κινήσεις και χαρτογραφήθηκαν σε τοπογραφικό χάρτη. Ο συνολικός αριθμός των κατολισθητικών φαινομένων διαχωρίστηκε σε δύο ομάδες με τον ίδιο αριθμό κατολισθήσεων Η πρώτη ομάδα (ομάδα διερεύνησης) χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των κατολισθητικών φαινομένων και των παραγόντων που επιδρούν σε αυτά και η δεύτερη ομάδα (ομάδα ελέγχου) χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

#### 4.2 Παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων

Κατόπιν προσδιορίστηκαν οι παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Ο προσδιορισμός των παραγόντων έγινε με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα (Anbalagan, 1992; Temesgen et al., 2001; Donati and Turrini, 2002; Lan et al., 2004:;) καθώς επίσης από παρατηρήσεις και προσωπικές εκτιμήσεις κατά την εργασία υπαίθρου. Οι παράγοντες αυτοί είναι: η λιθολογία, τα τεκτονικά στοιχεία, οι μορφολογικές κλίσεις, το οδικό δίκτυο, το υδρογραφικό δίκτυο, η χρήση γης και οι βροχοπτώσεις.

**Λιθολογία:** Οι λιθολογικοί σχηματισμοί διακρίθηκαν ανάλογα με τα τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά (Κούκης και Ρόζος, 1982) σε κατηγορίες, οι οποίες περιλαμβάνουν αντίστοιχες λιθολογικές ενότητες και είναι:

τεταρτογενείς σχηματισμοί (αλλουβιακές αποθέσεις, κώνοι κορημάτων και πλευρική κορήματα), -νεογενείς σχηματισμοί (χερσαίες αποθέσεις), - μολασσικοί σχηματισμοί (σχηματισμοί Τρικάλων -μάργες και ασβεστόλιθοι-, ανώτερη σειρά Μετρώρων -κυρίως κροκαλοπαγή-, κατώτερη σειρά Μετρώρων -κυρίως κροκαλοπαγή-, κλαστικοί σχηματισμοί και ασβεστόλιθοι Κρητιδικού της Πίνδου, στρώματα μετάβασης του φλύσχη της Πίνδου, πρώτος φλύσχος της Πίνδου, φλύσχος της Υποελαγονικής), - ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι Κρητιδικού της Πίνδου, ασβεστόλιθοι Κρητιδικού του Κόζιακα, ασβεστόλιθοι Κρητιδικού της Υποελαγονικής, ασβεστόλιθοι Ιουρασικού της Πίνδου, ασβεστόλιθοι Ιουρασικού του Κόζιακα, ασβεστόλιθοι Τριαδικού της Πίνδου), - σχιστοκερατολιθική διάπλωση (κερατόλιθοι της Πίνδου, αργιλοπηριτιτικοί σχηματισμοί του Κόζιακα, ασβεστόλιθοι και κερατόλιθοι του Κόζιακα), - μεταμορφωμένα και εκρηξιγενή

Πετρώματα (ημικρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι της Πελαγονικής, σχιστόλιθοι της Πελαγονικής, γνεύσιοι της Πελαγονικής), και οφιολιθικοί σχηματισμοί.

Τεκτονικά στοιχεία: Τα τεκτονικά στοιχεία της περιοχής μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι φωτογραμμώσεις, τα ρήγματα, οι επωθήσεις και οι επιπέυσεις (Μπαθρέλλος, 2005). Με σκοπό τη διερεύνηση των κατολισθήσεων σε σχέση με την απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία δημιουργήθηκαν συνολικά 45 κατηγορίες αποστάσεων, με ισοδιάστημα 100 μέτρων.

Μορφολογικές κλίσεις: Η ταξινόμηση των μορφολογικών κλίσεων στην περιοχή μελέτης, προήλθε από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους δημιουργήθηκε από τοπογραφικούς χάρτες με ισο-διάσταση 20m. Οι μορφολογικές κλίσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε: 0° - 10°, 10° - 20°, 20° - 30°, >30°.

Οδικό δίκτυο: Τα δεδομένα για το οδικό δίκτυο προήλθαν από τους τοπογραφικούς χάρτες. Όπως και στην περίπτωση των τεκτονικών στοιχείων έτσι και στο οδικό δίκτυο κατασκευάστηκαν 24 ζώνες αποστάσεων γύρω από τους δρόμους που το μήκος του ποικίλλει από 100 έως 2.400 μέτρα.

Υδρογραφικό δίκτυο: Το υδρογραφικό δίκτυο ψηφιοποιήθηκε από τους τοπογραφικούς χάρτες και έγινε ταξινόμηση και αρίθμηση όλων των κλάδων του με τη μέθοδο Strahler (1957). Χρησιμοποιήθηκαν οι κλάδοι 3ης και μεγαλύτερης τάξης του υδρογραφικού δικτύου διότι εκτιμήθηκε ότι οι κλάδοι μεγάλων τάξεων προκαλούν μεγαλύτερα και σημαντικότερα προβλήματα διάβρωσης και υποσκαφών. Όπως και στις άλλες δύο περιπτώσεις γραμμικών στοιχείων, κατασκευάστηκαν ζώνες αποστάσεων με ισο-διάστημα 100 μέτρων και απόσταση από 100 έως 1.900 μέτρα.

Χρήση γης: Η χρήση γης για την περιοχή μελέτης προήλθε από τα δεδομένα του προγράμματος CORINE 2000 (Bossard et al 2000). Οι χρήσεις γης κατηγοριοποιήθηκαν ως εξής: δασώδεις εκτάσεις, εναλλαγές δένδρων με θάμνους, θαμνώδεις εκτάσεις, χορτώδεις εκτάσεις με διάσπαρτα δένδρα και θάμνους, χορτώδεις εκτάσεις, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και γυμνές εκτάσεις.

Βροχοπτώσεις: Οι βροχοπτώσεις μελετήθηκαν με τη χρήση των πολυγώνων της μεθόδου Thiessen. Η περιοχή διαιρέθηκε σε δέκα πολύγωνα σε σχέση με το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης από τους υπάρχοντες δέκα τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς.

#### 4.3 Βαθμονόμηση των κατηγοριών των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων

Η κάθε κατηγορία του κάθε παράγοντα κατολισθησιμότητας έχει διαφορετική σημασία στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Έτσι η βαθμονόμηση κάθε κλάσης θεωρήθηκε απαραίτητη βασισμένη στην επιδεκτικότητα για εκδήλωση κατολισθήσεων. Αρχικά μελετήθηκε η σχέση των κατολισθήσεων με τις κατηγορίες των παραγόντων κατολισθησιμότητας και συγκεκριμένα ο αριθμός των περιστατικών των κατολισθήσεων που εμπίπτει σε κάθε κατηγορία και σε κάθε παράγοντα χωριστά, προκειμένου να διερευνηθεί η συχνότητα των κατολισθήσεων σε κάθε μία. Η βαθμονόμηση βασίστηκε στην κατανομή της συχνότητας των περιστατικών σε κάθε κατηγορία. Στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι οι κατηγορίες των παραγόντων κατολισθησιμότητας παρουσιάζουν ανομοιογένεια μεταξύ τους, όσο αφορά τη συχνότητα των περιστατικών. Έτσι έγινε μία ενιαία βαθμονόμηση σε κάθε κατηγορία χωριστά και αντικαταστάθηκε το αριθμητικό στοιχείο της συχνότητας με το βαθμό επικινδυνότητας για κατολίπηση. Τέσσερα επίπεδα επικινδυνότητας χρησιμοποιήθηκαν: χαμηλή, μέση υψηλή και πολύ υψηλή.

#### 4.4 Μοντέλα για την συνολική εκτίμηση της επικινδυνότητας κατολισθήσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εκδήλωση των κατολισθήσεων εξαρτάται από την αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων. Δεδομένου ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί ο βαθμός αυτής της αλληλεπίδρασης, στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια να συνδυαστούν οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων με δύο διαφορετικές μεθόδους. Οι ίδιοι παράγοντες

κατολισθησιμότητας και το ίδιο σύστημα βαθμονόμησης εφαρμόζονται στις δύο μεθόδους που βασίζονται σε κανόνες λογικής. Οι κατηγορίες επικινδυνότητας σε μία περιοχή είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των επιπέδων των μεμονωμένων παραγόντων που χρησιμοποιούν τις ακόλουθες διαδικασίες:

i) Μοντέλο του μέγιστου παράγοντα (MaF model)

Εκτιμήθηκε κατά την εργασία υπαίθρου ότι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη τιμή σε επίπεδο επικινδυνότητας σε ορισμένες περιπτώσεις κατολισθήσεων πιθανά ήταν ο κύριος παράγοντας για κατολίπηση. Όμως ο παράγοντας αυτός δεν ήταν κοινός σε όλες τις περιπτώσεις. Για τους λόγους αυτούς υιοθετήθηκε ένα μοντέλο που εκφράζει αυτό τον πιθανό σημαντικό παράγοντα. Το συνολικό επίπεδο επικινδυνότητας αποδίδεται σύμφωνα με το μέγιστο παράγοντα επιπέδων κινδύνου. Έτσι, για παράδειγμα μία κυψελίδα με χαμηλή επικινδυνότητα στη χρήση γης, μέση στη βροχόπτωση, υψηλή στη μορφολογική κλίση και πολύ υψηλή στη λιθολογία εκτιμήθηκε συνολικά ως πολύ υψηλής επικινδυνότητας για κατολισθήσεις.

ii) Μοντέλο του πολλαπλού παράγοντα (MuF model)

Σε άλλες περιπτώσεις κατά την εργασία υπαίθρου παρατηρήθηκε ότι ένας αριθμός κατολισθήσεων εκδηλωνόταν με την ταυτόχρονη δράση δύο ή περισσότερων παραγόντων που είχαν πολύ υψηλό ή υψηλό επίπεδο επικινδυνότητας. Έτσι εφαρμόστηκε ένα δεύτερο μοντέλο που ελήφθησαν υπόψη οι παραπάνω παράμετροι. Το Μοντέλο του πολλαπλού παράγοντα (μοντέλο MuF) είναι ένα μοντέλο που βασίστηκε στον αριθμό των παραγόντων, που έχουν χαρακτηριστεί ως υψηλού και πολύ υψηλού επιπέδου επικινδυνότητας. Η δημιουργία του μοντέλου στηρίχθηκε στην καταμέτρηση του αριθμού των παραγόντων κατολισθησιμότητας, που είχαν τιμή επικινδυνότητας ίση με πολύ υψηλή, υψηλή, μέση ή χαμηλή σε κάθε κυψελίδα. Για παράδειγμα μετά τον συνδυασμό των παραγόντων κατολισθησιμότητας μία κυψελίδα είχε τέσσερις τιμές πολύ υψηλής, μία υψηλής, μία μέσης, και μία χαμηλής. Αυτή η κυψελίδα θεωρήθηκε ως πολύ επιρρεπής για κατολίπηση και χαρακτηρίστηκε ως πολύ υψηλής επικινδυνότητας.

Στηριζόμενοι στους πιθανούς συνδυασμούς των επιπέδων επικινδυνότητας των επτά παραγόντων κατολισθησιμότητας το συνολικό επίπεδο επικινδυνότητας ορίστηκε με τη χρήση των ακόλουθων κανόνων:

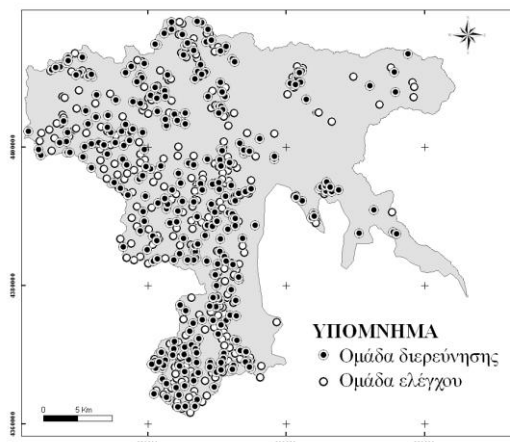
1. Πολύ υψηλή επικινδυνότητα: κυψελίδες με περισσότερους από δύο με πολύ υψηλή ή τέσσερις υψηλής επικινδυνότητας παράγοντες ( $ΠΥ > 2$  ή  $Υ > 4$ ).
2. Υψηλή επικινδυνότητα: κυψελίδες με δύο πολύ υψηλής επικινδυνότητας παράγοντες ή λιγότερους από δύο και τέσσερα υψηλής επικινδυνότητας παράγοντες ( $ΠΥ = 2$  ή ( $ΠΥ < 2$  και  $Υ = 4$ )).
3. Μέση επικινδυνότητα: κυψελίδες με ένα πολύ υψηλής και περισσότερους από τέσσερα υψηλής επικινδυνότητας παράγοντες ( $ΠΥ = 1$  και  $Υ < 4$ ).
4. Χαμηλή επικινδυνότητα: κυψελίδες με κανένα πολύ υψηλής και λιγότερους από τέσσερα υψηλής επικινδυνότητας παράγοντες ( $ΠΥ = 0$  και  $Υ < 4$ ).

## 5. Αποτελέσματα

### 5.1 Η σχέση των κατολισθήσεων με κάθε κατηγορία των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωσή τους και η βαθμονόμησή τους.

Ο αριθμός των κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή έρευνας υπολογίστηκε ότι είναι ίσος με 608. Στο σχήμα 2 απεικονίζεται ο χάρτης των κατολισθητικών φαινομένων με τις δύο ομάδες κατολισθήσεων (διερεύνησης και ελέγχου). Η ομάδα διερεύνησης περιέχει 304

κατολισθήσεις και χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθεί η σχέση των κατολισθήσεων με τις κατηγορίες των παραγόντων κατολισθησιμότητας και για να γίνει η βαθμονόμησή τους.



Σχήμα 2. Οι κατολισθήσεις της περιοχής μελέτης

Η κατανομή της συχνότητας των περιστατικών των κατολισθήσεων σε κάθε μία κατηγορία παράγοντα κατολισθησιμότητας και η αντίστοιχη βαθμονόμησή τους ανάλογα με την επίπεδο επικινδυνότητας τους δίνεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Η συχνότητα των κατολισθήσεων και η βαθμονόμηση κάθε κατηγορίας παραγόντων

Παράγοντες	Συχνότητα (%)	Βαθμονόμηση επικινδυνότητας	Παράγοντες	Συχνότητα (%)	Βαθμονόμηση επικινδυνότητας
Λιθολογία			Μορφολογικές κλίσεις		
Αλλουβιακές αποθέσεις	1.6	Χαμηλή	>30°	39.6	Πολύ υψηλή
Κώνιοι κορημάτων, πλευρικά κορημάτα	6.9	Υψηλή	Οδικό δίκτυο		
Νεογενείς χερσαίες αποθέσεις	0.7	Χαμηλή	0-100	14.2	Πολύ υψηλή
Σχηματισμοί Τρικάλων	0.3	Χαμηλή	100-200	12.8	Πολύ υψηλή
Ανώτερη σειρά Μετεώρων	3.6	Μέση	200-300	9.9	Υψηλή
Κατώτερη σειρά Μετεώρων	6.6	Υψηλή	300-400	10.5	Υψηλή
Σχηματισμοί Επταχωρίου-Κηπουριού	4.6	Μέση	400-500	6.9	Μέση
Σχηματισμοί Κρανιάς	1.0	Χαμηλή	500-600	5.9	Μέση
Σχηματισμοί Ριζώματος	2.3	Μέση	>600	39.8	Χαμηλή
Φλύσχος της Πίνδου	16.8	Πολύ υψηλή	Υδρογραφικό δίκτυο		
Στρώματα μετάβασης	0.7	Χαμηλή	0-100	15.1	Πολύ υψηλή
Πρώτος φλύσχος	5.3	Υψηλή	100-200	14.8	Πολύ υψηλή

Παράγοντες	Συχνότητα (%)	Βαθμονόμηση επικινδυνότητας	Παράγοντες	Συχνότητα (%)	Βαθμονόμηση επικινδυνότητας
Φλύσχη της Υποπελαγονικής	0.3	Χαμηλή	200-300	11.2	Υψηλή
Ασβεστόλ. Κρητ. Πίνδου	11.9	Πολύ υψηλή	300-400	11.5	Υψηλή
Ασβεστ. Κρητ Κόζιακα	1.0	Χαμηλή	400-500	9.2	Μέση
Ασβ. Κρ. Υποπελαγονικ.	0.3	Χαμηλή	500-600	7.2	Μέση
Ασβεστόλ. Ιουρ. Πίνδου	1.3	Χαμηλή	600-700	7.6	Μέση
Ασβεστόλ. Ιουρ Κόζιακα	9.5	Υψηλή	>700	23.4	Χαμηλή
Ασβεστόλ. Τριαδ. Πίνδου	0.3	Χαμηλή	Χρήση γης		
Κερατόλιθοι Πίνδου	9.8	Υψηλή	Δασώδεις εκτάσεις	9.2	Χαμηλή
Αργιλοपुरιτικοί σχηματισμοί Κόζιακα	3.1	Μέση	Εναλλαγές δένδρων θάμνων	9.6	Χαμηλή
Ασβεστόλιθοι & κερατόλιθοι Κόζιακα	3.3	Μέση	Θαμνώδεις εκτάσεις	11.2	Μέση
Ημικρυστ. ασβεστόλιθοι Πελαγονικής	0.3	Χαμηλή	Χόρτα δένδρα θάμνοι	11.9	Μέση
Σχιστόλιθοι & κρυστ. ασβεστόλ. Πελαγονικής	0.3	Χαμηλή	Χορτώδεις εκτάσεις	17.5	Υψηλή
Σχιστόλιθοι της Πελαγονικής	0.3	Χαμηλή	Καλλιέργειες	10.6	Μέση
Γνεύσιοι Πελαγονικής	1.3	Χαμηλή	Οικισμοί	10.2	Μέση
Οφιολιθικοί σχηματισμοί	6.6	Υψηλή	Γυμνές εκτάσεις	19.8	Πολύ υψηλή
Τεκτονικές γραμμές			Βροχόπτωση		
0-100	15.5	Πολύ υψηλή	671.7	2.3	Χαμηλή
100-200	14.8	Πολύ υψηλή	722.4	2.0	Χαμηλή
200-300	11.5	Υψηλή	729.3	3.6	Χαμηλή
300-400	11.2	Υψηλή	788.7	9.6	Μέση
400-500	10.5	Υψηλή	879.2	9.6	Μέση
500-600	7.2	Μέση	894.3	13.2	Υψηλή
>600	29.3	Χαμηλή	1,061.7	12.2	Υψηλή
Μορφολογικές κλίσεις			1,188.4	16.5	Πολύ υψηλή
0-10°	9.6	Χαμηλή	1,568.6	15.2	Πολύ υψηλή
10-20°	21.1	Μέση	1,633.6	15.8	Πολύ υψηλή
20-30°	29.7	Υψηλή			

### 5.2 Χάρτης κατολισθητικής επικινδυνότητας με την εφαρμογή του μοντέλου MaF

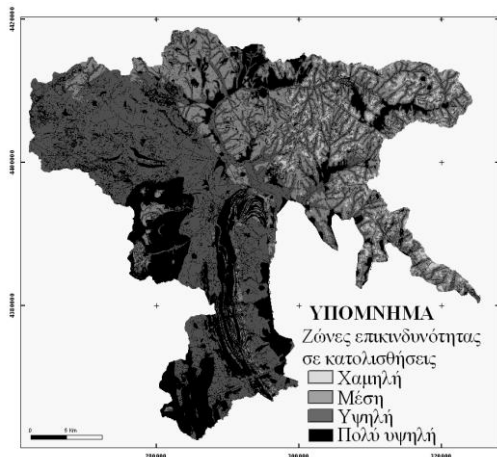
Με την εφαρμογή των δύο μοντέλων κατασκευάστηκαν οι δύο διαφορετικοί χάρτες κατολισθητικής επικινδυνότητας. Η περιοχή του κάθε χάρτη ανάλογα με τον εκτιμηθέντα βαθμό επικινδυνότητάς για κατολίσηση κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις ζώνες: χαμηλής επικινδυνότητας (ΧΕ), μέσης επικινδυνότητας (ΜΕ), υψηλής επικινδυνότητας (ΥΕ) και πολύ υψηλής επικινδυνότητας (ΠΥΕ).

Πίνακας 2. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου MaF

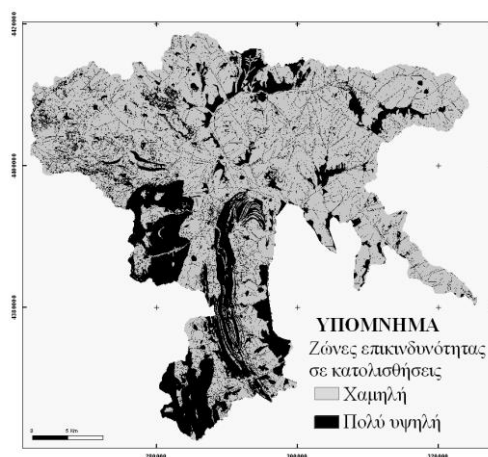
Ζώνη	Έκταση ζώνης (τ.χλμ)	Έκταση (%)	Ποσοστό κατολισθήσεων (%)
ΠΥΕ	504,53	30,93	70,68
ΥΕ	833,22	51,08	24,33
ΜΕ	262,95	16,12	4,95
ΧΕ	30,5	1,87	0,04
Σύνολο	1.631,21	100,00	100,00

Η ομάδα ελέγχου των κατολισθήσεων χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παραγόμενων δύο χαρτών εκτίμησης της επικινδυνότητας για κατολισθήσεις. Σε κάθε ζώνη επικινδυνότητας υπολογίστηκε το ποσοστό των κατολισθήσεων της ομάδας ελέγχου που βρίσκονται σε αυτές, για κάθε έναν από τους δύο χάρτες. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ο χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις ο οποίος δημιουργήθηκε με την εφαρμογή του μοντέλου MaF και στον πίνακα 2 δίνεται η έκταση που καταλαμβάνει η κάθε ζώνη επικινδυνότητας, το ποσοστό της έκτασης των ζωνών σε σχέση με τη συνολική και το ποσοστό του αριθμού των κατολισθήσεων που εμπίπτουν σε κάθε ζώνη.

Το μοντέλο αυτό δίνει πολύ υψηλό ποσοστό έκτασης των ΠΥΕ και ΥΕ ζωνών το οποίο αθροιστικά φτάνει το 82% της συνολικής έκτασης. Εξαιτίας της μεγάλης αθροιστικής έκτασης των ΠΥΕ και ΥΕ ζωνών είναι αναμενόμενο και το πάρα πολύ μεγάλο ποσοστό των κατολισθήσεων που εμπίπτουν σε αυτές, το οποίο ξεπερνά το 95%. Στις άλλες δύο ζώνες τα ποσοστά της έκτασης τους αλλά και της έκτασης των κατολισθήσεων είναι πάρα πολύ χαμηλά. Το μοντέλο MaF όπως προκύπτει από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του, είναι μία γρήγορη, εύκολη και οικονομική επεξεργασία που μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη και χρησιμοποιώντας μόνο την ΠΥΕ ζώνη. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την εφαρμοσμένη χρήση του κατασκευάστηκε ένας νέος χάρτης (Σχήμα 4) με δύο ζώνες την Υψηλής και Χαμηλής επικινδυνότητας. Στον χάρτη έγινε νέα κατηγοριοποίηση όπου η ΥΕ αντιστοιχεί στην παλαιά ΠΥΕ και η ΧΕ με όλες τις υπόλοιπες ζώνες μαζί.



Σχήμα 3. Χάρτης εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας με το μοντέλο MaF.



Σχήμα 4. Χάρτης εκτίμησης κατολισθητικής με νέα κατηγοριοποίηση



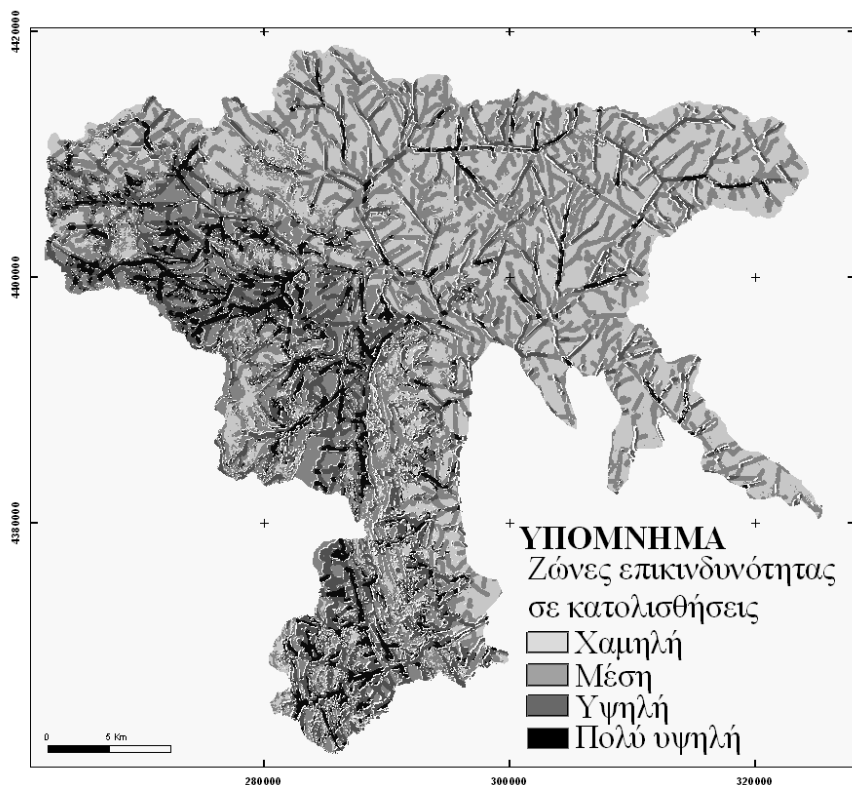
## 5.3 Χάρτης εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας με την εφαρμογή του μοντέλου MuF

Με την εφαρμογή του μοντέλου MuF δημιουργήθηκε ο χάρτης του σχήματος 5, ενώ τα αποτελέσματα του ελέγχου του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

*Πίνακας 3. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου MuF*

Ζώνη	Έκταση ζώνης (τ.χλμ)	Έκταση (%)	Ποσοστό κατολισθήσεων (%)
ΠΥΕ	158,96	9,75	31,44
ΥΕ	466,16	28,58	31,09
ΜΕ	578,91	35,48	22,35
ΧΕ	421,18	26,19	15,12
Σύνολο	1.631,21	100,00	100,00

Στο μοντέλο MuF την μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνει πρωταρχικά η ΜΕ και δευτερευόντως η ΥΕ ζώνη. Αντίθετα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου μοντέλου, το σημαντικό αποτέλεσμα είναι το μικρό ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνει η ΠΥΕ ζώνη.



Σχήμα 5. Χάρτης εκτίμησης κατολισθητικής επικινδυνότητας με το μοντέλο MuF

Η έκταση αυτή είναι κατά 3,17 φορές μικρότερη από εκείνη στο μοντέλο MaF.. Αθροιστικά η έκταση που καταλαμβάνουν οι ΠΥΕ και ΥΕ ζώνες είναι το 38.32% της συνολικής έκτασης και σε αυτές βρίσκεται το 62.53% της έκτασης των κατολισθήσεων. Το μοντέλο MuF αποτελεί μία πολύ καλή μέθοδο, η οποία δίνει αξιόπιστα και γρήγορα γεωλογικά αποτελέσματα.

## 6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Οι χάρτες επικινδυνότητας σε κατολισθήσεις χρησιμεύουν στον χωροταξικό σχεδιασμό, για τον καθορισμό των χρήσεων γης και στον σχεδιασμό των μελλοντικών κατασκευών και τεχνικών έργων. Στις ΜΕ και ΧΕ ζώνες μπορεί να γίνει σχεδιασμός οποιασδήποτε κατασκευής ή δραστηριότητας. Σε αντίθεση χρειάζεται ειδικός και προσεκτικός σχεδιασμός στις ΥΕ and ΠΥΕ ζώνες.

Σημαντικοί παράγοντες στην αξιολόγηση ενός μοντέλου είναι η ταχύτητα και η ευκολία εφαρμογής καθώς και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του. Επίσης, στον χωροταξικό σχεδιασμό και στο σχεδιασμό των κατασκευών σημαντικό ρόλο παίζει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη η έκταση των ΠΥΕ και ΥΕ ζωνών και όσο το δυνατόν μεγαλύτερο το ποσοστό των κατολισθήσεων που συμπίπτουν με τις ζώνες αυτές. Από τεχνικής άποψης το μοντέλο MaF είναι γρήγορο και αρκετά εύκολο να εφαρμοστεί δεδομένου ότι χρησιμοποιεί μόνο κανόνες λογικής και δεν είναι απαραίτητη η εκτίμηση της συνέργειας της αλληλοεπίδρασης των διαφορετικών παραγόντων. Απεναντίας το μοντέλο MuF είναι περισσότερο αξιόπιστο από το μοντέλο MaF. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο ένας παράγοντας, ο παράγοντας υψηλότερης επικινδυνότητας αποφασίζει το συνολικό επίπεδο επικινδυνότητας από το μοντέλο MaF, ενώ κατά την εφαρμογή του μοντέλου MuF εξετάζονται όλοι οι παράγοντες. Η χωρική κατανομή κάθε ΠΥΕ ζώνης στους παραχθέντες χάρτες επικινδυνότητας για κατολισθήσεις συμπίπτει. Συγκεκριμένα οι ζώνες βρίσκονται στο δυτικό, νοτιοδυτικό και κεντρικό τμήμα του κάθε χάρτη. Επισημαίνεται ότι ανεξάρτητα από την παρατηρούμενη χωρική σύμπτωση των ζωνών, το εύρος έκτασης κάθε μίας από αυτές είναι διαφορετικό. Το μοντέλο MuF παρουσιάζει πολύ μικρή χωρική εξάπλωση της ΠΥΕ ζώνης και το ποσοστό των κατολισθήσεων που εμπίπτουν στην ζώνη είναι αρκετά υψηλό. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χωρική εξάπλωση αθροιστικά των ΠΥΕ και ΥΕ ζωνών για το μοντέλο MuF είναι πολύ μικρή και το ποσοστό των κατολισθήσεων που εμπίπτουν σε αυτές είναι πολύ μεγάλο. Έτσι, κατά τον χωροταξικό σχεδιασμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενιαία οι ΠΥΕ και ΥΕ ζώνες. Αντίθετα το μοντέλο MaF εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη χωρική εξάπλωση της ΠΥΕ ζώνης αλλά και το υψηλότερο ποσοστό κατολισθήσεων. Έτσι η ενοποιημένη ΠΥΕ και ΥΕ ζώνη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον χωροταξικό σχεδιασμό εξαιτίας της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η ΠΥΕ ζώνη. Επειδή, το μοντέλο MaF έχει γρήγορη εφαρμογή, εντοπίζει περιοχές μέγιστου κινδύνου και καθορίζει περιοχές προτεραιότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μικρή κλίμακα χαρτογράφηση περιοχών με κίνδυνο κατολισθήσεων. Δηλαδή μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο χώρας ή περιφέρειας, για να εντοπιστούν οι ευάλωτες περιοχές που πρέπει να μελετηθούν εκτενέστερα. Απεναντίας το μοντέλο MuF μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μέση και μεγάλης κλίμακας χαρτογράφηση περιοχών με κίνδυνο κατολισθήσεων.

## 7. Συμπεράσματα

Επειδή ο βαθμός αλληλοεπίδρασης των παραγόντων στην εκδήλωση των κατολισθήσεων είναι δύσκολο να προσδιορισθεί, για αυτό έγινε προσπάθεια στην εργασία αυτή να συνδυασθούν οι παράγοντες αυτοί με διαφορετικές μεθόδους και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά τους. Με τη χρήση των τεχνικών των ΓΣΠ, σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα εκτίμησης της επικινδυνότητας για κατολισθήσεις και τελικό αποτέλεσμα ήταν η παραγωγή δύο διαφορετικών χαρτών. Τα δύο μοντέλα που εφαρμόστηκαν βασίζονται σε κανόνες λογικής και είναι το μοντέλο του μέγιστου παράγοντα (μοντέλο MaF) και το μοντέλο του πολλαπλού παράγοντα (μοντέλο MuF). Το μοντέλο MaF στηρίχθηκε στο ότι το συνολικό επίπεδο της εκτιμώμενης επικινδυνότητας; ταξινομήθηκε σύμφωνα με το μέγιστο επίπεδο επικινδυνότητας ενός παράγοντα. Το μοντέλο MuF είναι ένα μοντέλο που βασίζεται στον συνδυασμό των παραγόντων που έχουν χαρακτηριστεί ως υψηλής ή πολύ υψηλής επικινδυνότητας για κατολισθήσεις.

Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον χωροταξικό σχεδιασμό, στον καθορισμό των χρήσεων γης και στον σχεδιασμό των μελλοντικών

κατασκευών και στα τεχνικά έργα. Το μοντέλο MaF είναι το πιο εύκολο και γρήγορο στην δημιουργία και στην εφαρμογή του και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μικρής κλίμακας χαρτογράφηση, δηλαδή σε επίπεδο χώρας ή περιφέρειας, με σκοπό να εντοπιστούν οι ευάλωτες περιοχές που πρέπει να μελετηθούν εκτενέστερα. Απεναντίας το μοντέλο MuF μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μέση και μεγάλης κλίμακας χαρτογράφηση περιοχών με κίνδυνο κατολισθήσεων.

## Βιβλιογραφία

Γκουρνέλλος Θ., Χαλκιάς Χ. και Τσαγκάς Δ. 2006. Επιδεκτικότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων για τον Ελληνικό Χώρο. Ανάλυση με την χρήση Κανόνων Ασαφούς Λογικής και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Γεωγραφίες, 12, 114-126.

Κούκης, Γ. και Ρόζος, Δ. 1982. Γεωτεχνικές συνθήκες και κατολισθητικές κινήσεις στον Ελλαδικό Χώρο σε σχέση με τη γεωλογική δομή και γεωτεκτονική εξέλιξη. Ορυκτός Πλούτος, 16, 53 – 69.

Λέκκας, Ε. 2000. Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές. Access Pre-Press, Αθήνα.

Μπαθρέλλος Γ. 2005. Γεωλογική, γεωμορφολογική και γεωγραφική μελέτη των αστικών περιοχών του Νομού Τρικάλων – Δυτικής Θεσσαλίας. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, 567 σ.

Anbalagan R. 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Engineering Geology, 32, 269-27

Bossard M, Feranec J and Otahel J 2000 CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. European Environment Agency, Copenhagen.

Carrara, A., Giovanni, C., and Frattini P., 2003. Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms, 28, 1125 – 1142.

Dai FC, Lee CF, and Ngai YY., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology, 64, 65 – 87.

Donati L, Turrini MC. 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). Engineering Geology, 63, 277 – 289.

Hansen A., 1984. Landslide hazard. In: Brunnsden D. and Prior D.B. (eds) Slope Instability, J. Wiley & Son, 523 – 602, New York.

Lan HX, Zhou CH, Wang LJ, Zhang HY and Li RH., 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. Engineering Geology, 76, 109 – 128.

Strahler, A. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Amer. Geophysys. Union Trans., 38 (6), 913-920.

Temesgen B., Mohammed MU, and Korme T., 2001. Natural Hazard Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. Phys. Chem. Earth (C), 26(9), 665 – 675.