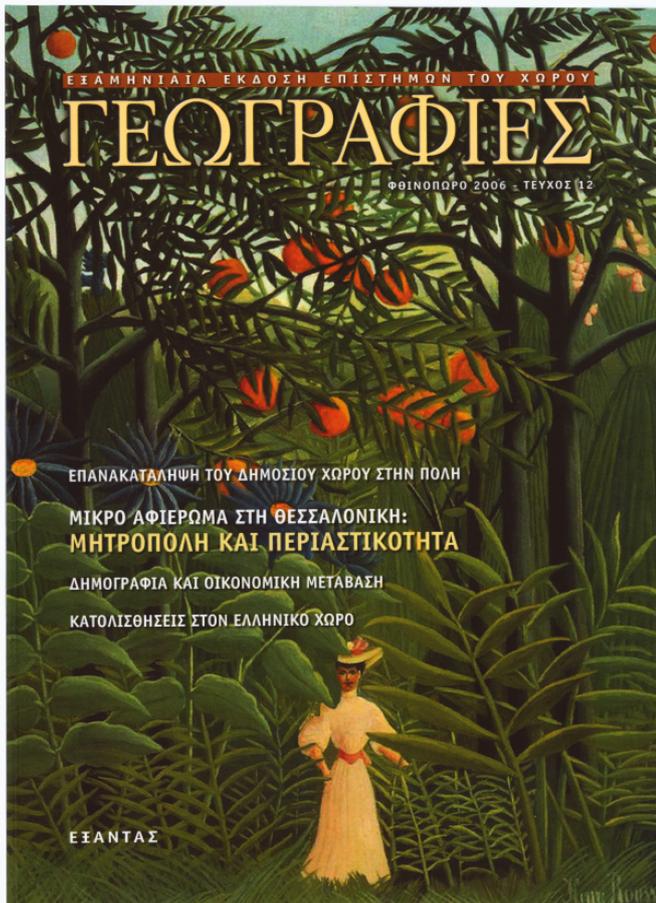


Γεωγραφίες

Αρ. 12 (2006)

Γεωγραφίες, Τεύχος 12, 2006



**ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ.
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ
ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ**

*Θεόδωρος Γκουρνέλλος, Χρίστος Χαλκιάς,
Δημήτρης Τσαγκάς*

ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Θεόδωρος Γκουρνέλλος,* Χρίστος Χαλκιάς,** Δημήτρης Τσαγκάς***

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την ανάλυση της κατανομής των κατολισθητικών φαινομένων στον ελληνικό χώρο, με την αξιοποίηση της τεχνολογίας των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) και της ασαφούς λογικής. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σχετίζονται με την αποτίμηση του φαινομένου σε αυτή τη μικρή κλίμακα και προέρχονται από εθνικές βάσεις δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά αρχεία κατολισθητικών φαινομένων, γενικευμένα στοιχεία γεωτεχνικής συμπεριφοράς, τοπογραφικά δεδομένα, μετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα σεισμικότητας και στοιχεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων που σχετίζονται με το υπό εξέταση φαινόμενο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιεί για την επεξεργασία των δεδομένων κανόνες ασαφούς λογικής σε περιβάλλον ΣΓΠ. Οι κανόνες αυτοί βασίζονται στην εμπειρική γνώση. Η δευτερογενής επεξεργασία των μεταβλητών που μελετήθηκαν και η θεώρησή τους ως ασαφών συνόλων έδωσαν τη δυνατότητα ζωνοποίησης του ελληνικού χώρου σύμφωνα με το βαθμό επιδεκτικότητας για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Η κατασκευηή χάρτη επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης αφενός αποτελεί ένα χρήσιμο διαχειριστικό εργαλείο περιφερειακής κλίμακας, αφετέρου μπορεί να καταδείξει περιοχές για τις οποίες ενδείκνυται λεπτομερέστερη μελέτη του φαινομένου σε τοπική κλίμακα.

Landslide Susceptibility Zonation of Greece Using Fuzzy Logic Rules and Geographical Information Systems

Theodoros Gournellos, Christos Chalkias, Dimitris Tsagas

ABSTRACT

The main target of this paper is to present a methodology for the analysis of the spatial distribution of landslides in Greece using GIS techniques and fuzzy rules. For this purpose national datasets –concerning lithology, topography, seismicity, rainfalls, road network, land use– were used in a combination with historical files for the major landslide events in Greece during the last twenty years. The proposed methodology consists of different stages, from the input of the variables to the construction of an inference mechanism to transform the input variables to the output landslide susceptibility zonation map. The main concept is based on applying expert knowledge using fuzzy set rules in a GIS environment. Final susceptibility maps are effective management tools on the national level. These output maps can indicate areas of high landslide susceptibility for further detailed investigation.

* Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, e-mail: gournellos@uoa.geol.gr.

** Λέκτορας, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, e-mail: chalkias@hua.gr.

*** Γεωλόγος, e-mail: geoenv@tee.gr.

Εισαγωγή

Οι κατολισθήσεις είναι μία από τις πιο συνηθισμένες μορφές φυσικών καταστροφών. Κάθε χρόνο πραγματοποιούνται εκατοντάδες κατολισθήσεις μεγάλης έκτασης σε όλο τον κόσμο με ιδιαίτερα σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (Brabb & Harold 1989, Brabb 1991). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μόνο στην Κίνα οι θάνατοι που προκλήθηκαν από κατολισθήσεις το χρονικό διάστημα 1951-1989 ανέρχονται σε 5000 και οι ετήσιες οικονομικές απώλειες σε 500 εκατ. δολάρια (Li & Wang 1992), ενώ για τις ΗΠΑ οι εκτιμήσεις μιλούν για 25-50 θανάτους κάθε χρόνο και ετήσιες ζημιές της τάξης των 1-2 εκατ. δολαρίων (Schuster & Fleming 1986). Για τον ελληνικό χώρο, παρότι απουσιάζουν επίσημα στατιστικά στοιχεία αυτού του είδους, οι καταγραφές αναφέρουν περισσότερες από 500 σημαντικές κατολισθήσεις τα τελευταία 50 χρόνια μόνο κατά μήκος του οδικού δικτύου (www.civilprotection.gr). Επίσης, έχουν αναφερθεί κατά το παρελθόν ακόμα και εγκαταλείψεις οικισμών λόγω κατολισθήσεων. Είναι φανερό ότι το άμεσο αλλά κυρίως το έμμεσο κόστος από αυτό το καταστροφικό φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Πλήθος ερευνητών και οργανισμών έχει ασχοληθεί με τα προβλήματα της μελέτης, της πρόληψης αλλά και της αποκατάστασης των ζημιών από κατολισθητικά φαινόμενα. Η κατασκευή εθνικών χαρτών κατανομής κατολισθήσεων μικρής κλίμακας, με την αξιοποίηση βιβλιογραφικών δεδομένων όσο και ειδικών τηλεπισκόπησης και χαρτογραφικού υλικού, είναι συνήθης πρακτική (μεταξύ άλλων Dikau et al. 1996, Glade et al. 2003, Tropeano & Turconi 2004). Σημαντική επίσης είναι η καταγραφή των μεγάλων κατολισθητικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα, που πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία 1990-2000 υπό την αιγίδα της UNESCO (Διεθνής Γεωτεχνική Επιτροπή για τις Εδαφικές Κινήσεις, UNESCO 1990). Βασικός στόχος της δράσης αυτής ήταν η συνεισφορά στη μελέτη της κατανομής των κατολισθήσεων σε παγκόσμια κλίμακα. Αρκετοί μάλιστα ερευνητές υποστηρίζουν ότι τα κατολισθητικά φαινόμενα θα ενταθούν τον 21ο αιώνα, κυρίως λόγω της έντονης αστικοποίησης, της καταστροφής των δασών, της ερημοποίησης αλλά και των διαφαινόμενων σημαντικών κλιματικών αλλαγών (Jones 1995, Dai et al. 2002).

Στον ελληνικό χώρο ο επίσημος φορέας καταγραφής των κατολισθητικών φαινομένων είναι το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Στα αρχεία του καταγράφονται οι σημαντικές εδαφικές κινήσεις των τελευταίων 50 χρόνων. Το αρχείο αυτό αποτέλεσε μια από τις σημαντικότερες πηγές δεδομένων για την παρούσα μελέτη.

Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν το φαινόμενο της κατολίστεσης είναι η λιθολογική σύσταση, η γεωμορφολογική κατάσταση, η τοπογραφία και το γεωτεκτονικό καθεστώς. Σε πολλές περιπτώσεις σημαντική είναι η επίδραση μετεωρολογικών παραγόντων (π.χ. έντονες βροχοπτώσεις), της σεισμικής δραστηριότητας, αλλά και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (π.χ. μεταβολή συνθηκών ευστάθειας χωρίς λήψη μέτρων αντιστήριξης μετά από τεχνικά έργα).

Με βάση τα παραπάνω έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες αξιολόγησης του βαθμού επικινδυνότητας σε εκδήλωση κατολίστεσης, με την ανάπτυξη μεθοδολογιών διαφόρων τύπων. Συχνά χρησιμοποιείται ο όρος επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίστεσης (Brabb 1984) για να καταδείξει ένα μέτρο αξιολόγησης της ενδεχόμενης εκδήλωσης κατολίστεσης σε μια περιοχή.

Ο προσδιορισμός της επιδεκτικότητας σε κατολίστεση σε εθνική κλίμα-

κα μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο διαχειριστικό εργαλείο περιφερειακού σχεδιασμού. Ακόμα και στις μέρες μας, που χαρακτηρίζονται από σημαντικές επιστημονικές κατακτήσεις και ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι προσπάθειες αποτίμησης των συνθηκών εδαφικής ευστάθειας σε εκτεταμένες περιοχές είναι σχετικά περιορισμένες και βασίζονται κυρίως σε έμμεσες εκτιμήσεις και λιγότερο σε επιτόπιες παρατηρήσεις και μετρήσεις. Αξιοσημείωτα παραδείγματα αυτού του τύπου είναι οι εργασίες του Εθνικού Γεωλογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ (μεταξύ άλλων Radbruch-Hall et al. 1983, Brabb 1995), οι προτάσεις του γαλλικού εθνικού φορέα γεωλογικών και μεταλλευτικών ερευνών (μεταξύ άλλων Leroi 1996), καθώς και προσπάθειες στο Χονγκ Κονγκ (Hansen et al. 1995, Chau et al. 2004), την Ιταλία (Cararra et al. 1991), τη Γερμανία (Glade et al. 2003). Σχεδόν όλες οι παραπάνω μελέτες προσπαθούν να εκτιμήσουν τις περιοχές στις οποίες υπάρχει σημαντική πιθανότητα εκδήλωσης μιας κατολισθήσεως σε μια ευρύτερη περιοχή μελέτης, βασιζόμενες σε μια σειρά από ιδιότητες και χαρακτηριστικά της υποπεριοχής αυτής τα οποία σχετίζονται με το κατολισθητικό φαινόμενο. Στον ελληνικό χώρο πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη σημαντικών κατολισθητικών φαινομένων σε πανελλαδική (Koukis et al. 1997β, Lekkas 2001) ή τοπική κλίμακα (μεταξύ άλλων Ρόζος 1991, Ζούρος 1995, Marinos et al. 1997, Nikolaou et al. 1997, Koukis & Ziourkas 1991, Koukouvelas & Doutsios 1997, Lekkas & Papanikolaou 2000, Λέκκας κ.ά. 2004).

Το κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αποτίμηση της χωρικής κατανομής της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολισθήσεων για τον ελληνικό χώρο με την αξιοποίηση ιστορικών αρχείων, εργασιών υπαίθρου, χαρτογραφικού υλικού και σύγχρονων τεχνικών ανάλυσης-επεξεργασίας χωρικών δεδομένων. Η μεθοδολογική προσέγγιση και τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, εκτός από την προφανή τους αξία για το σχεδιασμό και την αποτίμηση κινδύνων από φυσικές καταστροφές σε περιφερειακή κλίμακα, στοχεύουν να αποτελέσουν το υπόβαθρο για τη διεξαγωγή λεπτομερέστερων ερευνών σε τοπικό επίπεδο.

Τα κατολισθητικά φαινόμενα στην Ελλάδα και οι επιπτώσεις τους

Οι κατολισθητικές κινήσεις αποτελούν ένα από τα πλέον καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα στον ελληνικό χώρο. Τα αποτελέσματά τους έχουν συχνά κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η απομόνωση ολόκληρων οικισμών λόγω των συχνών καταστροφών του οδικού δικτύου, η διακοπή παραγωγικών δραστηριοτήτων (π.χ. γεωργίας), η συνεχής απώλεια πολύτιμης καλλιεργούμενης γης, αλλά ακόμα και η μετεγκατάσταση –λόγω εκτεταμένων καταστροφών– ολόκληρων οικισμών (Κούκης 1982).

Το 1917 ιδρύθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας η Γεωλογική Υπηρεσία της Ελλάδας (μετέπειτα ΙΓΕΥ, ΕΘΙΓΜΕ και σήμερα ΙΓΜΕ), που σήμανε και την ουσιαστική συμβολή της επιστήμης στην επίλυση εφαρμοσμένων γεωλογικών προβλημάτων. Σημειώνεται ότι στις αρχές του 20ού αιώνα πολλοί οικισμοί χαρακτηρίστηκαν ως μη κατοικήσιμοι εξαιτίας κατολισθητικών φαινομένων. Σε πολλές περιπτώσεις η μεταφορά τους κρίθηκε ως η πιο αποτελεσματική λύση, λόγω της εκτιμώμενης υψηλής επικινδυνότητας και του υψηλού κόστους αντιμετώπισής της (Ελευθερίου & Στουρνάρας 1993).

Στην οργάνωση κάθε τοπικής κοινωνίας σπάνια περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, με συνέπεια, όταν αυτές εκδηλώνονται, όλες οι λειτουργίες της κοινότητας να αναστέλλονται ή να αδρανοποιούνται μόνιμα (Λέκκας 1996). Αναλυτικότερα, παρατηρούνται κυρίως τρία στάδια:

(α) Η αλυσίδα παραγωγή-διανομή-κατανάλωση διασπάται, εφόσον οι κύριες μονάδες παραγωγής και διανομής έχουν υποστεί σημαντικές βλάβες.

(β) Η κοινωνική συμμετοχή γίνεται ισχυρότερη, αφού μετά το πέρας της φυσικής καταστροφής και την έναρξη της κατάστασης έκτακτης ανάγκης όλες οι κοινωνικές ομάδες είναι το ίδιο εκτεθειμένες απέναντι στον κοινό κίνδυνο.

(γ) Ο κοινωνικός έλεγχος τροποποιείται σημαντικά και προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες.

Σημαντικά ποσά δαπανώνται από το κράτος σε ετήσια βάση για την πρόληψη, αντιμετώπιση και ανάσχεση των κατολισθητικών φαινομένων. Αναλογικά από τα ποσά αυτά, τα 2/3 περίπου αφορούν στις οικονομικές συνέπειες από τις κατολισθήσεις και το 1/3 περίπου αφορά στα έργα πρόληψης αυτών. Παρακάτω παρατίθενται χαρακτηριστικά ενδεικτικά παραδείγματα παλαιότερων και πρόσφατων κατολισθητικών φαινομένων που συνοδεύτηκαν από σημαντικές οικονομικές συνέπειες.

- Κατά την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων στο Μικρό Χωριό Ευρυτανίας τον Ιανουάριο του 1963 μετακινήθηκαν πάνω από 3 εκατ. κυβικά μέτρα εδαφικών υλικών για περισσότερα από 1000 μ., τα οποία έπληξαν 60 οικίες, ενώ 13 άτομα και μεγάλος αριθμός οικόσιτων ζώων έχασαν τη ζωή τους (Βετούλας 1963). Ο μισός οικισμός καταστράφηκε και εξαιτίας του φόβου μιας πιθανής νέας εκδήλωσης μεταφέρθηκε νοτιότερα σε ασφαλέστερη θέση. Το 1990 εκπονήθηκε νέα μελέτη που έδειξε ότι δεν υπάρχει επαναδραστηριοποίηση του φαινομένου και έτσι σταμάτησε η απαγόρευση οικοδόμησης.

- Την κοινότητα Λιθοχωρίου Ευρυτανίας αποτελούν ο κεντρικός συνοικισμός Πλάτανος και οι αραιοκατοικημένοι οικισμοί Σταυρός, Παναγιά, Βαλεμικά, Ανδριά και Λιβάδεια. Σε ολόκληρο τον κοινοτικό χώρο υπήρχαν εκδηλώσεις κατολισθητικών φαινομένων που είχαν προκαλέσει προβλήματα ασφαλείας των συνοικισμών. Μετά το σεισμό του 1966 αποφασίστηκε η συγκέντρωση των αραιοκατοικημένων και με προβλήματα κατολισθήσεων οικισμών Παναγιά, Βαλεμικά, Ανδριά και Λειβάδια στον κεντρικό οικισμό. Μόνο ο συνοικισμός Πλάτανος δεν μετακινήθηκε λόγω άρνησης των κατοίκων του, ενώ τον Ιανουάριο του 1986 εκδηλώθηκαν κατολισθητικά φαινόμενα που δεν προκάλεσαν ζημιές σε οικίες και τεχνικά έργα.

- Μεγάλης κλίμακας κατολίπηση εκδηλώθηκε τα ξημερώματα του Σαββάτου 18 Φεβρουαρίου 1995 στο 360 χλμ της Εθνικής Οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης, σε τμήμα που μόλις είχε ολοκληρωθεί η κατασκευή του. Το έργο (κατασκευή τμήματος Κόμβος Μαρκοπούλου - Κόμβος Οινοφύτων της Εθνικής Οδού Αθηνών-Λαμίας) άρχισε το 1990 και τελείωσε το 1993. Το αποτέλεσμα της κατολίπησης ήταν να καταστραφεί τμήμα του οδοστρώματος μήκους 80 μ., καθώς και η σιδηροδρομική γραμμή του ΟΣΕ που διερχόταν παράλληλα στο σημείο αυτό, διακόπτοντας την κυκλοφορία στο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν κίνδυνοι για σημαντικές βλάβες στο δίκτυο τηλεπικοινωνιών και ύδρευσης της πρωτεύουσας. Πολύ κοντά στην Εθνική Οδό, στο ρεύμα προς Θεσσαλονίκη, βρίσκονται γραμμές με πολύ σημαντικά ομοαξονικά καλώδια του ΟΤΕ, τα οποία, αν καταστρέφονταν, θα δημιουργούσαν τεράστια προβλήματα στις τη-

λεπτικοινωνίες της χώρας. Αρχικά διακόπηκε η οδική και σιδηροδρομική επικοινωνία του βόρειου με το νότιο τμήμα της χώρας, με σημαντικό κόστος για την εθνική οικονομία, εξαιτίας της διακοπής της διακίνησης ανθρώπων και αγαθών. Επιπλέον, γύρω στο 1,5 δισ. δραχμές κόστιζε το κάθε χιλιόμετρο οδοποιίας στο τμήμα της Εθνικής Οδού που μόλις είχε ολοκληρωθεί. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για τον πρώτο μήνα από την ημέρα διακοπής των δρομολογίων μόνο ο ΟΣΕ είχε απώλειες εσόδων που ξεπέρασαν τα 500 εκατ. δραχμές (Ζούρος 1995).

- Τον Φεβρουάριο του 2003 εκδηλώθηκαν σημαντικά κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή της κεντρικής Πελοποννήσου, όπου κατέστρεψαν το νέο οδικό δίκτυο σε δύο σημεία: στον κόμβο της Στέρνας (123 χμ. της νέας Εθνικής Οδού Κορίνθου-Τρίπολης) και στην περιοχή της Τσακώνας (15 χμ. νότια της Μεγαλόπολης, στο τμήμα της νέας Εθνικής Οδού Τρίπολης-Καλαμάτας). Τα τμήματα αυτά κατασκευάστηκαν εκ νέου, ενώ για όσο διάστημα διαρκούσαν οι εργασίες ανακατασκευής η κυκλοφορία διεξαγόταν από παρακαμπτηρείους ή μέσω της παλαιάς Εθνικής Οδού.

- Τον Αύγουστο του 2003, έπειτα από έντονη σεισμική δραστηριότητα που έπληξε το νησί της Λευκάδας, εκδηλώθηκαν καταπτώσεις βραχωδών τεμαχίων που απέκλεισαν το οδικό δίκτυο του νησιού πλησίον της παραλίας του Αγίου Νικήτα. Το αποτέλεσμα ήταν αρκετοί άνθρωποι να παραμείνουν αποκλεισμένοι, αφού δεν υπήρχε οδικός τρόπος διαφυγής, έως ότου τελικά απομακρύνθηκαν μέσω θαλάσσης.

- Τέλος, σημειώνεται ότι αρκετά είναι τα τμήματα του εθνικού ή επαρχιακού οδικού δικτύου που υπέστησαν ζημιές από κατολισθητικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα να σχεδιαστεί εκ νέου η χάραξή τους προκειμένου να παρακαμφθούν οι επισφαλείς θέσεις.

Τα παραδείγματα που παρατέθηκαν παραπάνω αποτελούν ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εκδήλωσης του καταστροφικού αυτού φυσικού φαινομένου στον ελληνικό χώρο. Πολλές από τις μεγάλες αλλαγές που παρατηρούνται όλο και περισσότερο στη γήινη επιφάνεια, σε παγκόσμια αλλά και τοπική κλίμακα (κλιματικές αλλαγές, ερημοποίηση, αστικοποίηση, κατασκευή μεγάλων έργων κ.λπ.), είναι βέβαιο ότι στο μέλλον θα έχουν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση όλο και περισσότερων και πιο έντονων τέτοιων φαινομένων. Έτσι, καθίσταται επιτακτικότερη η ανάγκη για την αποτελεσματική διαχείριση πληροφοριών που σχετίζονται με τις φυσικές καταστροφές.

Χωρική κατανομή κατολισθητικών φαινομένων με τη χρήση ασαφών συνόλων

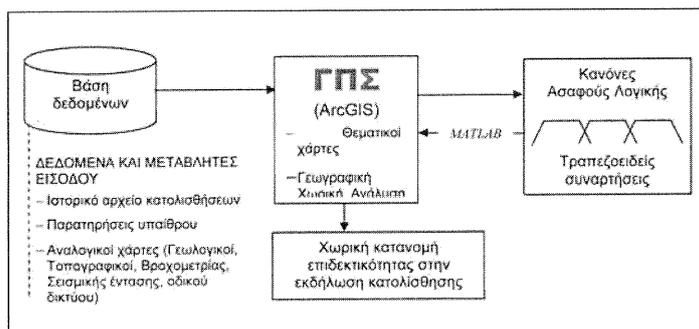
Στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφεται πλήθος μεθοδολογιών για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης κατολίθησης (Leroi 1996, Van Western et al. 1997). Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους βασίζονται σε λεπτομερείς εργασίες πεδίου, οι οποίες συχνά περιλαμβάνουν εκτεταμένες γεωλογικές χαρτογραφήσεις. Οι εργασίες αυτές, όντας χρονοβόρες, επίπονες και ιδιαίτερα δαπανηρές, είναι φανερό ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για μεγάλες περιοχές της γήινης επιφάνειας, πολύ δε περισσότερο σε εθνική κλίμακα. Από την άλλη μεριά, η αλματώδης ανάπτυξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), η συγκρότηση ολοένα και πιο λεπτομερών χωρικών βάσεων δεδομένων σε εθνική κλίμακα και η ολοένα αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς των σύγχρο-

ων υπολογιστών είναι οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στις μέρες μας στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων ή ημιαυτοματοποιημένων τεχνικών κατασκευής χαρτών επικινδυνότητας ή επιδεκτικότητας σε κατολισθήσεις. Οι τεχνικές αυτές, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της σύγχρονης τεχνολογίας, στοχεύουν στη μείωση του χρόνου και του κόστους συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούν στατιστικές επεξεργασίες (π.χ. Guzzetti et al. 1999, Sakellariou & Ferentinou 2001), άλλες μεθόδους χωρικής στατιστικής ανάλυσης και τα ΣΓΠ (Carara 1983, Hansen 1984, Cararra et al. 1995, 1999, Van Western 1994, Terlien 1995, Gournellos et al. 1997, Lazzari & Salvaneschi 1999, Zhou et al. 2003 κ.ά.) ή και στοχαστικές μεθόδους και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (Juang et al. 1992, Davis & Keller 1997, Binaghi et al. 1998, Ercanoglu & Gokceoglu 2002).

Η μεθοδολογία που ακολουθείται σε αυτή την εργασία στοχεύει στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα ΣΓΠ και η θεωρία των ασαφών συνόλων για την αποτίμηση της επιδεκτικότητας σε κατολίθηση σε εθνική κλίμακα. Η μελέτη αυτή βασίστηκε σε ιστορικά στοιχεία, σε στοιχεία υπαίθρου καθώς και σε στοιχεία που προέρχονται από χάρτες εθνικής κλίμακας. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των στοιχείων αυτών είναι η ζωνοποίηση της επιδεκτικότητας στην εκδήλωση κατολισθήσεων σε κλίμακες που κυμαίνονται από εντελώς τοπική έως περιφερειακή και εθνική. Οι χάρτες μικρής κλίμακας (εθνικού χαρακτήρα) είναι σημαντικοί, καθώς καταδεικνύουν ευρύτερες περιοχές με ευπάθεια στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Σε αυτή την προσπάθεια είναι αποφασιστικός ο καθορισμός των μεταβλητών που συνεκτιμούνται για την ανάλυση του φαινομένου σε αυτή την κλίμακα.

Στον ελληνικό χώρο οι κατολισθήσεις λαμβάνουν χώρα κυρίως σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές, έχοντας ως κύρια αιτία τους τις ευνοϊκές για την εκδήλωση κατολίθησης συνθήκες στην επιφάνεια της γης. Οι συνθήκες αυτές σχετίζονται με τη λιθολογική σύσταση, τη δομή και την τοπογραφία της περιοχής, την εδαφική και υπόγεια απορροή και τη βλάστηση. Ο μηχανισμός ο οποίος πυροδοτεί την εκδήλωση μιας κατολίθησης ελέγχεται κατά κύριο λόγο από μετεωρολογικά γεγονότα (έντονες βροχοπτώσεις – Koukis et al. 1997α, Anagnostopoulos & Georgiadis 1997), καθώς επίσης και από σεισμική δραστηριότητα (μεταξύ άλλων Papadopoulos & Plessa 2000) και ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες υποβαθμίζουν τη γεωτεχνική συμπεριφορά των πετρωμάτων.

Η πρώτη φάση της εργασίας αφιερώθηκε στο σχεδιασμό και την κατασκευή της χωρικής βάσης δεδομένων (Σχ. 1). Τα δεδομένα υποβάθρου που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από διάφορες πηγές (χάρτες διαφόρων κλιμάκων, εικόνες τηλεοπτικής, βιβλιογραφία και υπαίθριες παρατηρήσεις), ενώ το



Σχήμα 1.
Ροή δεδομένων,
μοντέλο σύνδεσης ΣΓΠ
- λογισμικού σύνταξης
κανόνων ασαφούς
λογικής

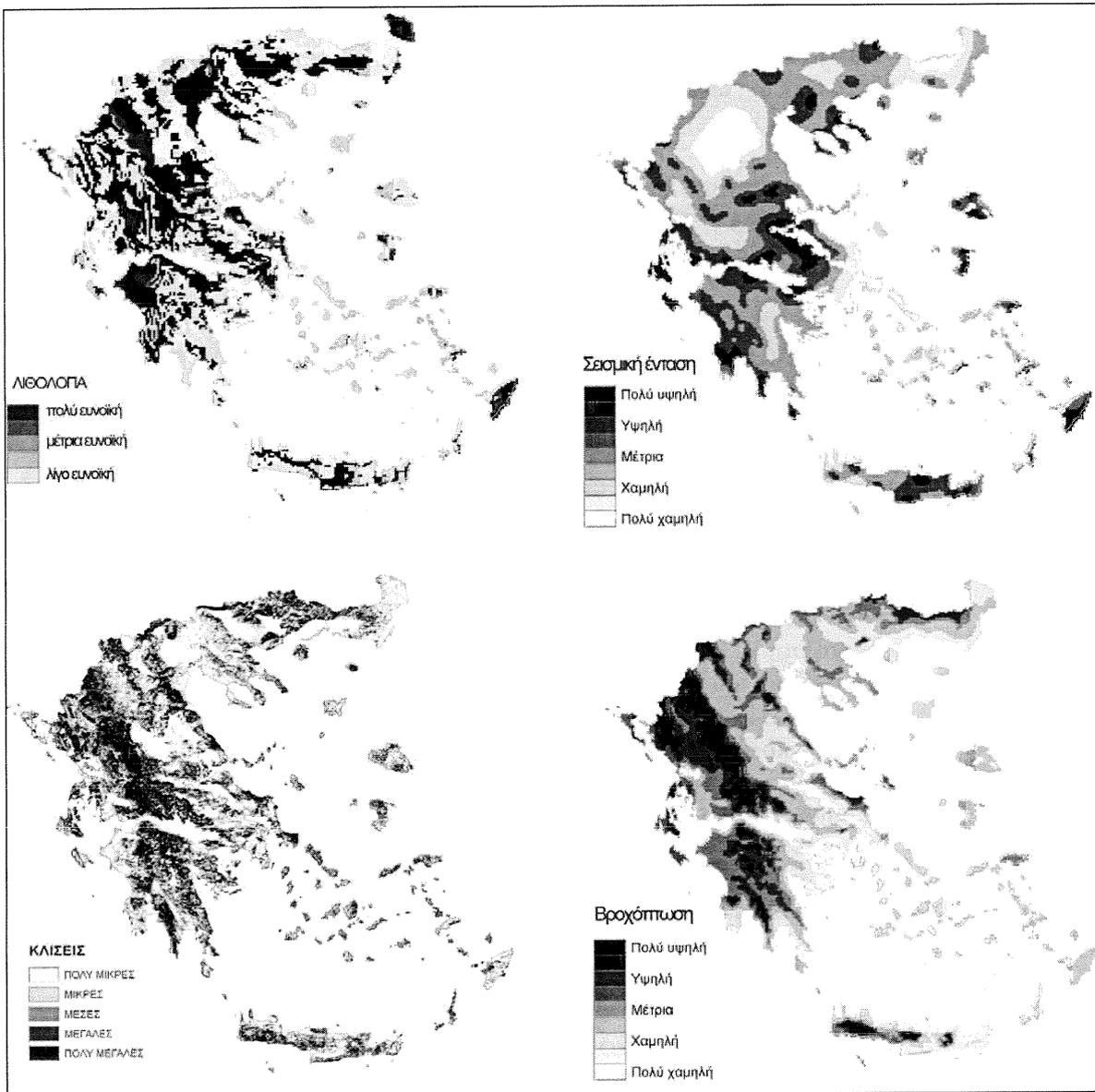
αρχείο των κατολισθητικών φαινομένων συντάχθηκε κύρια από καταγραφές του ΙΓΜΕ, του Υπουργείου Γεωργίας και της ΔΕΗ και με την αξιοποίηση δημοσιευμάτων του τύπου.

Η ενοποίηση όλων αυτών των δεδομένων υλοποιήθηκε μέσα από ένα ΣΓΠ, τεχνολογία η οποία αποτελεί το πλέον σύγχρονο μέσο διαχείρισης και ανάλυσης γεωγραφικών πληροφοριών. Η βασική επιδίωξη ήταν η κατασκευή χωρικής βάσης δεδομένων με όλες τις κρίσιμες μεταβλητές για τη μελέτη του φαινομένου των κατολισθήσεων. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: η πρώτη περιέχει τη χωρική και χρονική κατανομή των κατολισθήσεων όπως αυτή καταγράφεται στα ιστορικά αρχεία και τη βιβλιογραφία, ενώ η δεύτερη όλους εκείνους τους παράγοντες οι οποίοι ελέγχουν την ευστάθεια των πρανών (λιθολογία, δομή, τοπογραφία, βροχοπτώσεις, σεισμικότητα, ανθρώπινες κατασκευές) [Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ κλίμακας 1:500.000, Τοπογραφικός χάρτης κλίμακας 1:250.000, Καταγραφή σεισμικών επικέντρων στον ελληνικό χώρο, Χάρτης χωρικής κατανομής σεισμικής έντασης, Οδικός χάρτης της Ελλάδας κλίμακας 1:250.000, Βροχομετρικός χάρτης της Ελλάδας (Μαριολόπουλος & Καραπιπέρης 1955)] (Σχ. 2).

Έτσι, δημιουργήθηκε βάση δεδομένων με τις κατολισθήσεις του ελληνικού χώρου για την τελευταία 30ετία, η οποία περιλαμβάνει περισσότερα από 400 κατολισθητικά φαινόμενα (Τσαγκάς 2001). Σε αυτή τη βάση καταγράφεται πληθώρα χαρακτηριστικών μιας κατολίσθησης (θέση, γεωγραφικές συντεταγμένες, χρόνος εκδήλωσης, υψόμετρο, είδος κίνησης, λιθολογία, τεκτονική δομή, αίτια, επιπτώσεις). Πηγή γι' αυτή τη βάση δεδομένων αποτέλεσαν τα αρχεία του ΙΓΜΕ και η σχετική ελληνική βιβλιογραφία. Η βάση δεδομένων συμπληρώθηκε με στοιχεία που σχετίζονται με τις παρακάτω μεταβλητές: τοπογραφία, λιθολογία, βροχοπτώσεις, σεισμικότητα, πυκνότητα επαρχιακού οδικού δικτύου. Σημειώνεται ότι η επιλογή αυτών των μεταβλητών έγινε αξιοποιώντας υπαίθριες παρατηρήσεις και τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία. Οι πληροφορίες αυτές οργανώθηκαν σε ένα ΣΓΠ με τη μορφή θεματικών επιπέδων.

Η ενσωμάτωση των δεδομένων που περιγράφηκαν παραπάνω στο ΣΓΠ έγινε με την ψηφιοποίηση αναλογικών χαρτών και την αξιοποίηση αρχείων με χωρική αναφορά (π.χ. αρχείου κατολισθήσεων και αρχείου σεισμικών γεγονότων). Για την καταγραφή της χωρικής διάστασης των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τόσο το διανυσματικό όσο και το ψηφιδωτό μοντέλο. Για παράδειγμα, για την καταγραφή της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς χρησιμοποιήθηκε θεματικό επίπεδο διανυσματικού τύπου στο οποίο καταγράφονται –με τη μορφή πολυγώνων– περιοχές με διαφορετική τεχνικογεωλογική συμπεριφορά έτσι όπως αποδίδονται σε χάρτη κλίμακας 1:500.000 (ΙΓΜΕ 1993), ενώ η τοπογραφία καταγράφηκε σε ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ψηφιδωτό μοντέλο, μέγεθος ψηφίδας 100 x 100 μ.).

Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι, παρότι για πολλά θεματικά επίπεδα της χωρικής βάσης δεδομένων έγινε χρήση του διανυσματικού μοντέλου (το οποίο προϋποθέτει ρητά καθορισμένα όρια μεταξύ των γεωγραφικών οντοτήτων), σε αρκετές περιπτώσεις τα όρια μεταξύ των οντοτήτων είναι ασαφή. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο έγινε δευτερογενής επεξεργασία των δεδομένων σε δύο φάσεις. Η πρώτη σχετίζεται με τη μετατροπή όλων των μεταβλητών σε ψηφιδωτή μορφή με μέγεθος ψηφίδας 250 x 250 μ., το οποίο είναι κατάλληλο για την απόδοση της επιδεκτικότητας σε εθνική κλίμακα (Glade et al. 2003). Η μετατροπή αυτή διευκόλυνε τη διαδικασία συνδυαστικής ανάλυσης των θεματικών επι-



πέδων με την εφαρμογή μεθόδων χαρτογραφικής υπέρθεσης (Tomlin 1991). Η επόμενη φάση δευτερογενούς επεξεργασίας σχετίζεται με τη διαβάθμιση των μεταβλητών σε μη διακριτές (επικαλυπτόμενες) κλάσεις τιμών χρησιμοποιώντας κοινή κλίμακα τιμών (0-1). Αυτό επιτεύχθηκε με την κανονικοποίηση (normalization) των μεταβλητών εισόδου διαιρώντας με τη μέγιστη τιμή. Όλες αυτές οι μεταβλητές μετατράπηκαν σε ασαφή σύνολα και οι τιμές τους κατηγοριοποιήθηκαν σε επικαλυπτόμενες κλάσεις (χαμηλή-μέτρια-υψηλή) (Σχ. 2). Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής από τη θεωρία των ασαφών συνόλων (Zadeh 1965, Dubois & Prade 1988, Zadeh 1988). Για παράδειγμα, για τη βροχόπτωση έχουμε την εξής διαβάθμιση: χαμηλή (τιμές από 0-0,5), μέση (τιμές από 0,25- 0,75) και υψηλή (τιμές από 0,5-1). Με αυτό τον τρόπο οι μεταβλητές αντιμετωπίστηκαν ως ασαφή σύνολα.

Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε γιατί με αυτή την αντιμετώπιση ως προς τη διαβάθμιση των μεταβλητών έγινε εφικτή η ανάπτυξη κανόνων ασαφούς λογικής για την αποτίμηση της επιδεικτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Οι κα-

Σχήμα 2.

Οργάνωση της χωρικής βάσης δεδομένων σε θεματικά επίπεδα - δευτερογενής επεξεργασία. Οι σκούροι τόνοι αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές της μεταβλητής

νόνες αυτοί, οι οποίοι βασίστηκαν στην εμπειρική γνώση, αποτέλεσαν το μηχανισμό μετατροπής (inference mechanism) των μεταβλητών εισόδου στη μεταβλητή εξόδου, δηλαδή στην επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίσθησης. Ένας τέτοιος κανόνας έχει τη μορφή:

ΕΑΝ (ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ = “ΥΨΗΛΕΣ” ΚΑΙ ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ =
 “ΠΟΛΥ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΗ” ΚΑΙ ΚΛΙΣΕΙΣ = “ΕΝΤΟΝΕΣ”) ΤΟΤΕ
 ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ_ΣΕ_ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ = “ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗ”

Με αυτό τον τρόπο κάθε ψηφίδα κατηγοριοποιείται σε σχέση με την επιδεκτικότητα την οποία παρουσιάζει, ανάλογα με τις τιμές των μεταβλητών από τις οποίες χαρακτηρίζεται. Το τελευταίο στάδιο είναι η χαρτογραφική απόδοση των αποτελεσμάτων των εμπειρικών κανόνων (Σχ. 3). Από την αξιολόγηση της χωρικής κατανομής της επιδεκτικότητας η οποία αποδίδεται στο χάρτη αυτόν είναι φανερό ότι οι περιοχές μεγάλης επιδεκτικότητας τοποθετούνται κατά μήκος του άξονα της οροσειράς της Πίνδου, στην ορεινή Αχαΐα και κατά θέσεις στα Ιόνια Νησιά και στην Κρήτη, ενώ περιοχές μεγάλης επιδεκτικότητας παρατηρούνται σε σημαντικό τμήμα της Ηπείρου, της Δ. Θεσσαλίας, της Δ. Πελοποννήσου και της Κρήτης. Επιπρόσθετα, θύλακες μεγάλης επιδεκτικότητας τοποθετούνται στη Β. Ελλάδα (Πιερία, Χαλκιδική κ.α.), στη Β. Εύβοια, όπως και στη Χίο, τη Σάμο και τη Ρόδο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι περισσότερο από 50% του ελληνικού χώρου υπολογίστηκε ότι τοποθετείται στις ζώνες μέτριας-υψηλής επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.

Για την υλοποίηση της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο χαλαρής σύνδεσης (Σχ. 1) του λογισμικού ΣΓΠ ArcGIS (και της επέκτασής του Spatial Analyst) της εταιρείας ESRI, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διαχείριση των χωρικών πληροφοριών και την κατασκευή των χαρτών, και του λογισμικού MATLAB 7.1, στο οποίο υλοποιήθηκε το μαθηματικό σκέλος της εφαρμογής και η διατύπωση των κανόνων ασαφούς λογικής.

Συζήτηση-συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μεθοδολογία ανάλυσης επιδεκτικότητας στην εκδήλωση κατολίσθησης για τον ελληνικό χώρο, η οποία βασίστηκε στην τεχνολογία των ΣΓΠ και στην αξιοποίηση αρχείου σημαντικών κατολισθητικών φαινομένων της τελευταίας 30ετίας. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα που αφορούν στην τοπογραφία, τη λιθολογία, τις βροχοπτώσεις και τη σεισμικότητα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση που περιγράφηκε παραπάνω στοχεύει στη δημιουργία θεματικών χαρτών (χαρτών επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία προγραμματισμού και όχι για την κατάδειξη συγκεκριμένων θέσεων μελλοντικής εμφάνισης κατολισθήσεων. Παρ' όλα αυτά, η λεπτομερής μελέτη μπορεί να εστιάσει στις περιοχές μεγάλης επιδεκτικότητας.

Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών παρείχε ορισμένα σημαντικά οφέλη. Έτσι, η αξιοποίηση των ΣΓΠ έδωσε τη δυνατότητα επεξεργασίας και συνδυαστικής αξιοποίησης των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπρόσθετα, παρείχε το πλεονέκτημα της ευκολίας αναθεωρήσεων, βελτιώσεων και προσθηκών. Αναφορικά με τη χρήση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, θα πρέπει να

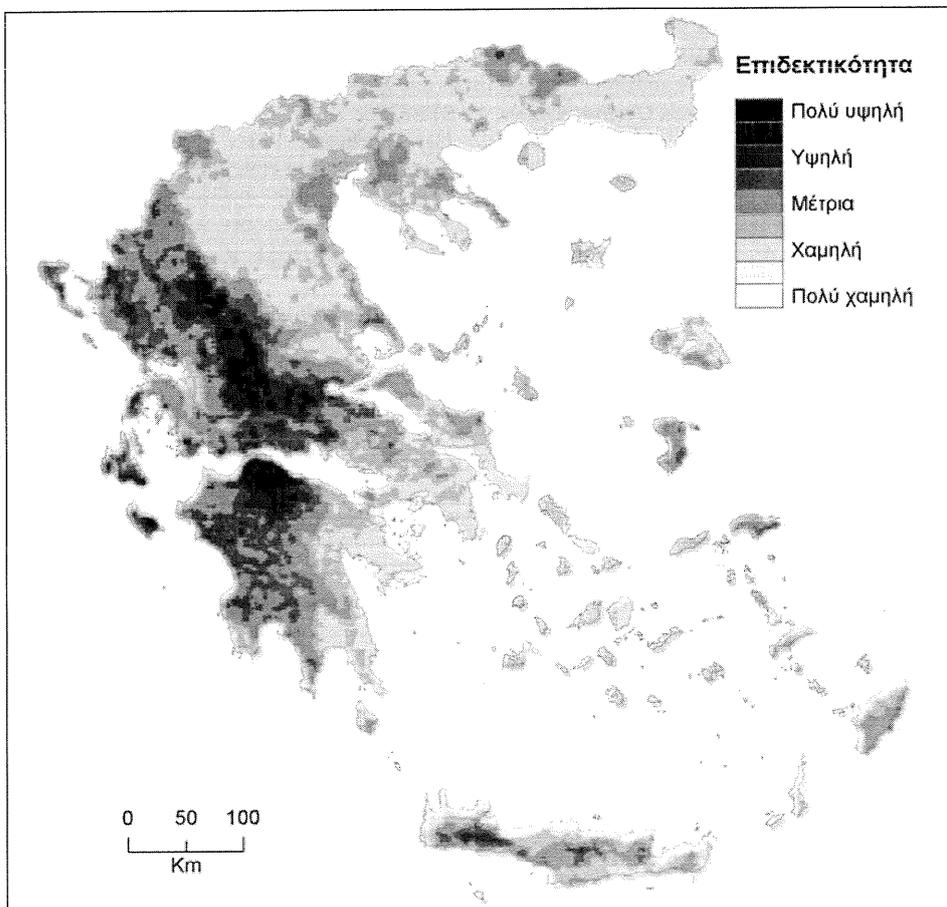
σημειωθεί ότι η αξιοποίηση της θεωρίας των ασαφών συνόλων αποδείχθηκε χρήσιμη και αποτελεσματική, αφού με αυτή προσεγγίζονται συνθήκες αβεβαιότητας οι οποίες σε άλλες μεθόδους αντιμετωπίζονται με δυαδικό τρόπο. Έτσι, με αυτό τον τρόπο καταγράφεται ο βαθμός εμφάνισης ενός φαινομένου αντί για την παρουσία/απουσία του.

Η εφαρμογή της μεθόδου για τον ελληνικό χώρο κατέδειξε περιοχές με πολύ μεγάλη επιδεκτικότητα στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Οι περιοχές αυτές συγκεντρώνονται στη Δ. και Κεντρική Ελλάδα και την ορεινή Αχαΐα, ενώ θύλακες μεγάλης επιδεκτικότητας εμφανίζονται διάσπαρτοι σε όλο τον ελληνικό χώρο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βρίσκεται σε προκαταρκτική φάση υλοποίησης. Στις βασικές μελλοντικές μας επιδιώξεις είναι η ενσωμάτωση πρόσθετων μεταβλητών (στοιχείων βλάστησης, υδρογραφικού δικτύου, κοινωνικοοικονομικών δεδομένων κ.λπ.), η υλοποίηση της μεθοδολογίας με διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής στα ασαφή σύνολα και η εφαρμογή της μεθόδου σε τοπικό επίπεδο με λεπτομερέστερα δεδομένα.

Σχήμα 3.

Χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίθησης: με σκούρους τόνους αποδίδονται οι περιοχές μεγάλης επιδεκτικότητας, ενώ με ανοιχτούς οι περιοχές μικρής επιδεκτικότητας



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostopoulos, C., Georgiadis, M. (1997), «Analysis of Rainfall Data and Correlation to Landslides: The Case of Sykia, Pieria, Greece», στο Marinos, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 483-488.
- Βετούλας, Δ. (1963), *Έκθεση περί της κατολισθήσεως του χωριού «Μικρόν Χωριόν» της Ευρυτανίας και τα εξ αυτής καταστρεπτικά αποτελέσματα, ως και περί της προτεινόμενης νέας θέσεως* (αδημοσίευτη έκθεση ΙΓΜΕ).
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Rampini, A. (1998), «Slope Instability Zonation: A Comparison Between Certainty Factor and Fuzzy Dempster-Shafer Approaches», *Natural Hazards*, 17: 77-97.
- Brabb, E. E. (1984), «Innovative Approaches to Landslide Hazard Mapping», *Proceedings*, 4th International Symposium on Landslides, Toronto, τόμ. 1, σ. 307-324.
- Brabb, E. E. (1991), «The World Landslide Problem», *Episodes*, 14: 52-61.
- Brabb, E. E. (1995), «The San Mateo County GIS Project for Predicting the Consequences of Hazardous Geologic Processes», στο Carrara, A., Guzzetti, F. (επιμ.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, σ. 299-334.
- Brabb, E. E., Harrod, B. L. (επιμ.) (1989), *Landslides: Extent and Economic Significance*, Rotterdam: Balkema.
- Carrara, A. (1983), «A Multivariate Model for Landslide Hazard Evaluation», *Mathematical Geology*, 15: 403-426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. (1991), «GIS Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard», *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5): 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995), «GIS Technology in Mapping Landslide Hazard», στο Carrara, A., Guzzetti, F. (επιμ.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, σ. 135-175.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999), «Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard», *Natural Hazards*, 20(2-3): 117-135.
- Chau, K. T., Lo, K. H. (2004), «Hazard Assessment of Debris Flows for Leung King Estate of Hong Kong by Incorporating GIS with Numerical Solutions», *Nat. Haz. Earth Sys. Sc.*, 4: 103-116.
- Dai, F. C., Lee, C. F. (2002), «Landslide Characteristics and Slope Instability Modeling Using GIS, Lantau Island, Hong Kong», *Geomorphology*, 42: 213-228.
- Davis, J. C. (1973), *Statistics and Data Analysis in Geology*, Chichester: Wiley.
- Davis, T. J., Keller, C. P. (1997), «Modelling Uncertainty in Natural Resource Analysis Using Fuzzy Sets and Monte Carlo Simulation: Slope Stability Prediction», *International Journal of Geographical Information Systems*, 11(5): 409-434.
- Dikau, R., Cavallin, A., Jager, S. (1996), «Databases and GIS for Landslide Research in Europe», *Geomorphology*, 15(3-4): 227-239.
- Dubois, D., Prade, H. (1988), «An Introduction to Possibilistic and Fuzzy Logics», στο *Non-Standard Logics for Automated Reasoning*, New York: Academic Press, σ. 287-326.
- Ελευθερίου, Α. (1983), «Οι κατολισθήσεις στον ελληνικό χώρο και το πρόβλημα της αποκατάστασης των κατολισθαινόντων οικισμών της Ελλάδας», *Δελτίο ΕΓΕ*, 17: 237-250.
- Ελευθερίου, Α., Στουρνάρας, Γ. (1993), «Τα καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα στον ελληνικό χώρο και οι τρόποι αντιμετώπισής τους», *Ειδικές Δημοσιεύσεις ΕΓΕ*, διήμερο συμπόσιο 22-23 Μαΐου, σ. 293-297.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C. (2002), «Assessment of Landslide Susceptibility for a Landslide-Prone Area (North of Ynise, NW Turkey) by Fuzzy Approach», *Environmental Geology*, 41: 720-730.
- Ζούρος, Ν., (1995), «Κατολισθήσεις στην περιοχή της Μαλακάσας», *Γεωτεχνική Ενημέρωση*, 71: 36-39.
- Glade, T., Dikau, R., Bell, R. (2003), «National Landslide Susceptibility Map for Germany», *Geophysical Research Abstracts*, τόμ. 5.
- Gournellos, T., Vassilopoulos, A., Evelpidou, N. (1997), «Development of a GIS-Based Methodology to Analyze Geological, Geomorphological and Environmental Data to the Island of Zakynthos», στο Marinos, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 2, σ. 1245-1251.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999), «Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy», *Geomorphology*, 31: 181-216.

- Hansen, A., Franks, C. A. M., Kirk, P. A., Brimicombe, A. J. (1995), «The Application of GIS to Landslide Hazard Assessment in Hong Kong», στο Carrara, A., Guzzetti, F. (επιμ.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, σ. 273-298.
- ΓΓΜΕ (1993), *Γεωτεχνικός Χάρτης της Ελλάδας*, κλίμακα 1:500.000, Δ/νση Τεχνικής Γεωλογίας Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Jones, D. K. C. (1995), «The Relevance of Landslide Hazard to the International Decade of Natural Disaster Reduction», *Proceedings*, Conference «Landslides Hazard Mitigation with Particular Reference to Developing Countries», London: The Royal Academy of Engineering, σ. 19-33.
- Juang, C. H., Lee, D. H., Sheu, C. (1992), «Mapping Slope Failure Potential Using Fuzzy Sets», *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 118(3): 475-493.
- Koukis, G. (1982), «Mass Movements in the Greek Territory. A Critical Factor for Environment Evaluation and Development», *Proceedings*, IV Congress IAEG, τόμ. 3, New Delhi.
- Koukis, G., Ziourkas, C. (1991), «Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis», *Bulletin of the IAEG*, 43: 47-60.
- Koukis, G., Rozos, D., Hadzinakos, I. (1997α), «Relationship Between Rainfall and Landslides in the Formations of Achaia Country, Greece», στο Marinou, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 793-799.
- Koukis, G., Tsiampaos, G., Sabatakakis, N. (1997β), «Landslide Movements in Greece: Engineering Geological Characteristics and Environmental Consequences», στο Marinou, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 789-792.
- Koukis, G., Ziourkas, C. (1991), «Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis», *Bulletin of the IAEG*, 43: 47-60.
- Koukouvelas, I. K., Doutsos, T. (1997), «The Effects of Active Faults on the Generation of Landslides in NW Peloponnese, Greece», στο Marinou, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 799-804.
- Λέκκας, Ε. (1996), *Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές*, Αθήνα: Access Pre-Press.
- Λέκκας, Ε., Δανάμος, Γ., Λόζιος, Σ., Σκούρτσος, Ε., Βερνίκιου, Ε. (2004), «Η γεωγραφική κατανομή των κατολισθήσεων στο σεισμό της Λευκάδας (14 Αυγούστου 2003) και οι παράγοντες που ευνόησαν την εκδήλωσή τους», *Τεύχος εκτεταμένων περιλήψεων*, 10ο Διεθνές Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη, σ. 130-131.
- Lazzari, M., Salvaneschi, P. (1999), «Embedding a Geographic Information System in a Decision Support for Landslide Hazard Monitoring», *Natural Hazards*, 20(2-3): 185-195.
- Lekkas, E. (2001), «Landslide Hazards in Greece», *Abstract Volume*, European Union of Geosciences XI, Strasbourg: Cambridge Publications, τόμ. 6.
- Lekkas, E., Papanikolaou, D. (2000), *Determination of Landslide Hazard Microzones. The Case of Kanalia Village (Karditsa, Greece)*, ανακοίνωση στο International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne.
- Leroi, E. (1996), «Landslide Hazard-Risk Maps at Different Scales: Objectives, Tools and Development», *Proceedings*, International Symposium on Landslides, Trondheim, 17-21 Ιουνίου, επιμ. K. Senneset, σ. 35-52.
- Li, T., Wang, S. (1992), *Landslide Hazards and Their Mitigation in China*, Beijing: Science Press.
- Μαριολόπουλος, Η. Γ., Καραπιέρης, Α. Ν. (1955), *Οι βροχοπτώσεις εν Ελλάδι*, Εθνικό Τυπογραφείο.
- Marinos, P., Yannatos, M., Sotiropoulos, E., Cavounidis, S. (1997), «Increasing the Stability of Failed Slope by Pumping, Malakasa, Athens, Greece», στο Marinou, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 853-857.
- Nikolaou, N., Koukis, G., Lambrakis, N. (1997), «Rainfall and Landslide Manifestation Correlation in Korinthos County, Greece», στο Marinou, P., Koukis, G., Tsiampaos, G., Stournaras, G. (επιμ.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Rotterdam: Balkema, τόμ. 1, σ. 919-925.
- Papadopoulos, G., Plessa, A. (2000), «Magnitude-Distance Relations for Earthquake-Induced Landslides in Greece», *Engineering Geology*, 58(3-4): 377-386.
- Radbruch-Hall, D., Colton, R., Davies, W., Lucchitta, I., Skipp, B., Varnes, D. (1983), *Landslide Overview Map of the Conterminous United States*, USGS Geological Survey Professional Paper 1183.

- Ρόζος, Δ. (1991), *Τεχνικογεωλογικές συνθήκες στον Ν. Αχαΐας. Γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των πλειο-πλειστοκαινικών ιζημάτων*, διδακτορική διατριβή, Γεωτεχνικές έρευνες 16, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Sakellariou, M. G., Ferentinou, M. D. (2001), «GIS-Based Estimation of Slope Stability», *Natural Hazards Review*, 2(1): 12-21.
- Schuster, R. L., Fleming, R. W. (1986), «Economic Losses and Fatalities Due to Landslides», *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 23(1): 11-28.
- Terlien, M. T. J., van Westen, C. J., van Asch, Th. W. J. (1995), «The Use of Deterministic Models in Landslide Hazard Assessment», στο Carrara, A., Guzzetti, F. (επιμ.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, σ. 57-77.
- Tomlin, D. (1991), *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*, Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Tropeano, D., Turconi, L. (2004), «Using Historical Documents for Landslide, Debris Flow and Stream Flood Prevention. Applications in Northern Italy», *Natural Hazards*, 31: 663-679.
- Τσαγγάς, Δ. (2001), *Ποιοτική και ποσοτική μελέτη των κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ειδίκευσης*, Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, τομέας Γεωγραφίας και Κλιματολογίας.
- UNESCO – International Geotechnical Societies' Working Party on World Landslide Inventory (1990), «A Suggested Method for Reporting a Landslide», *Bulletin of the IAEG*, 41: 5-12.
- Van Westen, C. J. (1994), «GIS in Landslide Hazard Zonation: A Review with Examples from the Colombian Andes», στο Price, M. F., Heywood, D. I. (επιμ.), *Mountain Environments and GIS*, London: Taylor & Francis, σ. 135-166.
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J., Soeters, R. (1997), «Prediction of the Occurrence of Slope Instability Phenomena Through GIS-Based Hazard Zonation», *Geol. Rundsch.*, 86: 404-414.
- Zadeh, L. A. (1965), «Fuzzy Sets», *Information and Control*, 8: 338-353.
- Zadeh, L. A. (1988), «Fuzzy Logic», *IEEE Computer*, σ. 83-92.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M., Mori, J. (2003), «Spatial Probabilistic Modeling of Slope Failure Using an Integrated GIS Monte Carlo Simulation Approach», *Engineering Geology*, 68(34): 373-386.