



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
HAROKOPIO UNIVERSITY

Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών
Τμήμα Γεωγραφίας

**Αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση
κατολίσθησης με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής**

Διδακτορική Διατριβή

Χρήστος Πολυκρέτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
HAROKOPIO UNIVERSITY

Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών
Τμήμα Γεωγραφίας

Αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής

Διδακτορική Διατριβή

Χρήστος Πολυκρέτης

Η Διδακτορική Διατριβή εξετάστηκε από την κάτωθι Επταμελή Επιτροπή:

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

1. **Χρίστος Χαλκιάς (Επιβλέπων)**
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο
2. **Μαρία Φερεντίνου**
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Department of Civil
Engineering Science, University of Johannesburg
3. **Ευθύμιος Καρύμπαλης**
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο

Μέλη Επταμελούς Επιτροπής:

4. **Ισαάκ Παρχαρίδης**
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο
5. **Λεωνίδας Σταματόπουλος**
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας,
Πανεπιστήμιο Πατρών
6. **Νικόλαος Σουλακέλλης**
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο
Αιγαίου
7. **Νίκη Ευελπίδου**
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωλογίας και
Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.



Η διδακτορική διατριβή υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), στο πλαίσιο της Δράσης «Υποτροφίες ΕΛΙΔΕΚ Υποψηφίων Διδασκτόρων».

Ο Χρήστος Πολυκρέτης δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα 087 αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	I
Περίληψη	IV
Abstract	VI
Εισαγωγή	VII
Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό πλαίσιο.....	1
1.1 Ορισμοί.....	1
1.2 Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων.....	2
1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων.....	7
1.3.1 Ταξινόμηση με βάση τον τύπο μετακίνησης και το είδος υλικού.....	7
1.3.2 Ταξινόμηση με βάση τη δραστηριότητα.....	15
1.3.3 Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα.....	18
1.4 Αιτίες κατολισθήσεων.....	20
1.5 Επιπτώσεις κατολισθήσεων.....	23
1.6 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	28
Κεφάλαιο 2: Γεωγραφική κατανομή των κατολισθήσεων.....	33
2.1 Παγκόσμια διάσταση.....	33
2.2 Ελληνική διάσταση.....	47
2.3 «Διαπλανητική» διάσταση.....	62
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής.....	64
3.1 Στάδια ανάλυσης.....	64
3.1.1 Αναγνώριση κατολισθήσεων.....	64
3.1.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων.....	76
3.1.2.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και κατολισθήσεις... ..	76
3.1.2.2 Χάρτες κατολισθήσεων.....	80
3.1.2.3 Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.....	84
3.1.3 Αξιολόγηση μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης.....	98
3.2 Επιλεγμένες προσεγγίσεις στα στάδια ανάλυσης.....	100
3.2.1 Αναγνώριση κατολισθήσεων.....	100
3.2.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων.....	102

3.2.2.1 Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων.....	103
3.2.2.2 Χάρτες παραγόντων.....	104
3.2.2.3 Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.....	113
3.2.3 Αξιολόγηση μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης.....	152
Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης.....	155
4.1 Περιφερειακή κλίμακα (1:250.000).....	155
4.1.1 Περιοχή μελέτης.....	155
4.1.2 Σύνολα δεδομένων.....	161
4.1.2.1 Δεδομένα καταγραφής κατολισθήσεων.....	161
4.1.2.2 Δεδομένα παραγόντων.....	165
4.1.3 Μεθοδολογία.....	169
4.1.3.1 Δειγματοληψία δεδομένων.....	171
4.1.3.2 Προετοιμασία δεδομένων.....	175
4.1.3.3 Επιλογή παραγόντων.....	179
4.1.3.4 Εφαρμογή μοντέλων ανάλυσης.....	185
4.1.3.5 Αποτελέσματα.....	212
4.2 Λεπτομερέστερη κλίμακα (1:50.000).....	222
4.2.1 Περιοχή μελέτης.....	222
4.2.2 Σύνολα δεδομένων.....	224
4.2.2.1 Δεδομένα καταγραφής κατολισθήσεων.....	225
4.2.2.2 Δεδομένα παραγόντων.....	226
4.2.3 Μεθοδολογία.....	229
4.2.3.1 Δειγματοληψία δεδομένων.....	229
4.2.3.2 Προετοιμασία δεδομένων.....	230
4.2.3.3 Επιλογή παραγόντων.....	230
4.2.3.4 Εφαρμογή μοντέλων ανάλυσης.....	238
4.2.3.5 Αποτελέσματα.....	249
Κεφάλαιο 5: Επικύρωση παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας.....	264
5.1 Περιφερειακή κλίμακα.....	264
5.1.1 Υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων.....	264
5.1.2 Ανάλυση ROC.....	266
5.1.3 Αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης.....	267

5.2	Λεπτομερέστερη κλίμακα.....	270
5.2.1	Υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων.....	270
5.2.2	Ανάλυση ROC.....	272
5.2.3	Αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης.....	276
Κεφάλαιο 6: Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης.....		279
Κεφάλαιο 7: Εξέταση χωρικής μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης του φαινομένου.....		293
7.1	Περιφερειακή κλίμακα.....	293
7.1.1	Εφαρμογή μοντέλου.....	293
7.1.2	Αποτελέσματα.....	294
7.2	Λεπτομερέστερη κλίμακα.....	299
7.2.1	Εφαρμογή μοντέλου.....	299
7.2.2	Αποτελέσματα.....	300
Κεφάλαιο 8: Εκτίμηση της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης.....		306
8.1	Μεταβλητές τρωτότητας – «στοιχεία σε επικινδυνότητα».....	306
8.2	Μεθοδολογία – Αποτελέσματα.....	310
Κεφάλαιο 9: Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα.....		314
9.1	Ανακεφαλαίωση.....	314
9.2	Συμπεράσματα.....	317
9.2.1	Ειδικά συμπεράσματα για την περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης.....	317
9.2.2	Ειδικά συμπεράσματα για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης.....	320
9.2.3	Ειδικά συμπεράσματα για τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης.....	323
9.2.4	Γενικά συμπεράσματα.....	324
Βιβλιογραφία.....		332
Γλωσσάρι.....		369
Παράρτημα.....		372

Κατάλογος πινάκων

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1: Τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης.....	5
Πίνακας 1.2: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes.....	8
Πίνακας 1.3: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητά τους.....	19
Πίνακας 1.4: Παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων.....	22
Πίνακας 1.5: Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	29

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1: Λίστα βιβλιογραφικών αναφορών αξιοποίησης δορυφορικών συστημάτων στην αναγνώριση κατολισθήσεων.....	72
Πίνακας 3.2: Τιμές RI ανάλογα με τον αριθμό των παραγόντων.....	115
Πίνακας 3.3: Καταστάσεις γλωσσικής μεταβλητής και οι αντίστοιχοι ασαφείς αριθμοί και συμμετοχές.....	117
Πίνακας 3.4: Θεωρητικές τιμές του χ^2 ανάλογα με τον βαθμό ελευθερίας (ν) και το επίπεδο εμπιστοσύνης.....	124
Πίνακας 3.5: Λίστα βιβλιογραφικών αναφορών εφαρμογής των επιλεγμένων μεθόδων/μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.....	150

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1: Κυριότεροι ποταμοί στο σύστημα λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου.....	157
Πίνακας 4.2: Διοικητικός διαχωρισμός της περιοχής μελέτης.....	160
Πίνακας 4.3: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή αιτιολογικών παραγόντων.....	168
Πίνακας 4.4: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.....	181
Πίνακας 4.5: Τιμή σπουδαιότητας αιτιολογικών παραγόντων.....	182
Πίνακας 4.6: Ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων και των επιμέρους κατηγοριών τους.....	186
Πίνακας 4.7: Βασιμένες στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων για τον έλεγχο ανεξαρτησίας τους.....	195
Πίνακας 4.8: Δυνατοί συνδυασμοί αιτιολογικών παραγόντων.....	196

Πίνακας 4.9: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.....	198
Πίνακας 4.10: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης της βέλτιστης παραλλαγής του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης.....	201
Πίνακας 4.11: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης του βέλτιστου τύπου MF.....	207
Πίνακας 4.12: Συντελεστές βαρύτητας των αιτιολογικών παραγόντων από το σύνολο των μοντέλων.....	213
Πίνακας 4.13: Συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα AHP, TFNW, FR, LSI, WoE και TFNW/LSI.....	214
Πίνακας 4.14: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή αιτιολογικών παραγόντων.....	227
Πίνακας 4.15: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.....	234
Πίνακας 4.16: Τιμή σπουδαιότητας αιτιολογικών παραγόντων.....	235
Πίνακας 4.17: Βασιμένες στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων για τον έλεγχο ανεξαρτησίας τους.....	240
Πίνακας 4.18: Δυνατοί συνδυασμοί αιτιολογικών παραγόντων.....	241
Πίνακας 4.19: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.....	242
Πίνακας 4.20: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης της βέλτιστης παραλλαγής του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης.....	244
Πίνακας 4.21: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης του βέλτιστου τύπου MF.....	248
Πίνακας 4.22: Συντελεστές βαρύτητας των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα FR, LSI, WoE, LR, ANN και ANFIS.....	250
Πίνακας 4.23: Συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα FR, LSI και WoE.....	251
Κεφάλαιο 5	
Πίνακας 5.1: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα.....	267
Πίνακας 5.2: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα στις τρεις μεθόδους ταξινόμησης.....	274
Κεφάλαιο 6	
Πίνακας 6.1: «Ανά μοντέλο» διασταυρούμενη σύγκριση των εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας.....	283

Πίνακας 6.2: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα.....	292
Κεφάλαιο 7	
Πίνακας 7.1: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης βέλτιστου εύρους ζώνης.....	294
Πίνακας 7.2: Τοπικές παράμετροι των αιτιολογικών παραγόντων.....	295
Πίνακας 7.3: Σύγκριση στατιστικών δεικτών απόδοσης μεταξύ του ολικού μοντέλου LR και του τοπικού μοντέλου GWR.....	299
Πίνακας 7.4: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης βέλτιστου εύρους ζώνης.....	300
Πίνακας 7.5: Τοπικές παράμετροι των αιτιολογικών παραγόντων.....	301
Πίνακας 7.6: Σύγκριση στατιστικών δεικτών απόδοσης μεταξύ του ολικού μοντέλου LR και του τοπικού μοντέλου GWR.....	305
Κεφάλαιο 8	
Πίνακας 8.1: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή μεταβλητών τρωτότητας.....	308
Πίνακας 8.2: Τιμές γενικής τρωτότητας για τις επιμέρους κατηγορίες των μεταβλητών..	311
Κεφάλαιο 9	
Πίνακας 9.1: Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων ανά κλίμακα ανάλυσης.....	329

Κατάλογος σχημάτων

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1: Διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά μιας ιδεατής κατολίσθησης.....	3
Σχήμα 1.2: Τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης.....	5
Σχήμα 1.3: Οι διαστάσεις μιας τυπικής κατολίσθησης.....	6
Σχήμα 1.4: Τυπική πτώση βράχων.....	9
Σχήμα 1.5: Ανατροπή.....	10
Σχήμα 1.6: Περιστροφική ολίσθηση.....	11
Σχήμα 1.7: Μεταθετική ολίσθηση.....	11
Σχήμα 1.8: Πλευρική επέκταση.....	13
Σχήμα 1.9: Ροή κορημάτων.....	14
Σχήμα 1.10: Ερπυσμός.....	14
Σχήμα 1.11: Ταξινόμηση με βάση την κατάσταση της δραστηριότητας.....	16
Σχήμα 1.12: Ταξινόμηση με βάση την κατανομή της δραστηριότητας.....	17
Σχήμα 1.13: Ταξινόμηση με βάση τη μορφή της δραστηριότητας.....	18
Σχήμα 1.14: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανού σε σχέση με το χρόνο..	21
Σχήμα 1.15: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές την περίοδο 1996-2015.....	26
Σχήμα 1.16: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές το έτος 2016.....	27
Σχήμα 1.17: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές το πρώτο εξάμηνο του έτους 2017.....	27
Σχήμα 1.18: Οι δέκα πρώτες φυσικές καταστροφές για το πρώτο εξάμηνο του 2017 με βάση τον αριθμό θανάτων που προκάλεσαν.....	27
Σχήμα 1.19: Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων.....	31
Σχήμα 1.20: Σύνθετα έργα σταθεροποίησης στην πόλη Constantza, ρουμανική ακτή της Μαύρης Θάλασσας.....	32

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών την περίοδο 1995-2015.....	34
Σχήμα 2.2: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών το έτος 2016.....	34
Σχήμα 2.3: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών το πρώτο εξάμηνο του έτους 2017.....	35

Σχήμα 2.4: Παγκόσμια κατανομή των προκαλούμενων από σεισμό κατολισθητικών γεγονότων για την περίοδο 1968-2008.....	36
Σχήμα 2.5: Παγκόσμια κατανομή των προκαλούμενων από βροχόπτωση κατολισθητικών γεγονότων για την περίοδο 2007-2017.....	36
Σχήμα 2.6: Κατανομή κατολισθητικών γεγονότων στον Ελληνικό χώρο.....	48
Κεφάλαιο 3	
Σχήμα 3.1: Στάδια και διαδικασίες σε ένα ΣΓΠ.....	77
Σχήμα 3.2: Διάφορα είδη χαρτών για την ίδια περιοχή.....	83
Σχήμα 3.3: Διαφορετικής κλίμακας χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.....	84
Σχήμα 3.4: Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.....	85
Σχήμα 3.5: Κατηγορίες στατιστικής ανάλυσης.....	90
Σχήμα 3.6: Αναπαράσταση δύο διακριτών στοιχείων (λίμνη και δάσος) με βάση την ασαφή λογική.....	96
Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση καταστάσεων γλωσσικής μεταβλητής με ασαφείς αριθμούς...	97
Σχήμα 3.8: Σχέσεις μεταξύ κατολίσθησης και παράγοντα στη μέθοδο WoE.....	122
Σχήμα 3.9: Γραφική αναπαράσταση ενός πίνακα συνάφειας για τον έλεγχο ανεξαρτησίας των παραγόντων.....	124
Σχήμα 3.10: Παρουσίαση απαιτούμενων ενεργειών στη μέθοδο WoE.....	125
Σχήμα 3.11: Σχηματική αναπαράσταση βιολογικού νευρώνα.....	134
Σχήμα 3.12: Μηχανισμός μετάδοσης σημάτων μεταξύ δύο βιολογικών νευρώνων.....	135
Σχήμα 3.13: Σχηματική αναπαράσταση τεχνητού νευρώνα.....	137
Σχήμα 3.14: Αρχιτεκτονική ενός τυπικού ΤΝΔ.....	138
Σχήμα 3.15: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον χρόνο εκπαίδευσης.....	142
Σχήμα 3.16: Πρώτης τάξεως Takagi and Sugeno μοντέλο.....	146
Κεφάλαιο 4	
Σχήμα 4.1: Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης.....	156
Σχήμα 4.2: Κατανομή καταγεγραμμένων σεισμικών γεγονότων στην περιοχή μελέτης....	158
Σχήμα 4.3: Αναγνώριση και οριοθέτηση παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων (καφέ πολύγωνα) της περιοχής μελέτης στο λογισμικό Google Earth.....	162
Σχήμα 4.4: Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων της περιοχής μελέτης.....	163
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ακολουθούμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.....	170

Σχήμα 4.6: Τεχνικές δειγματοληψίας.....	171
Σχήμα 4.6: Βήματα δειγματοληψίας “seed cell”.....	173
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα βημάτων δειγματοληψίας κατολισθητικών και μη- κατολισθητικών δεδομένων με τη μορφή model builder του λογισμικού ArcGIS.....	174
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα βημάτων προετοιμασίας δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων με τη μορφή «τροποποιημένου» model builder.....	176
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα βημάτων διαδικασίας επιλογής παραγόντων.....	180
Σχήμα 4.11: Επιλεγμένοι προς ανάλυση αιτιολογικοί παράγοντες.....	183
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου AHP.....	185
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου TFNW.....	190
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου FR.....	191
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου LSI.....	192
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου WoE.....	194
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου LR.....	197
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου ANN.....	199
Σχήμα 4.19: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος δικτύου.....	200
Σχήμα 4.20: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων (epochs) για τις διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης.....	202
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου ANFIS.....	205
Σχήμα 4.22: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος ANFIS.....	207
Σχήμα 4.23: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους διάφορους τύπους MF.....	208
Σχήμα 4.24: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου TFNW/LSI.....	211
Σχήμα 4.25: Χάρτες επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από το σύνολο των μοντέλων.....	220
Σχήμα 4.26: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από το σύνολο των μοντέλων.....	221
Σχήμα 4.27: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στους παραγόμενους χάρτες των μοντέλων.....	222
Σχήμα 4.28: Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης.....	223
Σχήμα 4.29: Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων της περιοχής μελέτης.....	225
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα βημάτων προετοιμασίας δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων με τη μορφή «τροποποιημένου» model builder.....	231
Σχήμα 4.31: Επιλεγμένοι προς ανάλυση αιτιολογικοί παράγοντες.....	236

Σχήμα 4.32: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος δικτύου.....	243
Σχήμα 4.34: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος ANFIS.....	247
Σχήμα 4.35: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους διάφορους τύπους MF.....	248
Σχήμα 4.36: Χάρτες επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης.....	257
Σχήμα 4.37: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης.....	260
Σχήμα 4.38: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στους παραγόμενους χάρτες των μοντέλων για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης....	262
Κεφάλαιο 5	
Σχήμα 5.1: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα.....	265
Σχήμα 5.2: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα.....	266
Σχήμα 5.3: Καμπύλες αθροιστικών ποσοστών για τα μοντέλα.....	269
Σχήμα 5.4: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης.....	270
Σχήμα 5.5: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα στις τρεις μεθόδους ταξινόμησης.....	273
Σχήμα 5.6: Καμπύλες αθροιστικών ποσοστών για τα μοντέλα.....	277
Κεφάλαιο 6	
Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από τα μοντέλα στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα.....	280
Σχήμα 6.2: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τα αποτελέσματα από τα μοντέλα.....	282
Σχήμα 6.3: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στα εξαγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων.....	286
Σχήμα 6.4: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων επικύρωσης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα.....	291
Σχήμα 6.5: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα.....	292
Κεφάλαιο 7	
Σχήμα 7.1: Χωρική μεταβολή τοπικών παραμέτρων αιτιολογικών παραγόντων.....	296
Σχήμα 7.2: Χωρική μεταβολή τιμής pseudo R^2	299

Σχήμα 7.3: Χωρική μεταβολή τοπικών παραμέτρων αιτιολογικών παραγόντων.....	302
Σχήμα 7.4: Χωρική μεταβολή τιμής pseudo R^2	305
Κεφάλαιο 8	
Σχήμα 8.1: Χωρική αναπαράσταση των «στοιχείων σε επικινδυνότητα» ανάλογα με την κλίμακα ανάλυσης.....	307
Σχήμα 8.2: Μεταβλητές τρωτότητας.....	309
Σχήμα 8.3: Χάρτης τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.....	312

Κατάλογος εικόνων

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1: Επίπτωση κατολίσθησης στο φυσικό περιβάλλον.....	24
Εικόνα 1.2: Επίπτωση κατολίσθησης στο δομημένο περιβάλλον.....	25

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1: Κατολίσθηση στη Βενεζουέλα το 1999.....	38
Εικόνα 2.2: Κατολίσθηση στις Φιλιππίνες το 2006.....	38
Εικόνα 2.3: Μια από τις πολλές κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό του Wenchuan το 2008.....	39
Εικόνα 2.4: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Xiaolin το 2009.....	40
Εικόνα 2.5: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Nametsi το 2010.....	41
Εικόνα 2.6: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή βορειοανατολικά της πόλης Zhouqu το 2010.....	42
Εικόνα 2.7: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Abe Barek το 2014.....	43
Εικόνα 2.8: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Malin το 2014.....	44
Εικόνα 2.9: Κατολίσθηση στην όχθη του ποταμού Sunkoshi το 2014 και το φράγμα κατολίσθησης που δημιουργήσε.....	44
Εικόνα 2.10: Κατολίσθηση στο χωριό El Cambray Dos το 2015.....	45
Εικόνα 2.11: Κατολίσθηση στην πόλη Mocoa το 2017.....	46
Εικόνα 2.12: Κατολίσθηση στο πρανές του ορεινού τμήματος της περιοχής Regent το 2017.....	46
Εικόνα 2.13: Κατολίσθηση Τσιβλού το 1913.....	50
Εικόνα 2.14: Κατολισθήσεις Καρνάς.....	51
Εικόνα 2.15: Κατολίσθηση Μικρού Χωριού το 1963.....	52
Εικόνα 2.16: Κατολίσθηση Παναγοπούλας το 1971.....	53
Εικόνα 2.17: Κατολίσθηση Μαλακάσας το 1995.....	54
Εικόνα 2.18: Κατολίσθηση Πλατανιού το 1999.....	55
Εικόνα 2.19: Κατολίσθηση Νεμέας το 2001.....	55
Εικόνα 2.20: Κατολίσθηση Τσακώνας το 2003.....	56
Εικόνα 2.21: Κατολίσθηση Τεμπών το 2009.....	57
Εικόνα 2.22: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τις σεισμικές δονήσεις στην Κεφαλλονιά το 2014.....	58

Εικόνα 2.23: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό στη Λευκάδα το 2015....	59
Εικόνα 2.24: Πρόσφατα παραδείγματα κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο.....	60
Εικόνα 2.25: Κατολίσθηση ορυχείου Αμυνταίου το 2017.....	61
Εικόνα 2.26: Κατολισθήσεις σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος..	63

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1: Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης La Conchita στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ με έτος λήψης το 2005.....	67
Εικόνα 3.2: Αναγνώριση κατολισθήσεων ή εντοπισμός των θέσεων τους σε δεδομένα προερχόμενα από δορυφορικές τεχνικές.....	72
Εικόνα 3.3: Αναγνώριση ετεροχρονισμένων γεγονότων (διαφορετικά χρώματα) της ίδιας κατολίσθησης κατολισθήσεων σε ψηφιακή αναπαράσταση LiDAR.....	74
Εικόνα 3.4: Αναγνώριση κατολισθήσεων σε αεροφωτογραφικά και τηλεπισκοπικά δεδομένα μέσω της οπτικής ανάλυσης διαφορετικών χαρακτηριστικών.....	75

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1: Εκδηλωμένες κατολισθήσεις στην περιοχή μελέτης.....	164
Εικόνα 4.2: Εκδηλωμένες κατολισθήσεις στην περιοχή μελέτης.....	226

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, με τίτλο «Αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορική», εκπονήθηκε στο Τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών.

Αν και τυπικώς η διατριβή αυτή μπορεί να θεωρηθεί το αποτέλεσμα της σχεδόν τετράχρονης ερευνητικής δραστηριότητας μου ως Υποψήφιος Διδάκτορας στο Τμήμα Γεωγραφίας (Ιανουάριος 2015 - Σεπτέμβριος 2018), ουσιαστικά η διαμόρφωση των απαιτούμενων συνθηκών έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η διεκπεραίωση της μπορεί να τοποθετηθεί χρονικώς αρκετά νωρίτερα. Η ακαδημαϊκή επιμόρφωση μου στον επιστημονικό κλάδο της Γεωγραφίας (προπτυχιακές σπουδές, 2006-2010), και ειδικότερα στο θεματικό πεδίο/κατεύθυνση της Γεωπληροφορικής (μεταπτυχιακές σπουδές, 2011-2013) συνέβαλαν αρχικώς στην απόκτηση πολύτιμων γνώσεων και εμπειριών σε σχετικούς, με το αντικείμενο της διατριβής, τομείς (όπως η χαρτογραφία, η χωρική ανάλυση, η μοντελοποίηση/αναπαράσταση διεργασιών και φαινομένων του φυσικού περιβάλλοντος, κ.ά.) και τεχνολογίες (όπως τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, η Τηλεπισκόπηση, κ.ά.). Εν συνεχεία, η ομολογουμένως μικρής διάρκειας επαγγελματική εμπειρία μου (στα πλαίσια δίμηνης πρακτικής άσκησης το 2009) στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) και η οφειλόμενη, σ' αυτήν, επαφή μου με αντικείμενα γεωλογικών μελετών επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό τη διαμόρφωση και τον προσανατολισμό του ερευνητικού μου ενδιαφέροντος.

Η «εναρμόνιση» του διαμορφωθέντος ερευνητικού μου ενδιαφέροντος με την παρατηρούμενη τότε αυξανόμενη τάση μελέτης του φαινομένου των κατολισθήσεων από την πλευρά των γεω-επιστημόνων είχε ως αποτέλεσμα, το 2009, την πρώτη επισήμως ανάθεση (ως θέμα πτυχιακής εργασίας) ερευνητικής ενασχόλησης μου με το συγκεκριμένο φαινόμενο. Από εκείνη τη στιγμή και πλὴν ελαχίστων εξαιρέσεων, η ενασχόληση αυτή είναι συνεχής προσφέροντας μου, στο ενδιάμεσο, ευκαιρίες περαιτέρω εκβάθυνσης στο φαινόμενο μέσω μιας δεύτερης επίσημης ανάθεσης το 2012 (ως θέμα μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας) και της συγγραφής σχετικών άρθρων προς δημοσίευση σε διεθνή επιτημονικά περιοδικά. Θα μπορούσε, συνεπώς, να ειπωθεί πως η παρούσα διατριβή συνιστά το αποτέλεσμα αυτής της μακρόχρονης ερευνητικής ενασχόλησης μου με τη μελέτη του φαινομένου.

Η ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής δε θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη των μελών της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, καθώς και την πολύτιμη βοήθεια φίλων και συνεργατών/συναδέλφων. Ως εκ τούτου, οφείλω πρώτα απ' όλους να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών και επιβλέποντα αυτής της διατριβής, κ. Χρίστο Χαλκιά, ο οποίος μου έδωσε αρχικώς το 2009, και συνέχισε και τα επόμενα χρόνια να μου δίνει, την ευκαιρία να εντρυφήσω στο συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερος γιατί είναι ο άνθρωπος που με δίδαξε να λειτουργώ με επιστημονική σκέψη, αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπο μου όταν δέχτηκε να συμπεριληφθώ στην ερευνητική του ομάδα ως Υποψήφιος Διδάκτορας. Η ευρεία γνώση του σε σχετικά θέματα και ο λογικός τρόπος σκέψης του, εκφρασμένα και τα δύο μέσω της συνεχούς παρότρυνσης, καθοδήγησης και υποστήριξης προς εμένα, συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην εκπόνηση της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην Ανώτατη Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου του Γιοχάνεσμπουργκ και μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, κ. Μαρία Φερεντίνου, για την αμέριστη υποστήριξη της προς το πρόσωπο μου. Την ευχαριστώ ιδιαίτερα γιατί είναι ο άνθρωπος που με εισήγαγε στον, συνοδευόμενο από εξαιρετικό ενδιαφέρον, «κόσμο» της Τεχνητής Νοημοσύνης. Σε ότι αφορά το κομμάτι της διατριβής, οι άμεσες και εύστοχες παρατηρήσεις και παροτρύνσεις της συνέβαλαν στη διαμόρφωση μιας διατριβής με πρωτότυπα στοιχεία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στον Καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών και μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, κ. Ευθύμιο Καρύμπαλη, τόσο για την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής, όσο και για την μετάδοση ουσιαστικών γνώσεων στο πεδίο της Γεωλογίας. Η βοήθεια του στην κατανόηση της κατολισθητικής «συμπεριφοράς» των γεωλογικών σχηματισμών και των τεκτονικών στοιχείων ήταν ιδιαίτερος σημαντική.

Επίσης, ιδιαίτερη μνεία και θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω:

Στη φίλη και συνεργάτιδα, Δρ. Αντιγόνη Φάκα, για την πολύτιμη βοήθεια της, μέσω εποικοδομητικών συζητήσεων, στην κατανόηση της πτυχής του φαινομένου που σχετίζεται με την τρωτότητα, καθώς και για την προσφορά της στην απόκτηση και συλλογή των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων.

Στο φίλο και συνάδελφο, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών, κ. Κλεομένη Καλογερόπουλο για την καθοριστική συμβολή του στην απόκτηση και συλλογή των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων.

Την ευγνωμοσύνη μου θα ήθελα να εκφράσω, επίσης, στο «Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.)» για τη χορήγηση σχετικής υποτροφίας η οποία συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην ομαλή και ανεπηρέαστη, από «εξωγενείς» παράγοντες, διεκπεραίωση της διδακτορικής διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα ν' απευθύνω και στην κ. Βασιλική Κερασιώτη, υπεύθυνη παρακολούθησης της υποτροφίας για την άμεση ανταπόκριση της σε κάθε θέμα που αφορούσε τη χορήγησή της.

Περίληψη

Η γνώση σχετικά με τη χωρική πιθανότητα εκδήλωσης ενός φυσικού κινδύνου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον μετριασμό του, και την εκτίμηση του πλήθους των ενδεχόμενων ζημιών και απωλειών που μπορεί να προκαλέσει. Ωστόσο, η απόκτηση αυτής της γνώσης απαιτεί την αντιμετώπιση σημαντικών ζητημάτων, όπως είναι η ύπαρξη των πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ των παραγόντων που σχετίζονται με την εκδήλωση ενός τέτοιου κινδύνου, η έλλειψη σχετικών δεδομένων, και η ενσωμάτωση των δυναμικών αλλαγών που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον. Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στον επιστημονικό κλάδο των Γεωεπιστημών επιτρέπουν την προσομοίωση των φυσικών κινδύνων. Γι' αυτό το λόγο, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των βασισμένων στη Γεωπληροφορική τεχνολογιών (όπως Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Τηλεπισκόπηση, κ.ά.), η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στη διαμόρφωση χωρικών προβλέψεων εκδήλωσης κατολισθήσεων. Οι επιδιωκόμενες προβλέψεις προέκυψαν από την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης μέσω εμπειρικών αναλύσεων στον Ελληνικό χώρο. Στα πλαίσια αυτής της εκτίμησης, εξετάστηκε η επίδραση της μεταβολής της κλίμακας ανάλυσης στην απόδοση επιλεγμένων μοντέλων. Ένα σύνολο ποιοτικών, ποσοτικών και ενοποιημένων μοντέλων εφαρμόστηκε σε δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης (περιφερειακή και λεπτομερέστερη), και κατ' επέκταση, σε δύο διαφορετικού μέγεθους περιοχές του Ελληνικού χώρου (σύστημα λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου, και λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα, αντιστοίχως). Λόγω της διαφοράς της κλίμακας ανάλυσης, παρόμοια σύνολα δεδομένων κατολισθήσεων και αιτιολογικών παραγόντων συλλέχθηκαν τα οποία χαρακτηρίζονταν από διαφορετική χωρική ανάλυση (με μέγεθος ψηφίδας 90 και 20 μέτρα, αντιστοίχως). Η απόδοση των μοντέλων αξιολογήθηκε συγκριτικώς μέσω εξειδικευμένων μεθόδων επικύρωσης. Επιπλέον, για κάθε μια από τις δύο κλίμακες ανάλυσης, διερευνήθηκε η ύπαρξη χωρικής μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης κατολισθήσεων και των αναλυθέντων παραγόντων. Τέλος, η επίδραση που αναμένεται να έχει η επαλήθευση του «βέλτιστου» αποτελέσματος επιδεκτικότητας στα κοινωνικο-οικονομικά στοιχεία της περιοχής μελέτης στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, εξετάστηκε μέσω της εκτίμησης της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.

Λέξεις κλειδιά: Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων, μοντελοποίηση, κλίμακα ανάλυσης, χωρική μη-στασιμότητα, τρωτότητα κατολισθήσεων, Γεωπληροφορική

Abstract

The knowledge about the spatial occurrence probability of a natural hazard is particularly useful for its mitigation, and estimation of the potential amount of damages and losses that it may cause. However, the acquisition of this knowledge requires dealing with important issues such as the existence of complex relationships among factors related to the occurrence of such a hazard, the lack of relevant data, and the integration of the dynamic changes taking place in the environment. The modern technological advances in the field of Geosciences allow the simulation of natural hazards. For this reason, by using the capabilities of Geoinformatics-based technologies (such as Geographical Information Systems, Remote Sensing, etc.), the present PhD thesis aims to the figuration of spatial predictions of landslide occurrence. The target predictions were derived from the landslide susceptibility assessment through empirical analyses in Greece. In terms of this assessment, the impact of the change of analysis scale on the performance of selected models was examined. A set of qualitative, quantitative and integrated models was applied in two different analysis scales (regional and more detailed), and by extension, in two areas with different size in Greece (system of catchments in northern Peloponnese, and Selinous river catchment, respectively). Due to the difference in the scale analysis, similar datasets of landslides and causal factors were collected which were characterized by different spatial resolution (with cell size 90 and 20 meters, respectively). The performance of the models was evaluated comparatively through specific validation methods. Furthermore, for each of the two analysis scales, the existence of spatial non-stationarity in the relationships between the landslide occurrence and the analyzed factors was investigated. Finally, the impact expected to have the “optimal” susceptibility result on the socio-economic elements of the study area in the more detailed analysis scale was examined through the landslide vulnerability assessment.

Keywords: Landslide susceptibility, modeling, analysis scale, spatial non-stationarity, landslide vulnerability, Geoinformatics

Εισαγωγή

Η διαχείριση των φυσικών κινδύνων (πλημμύρες, σεισμοί, κατολισθήσεις, κ.ά.) αποτελεί, διεθνώς, αντικείμενο έρευνας με συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τον Varnes (1984), ως *φυσικός κίνδυνος (natural hazard)* ορίζεται ένα δυνητικώς ζημιογόνο φαινόμενο το οποίο εκδηλώνεται σε μια δεδομένη περιοχή, μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Η συχνότητα εμφάνισης αυτών των κινδύνων σημειώνει ανοδική πορεία, ενώ την ίδια στιγμή, από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) εκτιμάται ότι οι μελλοντικές αλλαγές που θα επιφέρει τις επόμενες δεκαετίες στο περιβάλλον το (ανθρωπογενές) φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, θα έχουν ως αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξησή τους τόσο από πλευράς συχνότητας, όσο κι από πλευράς σφοδρότητας (IPCC, 2014). Γι’ αυτό το λόγο, οι διάφοροι επιστημονικοί κλάδοι που ασχολούνται με τη μελέτη των φυσικών κινδύνων, καλούνται – αξιοποιώντας εκτός των άλλων τη διαθέσιμη τεχνολογία – να κατανοήσουν τον μηχανισμό τους και να μετριάσουν, αν όχι και ν’ αποτρέψουν, τις επιπτώσεις τους τόσο στο φυσικό, όσο και στο δομημένο περιβάλλον.

Η γη, μέσω των μηχανισμών που διατηρούν την ισορροπία της, αναδιαμορφώνεται διαρκώς. Μια μορφή τέτοιας αναδιαμόρφωσης αποτελεί και το φαινόμενο των κατολισθήσεων. Αποτελεί ένα γεωλογικό φαινόμενο το οποίο μπορεί να κάνει την εμφάνιση του σε διαφορετικού τύπου τμήματα περιοχών, όπως ξηρά, παράκτια και υδάτινα (π.χ. σε θάλασσες, λίμνες και ταμιευτήρες). Μια κατολίσθηση συνήθως λαμβάνει χώρα απροειδοποίητα και συχνά επεκτείνεται σε μεγάλες εκτάσεις προκαλώντας σοβαρές υλικές ζημιές, και ορισμένες φορές, την απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Με βασικό γνώμονα τη δυνατότητα πρόβλεψης των μελλοντικών κατολισθήσεων και προσδιορισμού των δυνητικών επιπτώσεων τους, ο επιστημονικός κλάδος των Γεωεπιστημών έχει αναδείξει, κατά τις πρόσφατες δεκαετίες, ως κύριο αντικείμενο του την μελέτη των διαφόρων πτυχών του φαινομένου (κινδύνου, επιδεκτικότητας, τρωτότητας, και επικινδυνότητας) και την κατασκευή των αντίστοιχων παραγώγων απ’ αυτές. Τα παράγωγα αυτά, συνήθως σε μορφή θεματικών χαρτών, είναι αποτέλεσμα της χρήσης των τεχνολογιών της Γεωπληροφορικής (Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Τηλεπισκόπηση, κ.ά.) και

συνιστούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση και παρουσίαση των σχετικών με το φαινόμενο πληροφοριών σε διάφορες κλίμακες.

Ειδικότερα για τον Ελληνικό χώρο όπου οι κατολισθήσεις αποτελούν έναν από τους πιο ζημιογόνους φυσικούς κινδύνους με τεράστιες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, η απόκτηση γνώσης σχετικά με τη θέση μελλοντικών κατολισθήσεων κρίνεται ιδιαίτερος σημαντική. Η επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίσθησης είναι η πτυχή του φαινομένου η οποία αφορά την εξαγωγή χωρικών προβλέψεων μέσω της ανάλυσης των παραγόντων που επηρεάζουν ή ακόμη και προκαλούν την εκδήλωση του. Ένας χάρτης επιδεκτικότητας καταδεικνύει τα τμήματα μιας περιοχής που πιθανόν να εμφανίσουν κατολισθήσεις στο μέλλον, και προκύπτει από την υλοποίηση συγκεκριμένων ενεργειών. Οι ενέργειες αυτές περιλαμβάνουν, σε πρώτη φάση, τη συλλογή και διαμόρφωση των απαιτούμενων κατολισθητικών (σχετικά με τη θέση και τα χαρακτηριστικά των παρελθοντικών κατολισθήσεων) και παραγοντικών (σχετικά με τους παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου) δεδομένων τα οποία, σε μια μεταγενέστερη φάση, τίθενται υπό ανάλυση από εξειδικευμένα μοντέλα. Ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης είναι διαθέσιμος σήμερα. Μέσω της προσομοίωσης του φαινομένου, τα μοντέλα αυτά προσπαθούν ν' αξιοποιήσουν συνδυαστικά τα διαθέσιμα δεδομένα προκειμένου ν' αποτύπωσουν την επιδεκτικότητα με τη μορφή οριοθετημένων ζωνών.

Λόγω της αβεβαιότητας και της μεγάλης πιθανότητας σφάλματος που ενέχει η προσομοίωση του πολύπλοκου φαινομένου των κατολισθήσεων, τα παραγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων αξιολογούνται, σε μια τελική φάση, με στόχο την ανάδειξη του βαθμού ακρίβειας και της προβλεπτικής ικανότητας τους. Επιπλέον, από τη συνδυαστική χρήση των παραγώγων της επιδεκτικότητας με κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα, καθίσταται δυνατή η γεωγραφική αποτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου μέσω της εκτίμηση μιας άλλης πτυχής του, αυτής της τρωτότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην εκτίμηση, μέσω της εφαρμογής εξειδικευμένων μοντέλων, της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, και κατ' επέκταση για δύο διαφορετικού μεγέθους περιοχές του Ελληνικού χώρου. Η εξέταση αυτών των δύο κλιμάκων έχει ως στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση μιας ενδεχόμενης μεταβολής της κλίμακας ανάλυσης στα παραγόμενα αποτελέσματα των εξεταζόμενων

μοντέλων. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής ενός τοπικού μοντέλου, διερευνάται η ύπαρξη χωρικής μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν. Τέλος, για την υπό μελέτη περιοχή στη δεύτερη πιο λεπτομερή κλίμακα ανάλυσης, μέσω της συνδυαστικής χρήσης των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας με κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα, επιχειρείται η εκτίμηση της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.

Κίνητρο/έναυσμα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής αποτέλεσαν βασικά ερευνητικά ερωτήματα όπως:

- Σε ποιά τμήματα των υπό μελέτη περιοχών είναι πιο πιθανό να εκδηλωθούν κατολισθήσεις στο μέλλον (δηλαδή παρουσιάζουν υψηλότερη επιδεκτικότητα);
- Μεταξύ του συνόλου των εξεταζόμενων μοντέλων ανάλυσης, ποιο/ά είναι αυτό/ά που αποδίδει/ουν καλύτερα, με βάση την εκτιμώμενη, γι' αυτά, ακρίβεια και ικανότητα πρόβλεψης;
- Μεταξύ του συνόλου των αναλυθέντων παραγόντων και των επιμέρους κατηγοριών τους, ποιοί παράγοντες και ποιές κατηγορίες τους σχετίζονται περισσότερο με την εκδήλωση του φαινομένου;
- Η ποσοτικώς εκφρασμένη σχέση μεταξύ του κάθε παράγοντα και της εκδήλωσης του φαινομένου είναι χωρικώς στατική σ' όλη την έκταση των περιοχών μελέτης ή διαφοροποιείται σε ορισμένα τμήματα τους;
- Για την περιοχή που ενδύκνεται η σχετική εκτίμηση (τρωτότητας) με βάση της κλίμακα ανάλυσης, ποιά κοινωνικο-οικονομικά στοιχεία της βρίσκονται σε «δυσμενέστερη θέση» ως προς την εκδήλωση του φαινομένου;

Η παρούσα διδακτορική διατριβή χωρίζεται σε εννέα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στο θεωρητικό πλαίσιο που διέπει το φαινόμενο των κατολισθήσεων. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον προσδιορισμό του όρου «κατολίσθηση», τα χαρακτηριστικά του φαινομένου, τη βασισμένη σε διαφορετικά κριτήρια ταξινόμησή του, τις αιτίες εκδήλωσης του (παράγοντες που επιδρούν σ' αυτήν ή την προκαλούν), τις επιπτώσεις του, και τα μέτρα αντιμετώπισης του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στη γεωγραφική κατανομή του φαινομένου. Περιγράφονται αναλυτικώς οι τάσεις που παρουσιάζει η εκδήλωση του φαινομένου τόσο

διεθνώς, όσο και εθνικώς (στον Ελληνικό χώρο), ενώ για κάθε μια απ' αυτές παρατίθενται επιπροσθέτως χαρακτηριστικά παραδείγματα εκδηλωμένων κατολισθηστικών γεγονότων. Επιπλέον, περιγράφεται, σ' έναν μικρότερο βαθμό, η παρατηρούμενη, τα τελευταία χρόνια, «διαστημική» τάση της εκδήλωσης του φαινομένου (και σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος εκτός της Γης).

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στα βασικά στάδια που απαιτούνται για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής. Αρχικώς, πραγματοποιείται η παρουσίαση, για κάθε ένα στάδιο, των διαφορών, βασισμένων στις τεχνολογίες της Γεωπληροφορικής, μεθοδολογικών επιλογών τις οποίες έχει στη διάθεση του ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος που επιθυμεί να μελετήσει το φαινόμενο των κατολισθήσεων από τη συγκεκριμένη πτυχή. Στη συνέχεια, αναδεικνύονται οι επιλογές που προτιμήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για την υλοποίηση αυτών των σταδίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο κεφάλαιο σημαντική θέση κατείχε η ανασκόπηση της διεθνούς και εγχώριας σχετικής βιβλιογραφίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο «κεντρικός πυλώνας» της διατριβής καθώς περιλαμβάνει την παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στις δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Για τις ανάγκες αυτής της παρουσίασης, γίνεται αναφορά προηγούμενως στην περιοχή μελέτης και στα σύνολα δεδομένων που επιλέχθηκαν για κάθε μια από τις δύο κλίμακες ανάλυσης. Την παρουσίαση της μεθοδολογίας ακολουθεί η παράθεση αναλυτικώς των παραγόμενων αποτελεσμάτων των μοντέλων ανάλυσης που εφαρμόστηκαν σ' αυτήν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για την αξιολόγηση των εφαρμοσμένων μοντέλων της μεθοδολογίας μέσα από την επικύρωση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας που εξήχθησαν για κάθε μια από τις δύο κλίμακες ανάλυσης.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας των δύο διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης, και παραθέτει τα παραγόμενα, απ' αυτήν, αποτελέσματα.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται η εξέταση της ύπαρξης μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ των χρησιμοποιούμενων παραγόντων και της εκδήλωσης του φαινομένου των

κατολισθήσεων. Τα προκύπτοντα, απ' αυτήν την εξέταση, αποτελέσματα, επίσης, παρουσιάζονται και σχολιάζονται.

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην υπό μελέτη περιοχή μιας εκ των δύο εξεταζόμενων κλιμάκων ανάλυσης.

Το ένατο κεφάλαιο αποτελείται από τη συνοπτική παρουσίαση του εμπειρικού μέρους της διατριβής (ανακεφαλαίωση), και από την παράθεση των εξαγόμενων, απ' αυτό, τόσο ειδικών, όσο και γενικών συμπερασμάτων.

Τα «στοιχεία διαφορετικότητας» της παρούσας διδακτορικής διατριβής έναντι σχετικών μελέτων θα μπορούσαν να εντοπιστούν στα εξής:

- Στην εξέταση της επίδρασης στα παραγόμενα αποτελέσματα επιδεκτικότητας των επιλεγμένων μοντέλων από την μεταβολή μιας εκ των σημαντικότερων παραμέτρων ανάλυσης, όπως είναι αυτή της κλίμακας ανάλυσης. Σε αντίθεση με την παρατηρούμενη κοινώς τάση της αξιολόγησης των μεμονωμένων μοντέλων ως αποτέλεσμα της εφαρμογής τους σε μια μόνο κλίμακα ανάλυσης (και κατ' επέκταση, σε μια μόνο περιοχή μελέτης), η εξέταση αυτή περιλάμβανε την αξιολόγηση των επιλεγμένων μοντέλων μέσα από την εφαρμογή τους σε δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης (και κατ' επέκταση, σε δύο διαφορετικού μεγέθους περιοχές μελέτης).
- Στην εφαρμογή ενός μη χρησιμοποιούμενου ευρέως, σε μελέτες κατολισθήσεων, τοπικού μοντέλου στατιστικής ανάλυσης για τη διερεύνηση της ύπαρξης τοπικώς μιας χωρικής μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των υπό εξέταση παραγόντων.
- Στη δημιουργία ενός πρωτότυπου μοντέλου ανάλυσης μέσω της ενοποίησης ενός βασισμένου στην εμπειρία «ειδικών» ποιοτικού μοντέλου και ενός «καθοδηγούμενου από τα δεδομένα» ποσοτικού μοντέλου. Το διαμορφωθέν μοντέλο συνιστά την πρώτη προσπάθεια ενοποίησης των συγκεκριμένων τύπων μοντέλων.
- Στην εκτίμηση, πέραν της επιδεκτικότητας, και της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για μια επιλεγμένη περιοχή μελέτης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και εξετάζονται συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος, οι μεθοδολογίες που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες διαφορετικές περιοχές. Επιπλέον, παρότι το φαινόμενο που μελετάται είναι οι κατολισθήσεις, τα μοντέλα τα οποία αναπτύχθηκαν μπορούν μελλοντικώς να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση και άλλων τύπων φυσικών κινδύνων.

Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό πλαίσιο

1.1 Ορισμοί

Λόγω της διατύπωσης και χρήσης διαφορετικών ορισμών με την πάροδο των χρόνων, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ο όρος *κατολίσθηση* έχει τη δική του «διαχρονική πορεία». Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος ορισμός προτάθηκε από τον Terzaghi (1950), σύμφωνα με τον οποίο *«κατολίσθηση αποτελεί μια μεγάλης ταχύτητας μετακίνηση μάζας βράχων, κορημάτων ή γαιών ενός πρανούς της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω»*. Ακολούθως, οι Zaruba and Mencl (1969) όρισαν την κατολίσθηση ως *«μια μεγάλης ταχύτητας μετακίνηση βράχων που οφείλεται στην ολίσθηση του τμήματος ενός πρανούς. Μια διακριτή, καλώς καθορισμένη επιφάνεια είναι αυτή που διαχωρίζει το ολισθαίνον τμήμα του πρανούς από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα»*.

Στη συνέχεια, ο Coates (1977) πρότεινε συγκεκριμένες προϋποθέσεις για το χαρακτηρισμό μιας μετακίνησης εδαφικής μάζας ως κατολίσθηση. Αυτές ήταν οι εξής:

- Η βαρύτητα είναι η δύναμη που κατέχει πρωτεύοντα ρόλο.
- Η ταχύτητα της μετακίνησης πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη.
- Η μετακίνηση μπορεί να εκδηλώνεται με διάφορες μορφές.
- Η ζώνη ή το επίπεδο της μετακίνησης δεν ταυτίζεται με γεωλογικό ρήγμα.
- Η μετακίνηση πρέπει να πραγματοποιείται προς τα κάτω και προς τα έξω, με αποτέλεσμα τη δημιουργία «ελεύθερης» επιφάνειας.
- Το μετατοπισμένο υλικό έχει καθορισμένα όρια και αποτελεί συνήθως τμήμα μιας ορεινής ή λοφώδους έκτασης.
- Το μετατοπισμένο υλικό συνιστά τμήμα είτε του μανδύα αποσάθρωσης των βράχων, είτε του μητρικού βράχου, είτε και των δύο.

Ένα χρόνο μετά, ο Varnes (1978) χρησιμοποίησε τον όρο *μετακίνηση μάζας* περιλαμβάνοντας σ' αυτόν οποιαδήποτε μορφής μετακίνηση τμήματος ενός πρανούς. Ο ίδιος, επίσης, διαχώρισε από τη (γενική) έννοια της κατολίσθησης τις (ειδικές) έννοιες της *καθίζησης* και της *κατάπτωσης*. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο διαχωρισμό, όταν η εδαφική ή βραχώδης μάζα μετακινείται μόνο προς την κατακόρυφη διεύθυνση, τότε το φαινόμενο χαρακτηρίζεται

ως καθίζηση ή κατάπτωση. Ο διαχωρισμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα τη θέσπιση της χρήσης του όρου κατολίσθηση για την περιγραφή κυρίως μετακινήσεων μαζών με οριζόντια διεύθυνση.

Αργότερα, και πιο συγκεκριμένα με την ανακήρυξη της δεκαετίας 1990-2000 από την UNESCO ως η «Διεθνής Δεκαετία για την Μείωση των Φυσικών Καταστροφών (Decade for Natural Disaster Reduction)», κρίθηκε αναγκαία η χρήση ενός επίσημου και κοινώς αποδεκτού ορισμού. Σ' αυτό το πλαίσιο, οι Wold and Jochim (1989), εκπροσωπώντας την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης (Federal Emergency Management Agency – FEMA)¹ των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ΗΠΑ), προσδιόρισαν την κατολίσθηση ως *«έναν όρο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ευρεία ποικιλία διεργασιών οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την αισθητή προς τα κάτω και προς τα έξω μετακίνηση μάζας (βράχων, εδάφους και βλάστησης) υπό την επίδραση της βαρύτητας»*. Για τον ίδιο λόγο, ο Cruden (1991), ως πρόεδρος της Ομάδας Εργασίας για την Παγκόσμια Καταγραφή των Κατολισθήσεων (Working Party on World Landslide Inventory – WP/WLI)² πρότεινε έναν «απλό» ορισμό σύμφωνα με τον οποίο *«κατολίσθηση είναι η μετακίνηση μιας μάζας προς τα κατάντη ενός πρανούς»*.

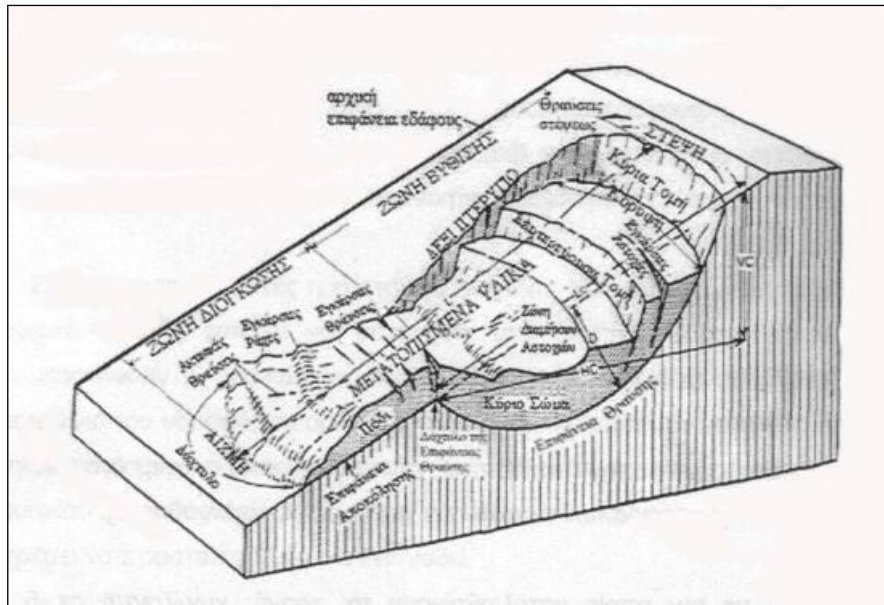
Γενικά, με βάση όλους τους παραπάνω ορισμούς και με την ευρύτερη έννοια του όρου, ως κατολίσθηση θα μπορούσε να οριστεί οποιαδήποτε, μεγάλη ή μικρή, αλλαγή της επιφάνειας ενός πρανούς η οποία συνοδεύεται από μετακίνηση μάζας/υλικού.

1.2 Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων

Εκτός από τον ορισμό του φαινομένου της κατολίσθησης, ο Varnes (1978) πρότεινε επίσης ένα διάγραμμα το οποίο απεικόνιζε τα χαρακτηριστικά μιας ιδεατής κατολίσθησης.

¹ Η FEMA συστάθηκε την 1η Απριλίου 1979 έπειτα από εντολή του Προέδρου των ΗΠΑ Jimmy Carter. Αποστολή της είναι να συντονίζει τον ρόλο της ομοσπονδιακής κυβέρνησης στην προετοιμασία, πρόληψη, περιορισμό των επιπτώσεων, αντιμετώπιση και ανάκαμψη της χώρας από όλες τις φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές (συμπεριλαμβανομένων των τρομοκρατικών ενεργειών).

² Η WP/WLI αποτελεί μια ομάδα εργασίας η οποία ουσιαστικά δημιουργήθηκε από διάφορες, σχετικές με το φαινόμενο, ενώσεις και επιτροπές (π.χ. IAEG, ISSMFE, ISRM, κ.ά.). Η δραστηριοποίηση της επισήμως τοποθετείται το 1988 στη Λοζάννη στα πλαίσια του 5^{ου} Διεθνούς Συμποσίου για τις Κατολισθήσεις. Το 1994 συνδέθηκε με τη Διεθνή Ένωση Γεωλογικών Επιστημών (International Union of Geological Sciences – IUGS) δημιουργώντας την αντίστοιχη Ομάδα Εργασίας για τις Κατολισθήσεις (IUGS Working Group on Landslides – WG/L).



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά μιας ιδεατής κατολίσθησης.

Στο διάγραμμα αυτό διακρίνονται τα εξής χαρακτηριστικά:

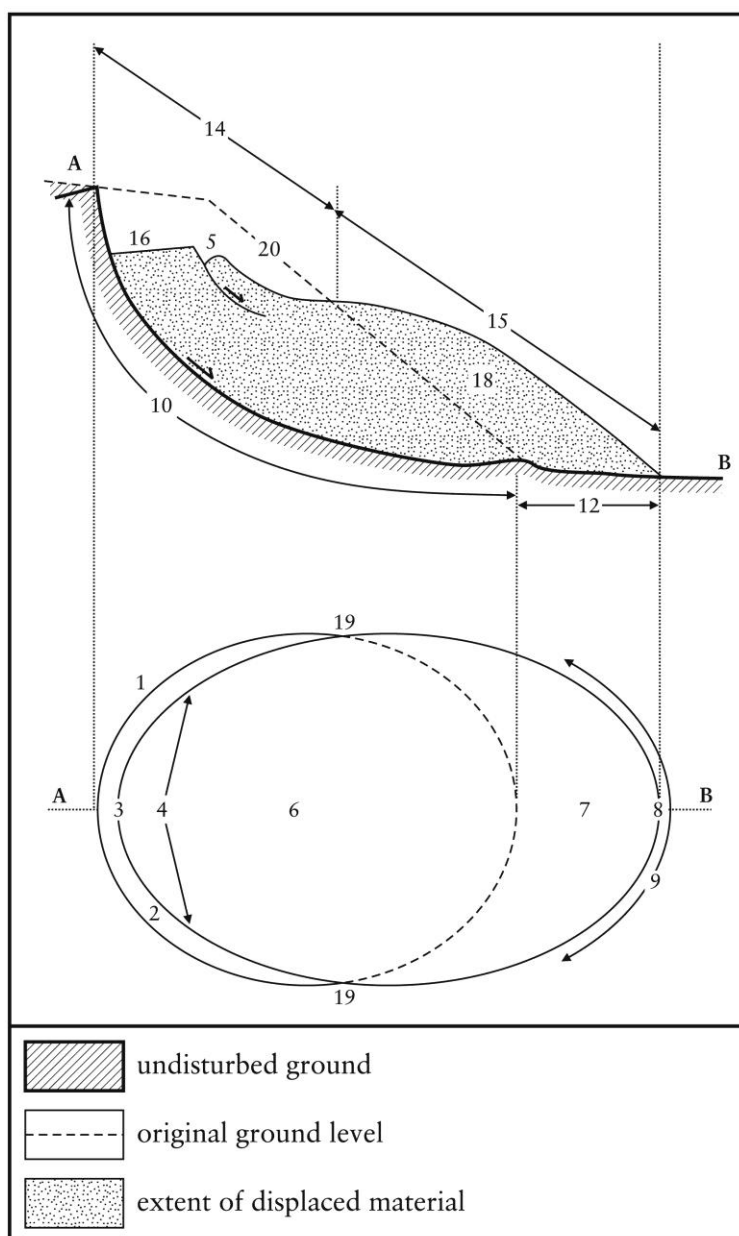
- **Κύρια τομή:** η απότομη επιφάνεια που δημιουργείται στο αδιατάρακτο (ή αμετακίνητο) έδαφος γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης. Προκαλείται από την απομάκρυνση του ολισθαίνοντος υλικού από το αδιατάρακτο υλικό.
- **Δευτερεύουσες τομές:** οι απότομες επιφάνειες του μετατοπισμένου υλικού οι οποίες προκύπτουν από τις διαφορικές κινήσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του υλικού.
- **Κεφαλή:** βρίσκεται στο ανώτερο μέρος της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος της επαφής, ανάμεσα στο μετατοπισμένο υλικό και την κύρια τομή.
- **Κορυφή:** το υψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ του μετατοπισμένου υλικού και της κύριας τομής.
- **Στέψη:** αποτελεί ουσιαστικά το αμετακίνητο υλικό που εντοπίζεται στα υψηλότερα σημεία της κύριας τομής.
- **Κύριο σώμα:** συνιστά τη μετατοπισμένη μάζα. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση του υλικού το οποίο αφού μετακινηθεί κατά μήκος μιας διαδρομής, σταματάει την πορεία του και συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης (σ' αυτό το σημείο η κινητική του ενέργεια μηδενίζεται).

- *Επιφάνεια θραύσης*: η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η μετακίνηση της κατολισθαίνουσας μάζας ως αποτέλεσμα του αποχωρισμού της από το σταθερό υπόβαθρο.
- *Επιφάνεια αποκόλλησης*: το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από το πόδι της κατολίσθησης.
- *Πόδι*: το ακραίο (χαμηλότερο συνήθως) τμήμα του κυρίου σώματος.
- *Δάκτυλο*: το κατώτερο και πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού.
- *Δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης*: η διατομή (συχνά θαμμένη) ανάμεσα στο κατώτερο όριο της επιφάνειας θραύσης και στην αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- *Αιχμή*: το πιο απομακρυσμένο από την κορυφή της κατολίσθησης σημείο το οποίο βρίσκεται στο πόδι.
- *Ζώνη βύθισης*: η περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- *Ζώνη διόγκωσης*: η περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.
- *Πτερύγιο*: το αμετακίνητο υλικό που βρίσκεται δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης. Περιγράφεται ως δεξί ή αριστερό με βάση τη στάση της στέψης.
- *Μετατοπισμένο υλικό*: το υλικό που μετατοπίζεται από την αρχική του θέση στο πρανές.
- *Αρχική επιφάνεια εδάφους*: η επιφάνεια του πρανούς που υπήρχε πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης.

Ακολούθως, η Διεθνής Ένωση για την Τεχνική Γεωλογία και το Περιβάλλον (International Association for Engineering Geology and the Environment – IAEG)³, βασιζόμενη στην πρόταση του Varnes, πρότεινε τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις μιας τυπικής κατολίσθησης (IAEG, 1990). Η πρόταση της αυτή έγινε επισήμως αποδεκτή από την WP/WLI η οποία, με τη σειρά της, την συμπεριέλαβε στο «οδηγό» που εξέδωσε το 1993, γνωστός ως το «Γλωσσάριο των Κατολισθήσεων (Landslide Glossary)». Σκοπός της WP/WLI

³ Η IAEG ιδρύθηκε το 1964 ως μια διεθνής επιστημονική κοινότητα, και πλέον αριθμεί πάνω από 5.200 μέλη και 59 εθνικές ομάδες σ' όλο τον κόσμο. Πρωταρχικοί της στόχοι αποτελούν η προώθηση της τεχνικής γεωλογίας, και η βελτίωση της διδασκαλίας και της κατάρτισης στο συγκεκριμένο τομέα μέσα από τη διάδοση των αποτελεσμάτων των τεχνολογικών δραστηριοτήτων και ερευνών της.

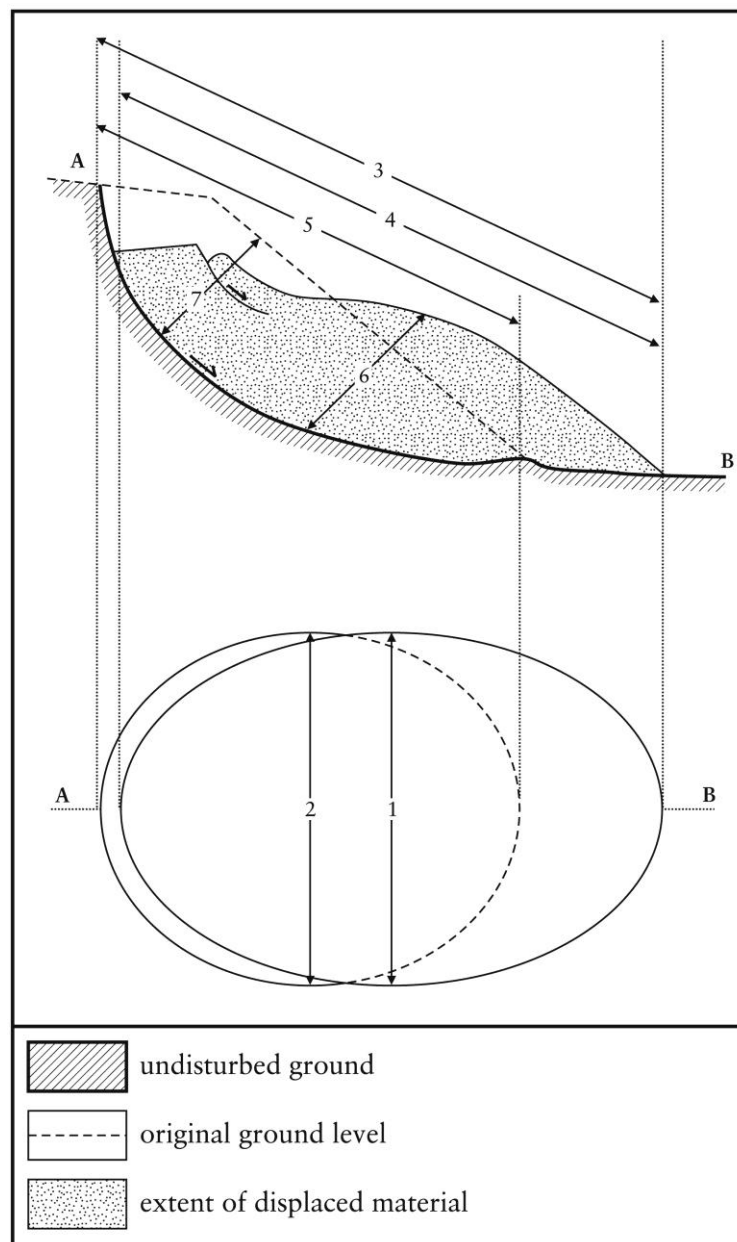
ήταν η δημιουργία μιας κοινής βάσης δεδομένων κατολισθήσεων σε διεθνές επίπεδο μέσω ενός πρότυπου δελτίου απογραφής, και η καθιέρωση μιας κοινής πρότυπης ορολογίας στην οποία θα στηριζόταν ο εκάστοτε ερευνητής που επρόκειτο ν' ασχοληθεί με τη μελέτη και ανάλυση του συγκεκριμένου φαινομένου.



Σχήμα 1.2: Τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης. Στο ανώτερο τμήμα παρουσιάζεται η τομή της ολίσθησης, ενώ στο κατώτερο τμήμα η κάτοψή της. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το αρχικό επίπεδο του εδάφους, πριν την αστοχία (Cooper, 2007).

Πίνακας 1.1: Τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης.

Κωδικός	Χαρακτηριστικό
1	Στέψη
2	Κύρια τομή
3	Κορυφή
4	Κεφαλή
5	Δευτερεύουσα τομή
6	Κύριο σώμα
7	Πόδι
8	Αιχμή
9	Δάκτυλο
10	Επιφάνεια θραύσης
11	Δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης
12	Επιφάνεια αποκόλλησης
13	Μάζα κατολίσθησης
14	Ζώνη βύθισης
15	Ζώνη διόγκωσης
16	Βύθιση
17	Μάζα βύθισης
18	Διόγκωση
19	Πτερύγια
20	Αρχική επιφάνεια εδάφους



Σχήμα 1.3: Οι διαστάσεις μιας τυπικής κατολίσθησης (Cooper, 2007).

Από το παραπάνω Σχήμα προκύπτουν οι ακόλουθες διαστάσεις για μια κατολίσθηση:

- (1) *Πλάτος μετατοπισμένης μάζας:* το μέγιστο εύρος της μετατοπισμένης μάζας. Κάθετο στο μήκος μετατοπισμένης μάζας (4).
- (2) *Πλάτος επιφάνειας θραύσης:* το μέγιστο πλάτος μεταξύ των πλευρών της κατολίσθησης. Κάθετο στο μήκος επιφάνειας θραύσης (5).

- (3) *Συνολικό μήκος*: το ελάχιστο μήκος από την αιχμή της κατολίσθησης έως τη στέψη.
- (4) *Μήκος μετατοπισμένης μάζας*: η ελάχιστη απόσταση από την αιχμή έως την κορυφή.
- (5) *Μήκος επιφάνειας θραύσης*: η ελάχιστη απόσταση από το δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης έως τη στέψη.
- (6) *Βάθος μετατοπισμένης μάζας*: το μέγιστο βάθος της μετατοπισμένης μάζας. Κάθετο στο επίπεδο που περιέχει το πλάτος μετατοπισμένης μάζας (1) και το μήκος μετατοπισμένης μάζας (4).
- (7) *Βάθος επιφάνειας θραύσης*: το μέγιστο βάθος της επιφάνειας θραύσης κάτω από την αρχική επίγεια επιφάνεια. Κάθετο στο επίπεδο που περιέχει το πλάτος επιφάνειας θραύσης (2) και το μήκος επιφάνειας θραύσης (5).

1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Σε αντίθεση με άλλους φυσικούς κινδύνους, η ταξινόμηση των κατολισθήσεων θεωρείται ένα αρκετά δύσκολο έργο εξαιτίας της φύσης του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα, η εκδήλωσή του σε διαφορετικές μορφές, με τη συμμετοχή διαφορετικών υλικών και υπό την επίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών παραγόντων, το καθιστούν ως ένα «μη τέλεια επαναλαμβανόμενο» φαινόμενο. Γι' αυτό το λόγο, ένας σχετικά μεγάλος αριθμός προτάσεων ταξινόμησης του φαινομένου έχει ιστορικά διατυπωθεί (Sharpe, 1938; Varnes, 1958; Hutchinson, 1968; Crozier, 1973; Coates, 1977; Varnes, 1978; Hutchinson, 1988). Τα κριτήρια στα οποία βασίστηκαν οι προτάσεις αυτές ποικίλουν (π.χ. ηλικία, γεωλογία, κλίμα, γεωγραφική θέση, κ.ά.), με τα κυριότερα απ' αυτά, ωστόσο, να εντοπίζονται στα εξής:

- Τύπος μετακίνησης
- Είδος μετατοπισμένου υλικού
- Δραστηριότητα
- Ταχύτητα

1.3.1 Ταξινόμηση με βάση τον τύπο μετακίνησης και το είδος υλικού

Στα τέλη της δεκαετίας του '50, ο Varnes (1958) εισήγαγε την πρώτη του ταξινόμηση διαχωρίζοντας τις εδαφικές μετακινήσεις στις αρχικές τους μορφές. Ύστερα από λεπτομερείς αναλύσεις και βελτιώσεις στην εικοσαετία που ακολούθησε, η πρόταση αυτή πήρε την τελική της μορφή (Πίνακας 1.2). Σήμερα είναι διεθνώς αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή όλων των εδαφικών μετακινήσεων, καθώς θεωρείται αρκετά ευέλικτη και λιγότερο απαιτητική ως προς την κατεχόμενη εμπειρία των ατόμων που επιθυμούν να μελετήσουν το φαινόμενο. Σύμφωνα με τον Varnes (1978), οι κατολισθήσεις μπορούν να περιγραφούν και να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια:

- Τον *τύπο της μετακίνησης*, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό τους σε πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές επεκτάσεις, και ροές.
- Το *είδος του μετατοπισμένου υλικού*, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό τους σε μετακινήσεις βράχων και μετακινήσεις εδαφών. Το εδαφικό υλικό, με τη σειρά του, διακρίνεται σε δύο επιμέρους είδη: τα κορήματα και τις γαίες. Η διάκρισή τους έγκειται στο ποσοστό των περιεχόμενων σωματιδίων που έχουν μέγεθος χονδροειδούς κόκκου (δηλαδή διάμετρο μεγαλύτερη των 2 χιλιοστών). Εάν το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο από 20%, τότε το υλικό της μετακίνησης ορίζεται ως γαία. Σε αντίθετη περίπτωση ορίζεται ως κορήματα.

Πίνακας 1.2: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes.

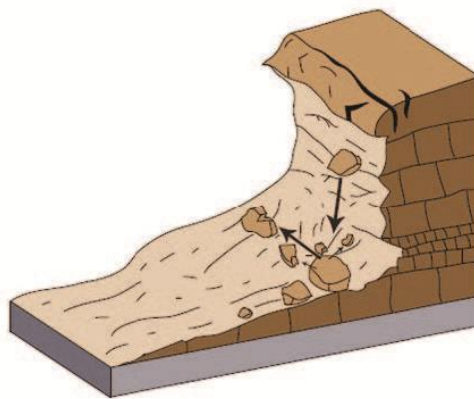
Τύπος μετακίνησης		Τύπος μετατοπισμένου υλικού		
		Βραχώδες υπόβαθρο	Εδάφη	
	Πτώσεις	Πτώση βράχων	Πτώση κορημάτων	Πτώση γαιών
	Ανατροπές	Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές Μεταθετικές	Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση κορημάτων	Ολίσθηση γαιών
	Πλευρικές επεκτάσεις	Επέκταση βράχων	Επέκταση κορημάτων	Επέκταση γαιών
	Ροές	Ροή βράχων (ερπυσμός υποβάθρου)	Ροή κορημάτων (ερπυσμός εδάφους)	Ροή γαιών (ερπυσμός εδάφους)
	Σύνθετες	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων		

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά για τον κάθε τύπο μετακίνησης ξεχωριστά:

Πτώσεις

Είναι οι απότομες μετακινήσεις μαζών γεωλογικών υλικών (όπως τμήματα εδάφους και βράχοι) οι οποίες αποσπώνται από ένα απότομο πρηνές κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή⁴. Η αποσύνδεση συμβαίνει κατά μήκος ασυνεχειών (π.χ. ρήγματα), ενώ η μετακίνηση του υλικού εκδηλώνεται κυρίως ελεύθερα, με αναπήδηση ή κύλιση. Η πτώση χαρακτηρίζεται ως μια πολύ έως εξαιρετικά γρήγορη σε ταχύτητα μετακίνηση και είναι πιθανόν ν' αποτελεί αποτέλεσμα προηγούμενων μικρότερων μετακινήσεων. Κύριες αιτίες εκδήλωσης μιας πτώσης είναι η επίδραση της βαρύτητας, η διαφορική διάβρωση και η παρουσία ρευμάτων.

Σ' αυτήν την κατηγορία μετακινήσεων διακρίνουμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, τις *πτώσεις βράχων*, η μάζα που μετακινείται είναι μάζα βράχων που αποσπάστηκε από το απότομο πρηνές. Στη δεύτερη περίπτωση, τις *πτώσεις κορημάτων*, η μάζα που μετακινείται είναι κορήματα, δηλαδή θραύσματα που έχουν δημιουργηθεί πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης. Τέλος, οι *πτώσεις γαιών* αποτελούν πολύ σπάνιο φαινόμενο και ουσιαστικά σχετίζονται με άλλους τύπους μετακίνησης (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).

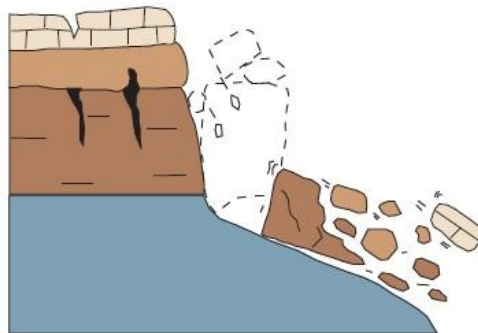


Σχήμα 1.4: Τυπική πτώση βράχων (Highland and Bobrowsky, 2008).

⁴ Διατμητική αντοχή του εδάφους (*shear strength of soil*) είναι η ικανότητα του εδάφους να φέρει φορτία χωρίς να αστοχεί.

Ανατροπές

Είναι οι προς τα εμπρός περιστροφές μαζών εδάφους ή βράχων, γύρω από ένα σημείο ή άξονα που βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους των μετατοπισμένων μαζών. Στη συνέχεια, αυτός ο τύπος μετακίνησης μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε πτώση ή ολίσθηση ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς, της μετατοπισμένης μάζας και της επιφάνειας αποκόλλησης. Η ταχύτητα μιας ανατροπής κυμαίνεται από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη ενώ ως κίνηση εκδηλώνεται κυρίως σε *βραχώδη πρανή*. Αντίθετα, οι *ανατροπές κορημάτων* και *γαιών* αποτελούν σπάνιες περιπτώσεις, η εκδήλωση των οποίων οφείλεται κυρίως σε φυσικές διεργασίες (π.χ. διαφορική διάβρωση) και σε ανθρώπινες παρεμβάσεις (π.χ. ανασκαφές) (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).



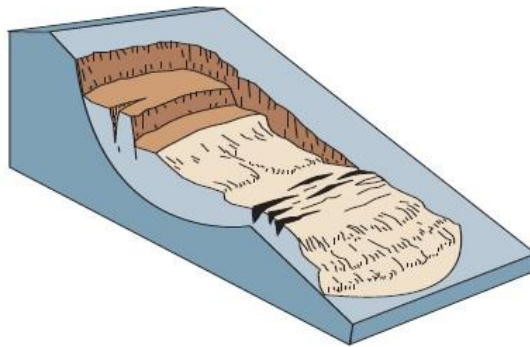
Σχήμα 1.5: Ανατροπή (Highland and Bobrowsky, 2008).

Ολισθήσεις

Αποτελούν κατηφορικές μετακινήσεις μαζών εδάφους ή βράχων που λαμβάνουν χώρα κυρίως κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή σχετικά λεπτών ζωνών έντονης διάτμησης. Ανάλογα με την μορφή της επιφάνειας ολίσθησης και τον μηχανισμό μετακίνησης διακρίνονται οι εξής τύποι ολισθήσεων:

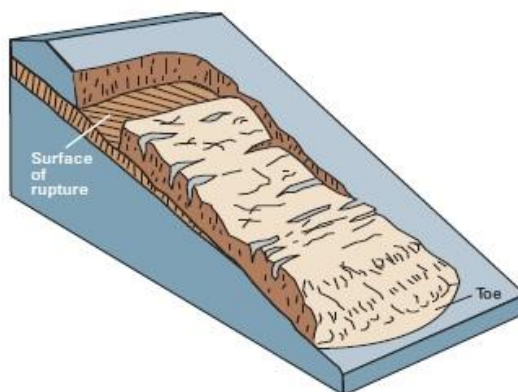
- *Περιστροφικές ή κυκλικές ολισθήσεις:* ολισθήσεις οι οποίες εκδηλώνονται κατά μήκος μιας κοίλης προς τα πάνω επιφάνειας θραύσης (που δεν προϋπήρχε) ενώ η κίνησή τους είναι περίπου περιστροφική γύρω από έναν άξονα που είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους και εγκάρσιος σ' όλη την ολίσθηση. Η ταχύτητά τους χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη και η βασική αιτία εκδήλωσης τους είναι η υπερνίκηση της διατμητικής αντοχής του

υλικού κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης από την διατμητική τάση που ασκεί το βάρος της μάζας που θα κατολισθήσει (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).



Σχήμα 1.6: Περιτροφική ολίσθηση (Highland and Bobrowsky, 2008).

➤ *Μεταθετικές ολισθήσεις:* ολισθήσεις στις οποίες η κατολισθαίνουσα μάζα μετακινείται κατά μήκος μιας σχεδόν επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας θραύσης, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφή. Όπως στην περίπτωση των περιστροφικών ολισθήσεων έτσι και εδώ, η ταχύτητά τους χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη. Οι μεταθετικές βραχώδεις ολισθήσεις, ανάλογα με την μορφή της αστοχίας που πραγματοποιείται σ' αυτές, χωρίζονται σε ολισθήσεις με αστοχία είτε μορφής σφήνας, είτε επίπεδης μορφής (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).



Σχήμα 1.7: Μεταθετική ολίσθηση (Highland and Bobrowsky, 2008).

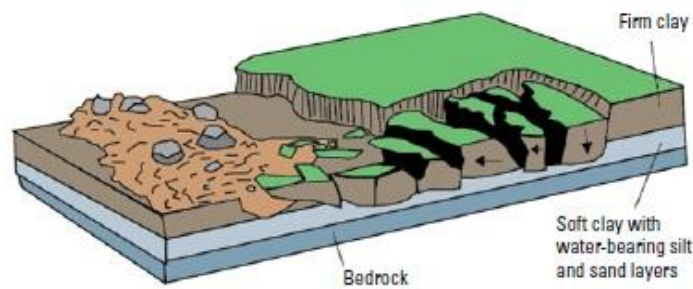
Πλευρικές επεκτάσεις

Ορίζονται ως οι μετακινήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από μια πλευρική επέκταση ενός συνεκτικού υλικού σε βάρος ενός πιο χαλαρού υποκείμενου υλικού (όπου και στηρίζεται). Διευκολύνονται από την παρουσία διατμητικών ή εφελκυστικών ρωγμών και είναι αρκετά διακριτές επειδή συνήθως εκδηλώνονται σε πολύ ομαλά πρανή ή σε επίπεδο έδαφος. Διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους: τις επεκτάσεις βράχων, τις επεκτάσεις ρευστοποίησης και τις σύνθετες επεκτάσεις.

Στις *επεκτάσεις βράχων* παρατηρείται το φαινόμενο κατά το οποίο βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί, που υπέρκεινται άλλων πιο χαλαρών, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχια. Το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί. Η μετατόπιση αυτή κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα και συχνά χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά αργή ταχύτητα.

Από την άλλη πλευρά, στις *επεκτάσεις κορημάτων*, η αστοχία του εδάφους προκαλείται από τη διαδικασία της ρευστοποίησης κατά την οποία τα διαποτισμένα και χαλαρά ιζήματα (συνήθως στρώσεις άμμου) μετασχηματίζονται από μια στερεή σε μια υγροποιημένη κατάσταση. Όταν συμβεί αυτό, οι ανώτερες μονάδες του συνεκτικού υλικού (συνήθως άργιλος και ιλύς) που στηρίζονται σ' αυτά τα υγροποιημένα ιζήματα, μπορούν να υποστούν θραύση και επέκταση, και στη συνέχεια να υποχωρήσουν, να μετατεθούν, να περιστραφούν, ν' αποσυντεθούν, ή να υγροποιηθούν και να πέσουν. Η θραύση είναι βαθμιαία, ενώ η επέκταση ξεκινάει ξαφνικά χωρίς προειδοποίηση σε μια μικρή περιοχή και κινείται με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα. Κύρια αιτία της συγκεκριμένης μετακίνησης είναι η σύντομη επίγεια κίνηση, όπως αυτή που συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, αλλά μπορεί επίσης να είναι και «τεχνητώς προκαλούμενη».

Τέλος, οι *επεκτάσεις γαιών* αποτελούν μετακινήσεις που εκδηλώνονται ως έντονες παραμορφώσεις οριζόντιων ανθεκτικών και διερρηγμένων στρωμάτων που καλύπτουν ρηγματωμένους αργίλους ή χαλαρούς σχιστόλιθους (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).

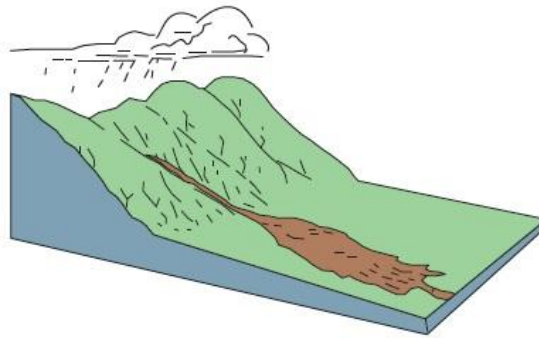


Σχήμα 1.8: Πλευρική επέκταση (Highland and Bobrowsky, 2008).

Ροές

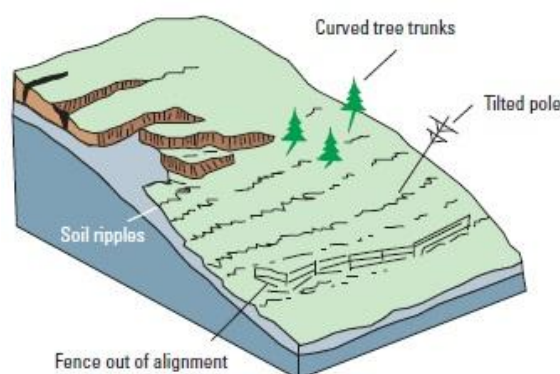
Χωρικά συνεχείς κινήσεις στις οποίες οι επιφάνειες διάτμησης είναι μικρής έκτασης και συνήθως δε διατηρούνται. Στις *ροές βράχων* παρατηρούνται παραμορφώσεις που κατανέμονται μεταξύ πολλών μεγάλων ή μικρών ρωγμών χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας. Αντίθετα, στα χαλαρά υλικά, οι ροές αναγνωρίζονται ευκολότερα καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη έκταση και ένταση λόγω της ύπαρξης μεγάλου ποσοστού αργιλικού υλικού. Αυτές οι ροές χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: τις ροές κορημάτων και τις ροές γαιών.

Η *ροή κορημάτων* είναι μια πολύ γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη μετακίνηση μάζας κατά την οποία ένας συνδυασμός από ασυμπίεστο χώμα, πέτρα, οργανικά στοιχεία, αέρα και νερό κινητοποιούνται ως «πηλός» που ρέει σε μια κατερχόμενη επιφάνεια. Κύρια αιτία εκδήλωσης τους συνιστά η έντονη επιφανειακή ροή του νερού, εξαιτίας της υψηλής βροχόπτωσης ή του γρήγορου λιώσιμου του χιονιού, που διαβρώνει και κινητοποιεί το χαλαρό υλικό ή το βράχο στα απότομα πρανή. Επιπλέον, ο προκύπτων «πηλός» μπορεί να φτάσει πυκνότητες μέχρι 2 τόνους/μ³ και ταχύτητες έως και 14 μ./δευτ. Αυτό έχει ως συνέπεια να μπορεί να παρασύρει δέντρα, σπίτια και αυτοκίνητα αποκλείοντας έτσι γέφυρες και ρέματα ποταμών, και προκαλώντας πλημμύρες κατά μήκος της διαδρομής του. Πολλοί μπερδεύουν συχνά την ροή κορημάτων με την ξαφνική πλημμύρα, αλλά αποτελούν δύο τελείως διαφορετικές διαδικασίες.



Σχήμα 1.9: Ροή κορημάτων (Highland and Bobrowsky, 2008).

Η *ροή γαιών*, από την άλλη, είναι μια αργή ή γρήγορη μετακίνηση μάζας που εμφανίζεται συνήθως σε λεπτόκοκκα υλικά ή βράχους που φέρουν άργιλο. Είναι επιμήκης και ξεχωρίζει από τη ροή κορημάτων λόγω του σχήματος της το οποίο θυμίζει κλεψύδρα. Όταν οι ροές χαρακτηρίζονται από πολύ έως εξαιρετικά αργή ταχύτητα μετακίνησης τότε ταξινομούνται ως *ερπυσμός*. Γενικά, ερπυσμός είναι η ανεπαίσθητα αργή, σταθερή και προς τα κάτω μετακίνηση μιας μάζας. Διακρίνονται τρεις τύποι ερπυσμού: (α) ο εποχιακός, όπου η μετακίνηση επηρεάζεται από τις εποχιακές αλλαγές στην υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους, (β) ο συνεχής, όπου η διατμητική πίεση υπερβαίνει συνεχώς τη δύναμη του υλικού, και (γ) ο προοδευτικός, όπου τα πρανή φθάνουν στο σημείο αστοχίας ως άλλοι τύποι μετακινήσεων μαζών. Σαν φαινόμενο ο ερπυσμός αναγνωρίζεται από την παρουσία κυρτών κορμών δέντρων, λυγισμένων περιφράξεων ή τοίχων αντιστήριξης, και κορυφογραμμών (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996).



Σχήμα 1.10: Ερπυσμός (Highland and Bobrowsky, 2008).

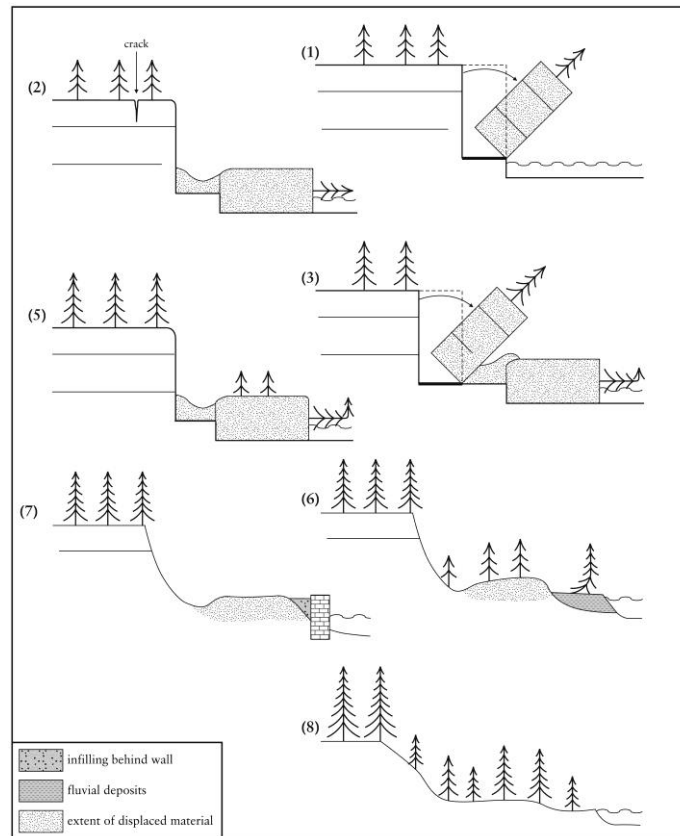
Σύνθετες

Προκύπτουν από το συνδυασμό δύο ή περισσότερων τύπων μετακίνησης που περιγράφηκαν παραπάνω. Εκδηλώνονται είτε στα διάφορα τμήματα της μετατοπισμένης μάζας, είτε στα διάφορα στάδια εξέλιξης της μετακίνησης.

1.3.2 Ταξινόμηση με βάση τη δραστηριότητα

Η ταξινόμηση μιας κατολίσθησης σε σχέση με τη δραστηριότητά της θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση και πρόβλεψη μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων. Οι συστάσεις της WP/WLI (1993) ορίζουν την έννοια της δραστηριότητας σε σχέση με τις χωρικές και χρονικές συνθήκες, καθορίζοντας την κατάσταση, την κατανομή και τη μορφή μιας κατολίσθησης. Ο όρος της *κατάστασης* παρουσιάζει πληροφορίες σχετικά με τον χρόνο στον οποίο εκδηλώθηκε η κατολίσθηση, επιτρέποντας τη διάθεση πληροφοριών για τη μελλοντική εξέλιξη της. Έτσι, μια κατολίσθηση διακρίνεται σε:

- *Ενεργή*: μια κατολίσθηση που κινείται αυτήν την περίοδο.
- *Ανασταλμένη*: μια κατολίσθηση που έχει κινηθεί μέσα στους τελευταίους 12 μήνες, αλλά δεν είναι ενεργή αυτή τη στιγμή.
- *Επανεργοποιημένη*: μια κατολίσθηση που ενεργοποιείται μετά από ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είχε σταθεροποιηθεί.
- *Ανενεργή*: μια κατολίσθηση που δεν έχει κινηθεί μέσα στους τελευταίους 12 μήνες. Μπορεί να (υπο)διαιβρεθεί σε τέσσερις καταστάσεις:
 - *Σε ύπνωση*: μπορεί να επανεργοποιηθεί από τις αρχικές αιτίες της ή άλλες αιτίες.
 - *Εγκαταλειμμένη*: δεν επηρεάζεται πλέον από τις αρχικές αιτίες της.
 - *Σταθεροποιημένη*: έχει προστατευθεί από τις αρχικές αιτίες της μέσω της διενέργειας επανορθωτικών μέτρων.
 - *Παλαιά-απολιθωμένη*: αναπτύχθηκε κάτω από κλιματολογικές ή γεωμορφολογικές συνθήκες αρκετά διαφορετικές από τις υφιστάμενες.

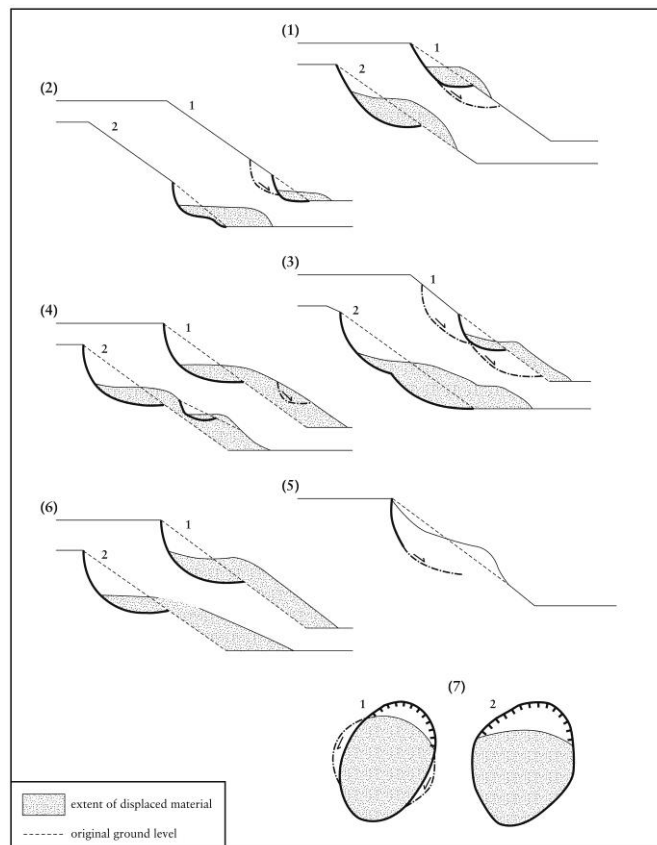


Σχήμα 1.11: Ταξινόμηση με βάση την κατάσταση της δραστηριότητας. (1) Ενεργή, (2) ανασταλμένη, (3) επανεργοποιημένη, (4) ανενεργή, (5) σε ύπνωση, (6) εγκαταλειμμένη, (7) σταθεροποιημένη, (8) παλαιά-απολιθωμένη (Cooper, 2007).

Ο όρος της *κατολίσθησης* περιγράφει, μ' έναν γενικό τρόπο, το πώς εξελίσσεται χωρικά μια κατολίσθηση. Έχουμε, συνεπώς, τους εξής τύπους:

- *Προωθούμενη:* η κατολίσθηση στην οποία η επιφάνεια θραύσης επεκτείνεται στην κατεύθυνση της μετακίνησης.
- *Οπισθοδρομούσα:* η κατολίσθηση στην οποία η επιφάνεια θραύσης επεκτείνεται στην κατεύθυνση απέναντι από τη μετακίνηση του μετατοπισμένου υλικού.
- *Μεγεθυνόμενη:* η κατολίσθηση στην οποία η επιφάνεια θραύσης επεκτείνεται σε δύο ή περισσότερες κατευθύνσεις.
- *Απομειούμενη:* η κατολίσθηση στην οποία ο όγκος του μετατοπισμένου υλικού μειώνεται.
- *Περιορισμένη:* υπάρχει ένα απότομο πρανές αλλά καμία επιφάνεια θραύσης ορατή στο πόδι της μετατοπισμένης μάζας.

- *Κινούμενη*: η κατολίσθηση στην οποία το μετατοπισμένο υλικό συνεχίζει να κινείται χωρίς οποιαδήποτε ορατή αλλαγή στον όγκο ή στην επιφάνεια θραύσης του.
- *Διευρυνόμενη*: η κατολίσθηση στην οποία η επιφάνεια θραύσης επεκτείνεται στη μία ή και στις δύο πλευρές της μετακίνησης.

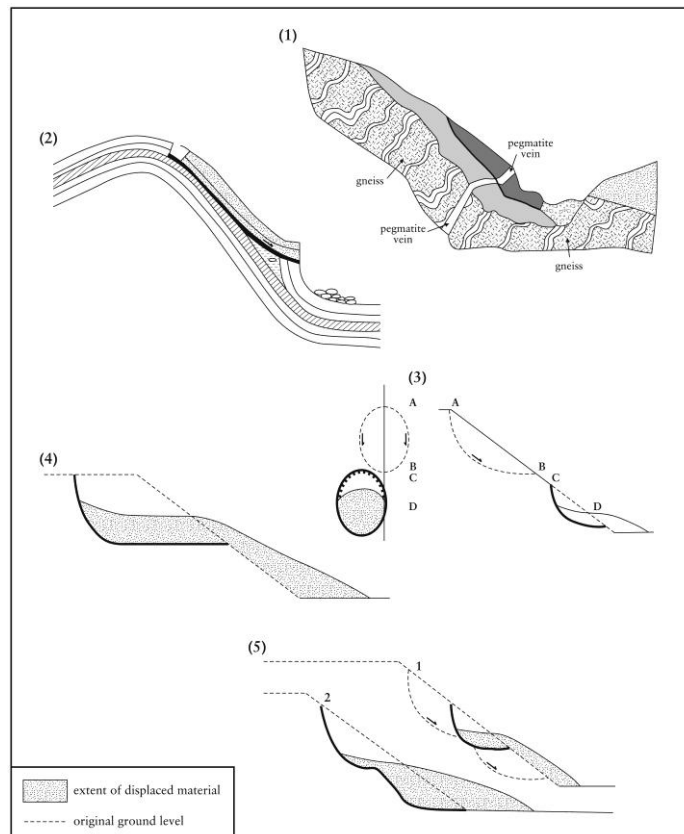


Σχήμα 1.12: Ταξινόμηση με βάση την κατανομή της δραστηριότητας. (1) Προωθούμενη, (2) οπισθοδρομούσα, (3) μεγεθυνόμενη, (4) απομειούμενη, (5) περιορισμένη, (6) κινούμενη, και (7) διευρυνόμενη (Cooper, 2007).

Ο όρος της *μορφής*, τέλος, δείχνει τον τρόπο εκδήλωσης μιας κατολίσθησης. Με βάση τη μορφή δραστηριότητα τους, οι κατολισθήσεις χωρίζονται σε:

- *Σύνθετη*: παραθέτει τουλάχιστον δύο τύπους μετακινήσεων (π.χ. πτώση, ανατροπή, ολίσθηση, επέκταση και ροή) στη σειρά.
- *Διαδοχική*: είναι ο ίδιος τύπος μετακίνησης με μια χρονικά κοντινή κατολίσθηση, αλλά δε μοιράζεται το μετατοπισμένο υλικό ή δε σπάζει την επιφάνεια μ' αυτό.

- *Απλή*: συνιστά μια απλή μετακίνηση του μετατοπισμένου υλικού.
- *Πολλαπλή*: παρουσιάζει επαναλαμβανόμενη ανάπτυξη του ίδιου τύπου μετακίνησης.



Σχήμα 1.13: Ταξινόμηση με βάση τη μορφή της δραστηριότητας. (1) και (2) Σύνθετη, (3) διαδοχική, (4) απλή, και (5) πολλαπλή (Cooper, 2007).

1.3.3 Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα

Η ταχύτητα μιας κατολίσθησης είναι μια παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με τις επιπτώσεις που επιφέρει τόσο σε ανθρώπινες ζωές, όσο και σε ζημιές κτιρίων και τεχνικών έργων. Ο Πίνακας που ακολουθεί, παρουσιάζει την ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητάς τους, καθώς και τις πιθανές καταστροφικές επιπτώσεις για κάθε τύπο ξεχωριστά.

Πίνακας 1.3: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητά τους.

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Περιγραφή	Ταχύτητα (χιλ./δευτ.)	Τυπική ταχύτητα	Πιθανές επιπτώσεις
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$>5 \times 10^3$	>5 μ./δευτ.	Καταστροφές κτιρίων λόγω πρόσκρουσης της μετατοπισμένης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Πολύ γρήγορη	5×10^1	3 μ./λεπτό	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.
5	Γρήγορη	5×10^{-1}	1,8 μ./ώρα	Δυνατή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα.
4	Μέτρια	5×10^{-3}	13 μ./μήνα	Μερικές προσωρινές και ανθεκτικές εγκαταστάσεις είναι δυνατό να διατηρηθούν.
3	Αργή	5×10^{-5}	1,6 μ./χρόνο	Δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας κατά την ενεργοποίηση. Μερικές φορές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της μετακίνησης.
2	Πολύ αργή	5×10^{-7}	15 χιλ./χρόνο	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες.
1	Εξαιρετικά αργή	$<5 \times 10^{-7}$	<15 χιλ./χρόνο	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με μετρήσεις από ειδικά όργανα λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

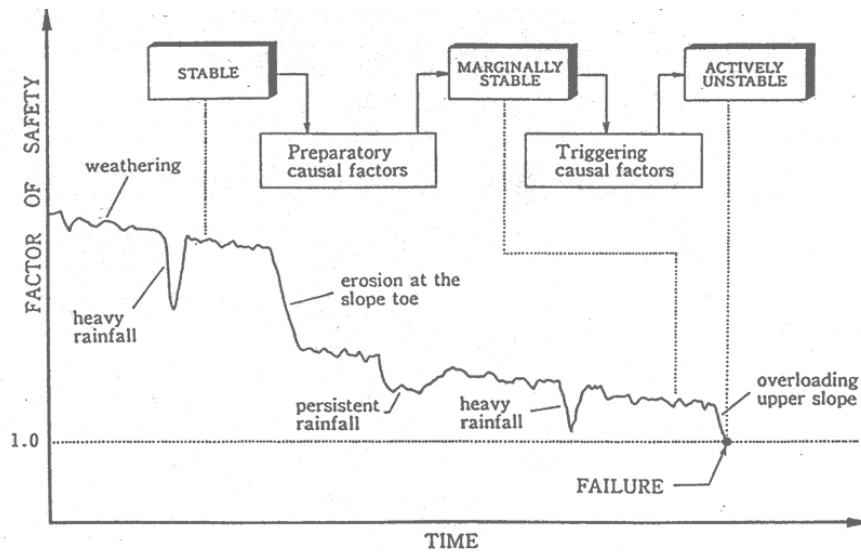
Παρατηρώντας κανείς τον Πίνακα 1.3 διαπιστώνει ότι η συγκεκριμένη ταξινόμηση εκφράζεται σε μια κλίμακα, τα διαστήματα της οποίας αυξάνονται σε πολλαπλάσια του 100

και κυμαίνονται από χιλ./χρόνο έως μ./δευτ. Επίσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα μιας εδαφικής μετακίνησης, τόσο εντονότερες είναι οι επιπτώσεις της.

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως ο προσδιορισμός της ταχύτητας μιας μετακίνησης μάζας είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς συχνά παρατηρείται διαφορετική ταχύτητα στα διάφορα στάδια εξέλιξής της ή ακόμα και στα διάφορα τμήματά της. Ακόμα πιο δύσκολος γίνεται ο προσδιορισμός της ταχύτητας όταν πρόκειται για σύνθετες μετακινήσεις, καθώς καθένας από τους συνδυαζόμενους τύπους μετακινήσεων μπορεί να έχει τη δική του ταχύτητα.

1.4 Αιτίες κατολισθήσεων

Σύμφωνα με την WP/WLI, ως προς την εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων, η χρήση απλώς του όρου «αιτίες» δεν ενδείκνυται. Υποστηρίζει ότι περισσότερο σωστή και αντιπροσωπευτική είναι η χρήση της έκφρασης «παράγοντες που επιδρούν στην αλλαγή της ευστάθειας ενός πρανούς». Από το Σχήμα 1.14 φαίνεται ότι ένα πρανές διέρχεται από τρία στάδια ευστάθειας: (α) *σταθερό*, το οποίο μπορεί και αντιστέκεται σε όλες τις δυνάμεις αποσταθεροποίησης, (β) *οριακά σταθερό*, όπου κάποια στιγμή αναμένεται η εκδήλωση αστοχίας από την επίδραση των δυνάμεων αποσταθεροποίησης, και (γ) *ενεργά ασταθές*, όπου οι δυνάμεις αποσταθεροποίησης προκαλούν συνεχείς ή περιοδικές μετακινήσεις. Τα τρία αυτά στάδια παρέχουν ένα καθοριστικό πλαίσιο για την κατανόηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση του φαινομένου και την κατάταξή τους σε δύο κύριες ομάδες: (α) στους *αιτιολογικούς παράγοντες* οι οποίοι καθιστούν το πρανές ευάλωτο στην μετακίνηση (χωρίς αυτή να έχει ξεκινήσει) και τείνουν μ' αυτόν τον τρόπο να το οδηγήσουν σε μια οριακά σταθερή κατάσταση, και (β) στους *παράγοντες ενεργοποίησης* οι οποίοι προκαλούν τη μετακίνηση, μεταβάλλοντας την κατάσταση τους πρανούς από μια οριακά σταθερή σε μια ενεργά ασταθή κατάσταση.



Σχήμα 1.14: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας ενός πρανούς σε σχέση με το χρόνο (Popescu, 2002).

Αν και η δύναμη της βαρύτητας θεωρείται ως η βασικότερη συνθήκη για την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Ανάλογα με τη «φύση» τους, αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- *Εδαφικές συνθήκες*, οι οποίες αναφέρονται στα γενικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του εδάφους.
- *Γεωμορφολογικές διεργασίες*, οι οποίες αναφέρονται στις μεταβολές της γεωμορφολογίας του εδάφους.
- *Φυσικές διεργασίες*, οι οποίες αναφέρονται στο φυσικό περιβάλλον και μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση ειδικών οργάνων, όπως σειсмоγράφοι, βροχόμετρα, κ.ά.
- *Ανθρωπογενείς διεργασίες*, οι οποίες αφορούν τις παρεμβάσεις του ανθρώπου σε μια δεδομένη περιοχή.

Πίνακας 1.4: Παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων (Popescu, 2002).

1	Εδαφικές συνθήκες
(α)	Πλαστικό, χαμηλής αντοχής υλικό
(β)	Ευαίσθητο υλικό
(γ)	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
(δ)	Αποσαθρωμένο υλικό
(ε)	Διατμημένο υλικό
(στ)	Ρωγματομένο ή διακλασμένο υλικό
(ζ)	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
(η)	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
(θ)	Διαφοροποίηση στην υδροπερατότητα και οι επιδράσεις της στη διαφοροποίηση της δυσκαμψίας
2	Γεωμορφολογικές διεργασίες
(α)	Τεκτονική ανύψωση
(β)	Ανύψωση λόγω ηφαιστείων
(γ)	Επίδραση παγετώνων
(δ)	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρσανούς
(ε)	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρσανούς
(στ)	Διάβρωση της βάσης του πρσανούς από παγετώνα
(ζ)	Διάβρωση των πλευρών του πρσανούς
(η)	Εσωτερική διάβρωση
(θ)	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρσανούς
(ι)	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση, κτλ.)
3	Φυσικές διεργασίες
(α)	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση
(β)	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
(γ)	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
(δ)	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
(ε)	Σεισμοί
(στ)	Εκρήξεις ηφαιστείων
(ζ)	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
(η)	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
(θ)	Αποσάθρωση λόγω παγετού
(ι)	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών

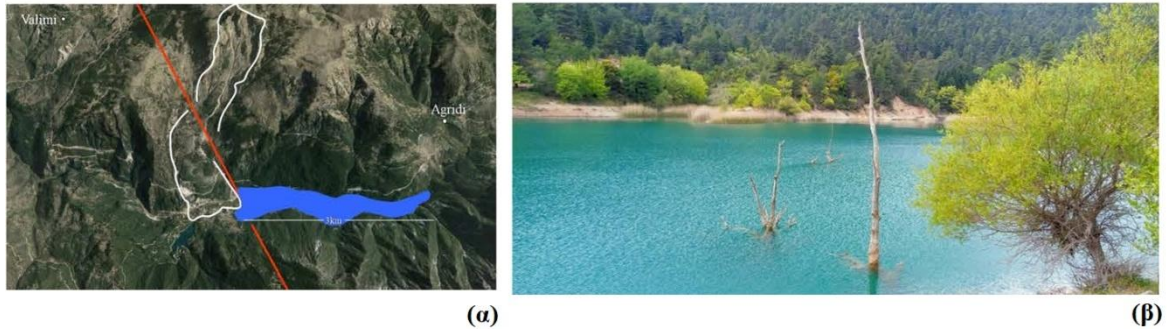
Πίνακας 1.4: (Συνέχεια).

4	Ανθρωπογενείς διεργασίες
(α)	Εκσκαφές στη βάση (δάκτυλο) του πρανούς
(β)	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανούς
(γ)	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
(δ)	Άρδευση
(ε)	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
(στ)	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές, κτλ.)
(ζ)	Αποψίλωση δασών
(η)	Λατομεία και μεταλλεία
(θ)	Δημιουργία χωματερών
(ι)	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, κτλ.)

1.5 Επιπτώσεις κατολισθήσεων

Όπως στο σύνολο των φυσικών κινδύνων, έτσι και στην περίπτωση των κατολισθήσεων, οι προκαλούμενες επιπτώσεις από την εκδήλωσή τους επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τόσο το φυσικό, όσο και το δομημένο περιβάλλον. Η αλλαγή της μορφολογίας της επιφάνειας του εδάφους συνιστά την κυριότερη επίπτωση του φαινομένου στο φυσικό περιβάλλον. Η αλλαγή αυτή εκφράζεται κυρίως μέσω της μετατόπισης του τμήματος του πρανούς (υποχώρηση της εδαφικής επιφάνειας) και της επακόλουθης επανεγκατάστασης του σε μια άλλη θέση (πλήρωση της εδαφικής επιφάνειας). Η επανεγκατάσταση του μετατοπισμένου εδαφικού υλικού συνήθως ενέχει τον κίνδυνο «μπλοκαρίσματος» της ροής ενός ποταμού ή ρέματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φυσικού φράγματος κατολίσθησης το οποίο επιτρέπει τη συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας νερού. Τα περισσότερα απ' αυτά τα φράγματα είναι βραχύβια καθώς το νερό τελικά τα διαβρώνει. Εάν, όμως, ένα τέτοιο φράγμα δεν καταστραφεί από τη φυσική διεργασία της διάβρωσης ή δεν αλλοιωθεί από την ανθρώπινη παρέμβαση, τότε δημιουργεί μια νέα δομή που έχει τη μορφή λίμνης (Highland and Bobrowsky, 2008). Η προκύπτουσα λίμνη μπορεί να υφίσταται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και κάποια στιγμή ν' «απελευθερωθεί» απροειδοποίητα προκαλώντας ένα ιδιαίτερος σοβαρό και ζημιογόνο πλημμυρικό γεγονός. Η αρνητική επίδραση στη χλωρίδα («φυσική υλοτόμηση» δασών,

καταστροφή βοσκοτόπων) και πανίδα (τραυματισμός ή απώλεια ζωής ζωικών οργανισμών), καθώς και η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού στα ύδατα (θαλάσσια, ποτάμια και λιμναία) λόγω της απόθεσης σ' αυτά ιζημάτων, αποτελούν μερικές ακόμη σημαντικές επιπτώσεις του φαινομένου στο φυσικό περιβάλλον.



Εικόνα 1.1: Επίπτωση κατολίσθησης στο φυσικό περιβάλλον. (α) Δημιουργία φράγματος κατολίσθησης στον ποταμό Κράθη από την απόθεση του υλικού της κατολίσθησης στο χωριό Τσιβλό το 2013, και (β) η διαμορφωθείσα λίμνη Τσιβλού η οποία σώζεται μέχρι σήμερα (Zygouri and Koukouvelas, 2018).

Στην περίπτωση του δομημένου περιβάλλοντος, οι επιπτώσεις από την εκδήλωση των κατολισθήσεων διακρίνονται σ' αυτές που αφορούν τις τεχνικές υποδομές κι αυτές που σχετίζονται με την ανθρώπινη ύπαρξη. Ως προς τις τεχνικές υποδομές, οι κυριότερες επιπτώσεις εντοπίζονται στη φθορά ή καταστροφή ατομικών ιδιοκτησιών/κατοικιών, επιχειρήσεων και δικτύων μεταφοράς. Η διαμόρφωση μιας «σαφούς εικόνας» για το οικονομικό κόστος αυτών των φθορών ή καταστροφών συνήθως δεν είναι εφικτή, καθώς οι αναφορές για τα διάφορα κατολισθητικά περιστατικά σπανίως συνοδεύονται από οικονομική εκτίμηση.

Γενικά, οι κατολισθήσεις επηρεάζουν συλλογικά (όπου πλήττονται πολλές ιδιοκτησίες) ή μεμονωμένα (όπου πλήττεται μια μόνο ιδιοκτησία ή μέρος αυτής) τις ατομικές ιδιοκτησίες μ' έναν άμεσο (ζημιά στην ίδια την ιδιοκτησία από κατολίσθηση) ή έμμεσο τρόπο (επίδραση στην ιδιοκτησία από κατολίσθηση σε κοντινή απόσταση). Οι ιδιοκτησίες που είναι χτισμένες σ' επιρρεπείς, στο φαινόμενο, αστικές ή οικιστικές περιοχές μπορούν να υποστούν από μερική ζημιά έως πλήρη καταστροφή, καθώς οι κατολισθήσεις δύνανται να συμβάλλουν τόσο στην αποσταθεροποίηση των θεμελίων τους, όσο και στην κατάρρευση των τοιχών τους. Επίσης, η φθορά, λόγω κατολισθήσεων, στα επιφανειακά και υπόγεια δίκτυα κοινής ωφέλειας

(ηλεκτρισμού, ύδρευσης και αποχέτευσης) έχει άμεσο αντίκτυπο σ' όλες τις επωφελούμενες απ' αυτά, ιδιοκτησίες.



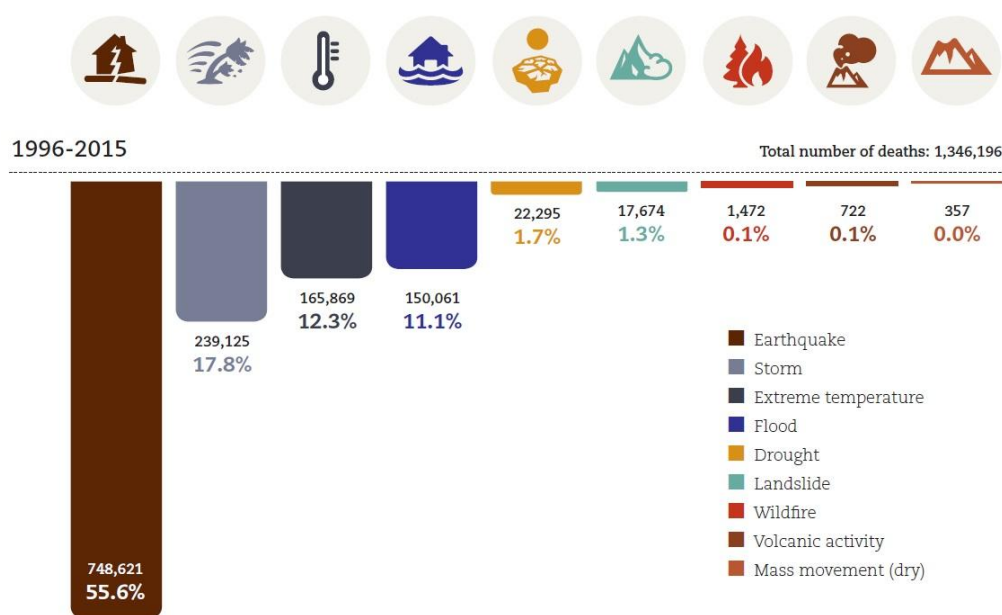
Εικόνα 1.2: Επίπτωση κατολίσθησης στο δομημένο περιβάλλον. Καταστροφή ατομικής ιδιοκτησίας από κατολίσθηση στη Σιέρα Λεόνε το 2017 (World Bank Group, 2017).

Κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τις ατομικές ιδιοκτησίες επηρεάζονται από την εκδήλωση του φαινομένου και οι επιχειρήσεις. Η φθορά, τόσο στις εγκαταστάσεις τους, όσο και στους δρόμους πρόσβασης σ' αυτές, έχει ως άμεση συνέπεια την απώλεια οικονομικών πόρων λόγω της διακοπής των εργασιών τους. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις επιχειρήσεων «κοινής χρήσης» (π.χ. μια επιχείρηση τροφίμων) οι οποίες απευθύνονται σ' ένα σημαντικό αριθμό ατόμων, η σημασία αυτής της διακοπής, εκτός από τις αναμενόμενες οικονομικές, για τις ίδιες τις επιχειρήσεις, διαστάσεις παίρνει ακόμη μεγαλύτερες λόγω της αδυναμίας ικανοποίησης βασικών αναγκών των εξυπηρετούμενων ατόμων.

Εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους (εκδήλωση χωρίς προειδοποίηση και με μεγάλου ισχύ), οι μεγάλης ταχύτητας κατολισθήσεις, όπως οι ροές κορημάτων, αποτελούν τον πιο ζημιογόνο τύπο κατολίσθησης για τις προαναφερθείσες δομές. Σε αντίθεση με την πλήρη καταστροφή που αυτές συνήθως προκαλούν, οι μικρής ταχύτητας κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν μερική ζημιά, ενώ κι ο αργός ρυθμός μετακίνησης τους μπορεί να επιτρέψει την εφαρμογή μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων τους. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων, λόγω της «φύσης» τους και του γεγονότος ότι μπορούν να συνεχίσουν να μετακινούνται μετά από ημέρες, εβδομάδες ή μήνες, ακόμη κι αυτού του τύπου οι κατολισθήσεις μπορούν να επιφέρουν τελικώς την πλήρη καταστροφή των δομών. Όλοι οι τύποι κατολισθήσεων, επίσης, έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν προσωρινή ή μακροπρόθεσμη διακοπή της κυκλοφορίας

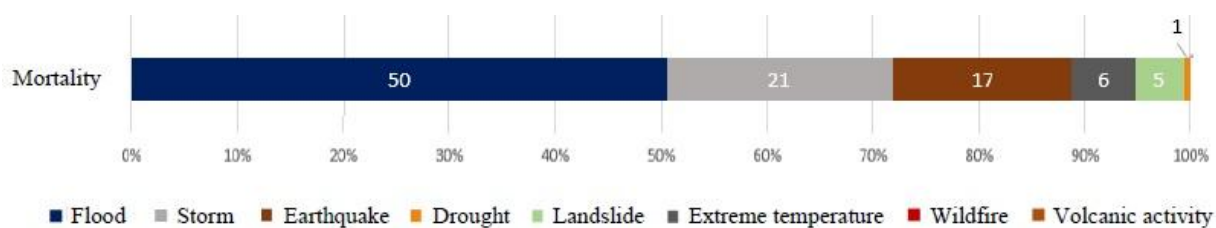
στα διάφορα δίκτυα μεταφοράς. Η εναπόθεση κατολισθητικού υλικού (ως επί το πλείστον από πτώσεις βράχων) κατά μήκος των οδικών και σιδηροδρομικών αξόνων, καθώς και η καθίζηση δρόμων λόγω της αστοχίας των υποκείμενων χαλαρών εδαφικών τμημάτων, συνιστούν τα πιο κοινά προβλήματα.

Η σημαντικότερη, ωστόσο, από τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων στο δομημένο περιβάλλον, δεν είναι άλλη από την απώλεια ανθρώπινων ζώων. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία του Κέντρου Έρευνας για την Επιδημιολογία των Καταστροφών (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED)⁵, για το χρονικό διάστημα 1996-2015, το 1,3% των καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές οφείλεται σε κατολισθήσεις (Σχήμα 1.15). Το ίδιο ποσοστό, μόνο για το 2016, ανέρχεται στο 5% (Σχήμα 1.16), ενώ μόνο για το πρώτο εξάμηνο του 2017, στο 25% (Σχήμα 1.17). Ενδεικτικό για το εξάμηνο αυτό είναι, επίσης, το γεγονός πως στην κατάταξη των δέκα πρώτων φυσικών καταστροφών με βάση τον αριθμό θανάτων που προκάλεσαν, οι τρεις από τις δέκα αφορούν κατολισθήσεις (Σχήμα 1.18).

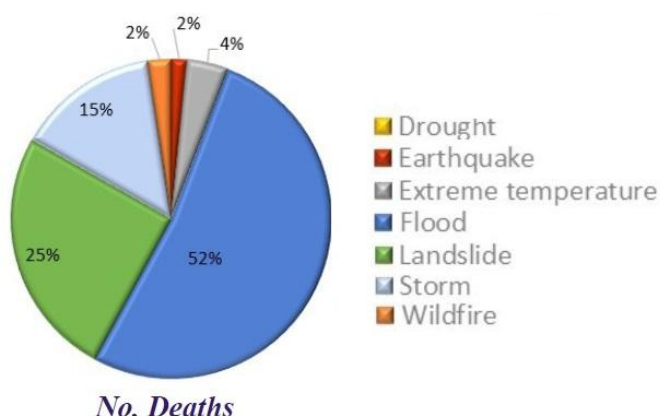


Σχήμα 1.15: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές την περίοδο 1996-2015 (CRED, 2016).

⁵ Το CRED ιδρύθηκε στο Βέλγιο, το 1973, στη Σχολή Δημόσιας Υγείας του Καθολικού Πανεπιστημίου της Λουβέν (ή αλλιώς Λέουβεν) ως ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός. Οι δραστηριότητες του επικεντρώνονται κυρίως στη μελέτη της δημόσιας υγείας και των κοινωνικο-οικονομικών επιπτώσεων που προέρχονται από μαζικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, συμπεριλαμβανομένων της επιδημιολογίας ασθενειών, των φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών, και των ανθρώπινων συγκρούσεων.



Σχήμα 1.16: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές το έτος 2016 (CRED, 2016b).



No. Deaths

Σχήμα 1.17: Ποσοστά καταγεγραμμένων θανάτων από φυσικές καταστροφές το πρώτο εξάμηνο του έτους 2017 (CRED, 2017).

The 10 natural disasters over the first semester of 2017
By number of deaths

Disaster	Month	Country	No. deaths
Flood	May	Sri Lanka	292
Landslide	March-April	Colombia	273
Flood	Oct. 2016 – Feb.2017	Zimbabwe	246
Flood	June-August	India	213
Flood	March	Peru	177
Landslide	June	Bangladesh	160
Tropical cyclone	January-March	Zimbabwe	126
Tropical cyclone 'Enawo'	March	Madagascar	99
Landslide	June	China	83
Flood	June-July	China	82

Σχήμα 1.18: Οι δέκα πρώτες φυσικές καταστροφές για το πρώτο εξάμηνο του 2017 με βάση τον αριθμό θανάτων που προκάλεσαν (CRED, 2017).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αρκετές περιπτώσεις, ο αριθμός των θυμάτων λόγω κατολισθήσεων μπορεί να χαρακτηριστεί «χονδροειδώς υποτιμημένος». Αυτό οφείλεται στο λανθασμένο τρόπο καταχώρησης των στοιχείων στις διάφορες βάσεις δεδομένων κατά τη διαδοχική εκδήλωση δύο διαφορετικών φυσικών κινδύνων. Αποτέλεσμα αυτής της λανθασμένης καταχώρησης είναι ο αριθμός των θυμάτων ν' αποδίδεται στο φυσικό κίνδυνο που λειτούργησε ως «μηχανισμός ενεργοποίησης» του άλλου, κι όχι στο φυσικό κίνδυνο που πραγματικά ευθυνόταν γι' αυτά. Για παράδειγμα, στην πλειοψηφία των βάσεων δεδομένων παγκοσμίως, τα 30.000 περίπου θύματα στη Βενεζουέλα το 1999, αποδίδονται σε πλημμύρα κι όχι στις κατολισθήσεις (σε μορφή ροών κορημάτων) που προκλήθηκαν απ' αυτήν, και οι οποίες ευθύνονται για τα περισσότερα απ' αυτά τα θύματα.

1.6 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

Στον τομέα της αντιμετώπισης του φαινομένου των κατολισθήσεων, διακρίνονται δύο κύριοι τύποι μέτρων: (α) τα μέτρα πρόληψης, που λαμβάνονται για ν' αποφευχθεί μια πιθανή κατολίσθηση, και (β) τα μέτρα ανάσχεσης ή αναχαίτισης, που λαμβάνονται για ν' αδρανοποιηθεί μια υφιστάμενη κατολίσθηση ή ν' αποτραπεί η ενεργοποίηση μιας παλαιότερης. Σύμφωνα με τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, η επιτυχία και των δύο τύπων μέτρων εξαρτάται από την επαρκή γνώση των παρακάτω χαρακτηριστικών (<http://civilprotection.gr/el/katolισθησεις-καθιζήσεις>, 20/12/2017):

- Της γεωλογικής δομής της περιοχής.
- Των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν.
- Των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζονται.
- Των εδαφοτεχνικών και βραχομηχανικών μεγεθών των σχηματισμών που κατολισθαίνουν ή υπάρχει περίπτωση να κατολισθήσουν.
- Το είδος του υλικού (βραχώδες ή εδαφικό) που κατολισθαίνει ή υπάρχει περίπτωση να κατολισθήσει.

Γενικά, οποιοδήποτε επανορθωτικό μέτρο κι αν εφαρμόζεται, πρέπει να παρέχει το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα της μείωσης των δυνάμεων ενεργοποίησης/αποσταθεροποίησης ή αντιστρόφως της αύξησης των δυνάμεων αντίστασης/σταθεροποίησης. Στα πλαίσια αυτά, η

Επιτροπή της Διεθνής Ένωσης Γεωλογικών Επιστημών για την Αποκατάσταση των Κατολισθήσεων (International Union of Geological Sciences Commission on Landslide Remediation) συνέταξε ένα συνοπτικό κατάλογο ο οποίος περιείχε διορθωτικά μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου (Πίνακας 1.5). Τα μέτρα αυτά είναι κατηγοριοποιημένα σε τέσσερις κύριες ομάδες: (1) την τροποποίηση της γεωμετρίας των πρανών, (2) την αποστράγγιση, (3) την κατασκευή δομών αντιστήριξης, και (4) την εσωτερική ενίσχυση των πρανών.

Πίνακας 1.5: Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων (Popescu, 2002).

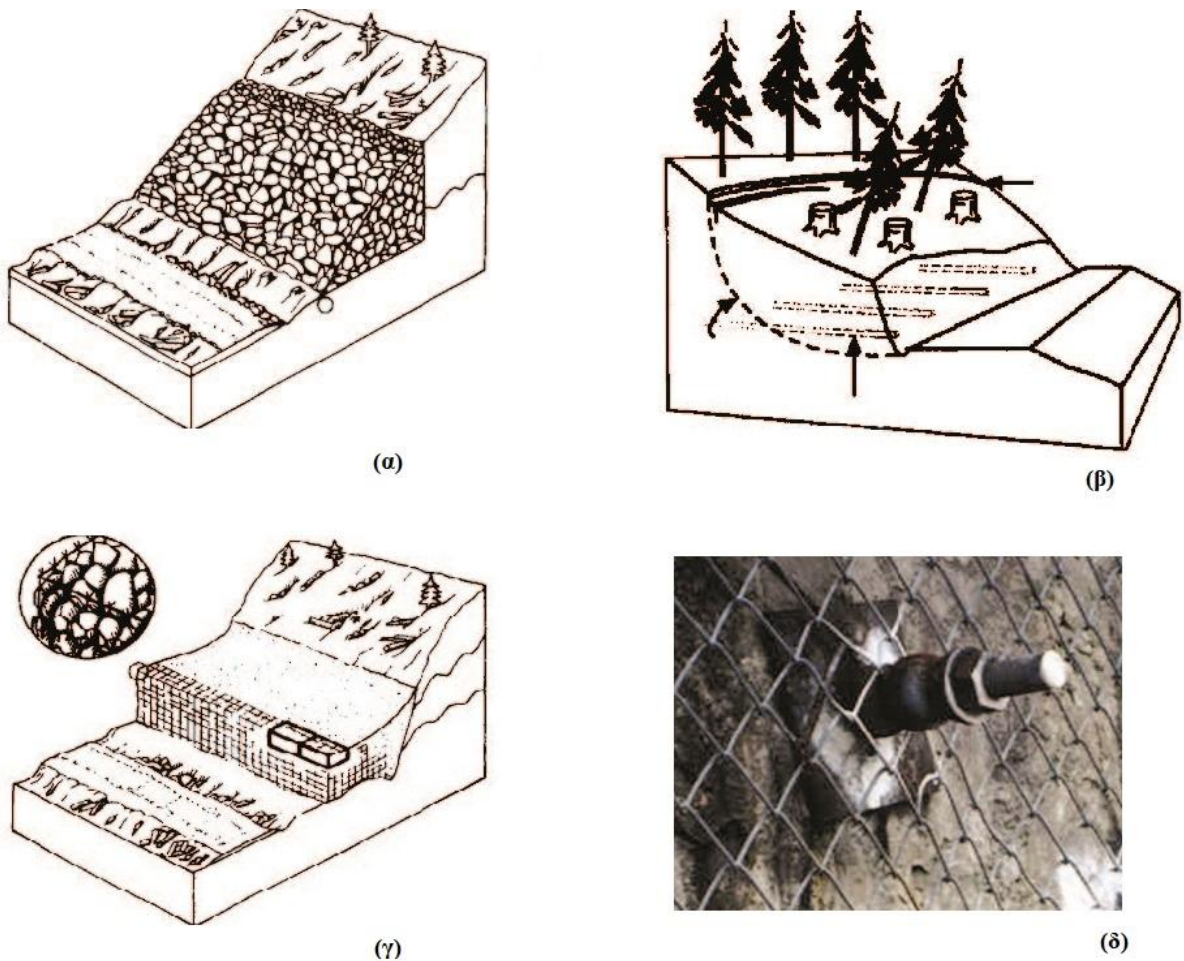
1	Τροποποίηση της γεωμετρίας των πρανών
(α)	Αφαίρεση υλικού από την περιοχή που δίνει ώθηση στη κατολίσθηση (με πιθανή αντικατάσταση από ελαφρύ συμπλήρωμα)
(β)	Προσθήκη υλικού στην περιοχή διατηρώντας την ευστάθεια (αντίβαρο ή συμπλήρωμα)
(γ)	Μείωση της γενικής γωνίας κλίσεων
2	Αποστράγγιση
(α)	Η επιφάνεια στραγγίζει για να εκτρέψει το νερό από τη ροή επάνω στην περιοχή ολίσθησης (συλλέγοντας τάφρους και σωλήνες)
(β)	Ρηχοί ή βαθιοί αγωγοί τάφρων γεμάτοι με τα γεωυλικά ελεύθερης-αποστράγγισης (συμπληρώματα χονδροειδών κόκκων και γεωσυνθετικών)
(γ)	Στήριγμα των χονδρόκοκκων υλικών (υδρολογική επίδραση)
(δ)	Κάθετες (μικρής διαμέτρου) γεωτρήσεις με άντληση ή αυτό-αποστράγγιση
(ε)	Κάθετα (μεγάλης διαμέτρου) φρεάτια με αποστράγγιση βαρύτητας
(στ)	Οριζόντιοι σωλήνες αποστράγγισης
(ζ)	Σήραγγες αποστράγγισης, στοές
(η)	Κενή απομάκρυνση νερού
(θ)	Αποστράγγιση με μετάγγιση
(ι)	Ηλεκτρο-οσμωτική απομάκρυνση νερού
(κ)	Φύτευση βλάστησης (υδρολογική επίδραση)

Πίνακας 1.5: (Συνέχεια).

3	Κατασκευή δομών αντιστήριξης
(α)	Τοίχοι διατήρησης βαρύτητας
(β)	Φατνωματικοί τοίχοι
(γ)	Τοίχοι με συρματοκιβώτια
(δ)	Παθητικοί πάσσαλοι, μεσόβαθρα και κιβώτια
(ε)	Επί τόπου ενισχυμένοι τοίχοι έγχυτου σκυροδέματος
(στ)	Ενισχυμένα έργα συγκράτησης εδαφών με ταινία/λωρίδα - πολυμερές/μεταλλικά στοιχεία ενίσχυσης
(ζ)	Στήριγμα χονδρόκοκκου υλικού (μηχανική επίδραση)
(η)	Δίχτυα παρακράτησης των μετώπων των βραχώδη πρανών
(θ)	Συστήματα μείωσης ή παύσης των καταπτώσεων βράχων (τάφροι, πάγκοι, περιφράξεις και τοίχοι)
(ι)	Προστατευτικά βραχώδη/τσιμεντένια τεμάχια ενάντια στη διάβρωση
4	Εσωτερική ενίσχυση των πρανών
(α)	Μπουλόνια βράχων
(β)	Μικροπάσσαλοι
(γ)	Κάρφωμα εδάφους
(δ)	Αγκυρώσεις (προεντεταμένες ή μη)
(ε)	Τσιμεντένεση
(στ)	Κολώνες πέτρας ή ασβέστη/τσιμέντου
(ζ)	Θερμική επεξεργασία
(η)	Πάγωμα
(θ)	Ηλεκτροοσμωτικές αγκυρώσεις
(ι)	Φύτευση βλάστησης (δυναμική μηχανική επίδραση)

Οι ομάδες μέτρων που σχετίζονται με την τροποποίηση της γεωμετρίας των πρανών, και την αποστράγγιση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων τυγχάνουν ευρείας χρήσης και θεωρούνται από τις πλέον αποτελεσματικές πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου. Σε γενικές γραμμές, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, τα «ελαφρώς μηχανικά, μη δομικά (που δεν προϋποθέτουν κατασκευές)» διορθωτικά μέτρα τείνουν να προτιμώνται λόγω

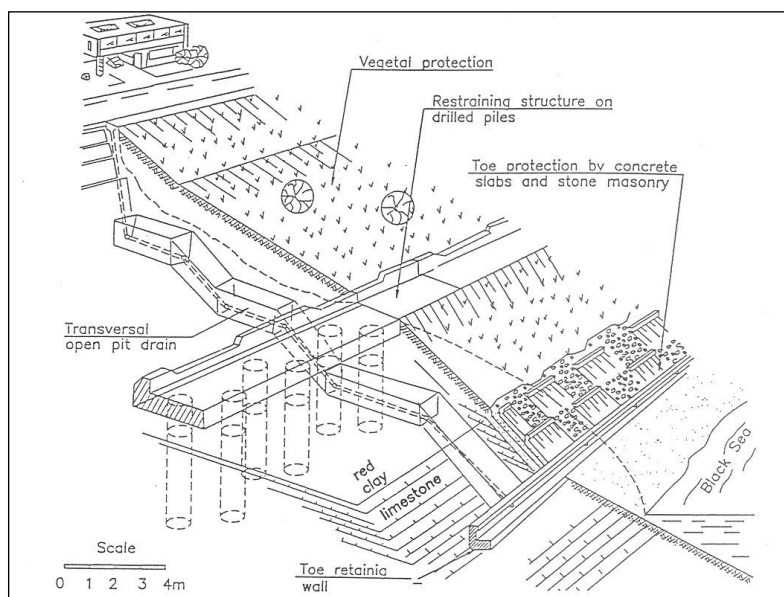
κύριως του σημαντικά χαμηλότερου κόστους τους έναντι των «μηχανικών, δομικών», και του μειωμένου κινδύνου πρόκλησης αστοχιών στα πρανή κατά τη διάρκεια της εφαρμογής τους.



Σχήμα 1.19: Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων. (α) Προσθήκη υλικού στην περιοχή διατηρώντας την ευστάθεια (1β στον Πίνακα 1.5), (β) Οριζόντιοι σωλήνες αποστράγγισης (2στ στον Πίνακα 1.5), (γ) Τοίχοι με συρματοκιβώτια (3γ στον Πίνακα 1.5), και (δ) Μπουλόνια βράχων (4α στον Πίνακα 1.5) (Highland and Bobrowsky, 2008).

Πολλές φορές, η εφαρμογή ενός μεμονωμένου διορθωτικού μέτρου δεν κρίνεται επαρκώς αποδοτική με αποτέλεσμα την εφαρμογή ενός συνδυασμού δύο ή περισσότερων μέτρων από τις προαναφερθείσες κύριες ομάδες (Σχήμα 1.20). Σε κάθε περίπτωση, οποιοδήποτε μέτρο (ή συνδυασμός μέτρων) κι αν επιλέγεται να εφαρμοστεί, απαιτεί αρχικώς την επαγγελματική συμβολή ειδικών, επί του φαινομένου και των επιλεγμένων έργων, ατόμων

(όπως γεωτεχνικό, πολιτικό μηχανικό, κ.ά.), και μετέπειτα τη συνεχή και κατάλληλη συντήρησή του προκειμένου να μην αχρηστευτεί.



Σχήμα 1.20: Σύνθετα έργα σταθεροποίησης στην πόλη Constantza, ρουμανική ακτή της Μαύρης Θάλασσας (Popescu, 2002).

Κεφάλαιο 2: Γεωγραφική κατανομή των κατολισθήσεων

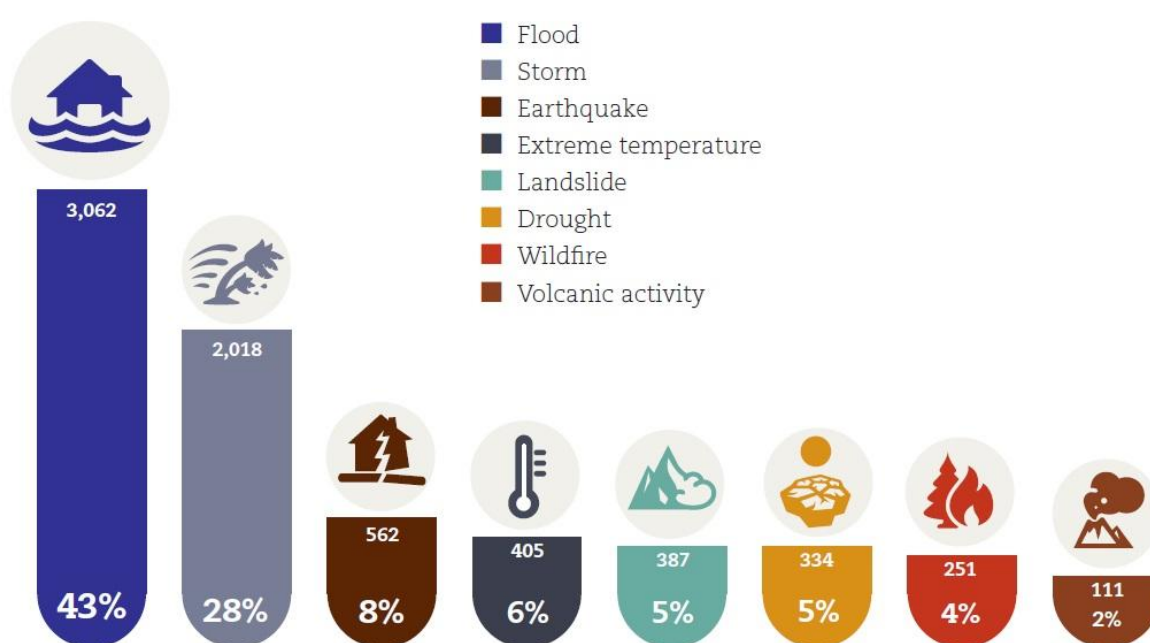
2.1 Παγκόσμια διάσταση

Θεωρείται κοινώς αποδεκτό ότι το φαινόμενο των κατολισθήσεων μπορεί να εκδηλωθεί σχεδόν οπουδήποτε στον κόσμο. Η «παραδοσιακή» άποψη που επικρατούσε στο παρελθόν, σύμφωνα με την οποία η εκδήλωση των κατολισθήσεων περιορίζεται σε εξαιρετικώς απότομα πρηνή μη οικιστικών περιοχών, δε φαίνεται ν' αντανάκλα με ακρίβεια πλέον την πραγματική φύση και διάσταση του φαινομένου.

Οι περισσότερες χώρες του κόσμου έχουν επηρεαστεί κατά κάποιο τρόπο από κατολισθήσεις (Highland and Bobrowsky, 2008). Μέχρι τα τέλη περίπου της δεκαετίας του '80, η αναγνώριση και οπτικοποίηση της γεωγραφικής κάλυψης του φαινομένου συνιστούσε ένα αρκετά δύσκολο έργο, καθώς ήταν λίγες οι χώρες οι οποίες βρίσκονταν σε μια διαδικασία συστηματικής καταγραφής και στενής παρακολούθησης των κατολισθητικών γεγονότων που εκδηλώνονταν στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, αυτό άλλαξε τα επόμενα χρόνια κατά τα οποία σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη βάσεων δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο (Van Den Eeckhaut and Hervás, 2012). Σήμερα, ένας σημαντικός αριθμός χωρών έχει αναπτύξει και διαθέτει τέτοιου είδους βάσεις δεδομένων (π.χ. του BGS για τη Μεγάλη Βρετανία, <http://www.bgs.ac.uk/geoindex/>, 03/04/2018 ή του CNR-IRPI για την Ιταλία, <http://webmap.irpi.cnr.it/>, 03/04/2018 ή του NIED για την Ιαπωνία, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/en/index.html>, 03/04/2018) υποστηριζόμενες από διαδικτυακές χαρτογραφικές (web-GIS) υπηρεσίες.

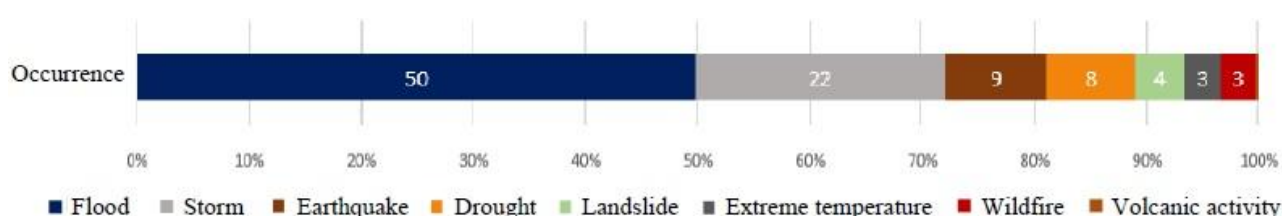
Δεδομένου ότι, όμως, οι βάσεις δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων των διαφόρων χωρών παρουσίαζαν συχνά αρκετά μειονεκτήματα που σχετίζονταν με τη χωρική και χρονική πληρότητά τους, καθώς και με το γεγονός ότι επικεντρώνονταν κυρίως σε κατολισθήσεις που είχαν πλήξει υποδομές (όπως οδικούς άξονες), ήταν αναγκαία η δημιουργία μιας πλήρους και ενιαίας βάσης δεδομένων με παγκόσμια κάλυψη. Το κενό αυτό ήρθε να καλύψει η Βάση δεδομένων Γεγονότων Έκτακτης Ανάγκης (Emergency Events Database – EM-DAT, https://www.emdat.be/emdat_db/, 03/04/2018) του CRED. Η EM-DAT αποτελεί μια παγκόσμια βάση δεδομένων με στοιχεία που αφορούν την εκδήλωση και τις επιπτώσεις πάνω από 21.000 φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών, από το 1900 μέχρι σήμερα. Ως βασικούς

στόχους της έχει: (α) την ενημέρωση της ανθρωπιστικής δράσης (σε εθνικό και διεθνές επίπεδο) προκειμένου να βελτιωθεί η λήψη αποφάσεων σε θέματα ετοιμότητας καταστροφών, (β) τη διάχυση αντικειμενικών και αξιόπιστων στοιχείων για την εκτίμηση των επιπτώσεων των καταστροφών, και (γ) την παροχή βοήθειας στους υπευθύνους χάραξης πολιτικής σχετικά με τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της συγκεκριμένης βάσης δεδομένων, για την εικοσαετία 1995-2015, οι κατολισθήσεις αντιστοιχούν στο 5% του συνόλου των φυσικών καταστροφών σε παγκόσμιο επίπεδο.

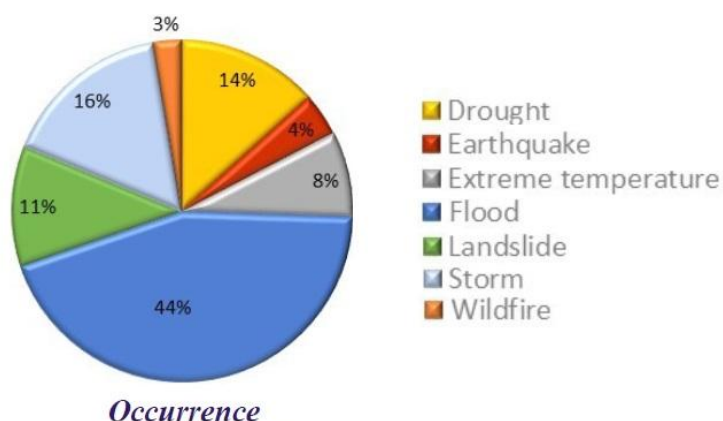


Σχήμα 2.1: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών την περίοδο 1995-2015 (CRED, 2015).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το ίδιο ποσοστό, μόνο για το 2016, ανέρχεται στο 4% (Σχήμα 2.2), ενώ μόνο για το πρώτο εξάμηνο του 2017, στο 11% (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών το έτος 2016 (CRED, 2016b).

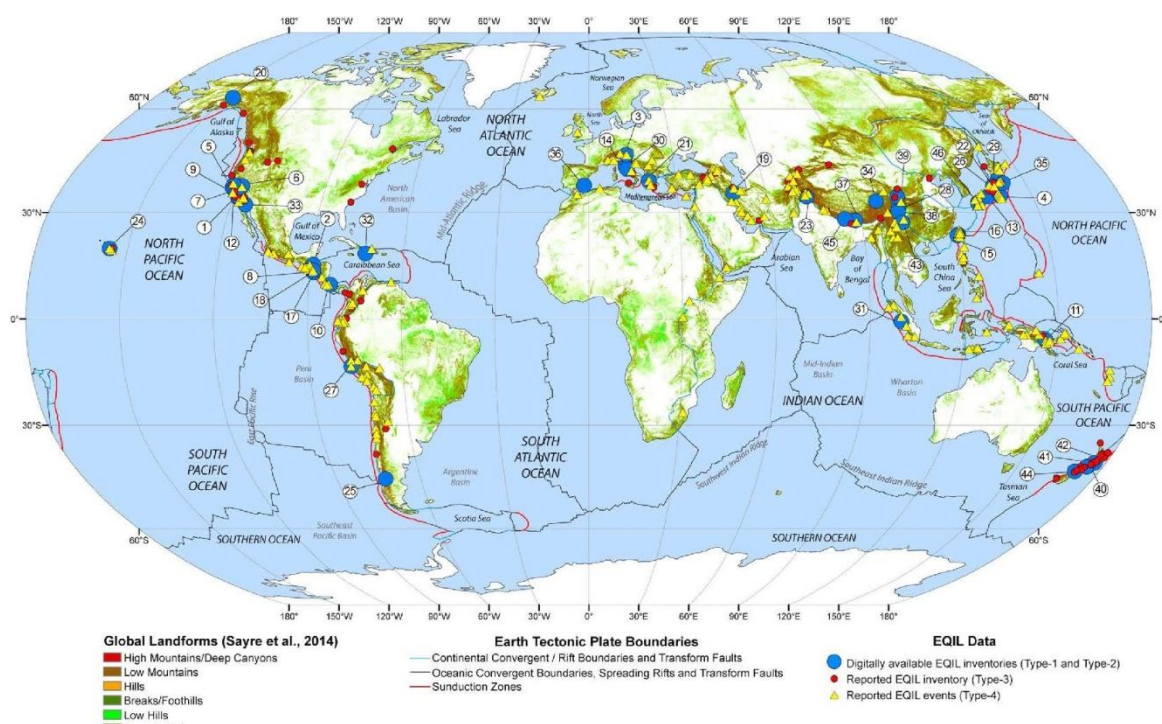


Σχήμα 2.3: Ποσοστά εκδήλωσης φυσικών καταστροφών το πρώτο εξάμηνο του έτους 2017 (CRED, 2017).

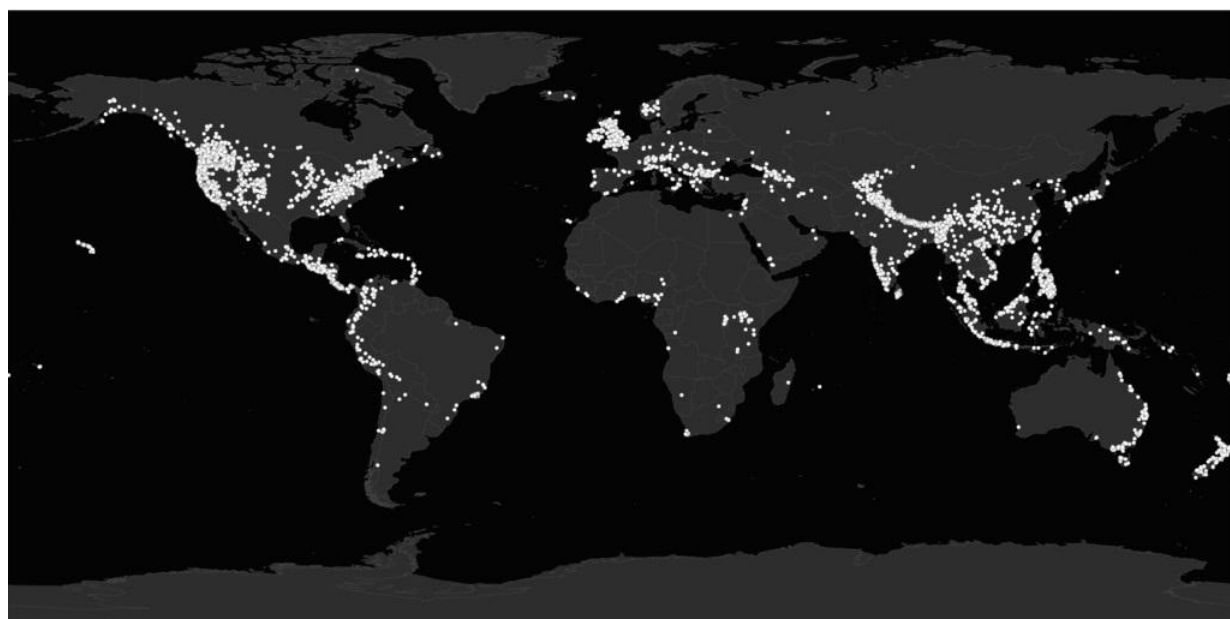
Παρατηρείται, δηλαδή, μια ιδιαίτερος ανοδική τάση του αριθμού των εκδηλωμένων παγκοσμίως κατολισθήσεων τα τελευταία χρόνια. Οι κυριότεροι παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στη διαμόρφωση αυτής της τάσης μπορούν να εντοπιστούν στους εξής:

- Στη συνεχή πληθυσμιακή αύξηση και την επακόλουθη χωρική διεύρυνση των οικιστικών δομών και δραστηριοτήτων. Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός συνεχίζει ν' αυξάνεται, καθίσταται όλο και περισσότερο ευάλωτος στον κατολισθητικό κίνδυνο. Οι άνθρωποι, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, τείνουν να μετακινούνται σε νέες εκτάσεις που ενώ θεωρούνται επιρρεπείς στο φαινόμενο, πλέον συνιστούν τους μόνους διαθέσιμους χώρους για την εγκατάσταση του συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού. Οι πολλές φορές ελλιπείς ή ανύπαρκτες πολιτικές χρήσης γης επιτρέπουν την κατασκευή κτιρίων και άλλων έργων υποδομής σ' αυτές τις εκτάσεις αυξάνοντας μ' αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα αστοχίας του εδάφους.
- Στις έντονες μεταβολές που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στις κλιματολογικές συνθήκες και τη σεισμική δραστηριότητα των διαφόρων περιοχών του πλανήτη. Η συσχέτιση της αύξησης του αριθμού των εκδηλωμένων κατολισθήσεων με την σημαντική αύξηση στην ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων, και στη συχνότητα των σεισμικών γεγονότων, αναδεικνύει τις συγκεκριμένες φυσικές διεργασίες ως τους κυριότερους «μηχανισμούς ενεργοποίησης» του φαινομένου. Η παρατηρούμενη αυτή συσχέτιση ενισχύεται και από τα ακόλουθα Σχήματα τα οποία παρουσιάζουν, για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους (1968-2008 και

2007-2017, αντιστοίχως), την παγκόσμια γεωγραφική κατανομή των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων που έχουν προκληθεί από σεισμούς και βροχοπτώσεις, αντιστοίχως.



Σχήμα 2.4: Παγκόσμια κατανομή των προκαλούμενων από σεισμό κατολισθητικών γεγονότων για την περίοδο 1968-2008 (Tanyaş et al., 2017).



Σχήμα 2.5: Παγκόσμια κατανομή των προκαλούμενων από βροχόπτωση κατολισθητικών γεγονότων για την περίοδο 2007-2017 (NASA, <https://svs.gsfc.nasa.gov/4632>, 07/06/2018).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω Σχήματα, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από την εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων, εντοπίζονται κυρίως στην νότια Ασία, στη βόρεια, κεντρική και νότια Αμερική, καθώς και στην κεντρική και νότια Ευρώπη.

Στη συνέχεια παρατίθενται χαρακτηριστικά παραδείγματα μερικών εκ των σημαντικότερων και πιο καταστροφικών κατολισθήσεων που έχουν εκδηλωθεί παγκοσμίως την τελευταία εικοσαετία.

- ❖ *Βενεζουέλα, 1999:* Αποτελεί τη χειρότερη φυσική καταστροφή της χώρας και μια από τις μεγαλύτερες στην Αμερικάνικη ήπειρο, κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα (Pérez, 2001). Η μεγάλης ποσότητας (πάνω από 1.000 χιλ. νερού) και έντασης βροχόπτωση που ξεκίνησε στις αρχές του Δεκέμβρη στην επαρχία Vargas (στο βόρειο παράκτιο τμήμα της χώρας) και διήρκησε για 14 περίπου ημέρες, είχε ως αποτέλεσμα τον κορεσμό του εδάφους και την εμφάνιση εκτεταμένων πλημμυρικών γεγονότων στην περιοχή. Τα γεγονότα αυτά, σε συνδυασμό με τις απότομες κλίσεις των πρανών στο ορεινό τμήμα, διαμόρφωσαν τις συνθήκες για την εκδήλωση ενός σημαντικού αριθμού κατολισθήσεων οι οποίες έλαβαν χώρα το διάστημα 14η-16η Δεκέμβρη. Ένας αρκετά μεγάλος όγκος (περίπου 2.000.000 μ³) μάζας αποτελούμενη από ιζήματα, κορμούς δέντρων και αποκομμένους βράχους, μετακινήθηκε με τη μορφή ροών κορημάτων, μέσω των πλημμυρικών ρεμάτων, από τα ανάντη τμήματα προς τις κοιλάδες της παράκτιας ζώνης διανυώντας μια απόσταση 50 χλμ. «Αποδέκτες» των συνεπειών των συγκεκριμένων κατολισθήσεων ήταν το σύνολο των οικισμών εντός της πληγείσας περιοχής στους οποίους περισσότερα από 120.000 κτίρια είτε καταστράφηκαν ολοσχερώς, είτε υπέστησαν σοβαρές υλικές ζημιές (μ' εκτιμώμενο κόστος της τάξης των 2 δισεκατομμυρίων δολαρίων). Η σημαντικότερη συνέπεια, ωστόσο, δεν ήταν άλλη από την απώλεια 30.000 περίπου ανθρώπινων ζώων.



Εικόνα 2.1: Κατολίσθηση στη Βενεζουέλα το 1999 (Pérez, 2001).

- ❖ *Φιλιππίνες, 2006:* Τη 17η Φεβρουαρίου, μια από τις μεγαλύτερες και πιο καταστροφικές κατολίσθησεις χιονοστιβάδας κορημάτων εκδηλώθηκε στη νότια επαρχία του νησιού Leyte. Η κατολίσθηση ξεκίνησε αρχικώς σ' ένα απότομο πρανές ύψους 450 μ., και διανύοντας μια απόσταση 3.800 μ. οριζοντίως και 810 μ. καθέτως, κατέληξε τελικώς στην πυκνοκατοικημένη κοιλάδα του ποταμού Himbungao. Αποτελούμενη κυρίως από ιζηματογενή και ηφαιστειακά πετρώματα, η συνολικού όγκου 15.000.000 μ³ μετακινούμενη μάζα κατέκλυσε το χωριό Guinsaugon προκαλώντας το θάνατο περισσότερων από 1.100 ανθρώπων (μεταξύ των οποίων και 250 μαθητές) (Evans et al., 2007). Οι αιτίες της αποδίδονται σε γεωτεκτονικούς παράγοντες, πλήρως συνδεδεμένους με το Ρήγμα των Φιλιππίνων το οποίο συνιστά μια από τις σημαντικότερες γεωτεκτονικές δομές του δυτικού Ειρηνικού.



Εικόνα 2.2: Κατολίσθηση στις Φιλιππίνες το 2006 (Evans et al., 2007).

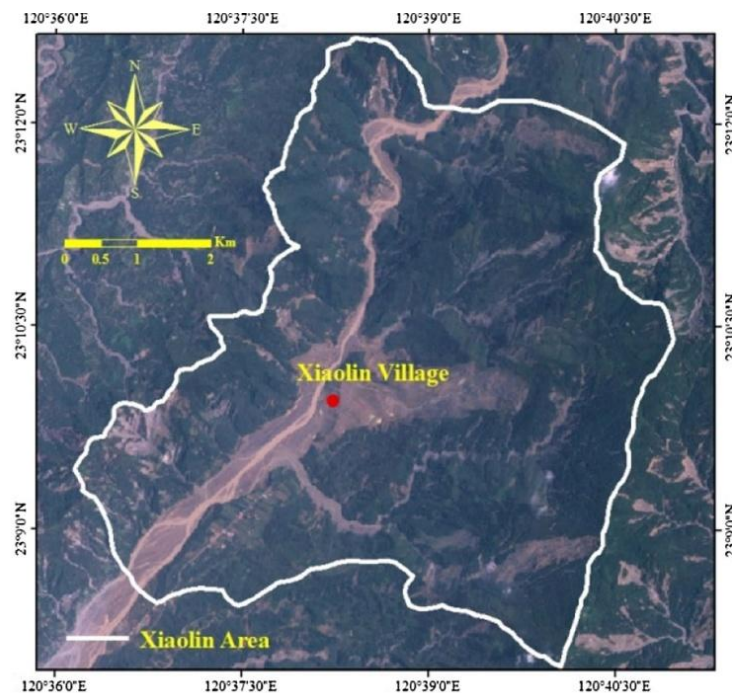
- ❖ *Κίνα, 2008*: Τη 12η Μαΐου, στην επαρχία Sichuan, σημειώθηκε ένας από τους ισχυρότερους σεισμούς της χώρας τα τελευταία χρόνια. Με μέγεθος 8 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, εστιακό βάθος 19 χλμ. και επίκεντρο 90 χλμ. βορειοδυτικά της πόλης Chengdu, ο σεισμός (γνωστός ως σεισμός του Wenchuan) επέφερε ως άμεσο αποτέλεσμα την εκδήλωση περισσότερων από 15.000 κατολισθητικών γεγονότων σε μια από τις πιο απότομες ορεινές περιοχές του κόσμου (με έκταση 50.000 χλμ²) (Chuan et al., 2009). Έχοντας τη μορφή (βαθιών) ολισθήσεων γαιών, ροών κορημάτων και πτώσεων βράχων, οι διαφορετικού μεγέθους και όγκου «μετασεισμικές» κατολισθήσεις προκάλεσαν το θάνατο 20.000 περίπου ανθρώπων (το 1/4 του συνολικού αριθμού θυμάτων του σεισμού). Η φθορά έως πλήρη καταστροφή οικιστικών δομών (κτιρίων και τμημάτων οδικού δικτύου) σε πολλές πόλεις, καθώς και ο αφανισμός ολόκληρων χωριών αποτέλεσαν επίσης μερικές από τις κύριες συνέπειες τους. Επιπλέον, οι κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν κοντά σε ποτάμια, διέκοψαν τη ροή των ίδιων και των ρεμάτων τους, δημιουργώντας μ' αυτό τον τρόπο περισσότερες από 30, απειλητικές για τους κατοίκους των κατάντη οικισμών, λίμνες φραγμάτων κατολίσθησης.



Εικόνα 2.3: Μια από τις πολλές κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό του Wenchuan το 2008 (Chuan et al., 2009).

- ❖ *Ταϊβάν, 2009*: Το διάστημα 7ης-10ης Αυγούστου, ο τυφώνας “Morakot” έπληξε το νότιο τμήμα της χώρας με ισχυρούς νοτιοδυτικούς ανέμους και ακραίες

βροχοπτώσεις. Αυτές οι, ιδιαίτερος μεγάλης διάρκειας και έντασης, βροχοπτώσεις (συνολικά πάνω από 2.500 χιλ. νερού) συνέβαλαν στην εκδήλωση εκτεταμένων κατολισθήσεων σε πολλά χωριά της επαρχίας Kaohsiung. Μεταξύ των προκληθέντων κατολισθήσεων, η σημαντικότερη ήταν αυτή που εκδηλώθηκε στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Xiaolin (ή Siaolin). Με έκταση 570.000 μ², όγκο περίπου 24.000.000 μ³ και μέσο βάθος 42 μ., η συγκεκριμένη κατολίσθηση κορημάτων έθαψε ολόκληρο το χωριό προκαλώντας το θάνατο 500 περίπου ανθρώπων (Doo et al., 2011). Λόγω των καταστροφικών συνεπειών της και κυρίως του αριθμού των θυμάτων της, έχει χαρακτηριστεί ως η πιο σοβαρή κατολισθητική τραγωδία στην ιστορία της χώρας.



Εικόνα 2.4: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Xiaolin το 2009 (Deng et al., 2016).

- ❖ *Ουγκάντα, 2010:* Οι έντονες βροχοπτώσεις που ξεκίνησαν την 25η Φεβρουαρίου και διήρκεσαν για πέντε ημέρες είχαν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση αρκετών κατολισθήσεων στο νομό Bududa. Απ' αυτές, η πιο καταστροφική ήταν η ροή κορημάτων που έλαβε χώρα την 1η Μαρτίου στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Nametsi (National Environment Management Authority, 2010). Έχοντας μήκος 800

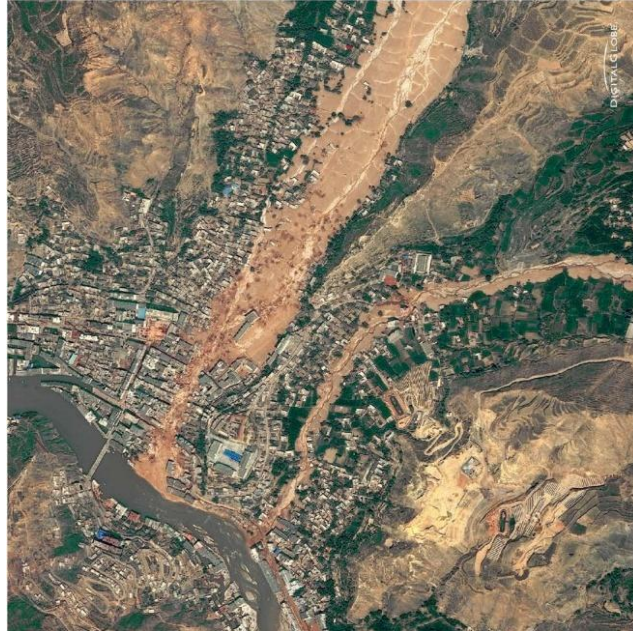
μ., πλάτος από 70 (στην κορυφή) έως 255 μ. (στο πόδι) και βάθος 20 μ., η συγκεκριμένη ροή κινήθηκε με πολύ μεγάλη ταχύτητα προς τα κατάντη όπου βρίσκοταν το χωριό, καταστρέφοντας τα πάντα στο πέρασμα της. Η μεγάλου όγκου ($2.768.000 \text{ m}^3$) μετακινούμενη μάζα κορημάτων προκάλεσε ανεπανόρθωτες υλικές ζημιές στο χωριό, καθώς και το θάνατο 365 περίπου ανθρώπων.



Εικόνα 2.5: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Nametsi το 2010 (National Environment Management Authority, 2010).

- ❖ *Κίνα, 2010:* Την 8η Αυγούστου, μια μεγάλων διαστάσεων (με μήκος περίπου 5.000 μ. και πλάτος 300 μ.) ροή κορημάτων εκδηλώθηκε στην ορεινή περιοχή βορειοανατολικά της πόλης Zhouqu, στην επαρχία Gansu. Κύριο αίτιο για την εκδήλωσης της αποτέλεσε η ξαφνική έντονη βροχόπτωση που ξέσπασε στην περιοχή την ίδια ημέρα. Καθοριστική, ωστόσο, θεωρήθηκε και η συμβολή των ιδιαίτερων γεωτεκτονικών συνθηκών που είχαν διαμορφωθεί σ' αυτήν ύστερα από το σεισμό του Wenchuan τον Μάιο του 2008. Διασχίζοντας μια σημαντική απόσταση προς τα κατάντη και καταλήγοντας τελικώς στον ποταμό Bailongjiang, η εκδηλωθείσα ροή έπληξε ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της πόλης με αποτέλεσμα να χάσουν τη ζωή τους περισσότεροι από 1.400 άνθρωποι. Επιπλέον, η κατάληξη της μετακινούμενης μάζας στον συγκεκριμένο ποταμό προκάλεσε τη διακοπή της ροής του σχηματίζοντας ένα φράγμα κατολίσθησης. Το φράγμα αυτό έθεσε τις βάσεις για τη δημιουργία μιας λίμνης της οποίας το νερό, λίγο αργότερα, κατέκλυσε το 1/3 της συνολικής έκτασης

της πόλης, ενώ επίσης κατέστρεψε πάνω από 200 στρέμματα γεωργικής γης (Wang et al., 2016a).



Εικόνα 2.6: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή βορειοανατολικά της πόλης Zhouqu το 2010 (Ren, 2014).

- ❖ *Αφγανιστάν, 2014:* Το πρωί της 2ης Μαΐου, μια μεγάλης έκτασης κατολίσθηση (κινούμενη επιφανειακά σαν χιονοστιβάδα λάσπης) συνέβη στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Abe Barek, στην επαρχία Badakhshan, θάβοντας ένα σημαντικό αριθμό κατοικιών και προκαλώντας το θάνατο περίπου 1.500 ανθρώπων. Με διαφορά μιας ώρας, μια δεύτερη κατολίσθηση ακολούθησε την πρώτη αφαιρώντας τη ζωή των διασωστών και χωρικών που επιχειρούσαν στην περιοχή. Σύμφωνα με τα στοιχεία των τοπικών φορέων, ο συνολικός αριθμός των θυμάτων από τις δύο διαδοχικές κατολισθήσεις ανήλθε στα 2.700 (Zhang et al., 2015). Εκτός των ανθρώπινων απωλειών και των υλικών ζημιών, το σύνολο της μετακινούμενη μάζας προκάλεσε τη διακοπή της ροής του διερχόμενου ποταμού μέσω του σχηματισμού ενός φράγματος κατολίσθησης μήκους 550 μ. και πάχους 60 μ. Μια λίμνη, ακολούθως, δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα αυτού του φράγματος. Οι κύριες αιτίες αυτών των δύο διαδοχικών κατολισθήσεων εντοπίστηκαν στα εξής: (α) λίγες ώρες πριν την πρώτη εκδήλωση του φαινομένου, μια μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση

επιβάρυνε το στρώμα του εδάφους και διαφοροποίησε τις μηχανικές ιδιότητες του, (β) η ύπαρξη τεκτονικών ρηγμάτων σε πρηνή καλυπτόμενα από παχύρρευστο εδαφικό υλικό προσέδιδε μια πολυπλοκότητα στη γεωλογική δομή της περιοχής, (γ) στο παρελθόν, μια παρόμοια κατολίσθηση είχε συμβεί στην περιοχή αλλοιώνοντας τόσο την τοπολογία της, όσο και τις χρήσεις γης και (δ) οι γεωργικές και αρδευτικές δραστηριότητες των κατοίκων του χωριού ενδέχεται να άσκησαν μια μακροχρόνια επιρροή στις συνθήκες ευστάθειας της περιοχής.



Εικόνα 2.7: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Abe Barek το 2014 (Sassa et al., 2015).

- ❖ *Ινδία, 2014:* Τις πρώτες πρωινές ώρες της 30ης Ιουλίου μια ροή κορημάτων (με συνολικό μήκος 514 μ. και πλάτος από 45 έως 134 μ.) εκδηλώθηκε σε υψόμετρο 936 μ. στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Malin. Περίπου 150 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και περισσότερες από 40 κατοικίες θάφτηκαν κάτω από τη μετακινούμενη μάζα κορημάτων (Ering et al., 2015). Η διείδυση μεγάλης ποσότητας νερού λόγω έντονης βροχόπτωσης (περίπου 108 χιλ. νερού) την ίδια ημέρα, και ο επακόλουθος κορεσμός του χαλαρού εδάφους της περιοχής θεωρήθηκαν οι κύριες αιτίες για την εκδήλωση του φαινομένου.



Εικόνα 2.8: Κατολίσθηση στην ορεινή περιοχή κοντά στο χωριό Malin το 2014 (Sinha et al., 2015).

- ❖ *Νεπάλ, 2014:* Τις πρώτες πρωινές ώρες της 2ης Αυγούστου, μια κατολίσθηση με τη μορφή ροής κορημάτων εκδηλώθηκε στη δεξιά όχθη του ποταμού Sunkoshi, πάνω από το χωριό Jure. Ξεκινώντας από υψόμετρο 1.500 μ., η τεράστια όγκου μετακινούμενη μάζα κορημάτων αρχικώς κατευθύνθηκε στη δεξιά όχθη της κοιλάδας του ποταμού (σε υψόμετρο 790-795 μ.) και ακολούθως επεκτάθηκε στην αριστερή καλύπτοντας τέσσερις αναβαθμίδες. Με μήκος 1,3 χλμ. και πλάτος 853 μ., η εκδηλωθείσα ροή προκάλεσε το θάνατο τουλάχιστον 156 ανθρώπων, καθώς και το σχηματισμό ενός φράγματος κατολίσθησης στον ποταμό (Champati ray and Chatteraj, 2014). Αποτέλεσμα αυτού του φράγματος ήταν η δημιουργία μια λίμνης η οποία έθετε σε μεγάλο πλημμυρικό κίνδυνο την παρακείμενη κατοικημένη περιοχή.



Εικόνα 2.9: Κατολίσθηση στην όχθη του ποταμού Sunkoshi το 2014 και το φράγμα κατολίσθησης που δημιούργησε (Champati ray and Chatteraj, 2014).

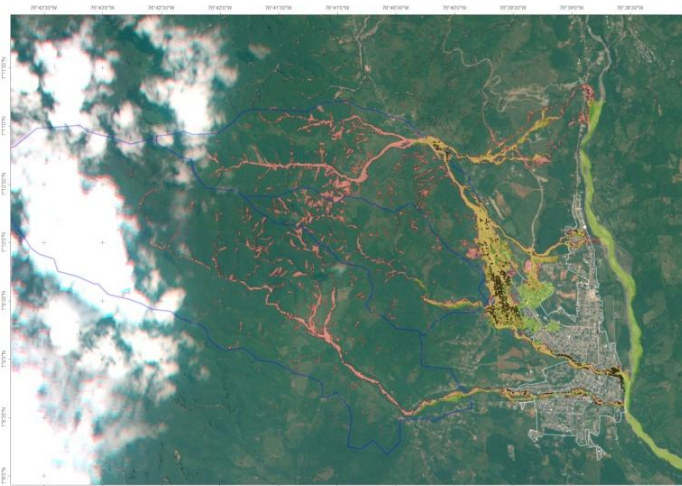
- ❖ *Γουατεμάλα, 2015*: Το βράδυ της 1ης Οκτωβρίου μια τεράστια κατολίσθηση έλαβε χώρα στο χωριό El Cambray Dos του νομού Santa Catarina Pinula ως αποτέλεσμα έντονων βροχοπτώσεων (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2015). Έχοντας τη μορφή ροής κορημάτων, η εκδηλωθείσα κατολίσθηση μετατόπισε 17.689 χλμ² γης προκαλώντας ανυπολογιστές υλικές ζημιές, καθώς και το θάνατο τουλάχιστον 280 ανθρώπων.



Εικόνα 2.10: Κατολίσθηση στο χωριό El Cambray Dos το 2015 (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2015).

- ❖ *Κολομβία, 2017*: Τις πρώτες πρωινές ώρες της 1ης Απριλίου, ύστερα από μακροχρόνιες και έντονες τοπικές βροχοπτώσεις, μια μεγάλου όγκου μετακινούμενη μάζα αποτελούμενη από εδαφικό υλικό και αποκομμένους βράχους μετακινήθηκε με τη μορφή ροών κορημάτων, μέσω των πλημμυρικών ρεμάτων, προς την πόλη Mocoa. Σύμφωνα με έκθεση της εταιρίας AON Benfield Inc.¹ (2017) η οποία επικαλείται στοιχεία της Εθνικής Μονάδας Διαχείρισης Κινδύνων της χώρας, περίπου 329 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και άλλοι 332 τραυματίστηκαν.

¹ Η AON Benfield Inc. αποτελεί μια εταιρεία επαγγελματικών υπηρεσιών η οποία παρέχει παγκοσμίως ένα ευρύ φάσμα λύσεων σε θέματα διαχείρισης κινδύνων, συνταξιοδότησης και υγείας.



Εικόνα 2.11: Κατολίσθηση στην πόλη Mocoa το 2017 (Behling, 2017).

- ❖ *Σιέρα Λεόνε, 2017:* Μετά από τρεις μέρες έντονων βροχοπτώσεων, ένα πρανές στο ορεινό τμήμα της περιοχής Regent, στα βόρεια της χερσονήσου Western Area, κατέρρευσε και μαζί με το πλημμυρικό ρέμα συνέθεσαν μια ιδιαίτερος καταστροφική ροή κορημάτων. Η κατάρρευση του πρανούς εκδηλώθηκε σε δύο φάσεις, με το κάτω τμήμα του να ολισθαίνει αρχικώς, και δέκα λεπτά αργότερα, ν' ακολουθεί και το πάνω τμήμα του (World Bank Group, 2017). Η μετακινούμενη μάζα ως ένα μίγμα εδαφικού υλικού και αποκομμένων βράχων διαφόρων μεγεθών (έως 40 μ³) κινήθηκε προς τα κατάντη με μεγάλη ορμή προκαλώντας ανυπολόγιστες καταστροφές σε υποδομές (όπως κτίρια, γέφυρες, σχολεία και εγκαταστάσεις υγείας), καθώς και το θάνατο περισσότερων από 450 ανθρώπων.



Εικόνα 2.12: Κατολίσθηση στο πρανές του ορεινού τμήματος της περιοχής Regent το 2017 (World Bank Group, 2017).

2.2 Ελληνική διάσταση

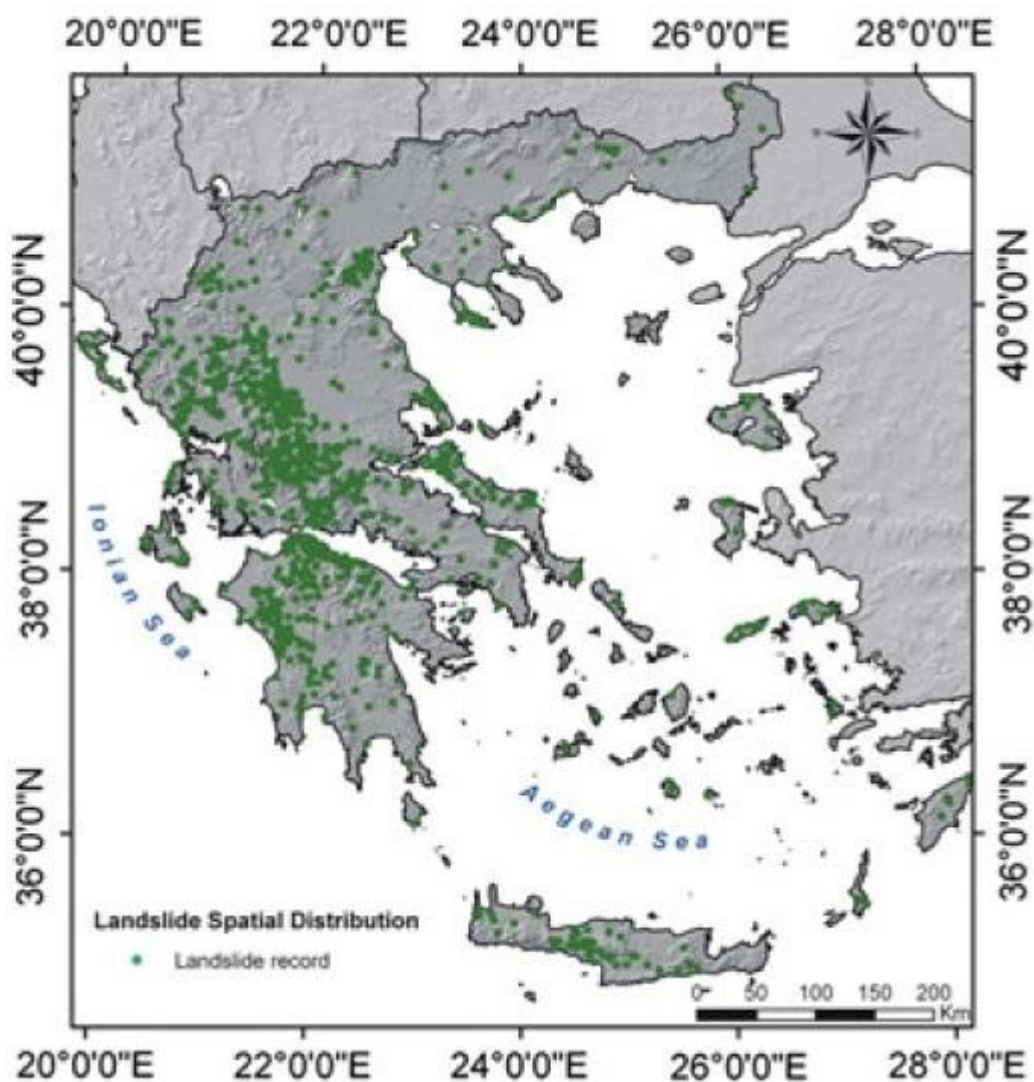
Στην Ελλάδα, τα κατολισθητικά γεγονότα παρουσιάζουν υψηλή συχνότητα και τις περισσότερες φορές έχουν αρκετά μεγάλη ένταση με αποτέλεσμα το φαινόμενο των κατολισθήσεων να καθίσταται ως ένας από τους πιο σημαντικούς φυσικούς κινδύνους της χώρας. Η εκδήλωση τους προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και συγχρόνως σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στο δομημένο περιβάλλον. Ειδικότερα για το δομημένο περιβάλλον, οι επιπτώσεις αυτές αφορούν στην υποβάθμιση της βιωσιμότητας των οικισμών, καθώς και στην αδυναμία κατασκευής νέων και επέκτασης υφιστάμενων τεχνικών δομών λόγω της διαμόρφωσης επισφαλών (για αυτές τις δομές) συνθηκών. Αξίζει, ωστόσο, ν' αναφερθεί ότι, σε εθνικό επίπεδο, ο βαθμός επίδρασης της εκδήλωσης του φαινομένου στις διάφορες περιοχές συχνά υποεκτιμάται. Αυτό οφείλεται στους εξής λόγους (Φερεντίνου και Χαλκιάς, 2012): (α) οι δυσμενείς επιπτώσεις των κατολισθήσεων επικαλύπτονται από άλλους φυσικούς κινδύνους (π.χ. σεισμούς, πλημμύρες) και διεργασίες (π.χ. διαβρώσεις), και (β) το κόστος αντιμετώπισης των επιπτώσεων τους συνηθίζεται να εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο μελέτης, ανακατασκευής και λειτουργίας των τεχνικών δομών ή αποκατάστασης των οικισμών.

Οι κατολισθήσεις που εκδηλώνονται στην Ελλάδα συνιστούν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ιδιαίτερων μορφολογικών, γεωλογικών, τεκτονικών και κλιματολογικών συνθηκών της χώρας σε συνδυασμό με τον ανθρωπογενή παράγοντα. Ειδικά λοιπόν για τον Ελληνικό χώρο, οι κύριες αιτίες που συμβάλλουν στη συχνή εκδήλωση κατολισθήσεων είναι (Koukis et al., 2005; Sabatakakis et al., 2013):

- ❑ Η έντονη τεκτονική παραμόρφωση των γεωλογικών σχηματισμών. Το σημείο αυτό κρίνεται ιδιαίτερος σημαντικό δεδομένου ότι συνδέεται με την υψηλή σεισμικότητα της χώρας. Δεν είναι τυχαίο, άλλωστε, το γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων έχει προκληθεί από σεισμικά γεγονότα.
- ❑ Οι έντονες μετεωρολογικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τμημάτων του Ελληνικού χώρου και η συχνή εκδήλωση ακραίων (μεγάλης διάρκειας και έντασης) γεγονότων βροχόπτωσης σε ορισμένα σημεία του.

- Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις οι οποίες συχνά γίνονται αλόγιστα, χωρίς μελέτη και προγραμματισμό, και οδηγούν στην αποψίλωση των δασών, στην εκδήλωση δασικών πυρκαγιών, στην υπεράντληση των υδροφόρων οριζόντων, κ.ά.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα στο οποίο απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων κατολισθητικών γεγονότων στον Ελληνικό χώρο, καθώς και οι προκύπτουσες απ' αυτές ζώνες συχνότητας κατολισθήσεων, οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από την εκδήλωση του φαινομένου εντοπίζονται κυρίως στην Κεντρική και Δυτική Ελλάδα, και λιγότερο στην Ανατολική.



Σχήμα 2.6: Κατανομή κατολισθητικών γεγονότων στον Ελληνικό χώρο (Sabatakakis et al., 2013).

Πιο αναλυτικά, στην Κεντρική και Δυτική Ελλάδα, η λιθολογική σύσταση και δομή υπαγορεύουν αρκετά επισφαλείς συνθήκες, ιδιαίτερα στις περιοχές που καταλαμβάνονται από χαλαρούς τεταρτογενείς σχηματισμούς, από ιζήματα του φλύσχη, από χαλαρά και πρόσφατα υλικά (κυρίως κορήματα), καθώς και από ασβεστολιθικά στρώματα μικρού πάχους που επικαλύπτουν χαλαρούς σχηματισμούς. Οι συνθήκες αυτές γίνονται ακόμη πιο επισφαλείς λόγω του σημαντικού αριθμού ισχυρών σεισμικών γεγονότων που σημειώνονται στα συγκεκριμένα τμήματα της χώρας. Τις περισσότερες των περιπτώσεων, τα ισχυρά αυτά σεισμικά γεγονότα συνοδεύονται από την εκδήλωση εκτεταμένων κατολισθήσεων. Η μόνη διαφορά μεταξύ της Κεντρικής και Δυτικής Ελλάδας έγκειται στ' ό,τι το φαινόμενο των κατολισθήσεων παρουσιάζει κατά τόπους μεγαλύτερη ένταση στην Κεντρική Ελλάδα λόγω της παρουσίας της οροσειράς της Πίνδου και της γεωτεκτονικής εξέλιξης των σχηματισμών που τη συνθέτουν. Σε αντίθεση με τα δύο αυτά τμήματα της χώρας, η Ανατολική Ελλάδα καταλαμβάνεται ως επί το πλείστον από συμπαγή και συνεκτικά πετρώματα με μεγάλο πάχος και ομοιόμορφη κατανομή των φυσικο-μηχανικών χαρακτηριστικών τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερη ευστάθεια, και συνεπώς μικρότερης εντάσεως κατολισθητικά γεγονότα. Το 80-85% των κατολισθήσεων στην Ανατολική Ελλάδα εκδηλώνονται σε Νεογενή ιζήματα (Λαλιώτη και Σπανού, 2001).

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά από τα σημαντικότερα κατολισθητικά γεγονότα που έχουν εκδηλωθεί στον Ελληνικό χώρο τόσο κατά το παρελθόν, όσο και κατά το πρόσφατο χρονικό διάστημα.

- ❖ *Τσιβλός, 1913*: Την 24η Μαρτίου, ένας μεγάλος όγκος με βραχώδη κορήματα (με διάμετρο από 2 εκ. έως 2 μ.) αποκολλήθηκε στη βορειοδυτική πλευρά του όρους Γερακάρι και διανύοντας μια διαδρομή μήκους περίπου 2,5 χλμ. και πλάτους περίπου 0,8 χλμ., κατέληξε στο βάθος της κοιλάδας του ποταμού Κράθη, στο σημείο του χωριού Τσιβλός (Νομός Αχαΐας). Έχοντας ταχύτητα 60 χλμ./ώρα και μετακινούμενη επιφανειακώς όπως μια χιονοστιβάδα, η βραχώδης μάζα παρέσυρε τα πάντα στο πέρασμα της με αποτέλεσμα την πλήρη καταστροφή του χωριού Συλίβaina, την μερική καταστροφή του χωριού Τσιβλός και το θάνατο 4 ανθρώπων. Επιπλέον, η απόθεση τελικώς της μετακινούμενης μάζας στον ποταμό Κράθη προκάλεσε τη διακοπή της ροής τόσο του ίδιου, όσο και ενός παραπόταμου του, σχηματίζοντας δύο λίμνες φραγμάτων κατολίσθησης (Zygouri and Koukouvelas,

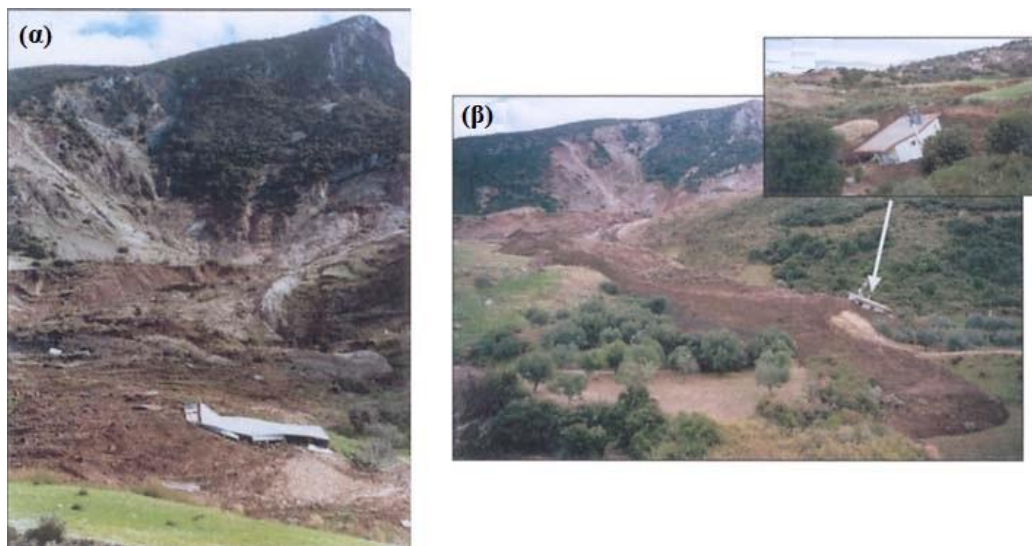
2018). Ένα χρόνο αργότερα, την 5η Ιανουρίου 1914, το φράγμα εντός του ποταμού Κράθη υποχώρησε και το νερό της διαμορφωθείσας λίμνης δημιούργησε ένα ιδιαίτερος σοβαρό πλημμυρικό γεγονός. Αντιθέτως, η λίμνη που σχηματίστηκε από το φράγμα στο παραπόταμο του Κράθη σώζεται μέχρι σήμερα και είναι γνωστή ως λίμνη Τσιβλού. Όσο αναφορά τις αιτίες της συγκεκριμένης κατολίσθησης, αυτές αποδίδονται σε δύο σενάρια: (α) στην ενεργοποίηση μια παλιότερης κατολίσθησης ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης του ποταμού Κράθη στη βάση του πρανούς και (β) στη συνδυαστική δράση της υψηλής βροχόπτωσης εκείνης της περιόδου και ενός μεσαίου μεγέθους σεισμικού γεγονότος.



Εικόνα 2.13: Κατολίσθηση Τσιβλού το 1913 (Zygouri and Koukouvelas, 2018).

- ❖ *Καρνά, 1962:* Συνιστά την πρώτη και σημαντικότερη από μια ακολουθία τριών διαδοχικών κατολισθήσεων που έχουν εκδηλωθεί στο χωριό Καρνά (Νομός Αχαΐας). Οι μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις που έπληξαν την περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (σχεδόν διπλάσια ετήσια βροχόπτωση σε σχέση με το προηγούμενο έτος) συνέβαλαν στην εκδήλωση μιας σύνθετης κατολίσθησης (ροή κορημάτων ακολουθούμενη από μεταθετική ολίσθηση) με συνολικό μήκος περίπου 700 μ. και πλάτος περίπου 250 μ. Στην κεφαλή της κατολίσθησης βρίσκονταν το (παλαιό) χωριό Καρνά το οποίο υπέστη μερική καταστροφή με αποτέλεσμα αργότερα να μετεγκατασταθεί σε μια κοντινή περιοχή με μεγαλύτερη ευστάθεια, όπου βρίσκεται σήμερα (Sabatakakis et al., 2005). Τον Φεβρουάριο του 1999, κατά τη διάρκεια μιας

έντονης και παρατεταμένης βροχόπτωσης (250% μεγαλύτερη από τη μέση μηνιαία τιμή, σύμφωνα με στοιχεία του βροχομετρικού σταθμού της Πάτρας), σημειώθηκε στην περιοχή μια δεύτερη σύνθετη κατολίσθηση (ροή πρόσφατων κορημάτων ακολουθούμενη από μεταθετική πολλαπλή ολίσθηση του υλικού της προηγούμενης κατολίσθησης) με συνολικό μήκος περίπου 500 μ. και πλάτος κεφαλής 150 μ. Δύο χρόνια αργότερα, και πιο συγκεκριμένα τον Δεκέμβριο του 2001, μια υψηλής έντασης βροχόπτωσης (94,2 χιλ. νερού σε λιγότερο από 24 ώρες) αποτέλεσε την αιτία για την εκδήλωση μιας τρίτης κατολίσθησης στην περιοχή με τη μορφή ροής κορημάτων. Ο συνολικός όγκος του υλικού που μετακινήθηκε κατά τη διάρκεια των τριών κατολισθήσεων εκτιμήθηκε σε περισσότερο από 600.000 μ³ και προκάλεσε τη διακοπή της ροής του ρέματος στη βάση της κοιλάδας σχηματίζοντας αρκετές μικρές λίμνες φραγμάτων κατολίσθησης βάθους περίπου 4-6 μ.



Εικόνα 2.14: Κατολισθήσεις Καρυάς. (α) Τον Φεβρουάριο του 1999, και (β) τον Δεκέμβριο του 2001 (Sabatakakis et al., 2005).

- ❖ *Μικρό Χωριό, 1963:* Η συνδυαστική δράση των υψηλής έντασης καιρικών φαινομένων κατά τη διάρκεια του χειμώνα του έτους 1962-63, η σεισμική δραστηριότητα της ίδιας περιόδου, και γενικώς η φύση και τεκτονική καταπόνηση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής (Ρόζος και Αποστολίδης, 2004) αποτέλεσαν τις αιτίες για την εκδήλωση μιας εκτεταμένης κατολίσθησης, την 13η Ιανουαρίου, στον (παλαιό) οικισμό του Μικρού Χωριού (Νομός Ευρυτανίας). Η

κατολίσθηση η οποία εκδηλώθηκε κυρίως σε υλικά κορημάτων είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 13 ανθρώπων και την καταστροφή του μεγαλύτερου τμήματος του οικισμού. Ύστερα από απόφαση της Πολιτείας, ο οικισμός μετεγκαταστάθηκε για λόγους ασφαλείας σε κοντινή απόσταση. Λόγω των αρνητικών επιπτώσεων και κυρίως του αριθμού των θυμάτων που προκάλεσε, χαρακτηρίζεται ως η πιο καταστροφική κατολίσθηση στην ιστορία του Ελληνικού χώρου.



Εικόνα 2.15: Κατολίσθηση Μικρού Χωριού το 1963 (<http://tempo24.news/eidisi/114360/i-pio-katastrofiki-katolisthisi-stin-elliniki-istoria>, 24/03/2018).

- ❖ *Παναγοπούλα, 1971:* Το διάστημα 25ης-27ης Απριλίου και την 3η Μαΐου 1971 εξελίχθηκε σε δύο στάδια μια από τις πιο γνωστές κατολισθήσεις του Ελληνικού χώρου. Πρόκειται για την κατολίσθηση στην περιοχή της Παναγοπούλας (η παράκτια περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στις πόλεις Αίγιο και Πάτρα) επί της οποίας διέρχεται η νέα εθνική οδός (Ολυμπία Οδός) που συνδέει την πόλη της Αθήνας μ' εκείνη της Πάτρας. Το πρώτο στάδιο (Απρίλιος) της συγκεκριμένης (σύνθετης) κατολίσθησης περιλάμβανε αρχικώς μια μεταθετική ολίσθηση στο ανώτερο τμήμα του πρανούς η οποία στη συνέχεια μετατράπηκε σε μια εκτεταμένη ροή γαιών στο κατώτερο τμήμα του. Το συνολικό μήκος ήταν περίπου 350 μ., το πλάτος περίπου 300 μ. και το βάθος 25 μ. Επιπλέον, ο όγκος της μετακινούμενης μάζας υπερέβαινε το $1.000.000 \text{ m}^3$ (Koukis et al., 2009). Το δεύτερο στάδιο της (Μαΐος) περιλάμβανε μια περιστροφική ολίσθηση στο τμήμα της μετακινούμενης μάζας του πρώτου σταδίου. Το συνολικό μήκος ήταν 250 μ. και το πλάτος 150 μ. Η

σημαντικότερη επίπτωση της κατολίθησης ήταν η πρόκληση σοβαρών ζημιών στους παρακείμενους άξονες μεταφοράς (νέα και παλαιά εθνική οδός, καθώς και σιδηροδρομική γραμμή) με αποτέλεσμα τη διακοπή της κυκλοφορίας από και προς τη Δυτική Ελλάδα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από εκείνη τη στιγμή και για τα επόμενα χρόνια, η εκδήλωση μικρότερων εδαφικών μετακινήσεων και αστοχιών αποτελεί ένα συχνό φαινόμενο για την περιοχή.



Εικόνα 2.16: Κατολίσθηση Παναγοπούλας το 1971 (Koukis et al., 2009).

- ❖ *Μαλακάσα, 1995:* Συνέβη την 18η Φεβρουαρίου, στο 36ο χιλιόμετρο της Εθνικής Οδού Αθηνών-Λαμίας. Η κατολίσθηση είχε κατά προσέγγιση διεύθυνση Βορρά-Νότου, με μέγιστο μήκος περίπου 300 μ., ενώ στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης το μέγιστο πλάτος της ήταν 240 μ. Το μέσο βάθος της κατολισθαίνουσας μάζας ήταν περίπου 25-30 μ. (Γεωργόπουλος και Βαρδουλάκης, 2001). Η κυριότερη επίπτωση της ήταν η πρόκληση σημαντικών ζημιών τόσο στην εθνική οδό, όσο και στη σιδηροδρομική γραμμή Αθήνας-Θεσσαλονίκης, με αποτέλεσμα τη διακοπή της οδικής και σιδηροδρομικής επικοινωνίας της πρωτεύουσας με το βόρειο τμήμα της χώρας. Οι βασικές αιτίες εκδήλωσης της εντοπίζονται στα εξής: (α) στην ευμετάβλητη τεχνικογεωλογική «συμπεριφορά» του κυρίαρχου στην περιοχή εδαφικού σχηματισμού (αργιλικός σχιστόλιθος) ως προς τις, κρίσιμες για το φαινόμενο, παραμέτρους αντοχής και διαπερατότητας, (β) στις ιδιαίτερες

υδροστατικές συνθήκες του πρανούς λόγω της θέσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, και (γ) στις συνθήκες «οριακής ισορροπίας» στις οποίες βρισκόταν το πρανές ύστερα από την εκδήλωση μιας παλαιότερης καθίζησης-κατολίσθησης σ' αυτό.



Εικόνα 2.17: Κατολίσθηση Μαλακάσας το 1995 (Καβουνίδης και λοιποί, 2005).

- ❖ *Πλατάνι, 1999:* Τον Φεβρουάριο του 1999, μια σύνθετη κατολίσθηση εκδηλώθηκε στο χωριό Πλατάνι (Νομός Αχαΐας) ως αποτέλεσμα έντονης και παρατεταμένης βροχόπτωσης. Η κατολίσθηση αυτή περιλάμβανε διαφορετικούς τύπους μετακινήσεων και πιο συγκεκριμένα, μια περιστροφική ολίσθηση στο ανώτερο τμήμα της μετακινούμενης μάζας, και δύο παράλληλες μεταθετικές ολισθήσεις στις δύο πλευρές του κατώτερου τμήματος της οι οποίες στη συνέχεια εξελίχθηκαν σε ροές γαιών. Το μήκος της συνολικής μετακινούμενης μάζας ήταν περίπου 300 μ. και το πλάτος περίπου 190 μ. (Sabatakakis et al., 2005). Οι σοβαρές υλικές ζημιές σε κτίρια, καθώς και οι εδαφικές αστοχίες τμημάτων του κεντρικού δρόμου που συνέδεε τα κοντινά χωριά με την πόλη της Πάτρας, αποτέλεσαν τις κύριες επιπτώσεις της.



Εικόνα 2.18: Κατολίσθηση Πλατανιού το 1999 (Sabatakakis et al., 2005).

- ❖ *Νεμέα, 2001:* Εκδηλώθηκε την 8η Φεβρουαρίου επί της Εθνικής Οδού Κορίνθου-Τριπόλεως (Χ.Θ. 123+000) αποκόπτοντας τμήμα της μήκους περίπου 150 μ. (Ντουνιάς και λοιποί, 2006α). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης κατολίσθησης, μια αρκετά μεγάλου όγκου (περίπου 400.000 m^3) μάζα κορημάτων κινητοποιήθηκε προς τα ανατολικά καλύπτοντας μια έκταση περίπου 35 στρεμμάτων. Είχε μήκος περίπου 180 μ. και μέγιστο βάθος 34 μ. Η αύξηση των πιέσεων των πόρων νερού λόγω των υψηλής έντασης και διάρκειας βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με τη χαμηλή αντοχή των αργιλικών εδαφικών σχηματισμών της περιοχής αποτέλεσαν τις κυριότερες αιτίες εκδήλωσης της.



Εικόνα 2.19: Κατολίσθηση Νεμέας το 2001 (Ντουνιάς και λοιποί, 2006α).

- ❖ *Τσακώνας, 2003*: Αν και οι πρώτες ενδείξεις μετακίνησης (εμφάνιση ρωγμών και καθιζήσεων) παρατηρήθηκαν το 2000, η γενικευμένη εκδήλωση της έλαβε χώρα τρία χρόνια αργότερα (Σωτηρόπουλος και λοιποί, 2004). Λόγω της γεωγραφικής θέσης της, επί της Εθνικής Οδού Τρίπολης-Καλαμάτας (σε απόσταση περίπου 15 χλμ. νότια της Μεγαλόπολης στο Νομό Αρκαδίας), και κυρίως των μεγάλων μετρητικών χαρακτηριστικών της (μήκος 1.300 μ. και πλάτος 300 μ.), η συγκεκριμένη κατολίσθηση θεωρείται μια από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις που έχουν σημειωθεί στο οδικό δίκτυο της χώρας. Συνιστά μια μεταθετική ολίσθηση κατά τη διάρκεια της οποίας μια τεράστιου όγκου (έχει εκτιμηθεί από 6.000.000 έως 9.000.000 μ³) μετακινούμενη μάζα αποτελούμενη από κορήματα και βραχώδη τεμάχια, διένυσε μια απόσταση περίπου 100 μ., με διεύθυνση εγκάρσια προς την εθνική οδό. Εκτός από την προσωρινή διακοπή της κυκλοφορίας στην εθνική οδό και την αποκοπή της από άλλες αγροτικές οδούς, η κατολίσθηση προκάλεσε σοβαρές υλικές ζημιές και εκτετεμένες ρωγμές στην ευρύτερη περιοχή (Ντουνιάς και λοιποί, 2006β). Επίπλέον, η διακοπή τοπικώς της ροής του ποταμού λόγω της απόθεσης της μετακινούμενης μάζας δημιούργησε σε πολλά σημεία μικρής έκτασης λίμνες.



Εικόνα 2.20: Κατολίσθηση Τσακώνας το 2003 (Σωτηρόπουλος και λοιποί, 2004).

Τα αίτια εκδήλωσης της αποδίδονται στη συνδυαστική δράση των ιδιαίτερων μορφολογικών (μεγάλη καμπυλότητα), λιθολογικών (λιθολογική σύσταση των εδαφικών σχηματισμών), τεκτονικών (καταπόνηση των σχηματισμών και εμφάνιση

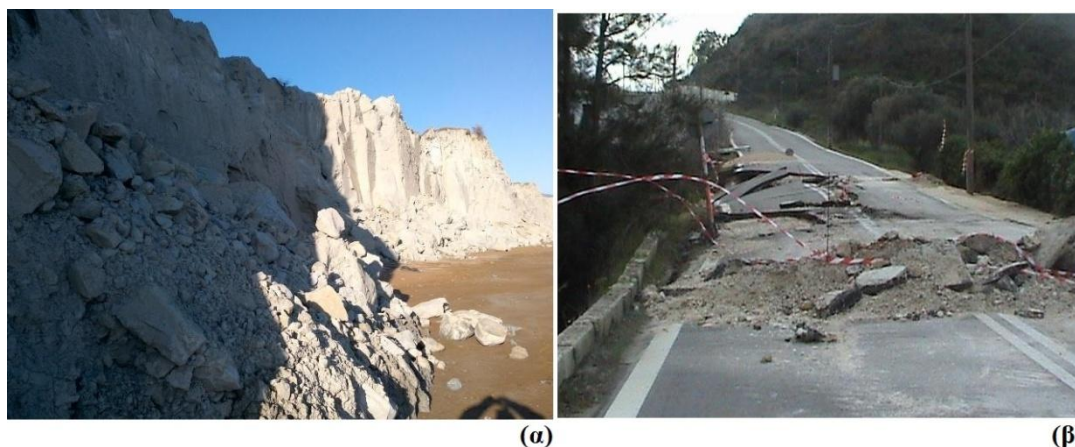
πτυχών και εφίππεύσεων), υδρογεωλογικών (υδροστατική πίεση από τις συγκεντρώσεις επιφανειακών και υπόγειων υδάτων) και κλιματολογικών (υψηλής έντασης βροχοπτώσεις κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους) συνθηκών της περιοχής, χωρίς ωστόσο να λησμονείται και η επιπρόσθετη συμβολή των ανθρωπογενών παρεμβάσεων για την κατασκευή της (νέας εκείνη την περίοδο) εθνικής οδού.

- ❖ *Τέμπη, 2009*: Την 17η Δεκεμβρίου, κατολίσθηση με τη μορφή πτώσης βραχώδων τεμάχων εκδηλώθηκε στο τμήμα από Χ.Θ. 386+150 έως Χ.Θ. 386-200 της Εθνικής Οδού Αθήνας-Θεσσαλονίκης, στην κοιλάδα των Τεμπών. Πιο συγκεκριμένα, μια 300 m^3 μάζα βραχώδων τεμάχων αποκολλήθηκε από πρανές, σε ύψος περίπου 80 μ., και αφού ανατράπηκε και θραύστηκε κατά την κίνηση της, κατέληξε επί της οδού. Εκτός από την προσωρινή διακοπή της κυκλοφορίας στην εθνική οδό, προκάλεσε επίσης το θάνατο του Διευθυντή του έργου της κατασκευής των γειτονικών σηράγγων της Νέας Εθνικής Οδού (Ν.Ε.Ο.) ο οποίος είχε μεταβεί για αυτοψία ύστερα από μικρότερης έκτασης γεγονότα που είχαν σημειωθεί στο ίδιο σημείο την προηγούμενη ημέρα. Σύμφωνα με πόρισμα επιτροπής εμπειρογνομόνων (Γκαζέτας και λοιποί, 2010), η αποκόλληση της βραχώδους μάζας οφειλόταν στο συνδυασμό της οριακής ισορροπίας των τεμάχων, της διαβρωτικής δύναμης του νερού και των διαμορφωθέντων υδατοπιέσεων στις ρωγματώσεις τους.



Εικόνα 2.21: Κατολίσθηση Τεμπών το 2009 (<http://www.kosmoslarissa.gr/blog/Τέμπη/εξι-εταιρειες-ζητουν-αποζημιωση-για-το-κλεισιμο-του-δρομου-στα-τεμπη-το-2009>, 24/03/2018).

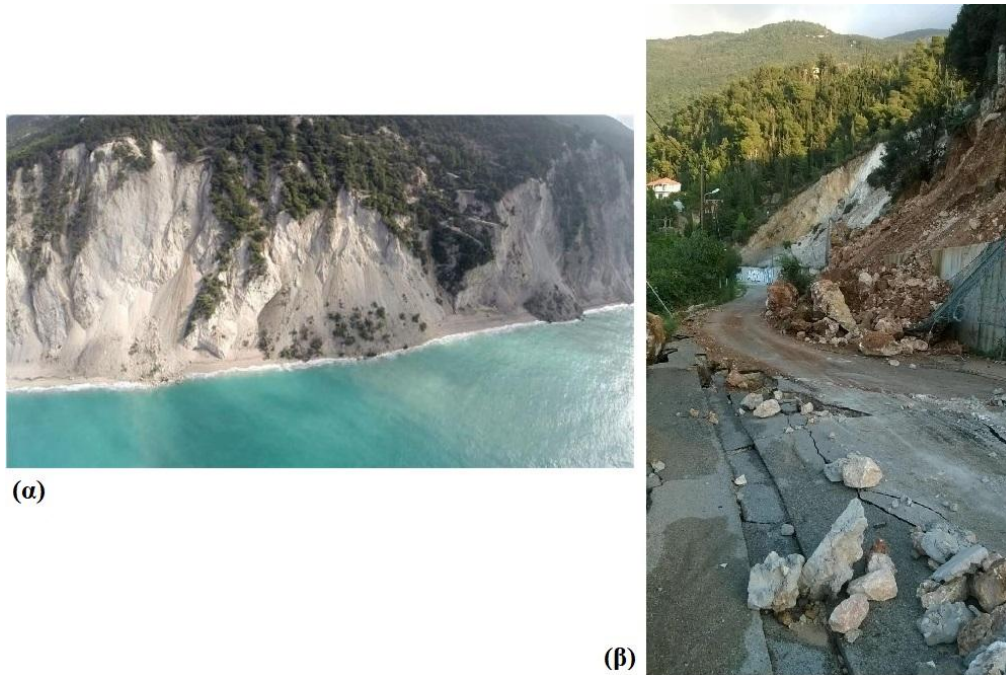
- ❖ *Κεφαλλονιά, 2014*: Στις αρχές του έτους, μια σεισμική ακολουθία αποτελούμενη από δύο διαδοχικές (την 26η Ιανουαρίου και την 3η Φεβρουαρίου) σεισμικές δονήσεις ίδιου περίπου μεγέθους (5,8 και 5,7, αντιστοίχως, βαθμών της κλίμακας ρίχτερ) σημειώθηκε στη χερσόνησο της Παλίκης (στο δυτικό τμήμα του νησιού). Οι σεισμικές αυτές δονήσεις είχαν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση μικρού έως μεσαίου μεγέθους κατολισθήσεων (με τη μορφή ροών κορημάτων, ολισθήσεων γαιών και πτώσεων βραχώδων τεμάχων), κυρίως στην περιοχή της χερσονήσου και σε μικρότερο βαθμό στο υπόλοιπο τμήμα του νησιού. Οι εκδηλωθείσες κατολισθήσεις απέκλεισαν το οδικό δίκτυο για αρκετές ημέρες προκαλώντας κυκλοφοριακό πρόβλημα (Valkaniotis et al., 2014).



Εικόνα 2.22: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τις σεισμικές δονήσεις στην Κεφαλλονιά το 2014. (α) Κατολίσθηση στην παραλία Ξι, και (β) αστοχία στον οδικό άξονα Χαβριάτα-Βουνί (Μάκρας και Ροβίθης, 2015).

- ❖ *Λευκάδα, 2015*: Την 17η Νοεμβρίου ένα σεισμικό γεγονός μεγέθους 6 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ έλαβε χώρα στο νησί. Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού μεταξύ των χωριών Αθάνι και Άγιος Πέτρος και, με εστιακό βάθος 10,7 χλμ., έγινε αισθητός στο μεγαλύτερο τμήμα της Δυτικής Ελλάδας. Ως κύριες συνέπειες είχε την απώλεια δύο ανθρώπινων ζώων, καθώς και την εκδήλωση μικρού έως μεγάλου μεγέθους κατολισθήσεων οι οποίες με τη σειρά τους προκάλεσαν σοβαρές ζημιές σε ιδιοκτησίες και οδικούς άξονες. Αυτές οι διαφορετικού τύπου κατολισθήσεις (ροές και ολισθήσεις κορημάτων, ολισθήσεις και

πτώσεις βραχώδων μαζών) έπληξαν κυρίως το δυτικό τμήμα του νησιού, και πιο συγκεκριμένα: (α) τα χωριά Κομηλιό, Δράγανο και Αθάνι, (β) την παράκτια ζώνη Εγγρεμνοί-Γιαλός, και (γ) τον μήκους 6 χλμ. οδικό άξονα Τσουκαλάδες-Άγιος Νικήτας (Papathanassiou et al., 2016).



Εικόνα 2.23: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον σεισμό στη Λευκάδα το 2015. (α) Ολίσθηση στην παραλία Εγγρεμνών, και (β) ολίσθηση βράχων στον οδικό άξονα Τσουκαλάδες-Άγιος Νικήτας (Μάκρα και Ροβίθης, 2015).

Άλλα πρόσφατα (κατά τη χρονική περίοδο 2015-2018) γεγονότα κατολισθήσεων είναι αυτά που εκδηλώθηκαν στα χωριά:

- ❖ *Κλεπά* (Νομός Αιτωλοακαρνανίας), την 1η Φεβρουαρίου 2015
- ❖ *Μοίρα* (Νομός Αχαΐας), την 20η Ιανουαρίου 2017
- ❖ *Κλεισούρα* (Νομός Αιτωλοακαρνανίας), επί της Εθνικής Οδού Αντιρρίου-Ιωαννίνων, την 2η Δεκεμβρίου 2017
- ❖ *Λεπρέο* (Νομός Ηλείας), την 13η Ιανουαρίου 2018



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 2.24: Πρόσφατα παραδείγματα κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο. (α) Κατολίσθηση Κλεπά το 2015 (<https://www.npress.gr/nafpaktia/katolisthisi-tis-klepa-apotelesmata-ke-efthynes/>, 24/03/2018), (β) κατολίσθηση Μοίρας το 2017 (<http://www.zougla.gr/greece/article/axaia-se-apognosi-i-apoklismeni-katiki-stou-mira-apo-tin-katolis8isi>, 24/03/2018), (γ) κατολίσθηση Κλεισούρας το 2017 (<http://www.iefimerida.gr/news/380243/sto-eleos-tis-kakokairias-aitoloakarnania-kai-ipeiros-megales-katastrofes-eikones-vinteo>, 24/03/2018), και (δ) κατολίσθηση Λεπρεού το 2018 (<https://www.protinews.gr/blog/sto-lepreo-entos-ton-imeron-klimakio-toy-igme>, 24/03/2018).

Τέλος, αν και επιδέχεται αμφισβήτηση ως προς τη «φυσικότητα» του φαινομένου, αξίζει κανείς ν' αναφερθεί και στην τεράστια κατολίσθηση που έλαβε χώρα, την 10η Ιουνίου 2017, στο *ορυχείο Αμυνταίου* (Νομός Φλώρινας). Περιλαμβάνοντας σχεδόν όλη την έκταση εκσαφής στα πρηνή του ορυχείου, εδαφικές μάζες της τάξεως συνολικά των 80.000.000 μ³ μετακινήθηκαν προκαλώντας την πλήρη αλλαγή της «φυσιογνωμίας» της ευρύτερης περιοχής (<http://www.cnn.gr/news/ellada/story/84413/amyntaio-allaxe-o-xartis-meta-tin-katolisthisi-ana-gkastiki-apallotriosi-oikismoy-pics-vid>, 24/03/2018). Επιπλέον, στα πλαίσια αντιμετώπισης των υφιστάμενων (κυρίως ρωγματώσεις στους δρόμους πρόσβασης και σε ιδιοκτησίες), καθώς και πρόληψης έναντι των δυνητικών, επιπτώσεων της κατολίσθησης, αποφασίστηκε η

αναγκαστική απαλλοτρίωση και μετεγκατάσταση του χωριού Ανάργυροι που βρίσκεται σε απόσταση 3 χλμ. από την περίμετρο του ορυχείου.



Εικόνα 2.25: Κατολίσθηση ορυχείου Αμυνταίου το 2017

(<http://www.cnn.gr/news/ellada/story/84413/amyntaio-allaxe-o-xartis-meta-tin-katolisthisi-anagkastiki-apallotriosi-oikismoy-pics-vid>, 24/03/2018)

Η μελέτη και συστηματική καταγραφή των κατολισθητικών γεγονότων που εκδηλώνονται στον Ελληνικό χώρο υλοποιούνται από τη Διεύθυνση Τεχνικής Γεωλογίας του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) και το Τμήμα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ). Το ΙΓΜΕ πρωτοσυστάθηκε το 1930 ως Γεωλογική Υπηρεσία Ελλάδος (ΓΥΕ) και αποτελεί θεσμοθετημένο επιστημονικό ερευνητικό φορέα του Ελληνικού κράτους (εποπτεύεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας) ο οποίος ασχολείται με θέματα γεωεπιστημών. Κύριες δραστηριότητες της Διεύθυνσης Τεχνικής Γεωλογίας ως προς το φαινόμενο των κατολισθήσεων είναι η καταγραφή (μετά από αναγνωριστικές εργασίες πεδίου) των εκδηλωμένων κατολισθητικών γεγονότων στους διάφορους οικισμούς της χώρας, η σύνταξη τεχνικών εκθέσεων, και η υποβολή προτάσεων για τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης των υφιστάμενων επιπτώσεων ή πρόληψης έναντι δυνητικού κινδύνου (όπου αυτό ζητείται). Στις σχετικές με το φαινόμενο δραστηριότητές της μπορεί να συγκαταλεχθεί, επίσης, η μελέτη της ευστάθειας των πρανών κατά μήκος των οδικών αξόνων της χώρας, καθώς και των θέσεων θεμελίωσης μεγάλων τεχνικών έργων (π.χ. γέφυρες, φράγματα, αγωγοί φυσικού αερίου, κ.ά.)

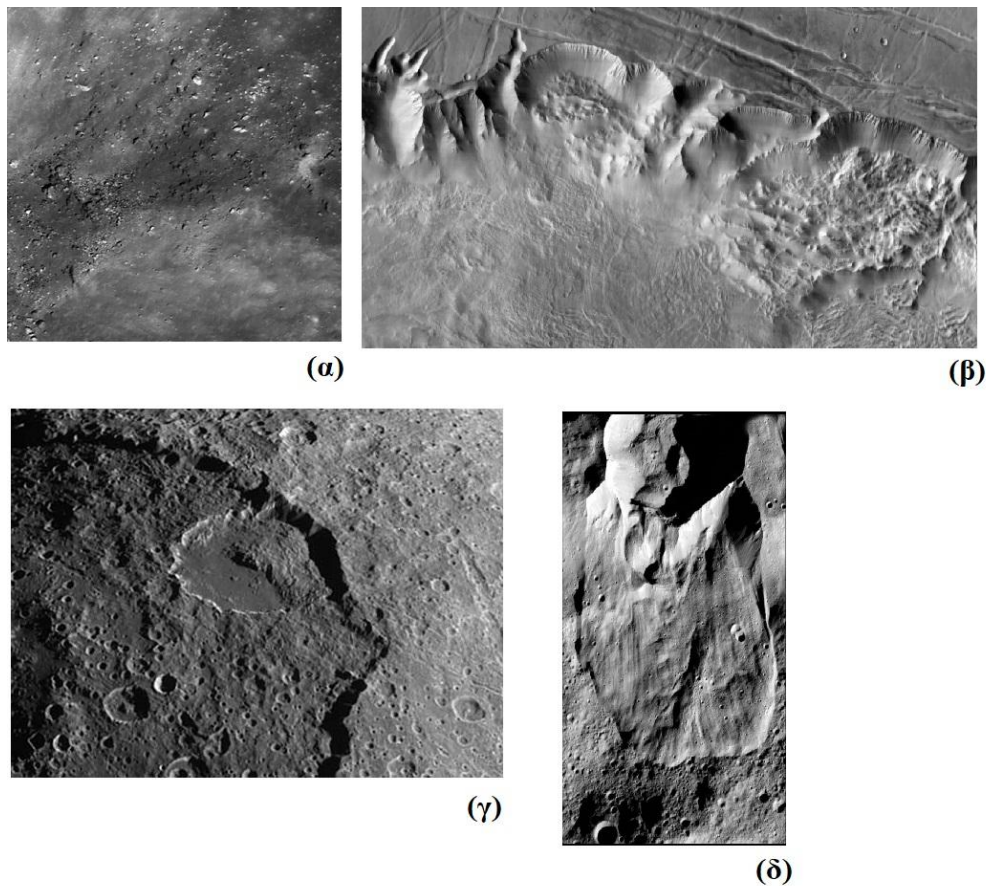
και πολιτιστικών μνημείων. Το ΚΕΔΕ πρωτοσυστάθηκε το 1960 με την ενοποίηση του «πρώτου γραφείου ποιοτικού ελέγχου υλικών» και του «εργαστηρίου Οδοποιίας», και σήμερα λειτουργεί ως Διεύθυνση υπαγόμενη στη Γενική Γραμματεία Υποδομών του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών. Κύρια δραστηριότητα του Τμήματος Γεωτεχνικής Μηχανικής ως προς το φαινόμενο των κατολισθήσεων είναι η διενέργεια αυτοψιών (και η επακόλουθη σύνταξη των σχετικών τεχνικών εκθέσεων) σε θέσεις θεμελίωσης τεχνικών έργων ή σε περιοχές που παρουσιάζουν προβλήματα ευστάθειας πρανών και αστοχιών έργων.

2.3 «Διαπλανητική» διάσταση

Η εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην επιφάνεια του πλανήτη της Γης, καθώς από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι καταγραφές και λήψεις εικόνων σχετικά με την εκδήλωση κατολισθήσεων και σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος όλο και πληθαίνουν. Η απόκτηση αυτών των καταγραφών έχει καταστεί δυνατή μέσω των διάφορων, κατά καιρούς, διαστημικών αποστολών στα πλαίσια των οποίων οι αρμόδιοι και εξειδικευμένοι οργανισμοί διαστήματος, με κύριους εκπροσώπους την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration – NASA) των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency – ESA), εκτοξεύουν και θέτουν σε τροχιά προηγμένης τεχνολογίας δορυφορικά συστήματα.

Τα κατολισθητικά γεγονότα που έχουν καταγραφεί και οπτικοποιηθεί κατά τη διάρκεια τέτοιων αποστολών (π.χ. Mars Reconnaissance Orbiter, Lunar Reconnaissance Orbiter, Cassini-Huygens, Dawn, New Horizons) αφορούν τόσο μεγάλα πλανητικά σώματα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τη Γη (π.χ. Σελήνη, Άρης, Αφροδίτη, Ερμής), όσο και πολύ μικρότερα απομακρυσμένα σώματα (π.χ. Δήμητρα, Ιαπετός του Κρόνου, Χάρων του Πλούτωνα). Οι τύποι αυτών των «διαπλανητικών» κατολισθήσεων έχουν ταυτιστεί μ' εκείνους των ροών κορημάτων, ολισθήσεων βραχώδων μαζών και σύνθετων μετακινήσεων, ενώ τα μεγέθη τους κυμαίνονται από δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα (Lucas et al., 2014). Όπως είναι φυσικό, οι παράγοντες που επηρεάζουν ή προκαλούν την εκδήλωση τους τείνουν να διαφέρουν από τους αντίστοιχους των επίγειων κατολισθήσεων λόγω των διαφορετικών φυσικών (π.χ. ως προς τη βαρύτητα, την ατμοσφαιρική πίεση) και περιβαλλοντικών (π.χ.

απουσία υγρών στοιχείων και της επακόλουθης επίδρασης της διάβρωσης) συνθηκών που χαρακτηρίζουν τα συγκεκριμένα πλανητικά σώματα (<http://www.irpi.cnr.it/en/focus/landslides-in-the-solar-system/>, 24/03/2018). Η εκδήλωση αυτών των κατολισθήσεων αποδίδεται κυρίως στα κύματα κραδασμών που προκαλούνται από τις εκρήξεις αστεροειδών/μετεωριτών στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας των πλανητικών σωμάτων, καθώς επίσης και στα παραγόμενα θραύσματα τα οποία καταλήγουν να προσκρούουν στο έδαφος τους. Αποτέλεσμα των προσκρούσεων είναι η εμφάνιση κρατήρων (συνήθως μεγάλων διαστάσεων) στην επιφάνεια του εδάφους, η πλειοψηφία των οποίων έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται με κάποιο κατολισθητικό γεγονός.



Εικόνα 2.26: Κατολισθήσεις σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος. (α) Στη Σελήνη (https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20110518-landslide.html, 24/03/2018), (β) στον Άρη (<https://mars.nasa.gov/resources/3313/>, 24/03/2018), (γ) στον Ιαπετό του Κρόνου (https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia06171.html, 24/03/2018), και (δ) στη Δήμητρα (<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6820>, 24/03/2018).

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής

3.1 Στάδια ανάλυσης

Τρία είναι τα κύρια στάδια από τα οποία αποτελείται μια διαδικασία ανάλυσης του φαινομένου των κατολισθήσεων με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής. Αυτά, κατά σειρά, είναι: (α) η αναγνώριση κατολισθήσεων, (β) η χαρτογράφηση κατολισθήσεων και (γ) η αξιολόγηση των παραγόμενων χαρτών ή αλλιώς των εκτελούμενων στο στάδιο της χαρτογράφησης μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης.

3.1.1 Αναγνώριση κατολισθήσεων

Ο όρος *αναγνώριση κατολισθήσεων* περιλαμβάνει όλες εκείνες τις τεχνικές που διενεργούνται στα πλαίσια μιας μελέτης ανάλυσης κατολισθήσεων με στόχο την αναγνώριση παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων που συνέβησαν σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνά μεγάλης έκτασης (Scaioni et al., 2014). Όλες αυτές οι τεχνικές συνδράμουν σε μεγάλο βαθμό στη δημιουργία των βάσεων δεδομένων και χαρτών καταγραφής κατολισθήσεων, του σημαντικότερου, δηλαδή, τύπου δεδομένων που απαιτούνται σε μια τέτοιου είδους ανάλυση. Αν και η χρονική διάκριση μεταξύ των τεχνικών είναι ασαφής, η αναγνώριση κατολισθήσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τόσο συμβατικών, όσο και καινοτόμων τεχνικών. Οι συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο στάδιο ανάλυσης είναι η εργασία πεδίου και η ερμηνεία αεροφωτογραφιών. Οι καινοτόμες τεχνικές βασίζονται κυρίως στην τηλεπισκόπηση. Αναλυτικότερα:

Εργασία πεδίου

Αποτελεί την πιο απλή τεχνική αναγνώρισης κατολισθήσεων η οποία διενεργείται κυρίως για (Guzzetti et al., 2012):

- τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση μεμονωμένων κατολισθήσεων που έχουν προκληθεί από ένα συγκεκριμένο γεγονός ενεργοποίησης (όπως σεισμός, ισχυρή βροχόπτωση, κ.ά.) ή σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο,

- τη λήψη εξειδικευμένων πληροφοριών σχετικά με τον τύπο και τα (οπτικά) χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων, και
- την επικύρωση κατολισθητικών δεδομένων που έχουν προκύψει από άλλες τεχνικές αναγνώρισης (υποστηρικτική/συνδυαστική χρήση).

Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, μια σειρά από τεχνολογίες έχουν προκύψει με στόχο τη διευκόλυνση των γεωεπιστημόνων στην προσπάθεια τους ν' αναγνωρίσουν κατολισθητικά γεγονότα στο πεδίο. Αναμφισβήτητα, η πιο πολύτιμη τεχνολογία είναι τα παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης (global positioning systems – GPS). Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται στην ύπαρξη δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό θέσεων με ακριβείς συντεταγμένες. Μέσω της ταυτόχρονης καταγραφής μιας θέσης από πολλαπλούς δορυφορικούς αισθητήρες, τα GPS μπορούν να αποφέρουν πολύ ακριβείς (εντός 1 εκατοστού) γεωγραφικές πληροφορίες για κάθε μία κατολίσθηση συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στη χαρτογράφηση της κατανομής του φαινομένου σε μια περιοχή. Εκτός από τα GPS, η διαθεσιμότητα υψηλής ποιότητας ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών έχει επίσης απλοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την τεκμηρίωση κατολισθήσεων στο πεδίο. Εκτός των προαναφερθέντων τεχνολογιών, μια πιο εξελιγμένη μορφή εργασίας πεδίου έχει επίσης κάνει την εμφάνιση της τα τελευταία χρόνια. Σ' αυτήν ένα όχημα, εξοπλισμένο με υψηλής ακρίβειας διαφορικό GPS (Differential GPS), ψηφιακές κάμερες με θέαση 360°, φορητές υπολογιστικές συσκευές και ασύρματη επικοινωνία, κινείται κατά μήκος των οδικών αξόνων, ακόμα και εκτός αυτών, ενώ ένας χειριστής εποπτεύει την καταγραφή των νέων δεδομένων και τις αλλαγές στην υφιστάμενη βάση δεδομένων (χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αυτού του είδους αποτελεί η υπηρεσία “Google Street View”).

Αν και για πολλά χρόνια η εργασία πεδίου θεωρείτο μια τεχνική συλλογής λεπτομερών κατολισθητικών δεδομένων, πλέον ο ισχυρισμός αυτός αμφισβητείται εντόνως λόγω της δυσκολίας αναγνώρισης του συνόλου των κατολισθητικών γεγονότων μιας υπό εξέταση περιοχής. Η δυσκολία αυτή οφείλεται: (α) στο μεγάλο μέγεθος μιας κατολίσθησης, καθιστώντας αδύνατη την πλήρη αναγνώριση της στο πεδίο, (β) στην εμπειρία του ερευνητή η οποία συχνά κρίνεται ανεπαρκής για να μπορέσει να διακρίνει όλα τα χαρακτηριστικά μιας κατολίσθησης (π.χ. κεφαλή, δάκτυλο, επιφάνεια θραύσης, κ.ά.), (γ) στο γεγονός ότι οι παλιές κατολισθήσεις, τις περισσότερες φορές, είτε είναι μερικώς ή πλήρως επικαλυμμένες από ψηλή

και πυκνή βλάστηση, είτε έχουν αλλοιωθεί από άλλες κατολισθήσεις, διεργασίες διάβρωσης και ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. γεωργικές και δασικές πρακτικές), και (δ) στη μη δυνατότητα πρόσβασης σε μια κατολίσθηση εξαιτίας του ανώμαλου αναγλύφου της περιοχής ή της έλλειψης οδικών αξόνων. Έτσι, άλλες τεχνικές θέασης από απόσταση, όπως η αεροφωτογράφιση και η τηλεπισκόπηση, τείνουν να προτιμώνται καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε πιο λεπτομερή και ολοκληρωμένα δεδομένα.

Αεροφωτογράφιση

Σύμφωνα με τον Brunsden,

«ο καλύτερος φίλος του ερευνητή κατολισθήσεων εξακολουθεί να είναι η αεροφωτογραφία. Όλοι είναι εξοικειωμένοι με τις (...) δυνατότητες αυτού του μέσου και μπορεί να υπάρχουν λίγες μελέτες που έχουν διεξαχθεί οι οποίες δεν χρησιμοποιούν την ερμηνεία των αεροφωτογραφιών σε κάποια μορφή» (1993:96).

Η ερμηνεία των αεροφωτογραφιών έχει αποδειχθεί μια αποτελεσματική τεχνική για την αναγνώριση και την οριοθέτηση κατολισθήσεων και παρά την ανάπτυξη πιο προηγμένων τεχνικών παραμένει ευρέως διαδεδομένη. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

- Για έναν έμπειρο ερευνητή, η ερμηνεία των αεροφωτογραφιών αποτελεί μια απλή και ανέξοδη διαδικασία που δεν απαιτεί εξειδικευμένες τεχνολογικές γνώσεις και δεξιότητες. Ειδικότερα, με την εισαγωγή της στερεοσκοπικής (3D) απεικόνισης στις αεροφωτογραφίες, ένας έμπειρος ερευνητής μπορεί να αναγνωρίσει και να χαρτογραφήσει κατολισθήσεις με αρκετά μεγάλη ευκολία.
- Το μέγεθος (συνήθως 21×21 εκατοστά) και η κλίμακα (από 1:5.000 έως 1:70.000) των αεροφωτογραφιών επιτρέπουν την κάλυψη μεγάλων περιοχών με ένα λογικό αριθμό φωτογραφιών. Μια κατολίσθηση με τυπικό μέγεθος, δηλαδή από μερικές δεκάδες έως αρκετές εκατοντάδες μέτρα σε μήκος ή πλάτος, μπορεί να χωρέσει σ' ένα μόνο ζεύγος στερεοσκοπικών αεροφωτογραφιών, επιτρέποντας έτσι στον ερευνητή να εργαστεί με μεγάλη ευκολία.
- Εθνικοί και τοπικοί φορείς ή ερευνητικοί οργανισμοί, καθώς επίσης και ιδιωτικές επιχειρήσεις, έχουν από καιρό αποκτήσει στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες για διάφορους σκοπούς τις οποίες πλέον ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος μπορεί άμεσα να προμηθευτεί είτε σε έντυπη, είτε σε

ηλεκτρονική μορφή μέσω διαδικτυακών υπηρεσιών (π.χ. του Ελληνικού Κτηματολογίου, <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>, 10/01/2018).

Γενικά, η προσεκτική μελέτη μιας συγκεκριμένης περιοχής με τη βοήθεια πλάγιων και κάθετων στερεοζευγών αεροφωτογραφιών μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και τη συχνότητα των κατολισθήσεων που έχουν εκδηλωθεί σ' αυτήν. Όποτε είναι δυνατό, συνιστάται η ανασκόπηση των διαδοχικών αεροφωτογραφικών επικαλύψεων (πρόσφατες και παλαιότερες αεροφωτογραφίες) της υπό εξέταση περιοχής, καθώς οι παλαιότερες ολισθήσεις μπορεί να μην είναι εμφανείς στις πιο πρόσφατες φωτογραφίες κυρίως λόγω της ανάπτυξης βλάστησης/φυτοκάλυψης. Η μελέτη των διαδοχικών επικαλύψεων, επιπλέον, μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το βαθμό δραστηριότητας των διαφόρων τύπων κατολισθήσεων, καθώς και την πιθανή επίδραση των μεταβολών των χρήσεων γης και άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων στη σταθερότητα των πρανών (Van Westen, 2000). Πολλές φορές, οι αεροφωτογραφίες χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με τα δορυφορικά δεδομένα. Ο συνδυασμός αυτός παρέχει μια πιο ακριβή και πλήρη απεικόνιση των συνθηκών του εδάφους.



Εικόνα 3.1: Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης La Conchita στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ με έτος λήψης το 2005. Η μπλε γραμμή υποδηλώνει ένα παλιότερο γεγονός, ενώ η κίτρινη ένα πιο πρόσφατο γεγονός (Highland and Bobrowsky, 2008).

Εκτός από την αεροφωτογράφιση, τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν εκμεταλλευτεί στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων τις δυνατότητες καινοτόμων τεχνικών που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση. Ως *τηλεπισκόπηση (remote sensing)* ορίζεται η επιστήμη που ασχολείται με τη συλλογή παρατηρήσεων της επιφάνειας της Γης (Earth observations) χρησιμοποιώντας τεχνικές μη-επαφής (Scaioni et al., 2014). Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται στις δορυφορικές τεχνικές και τις τεχνικές σάρωσης με λέιζερ.

Δορυφορικές τεχνικές

Η χρήση της δορυφορικής τεχνολογίας για μη στρατιωτικούς σκοπούς ξεκίνησε στη δεκαετία του 1960 με τους μετεωρολογικούς δορυφόρους, αλλά γρήγορα ακολουθήθηκε στις αρχές του 1970 από δορυφορικά συστήματα σχεδιασμένα να παρατηρούν την επιφάνεια της Γης. Από τότε, περισσότεροι από 200 δορυφόροι παρατήρησης έχουν εκτοξευθεί, χωρίς ωστόσο να βρίσκονται όλοι τους ακόμα σε λειτουργία. Στις μέρες μας, ένα σύνολο δορυφορικών συστημάτων/αισθητήρων λειτουργεί σαρώνοντας ζώνες ορθογώνιες προς την κατεύθυνση της τροχιάς τους με διαδοχικές σαρώσεις/περάσματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εικόνων. Ακριβώς όπως με τις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές όπου η ποιότητα τους εκτιμάται σύμφωνα με τον αριθμό των megapixels με τα οποία λαμβάνουν μια εικόνα, έτσι κι η ποιότητα των δορυφορικών αισθητήρων αξιολογείται ανάλογα με τη γεωμετρική διακριτική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) που διαθέτουν, δηλαδή την περιοχή του εδάφους που καλύπτεται από ένα εικονοστοιχείο (pixel) της παραγόμενης εικόνας τους. Η ικανότητα τους αυτή στις μέρες μας μπορεί να κυμαίνεται από λίγα έως και μερικές δεκάδες εκατοστά.

Η εκδήλωση των κατολισθήσεων έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση των οπτικών ιδιοτήτων της γήινης επιφάνειας. Οι δορυφορικοί αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν τις διακυμάνσεις στη φασματική υπογραφή της γήινης επιφάνειας με αποτέλεσμα οι εικόνες που λαμβάνονται απ' αυτούς να θεωρούνται ιδιαιτέρως χρήσιμες στην αναγνώριση παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων. Η αξιοποίηση της δορυφορικής απεικόνισης γι' αυτό το σκοπό χρονολογείται στη δεκαετία του 1970, όταν οι πρώτες οπτικές εικόνες έκαναν την εμφάνιση τους. Κατά την τελευταία δεκαετία, η χρήση, για κατολισθητικές μελέτες, εικόνων που προέρχονται από αυτού του είδους τις τεχνικές έχει σημειώσει σημαντική άνοδο λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας δορυφορικών εικόνων υψηλής ή πολύ υψηλής ανάλυσης, καθώς και των βελτιώσεων στο υλικό και λογισμικό των ηλεκτρονικών υπολογιστών που

διευκολύνουν την επεξεργασία και οπτικοποίηση τους. Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής γεωμετρικής διακριτικής ικανότητας χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή χαρτών καταγραφής κατολισθήσεων, όπως επίσης και για τη χαρτογράφηση των χρονικών μεταβολών των παραγόντων που σχετίζονται με την εκδήλωση του φαινομένου (όπως η μορφολογία του εδάφους, η γεωλογία, η κάλυψη γης, κ.ά.) (Savnaidis, 2003).

Για περιφερειακής και εθνικής κλίμακας μελέτες, οι δορυφορικές εικόνες αποτελούν έναν αρκετά οικονομικό τρόπο απόκτησης δεδομένων. Ένα άλλο πλεονέκτημα των δορυφορικών τεχνικών είναι η ικανότητα των επαναληπτικών παρατηρήσεων η οποία οδηγεί σε μια πιο συχνή ενημέρωση των σχετικών με τις κατολισθήσεις πληροφοριών απ' ό,τι οι συμβατικές πηγές δεδομένων (π.χ. έλλειψη πρόσφατων αεροφωτογραφιών). Σημαντικό μειονέκτημα, ωστόσο, του συγκεκριμένου τύπου τεχνικών αναγνώρισης κατολισθήσεων είναι ότι σε μικρής κλίμακας δορυφορικές εικόνες, μόνο οι εξαιρετικά μεγάλες κατολισθήσεις μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα.

Δύο είναι οι κύριοι τύποι δορυφορικών αισθητήρων από τους οποίους προέρχονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων: οι οπτικοί αισθητήρες και οι αισθητήρες ραντάρ.

- ο *Οπτικοί αισθητήρες (optical sensors)*: ονομάζονται και παθητικοί αισθητήρες καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στην καταγραφή του ηλιακού φωτός που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης (συμπεριλαμβανομένων και των αντικειμένων που βρίσκονται πάνω σ' αυτήν). Για το λόγο αυτό, η απεικόνιση από τους συγκεκριμένους αισθητήρες υφίσταται περιορισμούς ως προς τη χρονική στιγμή (μόνο με το φως της ημέρας) και τις καιρικές συνθήκες (χωρίς σύννεφα και ομίχλη) κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται. Αξιοποιούν κυρίως το ορατό (visible) και υπέρυθρο (infrared) τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καλύπτοντας το εύρος που κυμαίνεται από 400 nm έως 1.040 μm. Η ανάδειξη των οπτικών εικόνων, τόσο παγχρωματικών (από ένα μεμονωμένο φασματικό κανάλι) όσο και πολυφασματικών (από πολλαπλά φασματικά κανάλια), άνοιξε νέους ορίζοντες στην ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων για την αναγνώριση κατολισθήσεων. Αρχικά, οι αισθητήρες είχαν γεωμετρική διακριτική ικανότητα της τάξης των 10-30 μέτρων (π.χ. Landsat, SPOT). Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, όμως, οπτικοί αισθητήρες υψηλής και πολύ υψηλής

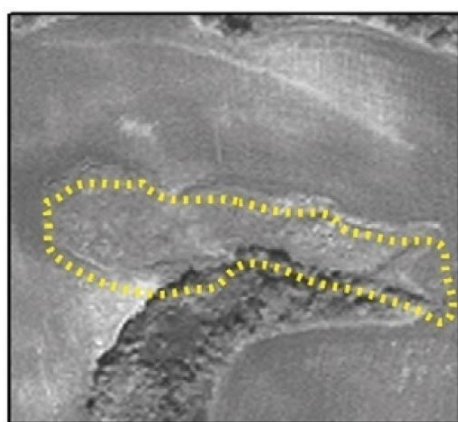
χωρικής ανάλυσης (π.χ. IKONOS, Quickbird, ASTER), συνοδευόμενοι συγχρόνως από καλύτερες προδιαγραφές όσο αναφορά τον αριθμό των φασματικών καναλιών (bands), το χρόνο επανάληψης, την καλυπτική ικανότητα (παγκόσμια κάλυψη) και γενικά τη λειτουργία τους (δυνατότητα στερεοσκοπικής απεικόνισης), κατασκευάστηκαν (Scaioni et al., 2014). Η χρήση αυτών των υψηλής ανάλυσης εικόνων και των παράγωγων προϊόντων τους (π.χ. σύνθετες, ψευδέχρωμες εικόνες, κ.ά.) αποσκοπούσε στην αντικατάσταση των παραδοσιακών αεροφωτογραφιών, στην παρασκευή χωρικός και γεωμετρικός διορθωμένων (γεωαναφερμένων και ορθοανοιγμένων) εικόνων ισοδύναμων από άποψη ποιότητας με τις ορθοφωτογραφίες, και στη δημιουργία εικόνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ή έμμεσα (σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα) στην αναγνώριση του φαινομένου (Εικόνα 3.2α). Πλέον, η ερμηνεία των οπτικών εικόνων θεωρείται ιδιαιτέρως κατάλληλη για τον εντοπισμό κατολισθήσεων με σαφή και διακριτά όρια, όπως στις περιπτώσεις των πρόσφατων και ρηχών κατολισθήσεων, καθώς επίσης κι αυτών που έχουν προκληθεί από ένα διακριτό γεγονός ενεργοποίησης, χρησιμοποιώντας εικόνες πριν και μετά από το γεγονός (pre- and post-event images). Επιπλέον, η στερεοσκοπική απεικόνιση αυτού του τύπου των αισθητήρων αποτελεί ένα βασικό εργαλείο δεδομένου ότι ορισμένες κατολισθήσεις είναι ανιχνεύσιμες μόνο με την τρισδιάστατη απεικόνιση. Κύρια μειονεκτήματα της οπτικής ερμηνείας εικόνων συνιστούν η εξάρτησή της σε μεγάλο βαθμό από την ανθρώπινη εμπειρία, και η προκύπτουσα απ' αυτή την εξάρτηση υποκειμενικότητα και αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της. Την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την «αυτοματοποίηση» της ερμηνείας των εικόνων, μέσω της ανάπτυξης αλγορίθμων ταξινόμησης, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής της και την παροχή υποστήριξης στους ερευνητές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αναγνώρισης (Lee and Lee, 2006; Lacroix et al., 2013). Η πλειοψηφία αυτών των αλγορίθμων βασίζεται στην ανάλυση των ραδιομετρικών/φασματικών πληροφοριών του εικονοστοιχείου (pixel-based algorithms).

- ο *Αισθητήρες ραντάρ (radar sensors)*: ονομάζονται και ενεργητικοί αισθητήρες καθώς παρέχουν τη δική τους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ακολούθως καταγράφουν την ισχύ του ανακλώμενου σήματος από το έδαφος. Λόγω αυτής

της ιδιότητάς τους, η απόκτηση εικόνων δεν επηρεάζεται από το φυσικό φωτισμό και τη νεφοκάλυψη. Ο πιο ευρέως γνωστός αισθητήρας τέτοιου τύπου είναι το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (synthetic aperture radar – SAR). Το SAR εφαρμόζεται συνήθως με την τοποθέτηση μιας ενιαίου σχηματισμού δέσμης κεραίας σε μία κινούμενη πλατφόρμα, όπως είναι ο δορυφόρος. Από αυτήν την κεραία μια στοχευόμενη περιοχή φωτίζεται επανειλημμένα με ραδιοκύματα. Οι κυματομορφές που λαμβάνονται διαδοχικά στις διάφορες θέσεις της κεραίας, αρχικώς, ανιχνεύονται συνεκτικά και αποθηκεύονται (Papa and Ferrando, 2012). Στη συνέχεια, υφίστανται μια (μετα)επεξεργασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση των παρατηρούμενων στοιχείων της στοχευμένης περιοχής σε μια εικόνα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Οι διαθέσιμοι αισθητήρες ERS-1 και 2, και οι πιο πρόσφατοι ENVISAT και ALOS PALSAR, μέσω των πολλών δυνατοτήτων που προσφέρουν για την απόκτηση μιας μεγάλης χρονοσειράς εικόνων, συμβάλλουν σημαντικά στην αναγνώριση των μετατοπίσεων της γήινης επιφάνειας. Η πιο διαδεδομένη τεχνική για την αξιοποίηση των δεδομένων SAR στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων είναι η συμβολομετρία (interferometric synthetic aperture radar – InSAR). Χρησιμοποιώντας τις διαφορές στην φάση των κυμάτων που επιστρέφουν στο δορυφόρο (δηλαδή την επιστροφή τους σε διαφορετικούς χρόνους), δύο ή περισσότερες εικόνες επιφανειακής παραμόρφωσης παράγονται. Έπειτα, οι παραγόμενες εικόνες, οι οποίες αφορούν την ίδια περιοχή, συγχωνεύονται, σχηματίζοντας μια εικόνα που ονομάζεται συμβολογράφημα (interferogram). Το συμβολογράφημα δείχνει την μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους (εφόσον υπάρχει) για την υπό εξέταση περιοχή (Εικόνα 3.2β). Σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι (α) βασιζόμενη σε ενεργητικούς αισθητήρες, δεν παρουσιάζει περιορισμούς όσο αναφορά τις καιρικές συνθήκες (π.χ. ομίχλη, βροχή), και (β) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιοχές που είναι δύσκολα προσβάσιμες. Η εφαρμοστικότητα της αποκλειστικά στην αναγνώριση κατολισθητικών γεγονότων με μικρή μετατόπιση υλικού (της τάξης των εκατοστών) συνιστά το κύριο μειονέκτημα της (Van Westen et al., 2008).

Πίνακας 3.1: Λίστα βιβλιογραφικών αναφορών αξιοποίησης δορυφορικών συστημάτων στην αναγνώριση κατολισθήσεων.

Δορυφόρος	Συγγραφείς	Χρονολογία
LANDSAT	Singhroy et al.	1998
	Zhou et al.	2002
SPOT	Nichol et al.	2006
	Borghuis et al.	2007
	Sato and Harp	2009
IKONOS	Grodecki and Dial	2001
	Fiorucci et al.	2011
QUICKBIRD	Mondini et al.	2011a
	Mondini et al.	2011b
ASTER	Gao and Maroa	2010
	Alkevli and Ercanoglu	2011
ERS	Cascini et al.	2013
	Del Ventisette et al.	2014
	Calvello et al.	2017
ENVISAT	Rosi et al.	2018
	Cascini et al.	2013
	Del Ventisette et al.	2014
	Calvello et al.	2017
ALOS PALSAR	Rosi et al.	2018
	Jebur et al.	2015
	Sun et al.	2015



(α)



(β)

Εικόνα 3.2: Αναγνώριση κατολισθήσεων ή εντοπισμός των θέσεων τους σε δεδομένα προερχόμενα από δορυφορικές τεχνικές. (α) Σε πανχρωματική εικόνα IKONOS (Fiorucci et al., 2011), και (β) σε συμβολογράφημα (InSAR) (Parcharidis et al., 2005).

Τεχνικές σάρωσης με λέιζερ

Η σάρωση με λέιζερ (laser scanning) ή ανίχνευση και σκόπευση του φωτός (light detection and ranging – LiDAR) είναι μια τεχνική τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιείται για την απόκτηση πολύ μεγάλης ακρίβειας (μικρότερη του ενός μέτρου) ψηφιακών αναπαραστάσεων της τοπογραφικής επιφάνειας περιοχών με έκταση από λίγα εκτάρια έως χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η τεχνική χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα λέιζερ (laser sensor), τοποθετημένο συνήθως σ' ένα αεροπλάνο ή ελικόπτερο με GPS (για την κατάδειξη της γεωγραφικής θέσης του), ο οποίος αφού αρχικώς εκπέμπει κατακόρυφα (προς τα κάτω) παλμούς φωτός, ακολούθως αναλύει τις ιδιότητες του επιστρεφόμενου σήματος για να προσδιορίσει μετρήσεις ύψους σε πολλαπλά σημεία στη τοπογραφική επιφάνεια (συνήθως πάνω από 100 σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο). Έτσι, καθίσταται δυνατή η απεικόνιση με μεγάλη λεπτομέρεια του ύψους και του σχήματος των κτιρίων και της βλάστησης, καθώς επίσης και οποιασδήποτε αλλαγής στην τοπογραφία μιας περιοχής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ικανότητα του αισθητήρα να διαπερνά το δασικό «θόλο» (δηλαδή το φύλλωμα των δέντρων), προσφέρουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη συγκεκριμένη τεχνική ως προς την αναγνώριση κατολισθήσεων έναντι των άλλων τεχνικών που βασίζονται στην οπτική ερμηνεία αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων (Εικόνα 3.3).

Πολύ υψηλής ανάλυσης Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρων – ΨΜΥ (Digital Elevation Models – DEMs) και παράγωγα προϊόντα (όπως χάρτες ισοϋψών καμπυλών, κλίσης και καμπυλότητας, εικόνες σκιασμένου αναγλύφου, κ.ά.) που προέρχονται από τεχνικές σάρωσης με λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως για την οπτική ανάλυση της τοπογραφικής επιφάνειας και την αυτόματη (ή ημι-αυτόματη) αναγνώριση κατολισθητικών γεγονότων. Η οπτική ανάλυση και ερμηνεία της τοπογραφικής επιφάνειας αποτελεί την πιο κοινή εφαρμογή στον εντοπισμό κατολισθήσεων σε μεγάλης έκτασης περιοχές (Schulz, 2007; Razak et al., 2011). Οι τύποι κατολισθήσεων που εντοπίζονται περιλαμβάνουν ως επί το πλείστον μεγάλες ρηχές και βαθιές ολισθήσεις (περιστροφικές ή σύνθετες), και ροές κορημάτων. Σε αντίθεση με την οπτική ανάλυση, λίγοι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να χρησιμοποιήσουν πολύ υψηλής ανάλυσης LiDAR ΨΜΥ για την αυτόματη αναγνώριση κατολισθητικών γεγονότων (Booth et al., 2009;

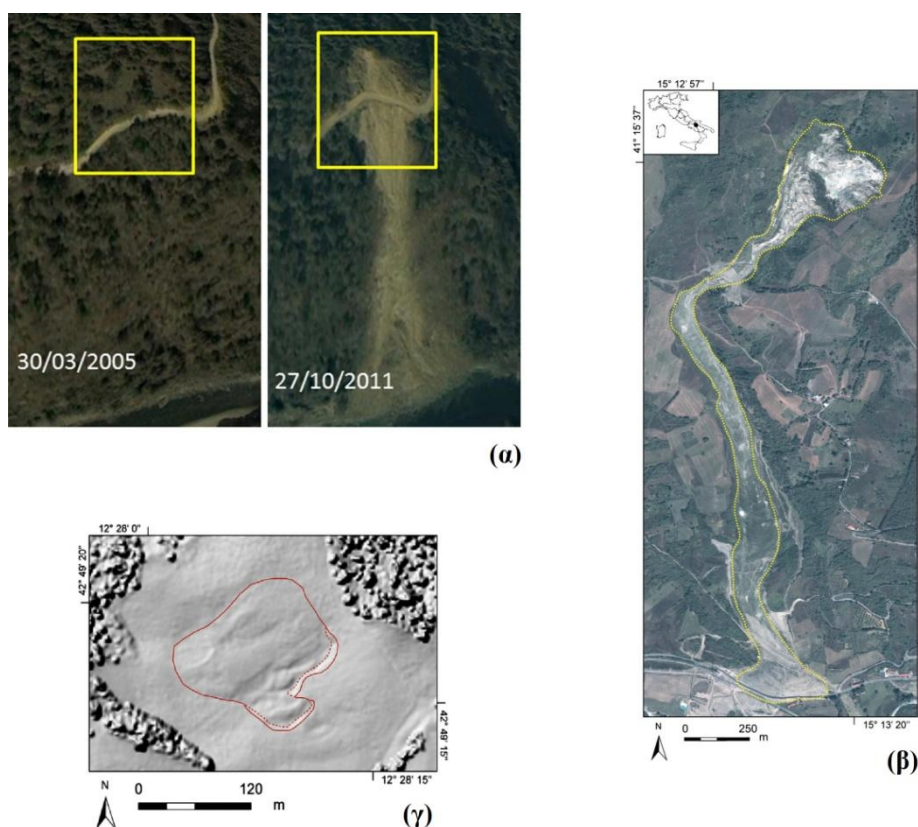
Kasai et al., 2009). Αυτή η διαδικασία διευκολύνει κυρίως την αναγνώριση κατολισθήσεων που έχουν προκληθεί από ένα συγκεκριμένο γεγονός ενεργοποίησης.



Εικόνα 3.3: Αναγνώριση ετεροχρονισμένων γεγονότων (διαφορετικά χρώματα) της ίδιας κατολίσθησης κατολισθήσεων σε ψηφιακή αναπαράσταση LiDAR (Highland and Bobrowsky, 2008).

Γενικότερα, η αναγνώριση κατολισθήσεων μέσα από την οπτική ανάλυση αεροφωτογραφικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί εμπειρία, συστηματική μεθοδολογία και σαφώς καθορισμένα κριτήρια ερμηνείας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές δεν υπάρχουν, ο ερευνητής εντοπίζει κατολισθητικά γεγονότα μέσω μιας, βασισμένης στην εμπειρία του, ανάλυσης του συνόλου των χαρακτηριστικών που μπορούν να ανιχνευτούν στα δεδομένα (Guzzetti et al., 2012). Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τόσο την υπό εξέταση περιοχή, όσο και τις ίδιες τις κατολισθήσεις. Τα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής περιλαμβάνουν κυρίως την ύπαρξη «ανωμαλιών» στις επικρατούσες σ' αυτήν γεωμορφολογικές και τοπογραφικές συνθήκες, όπως διακοπτόμενη ή απούσα βλάστηση/φυτοκάλυψη (Εικόνα 3.4α), διακοπτόμενο υδρογραφικό δίκτυο, επιφανειακές ρωγμές/σχισμές, απότομες αλλαγές της κλίσης, παρουσία κοιλοτήτων και κυρτοτήτων στο έδαφος, κ.ά. Τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων περιλαμβάνουν το σχήμα, το μέγεθος (Εικόνα 3.4β), το βάθος και τη χρωματική απόδοσή τους. Επιπλέον, λόγω των διαφόρων τύπων κατολισθήσεων, δεν είναι όλες οι κατολισθήσεις σαφώς και εύκολα αναγνωρίσιμες στα συγκεκριμένα δεδομένα. Αμέσως μετά από ένα γεγονός ενεργοποίησης, οι κατολισθήσεις είναι πρόσφατες και τα όρια μεταξύ των περιοχών αστοχίας (περιοχές εξάντλησης, μεταφοράς και απόθεσης) και του «ανεπηρέαστου» εδάφους είναι

συνήθως διακριτά, καθιστώντας σχετικά απλό για τον ερευνητή να τις εντοπίσει. Αυτό ιδιαίτερος ισχύει για τις μικρές και ρηχές κατολισθήσεις, όπως ολισθήσεις γαιών ή ροές κορημάτων. Για τις μεγάλες και βαθιές μετακινήσεις πρανών (συνήθως σύνθετες), ο προσδιορισμός αυτών των ορίων δεν είναι εφικτός, ακόμη και για τις πρόσφατες αστοχίες. Η πάροδος των χρόνων και η επίδραση διαφορετικών παραγόντων σε μια περιοχή, όπως η διάβρωση και οι αλλαγές στις χρήσεις γης, συμβάλλουν επίσης με τη σειρά τους στη δυσκολία καθορισμού με ακρίβεια των ορίων της κατολισθαίνουσας μάζας (Εικόνα 3.4γ).



Εικόνα 3.4: Αναγνώριση κατολισθήσεων σε αεροφωτογραφικά και τηλεπισκοπικά δεδομένα μέσω της οπτικής ανάλυσης διαφορετικών χαρακτηριστικών. (α) Με βάση χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής όπως απουσία βλάστησης/φυτοκάλυψης σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές (Pandey and Sharma, 2017), (β) με βάση χαρακτηριστικά της κατολίσθησης όπως ιδιαίτερο σχήμα και μεγάλο μέγεθος (Guzzetti et al., 2012), και (γ) με βάση χαρακτηριστικά της κατολίσθησης όπως μεγάλο βάθος (Guzzetti et al., 2012).

Η αναγνώριση κατολισθήσεων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης μίας ή των συνδυασμό δύο ή περισσότερων από τις προαναφερθείσες τεχνικές. Η επιλογή κάθε φορά της

κατάλληλης(-ων) τεχνικής(-ων) εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης, την έκταση της περιοχής μελέτης, την κλίμακα, τη γεωμετρική διακριτική ικανότητα και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δεδομένων (π.χ. αεροφωτογραφιών, δορυφορικών εικόνων, LiDAR ΨΜΥ), τις δεξιότητες και την εμπειρία του ερευνητή, καθώς επίσης και τους διαθέσιμους πόρους για την εκπόνηση της μελέτης. Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες απ' αυτές τις τεχνικές – αν όχι όλες – συνδυασμένες με άλλες γεωδαιτικές, γεωτεχνικές και γεωφυσικές τεχνικές εφαρμόζονται και σ' ένα άλλο παρεμφερές στάδιο ανάλυσης του φαινομένου, το στάδιο της παρακολούθησης κατολισθήσεων. Η *παρακολούθηση κατολισθήσεων* έχει ως στόχο τη σύγκριση των κατολισθητικών συνθηκών (όπως η έκταση, η ταχύτητα μετακίνησης, η τοπογραφία της επιφάνειας, η υγρασία του εδάφους από διαφορετικές χρονικές περιόδους, κ.ά.) μιας περιοχής, προκειμένου να εκτιμηθεί η δραστηριότητα των υφιστάμενων κατολισθήσεων (Mantovani et al., 1996). Η άμεση ανίχνευση της δραστηριότητας των υφιστάμενων κατολισθήσεων μέσω των συνεχών δεδομένων που παρέχονται από τα συστήματα πραγματικού χρόνου (π.χ. τηλεπισκοπικά συστήματα) μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών και την προστασία περιουσιών.

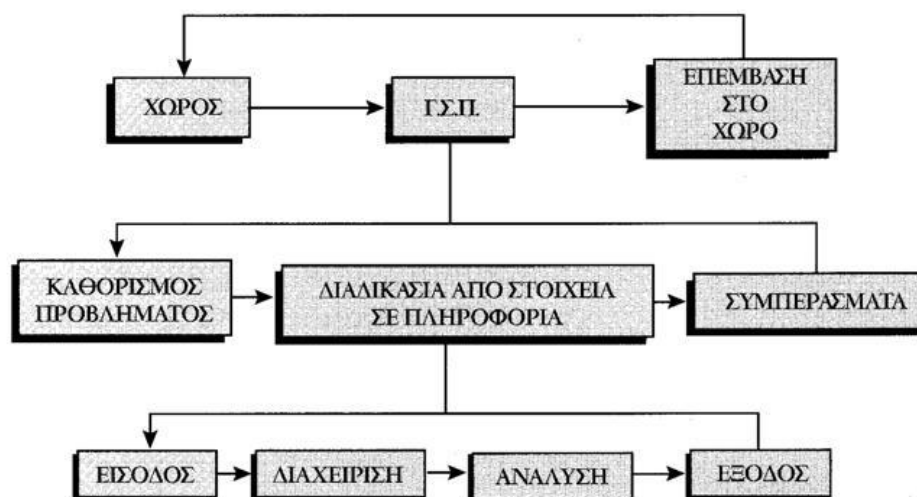
3.1.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων

Το στάδιο της *χαρτογράφησης κατολισθήσεων* περιλαμβάνει την εφαρμογή, βασισμένων στη τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης με στόχο την εκτίμηση των διαφορετικών πτυχών του φαινομένου (επιδεκτικότητα, κίνδυνος, επικινδυνότητα, τρωτότητα) και την παραγωγή των αντίστοιχων χαρτών. Αναλυτικότερα:

3.1.2.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και κατολισθήσεις

Κατά καιρούς, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορους ορισμούς για τον προσδιορισμό των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών – ΣΓΠ (Geographic Information Systems – GIS). Ωστόσο, σήμερα έχει επικρατήσει ένας γενικός ορισμός σύμφωνα με τον οποίον τα ΣΓΠ αποτελούν ένα σύνολο υλικού, λογισμικού, διαδικασιών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκληση, διαχείριση, ανάλυση, μοντελοποίηση και απεικόνιση των χωρικών δεδομένων του πραγματικού κόσμου (Burrough, 1983; Χαλκιάς, 2007). Στο παρακάτω Σχήμα με τα στάδια και τις διαδικασίες ενός ΣΓΠ,

μπορεί κανείς να διακρίνει όχι μόνο τις σχέσεις εξάρτησης που αναπτύσσονται μεταξύ των διαδικασιών του συστήματος, αλλά και τη σχέση του ίδιου συστήματος με τον πραγματικό κόσμο.



Σχήμα 3.1: Στάδια και διαδικασίες σε ένα ΣΓΠ (Χαραλάμπους και Σακελλαρίου, 2005).

Τα ΣΓΠ αποτελούνται από τρία βασικά συστατικά μέρη. Αυτά είναι (Burrough and Mc Donnell, 1998):

- Τα μηχανήματα ή το υλικό (hardware) και πιο συγκεκριμένα η κεντρική μονάδα, τα περιφερειακά και το τερματικό.
- Το λογισμικό (software) το οποίο αποτελείται από το λογισμικό εισαγωγής και επαλήθευσης στοιχείων, το λογισμικό αποθήκευσης και διαχείρισης στοιχείων, το λογισμικό μετασχηματισμού στοιχείων, το λογισμικό παρουσίασης, το λογισμικό αναζητήσεων, και το λογισμικό ανάλυσης χώρου.
- Τα διαθέσιμα τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο με την μορφή των δεδομένων, των ανθρώπων και της οργανωτικής υποδομής.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, και ειδικότερα με την ανακήρυξη της δεκαετίας 1990-2000 από την UNESCO ως η «Διεθνής Δεκαετία για την Μείωση των Φυσικών Καταστροφών (Decade for Natural Disaster Reduction)», η ανάγκη για επεξεργασία των γεωγραφικών/περιβαλλοντικών δεδομένων διαδόθηκε ουσιαστικά σ' όλες τις δυτικές χώρες και σε πολλά αναπτυσσόμενα κράτη με αποτέλεσμα η τεχνολογία των ΣΓΠ ν' αποκτήσει

σημαντική αναγνωρισιμότητα. Η αναγνωρισιμότητα αυτή εκφράστηκε μέσα από μια συνεχώς αυξανόμενη χρήση της τεχνολογίας (εμφάνιση πολυάριθμων σχετικών ερευνητικών πρωτοβουλιών) καθώς και στην καθιέρωσή της ως το κυρίαρχο εργαλείο των επιστημονικών κλάδων και οργανώσεων που ήταν αρμόδιες για τον προγραμματισμό, τη διαχείριση και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών θεμάτων. Οι δυνατότητες των ΣΓΠ σχετικά με τη συλλογή, το χειρισμό και την επεξεργασία των περιβαλλοντικών δεδομένων συνέβαλαν σημαντικά σ' αυτό. Επίσης, η δυνατότητα αξιοποίησης του ίδιου συνόλου δεδομένων για τους διάφορους τύπους φυσικών κινδύνων σε συνδυασμό με τις υφιστάμενες εκείνη την περίοδο επιστημονικές γνώσεις καθιστούσαν δυνατή τη διενέργεια εκτιμήσεων (πριν ή μετά το γεγονός) για τις ζημιογόνες συνέπειες που θα μπορούσε να είχε η εκδήλωση ενός τέτοιου κινδύνου. Οι εκτιμήσεις αυτές αποτελούσαν τη βάση στη διαδικασία λήψης αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς για τον περιορισμό ή τη μείωση των συνεπειών των φυσικών κινδύνων τόσο βραχυπρόθεσμα (σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης), όσο και μακροπρόθεσμα (ανάπτυξη γενικού πλαισίου δράσης).

Από τις αρχές της ίδιας δεκαετίας (1990-2000), όλο και περισσότερες βασισμένες στα ΣΓΠ τεχνικές για τη μοντελοποίηση του κινδύνου των κατολισθήσεων άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους. Οι τεχνικές αυτές χαρακτηρίζονταν από πολύ απλές, όπως ήταν για παράδειγμα η ταξινόμηση της ευστάθειας των πρανών με βάση διάφορους παράγοντες (γεωλογικοί σχηματισμοί, κλίση και υψόμετρο του αναγλύφου, κ.ά.), έως πολύ περίπλοκες, όπως τα στατιστικά μοντέλα με τα οποία οι ερευνητές μπορούσαν να καταγράψουν τις κατολισθήσεις, να χαρτογραφήσουν τις κινδύνους που τυχόν θα προέκυπταν απ' αυτές, καθώς και να χωρίσουν σε ζώνες (ζωνοποίηση) συγκεκριμένες περιοχές με βάση την επιδεκτικότητα ή τον κίνδυνο κατολισθήσεων που παρουσίαζαν (Carrara et al., 1999).

Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση των ΣΓΠ στην ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων είναι τα εξής (Deketh and Rengers, 1997):

- ✓ Σημαντική μείωση του χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία και την ανάλυση του φαινομένου σε μια περιοχή μελέτης, καθώς και για την παραγωγή των απαιτούμενων χαρτογραφικών προϊόντων.
- ✓ Απόκτηση μη-διαθέσιμων δεδομένων. Παλιότερα, σε πολλές χώρες, λίγα ήταν τα σχετιζόμενα με το φαινόμενο δεδομένα που μπορούσαν ν' αποκτηθούν ή να χαρτογραφηθούν με την κατάλληλη ακρίβεια έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν. Τη

λύση στο πρόβλημα αυτό έχει δώσει σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογία των ΣΓΠ η οποία, τα τελευταία χρόνια, παρέχει στους χρήστες πολύτιμα εργαλεία για την απόκτηση, αποθήκευση και διαχείριση πολλών εξ' αυτών των δεδομένων με τους πλέον αποδοτικούς και καινοτόμους τρόπους. Για παράδειγμα, τα μορφολογικά δεδομένα μιας περιοχής (όπως η κλίση, ο προσανατολισμός και η καμπυλότητα του αναγλύφου της) μπορούν, σήμερα, ν' αποκτηθούν αρκετά εύκολα και σε σύντομο χρονικό διάστημα μέσω των εδαφολογικών ιδιοτήτων των ΨΜΥ.

- ✓ Δυνατότητα εφαρμογής πολλών και διαφορετικών μοντέλων ανάλυσης τα οποία απαιτούν υψηλές ταχύτητες λόγω της μεγάλης ποσότητας των δεδομένων που λαμβάνουν υπόψη τους και της υπέρθεσης ενός μεγάλου αριθμού χαρτογραφικών επιπέδων.
- ✓ Δυνατότητα βελτίωσης των μοντέλων ανάλυσης μέσα από την αξιολόγηση κάθε φορά των αποτελεσμάτων και την προσαρμογή των δεδομένων εισόδου (μέθοδος “trial and error”).
- ✓ Ευκολία ενημέρωσης των χαρτών μετά από την συλλογή νέων διαθέσιμων δεδομένων.
- ✓ Δυνατότητα 3D απεικόνισης, με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η απόκτηση τρισδιάστατων πληροφοριών σχετικά με τη θέση και τη γεωμετρία των κατολισθητικών γεγονότων μιας περιοχής.
- ✓ Δυνατότητα ενσωμάτωσης των κατολισθητικών δεδομένων σε παγκόσμιες διαδικτυακές χαρτογραφικές πλατφόρμες και λογισμικά (π.χ. Bing Maps, Google Earth, κ.ά.).

Ωστόσο, η συστηματική χρήση των ΣΓΠ στην ανάλυση του συγκεκριμένου φαινομένου συνοδεύεται κι από μερικούς κινδύνους και αστοχίες όπως (Van Westen, 2004):

- ✗ Τα χαρτογραφικά προϊόντα που παράγονται από τον υπολογιστή θεωρούνται αντικειμενικότερα και πιο ακριβή από τα αντίστοιχα προϊόντα που προκύπτουν από τους ερευνητές με τον «συμβατικό και παραδοσιακό» τρόπο, δηλαδή τη λεπτομερή χαρτογράφηση περιοχών μέσα από τη διενέργεια εργασιών πεδίου.
- ✗ Η χρήση των ΣΓΠ και η παραγωγή μικρότερης ακρίβειας χαρτών από χρήστες που δεν ειδικεύονται στους διάφορους τομείς της Γεωπληροφορικής.

- ✘ Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την πλευρά των χρηστών για την εκτίμηση του κινδύνου κατολισθήσεων δεν ακολουθείται από το αντίστοιχο ενδιαφέρον για την συλλογή αξιόπιστων δεδομένων.
- ✘ Η εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων (π.χ. ψηφιοποίηση γεωγραφικών οντοτήτων από δορυφορικές εικόνες) αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία.
- ✘ Τα περισσότερα από τα μοντέλα ανάλυσης δεν ενσωματώνουν άμεσα ούτε τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων (π.χ. μέγεθος, ταχύτητα, κ.ά.), ούτε και τη συχνότητα εκδήλωσής τους. Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως «πραγματικά» μοντέλα εκτίμησης του κινδύνου.

3.1.2.2 Χάρτες κατολισθήσεων

Οι χάρτες είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για την παρουσίαση σε διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας (κλίμακα χαρτών) των πληροφοριών που σχετίζονται με το φαινόμενο των κατολισθήσεων. Με βάση την πτυχή του φαινομένου η οποία μελετάται, υπάρχουν τα ακόλουθα είδη χαρτών:

Χάρτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων

Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων ορίζεται η πιθανότητα μια κατολίσθηση να εκδηλωθεί σε μια περιοχή ως αποτέλεσμα της επίδρασης των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών (Brabb, 1984). Εκφράζεται συνήθως χαρτογραφικά μέσα από ένα συγκεκριμένο μοτίβο χρωμάτων το οποίο συσχετίζει τα «θερμά» χρώματα (κόκκινο, πορτοκαλί και κίτρινο) με τις ασταθείς και οριακά ασταθείς περιοχές και τα «ψυχρά» χρώματα (μπλε και πράσινο) με τις σταθερότερες περιοχές (Chacon et al., 2006). Ένας χάρτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων απεικονίζει τις περιοχές (ή τις ζώνες περιοχών) που πιθανόν να εμφανίσουν κατολισθήσεις στο μέλλον, συσχετίζοντας μερικούς από τους κύριους παράγοντες που συνέβαλαν στην εκδήλωση παρελθοντικών κατολισθήσεων (Santacana et al., 2003). Παρά το γεγονός ότι ένας τέτοιος χάρτης δεν περιλαμβάνει «χρονική πρόβλεψη» (δηλαδή «πότε» ή «πόσο συχνά» θα εκδηλωθεί μια κατολίσθηση), μπορεί ν' αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για την ανάπτυξη σχεδίων μετριασμού των επιπτώσεων από τη πιθανή εκδήλωση του φαινομένου, τον προγραμματισμό των χρήσεων γης (ειδικά στις ορεινές περιοχές), και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την

επιλογή των πιο κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή τεχνικών έργων (κυρίως δρόμων και κτιρίων).

Χάρτης κινδύνου κατολισθήσεων

Ως κίνδυνος κατολισθήσεων ορίζεται η πιθανότητα εκδήλωσης μιας κατολίσθησης εντός μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου (π.χ. έτος, περίοδος κατασκευής ενός τεχνικού έργου) (Van Westen et al., 2006). Δίνεται από τον τύπο:

$$H = M \times P \quad (1)$$

όπου M είναι το μέγεθος ή ο όγκος (σε μ^3) της πηγής της κατολίσθησης, και P είναι η πιθανότητα ότι μια συγκεκριμένη κατολίσθηση εκδηλώνεται μέσα σ' ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (συνήθως ένα έτος). Ένας χάρτης κινδύνου κατολισθήσεων ουσιαστικά περιλαμβάνει μια ζωνοποίηση η οποία, χρησιμοποιώντας ως βάση τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, εκχωρεί μια εκτιμώμενη συχνότητα (ετήσια πιθανότητα) στις πιθανές/μελλοντικές κατολισθήσεις (Cascini, 2008). Ο τρόπος που αυτή η συχνότητα εκφράζεται, εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος (ή όγκο) των πιθανών κατολισθήσεων. Για παράδειγμα, για μικρές κατολισθήσεις σε φυσικά πρηνή ο κίνδυνος μπορεί να εκφραστεί ως ο αριθμός κατολισθήσεων ενός ορισμένου τύπου, όγκου και ταχύτητας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ή έτος, ενώ για μεγάλες κατολισθήσεις ως η ετήσια πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων. Σύμφωνα με την «επιστημονική ερευνητική κοινότητα», ένας ιδανικός χάρτης κινδύνου κατολισθήσεων θα ήταν αυτός που θα περιλάμβανε την παρουσίαση όχι μόνο της πιθανότητας εμφάνισης μιας κατολίσθησης σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αλλά και της πιθανότητας επηρεασμού αυτής της περιοχής από κατολισθήσεις που εκδηλώνονται σε μακρύτερα (με βάση την τοποθεσία τους) πρηνή. Γενικά, λόγω της συχνής απουσίας σαφούς σχέσης μεταξύ των χαρακτηριστικών (τύπος, μέγεθος, κ.ά.) και της συχνότητας κατολισθήσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, η εκτίμηση του κινδύνου κατολισθήσεων αποτελεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία.

Χάρτης τρωτότητας κατολισθήσεων

Κατά καιρούς, διάφοροι ορισμοί έχουν προταθεί για την τρωτότητα κατολισθήσεων. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Varnes (1984), στην απλούστερη μορφή της, ορίζεται ως ο βαθμός απώλειας ή ζημιάς ενός δεδομένου στοιχείου ή ενός συνόλου στοιχείων σε μια περιοχή που

επηρεάζεται από την εκδήλωση μιας συγκεκριμένου μεγέθους κατολίσθησης. Μαθηματικώς, η τρωτότητα κατολισθήσεων, V_L , μπορεί να οριστεί ως (Einstein, 1998):

$$V_L = P[D_L \geq 0/L], (0 \leq D_L \leq 1) \quad (2)$$

όπου P είναι η πιθανότητα απώλειας ή ζημιάς, και D_L είναι η προκληθείσα ή δυνητική/αναμενόμενη απώλεια ή ζημιά ενός στοιχείου λόγω της εκδήλωσης ενός κατολισθητικού γεγονότος, L . Η τρωτότητα κατολισθήσεων εκφράζεται σε μια κλίμακα από 0 (καμία απώλεια ή ζημιά) μέχρι 1 (πλήρης απώλεια ή ζημιά) και μπορεί να εκτιμηθεί τόσο ποσοτικώς, όσο και ποιοτικώς. Η ποσοτική εκτίμηση βασίζεται είτε στον υπολογισμό της σχέσης μεταξύ της αξίας της ζημιάς και της συνολικής αξίας του στοιχείου (Remondo et al., 2008), είτε στη χρήση εξειδικευμένων στατιστικών δεικτών (Uzielli et al., 2008; Li et al., 2010). Αντιθέτως, η ποιοτική εκτίμηση περιλαμβάνει την απόδοση (κατατακτῆριων) τιμών τρωτότητας στα επηρεαζόμενα στοιχεία για τον προσδιορισμό του βαθμού αναμενόμενης ζημιάς τους λόγω της εκδήλωσης ενός δυνητικού κατολισθητικού γεγονότος (Wong et al., 1997; Cardinali et al., 2002). Τα στοιχεία που έχουν επηρεαστεί ή ενδέχεται να επηρεαστούν από την εκδήλωση του φαινομένου σε μια περιοχή και τα οποία λαμβάνονται υπόψη ως εξεταζόμενες μεταβλητές στην εκτίμηση της τρωτότητας ονομάζονται «στοιχεία σε επικινδυνότητα». Αφορούν κυρίως τα κοινωνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπως ο πληθυσμός, οι υποδομές (κτιριακό απόθεμα και τεχνικά έργα κοινής ωφέλειας) και οι οικονομικές δραστηριότητες. Η επιλογή των συγκεκριμένων μεταβλητών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κλίμακα της ανάλυσης, καθώς επίσης από τη διαθεσιμότητα και ποιότητα των αντίστοιχων πρωτογενών δεδομένων.

Χάρτης επικινδυνότητας κατολισθήσεων

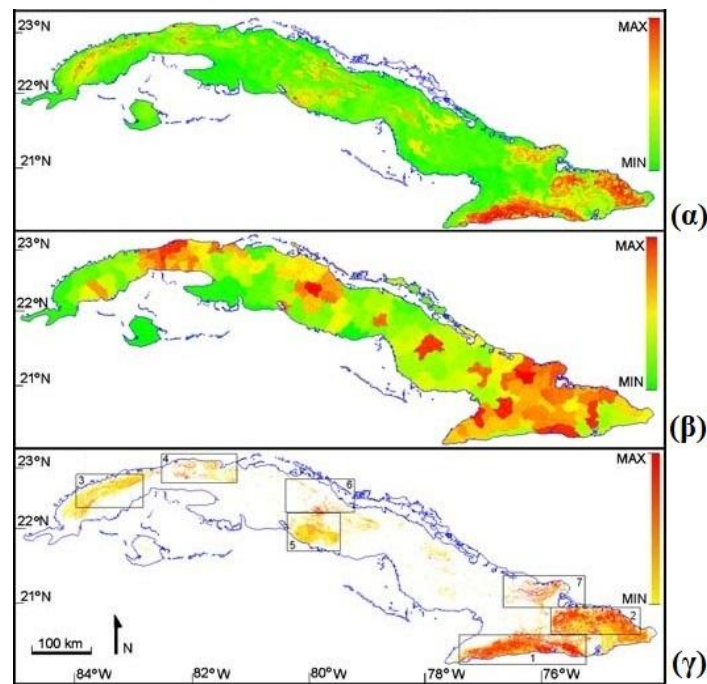
Για τον Varnes (1984), η επικινδυνότητα κατολισθήσεων μπορεί ν' αναλυθεί σε τρία μέρη: (α) την ειδική επικινδυνότητα (specific risk), R_s , ως ο αναμενόμενος βαθμός απωλειών ή ζημιών λόγω της εκδήλωσης ενός συγκεκριμένου φυσικού φαινομένου, που μπορεί να εκφραστεί από το γινόμενο:

$$R_s = H \times V \quad (3)$$

όπου H είναι ο κίνδυνος, και V η τρωτότητα, (β) τα «στοιχεία σε επικινδυνότητα», E , και (γ) την ολική επικινδυνότητα (total risk), R_t , ως ο αναμενόμενος αριθμός απωλειών ή ζημιών λόγω ενός συγκεκριμένου φυσικού φαινομένου, που μπορεί να εκφραστεί από το γινόμενο

$$R_t = (E) (R_s) = (E) (H \times V) \quad (4)$$

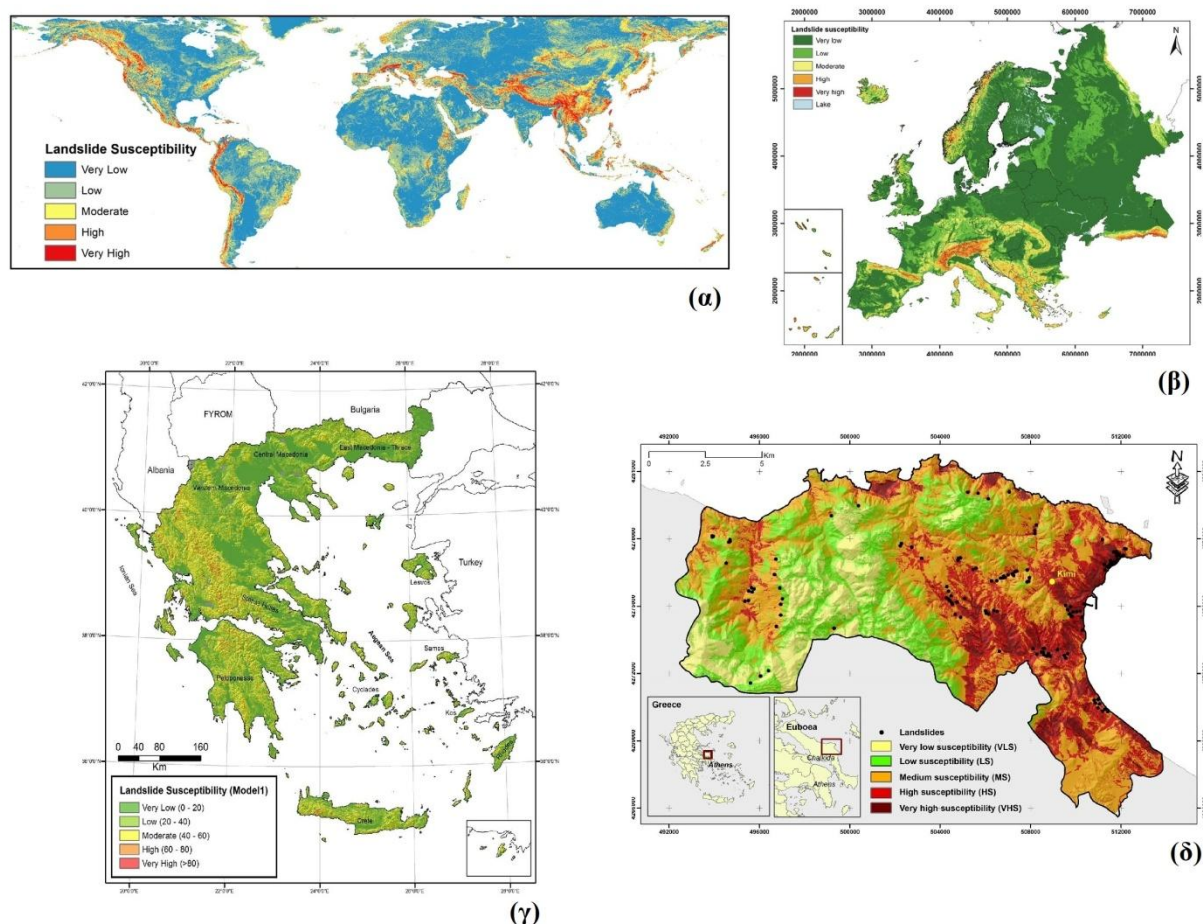
Ένας χάρτης επικινδυνότητας κατολισθήσεων συνδυάζει τις πληροφορίες πιθανότητας από έναν χάρτη κινδύνου κατολισθήσεων με μια ανάλυση όλων των πιθανών συνεπειών στην περιοχή επηρεασμού, όπως απώλειες ζώων και ζημιές ιδιοκτησιών. Συνεπώς, μπορεί να παρουσιαστεί είτε σε περιγραφικούς (ετήσια πιθανότητα ένα άτομο να χάσει τη ζωή του), είτε σε ποσοτικούς/χρηματικούς (ετήσιο κόστος ζημιών, π.χ. ευρώ ανά έτος) όρους.



Σχήμα 3.2: Διάφορα είδη χαρτών για την ίδια περιοχή. (α) Χάρτης κινδύνου κατολισθήσεων, (β) χάρτης τρωτότητας κατολισθήσεων, και (γ) χάρτης επικινδυνότητας κατολισθήσεων (Castellanos Abella and Van Westen, 2007).

Το 1976, η IAEG καθόρισε τις παρακάτω κλίμακες κατολισθητικών χαρτών:

- Εθνική κλίμακα (<1:1.000.000)
- Περιφερειακή κλίμακα (1:100.000 έως 1:500.000)
- Μεσαία κλίμακα (1:25.000 έως 1:50.000)
- Μεγάλη κλίμακα (1:5.000 έως 1:15.000)

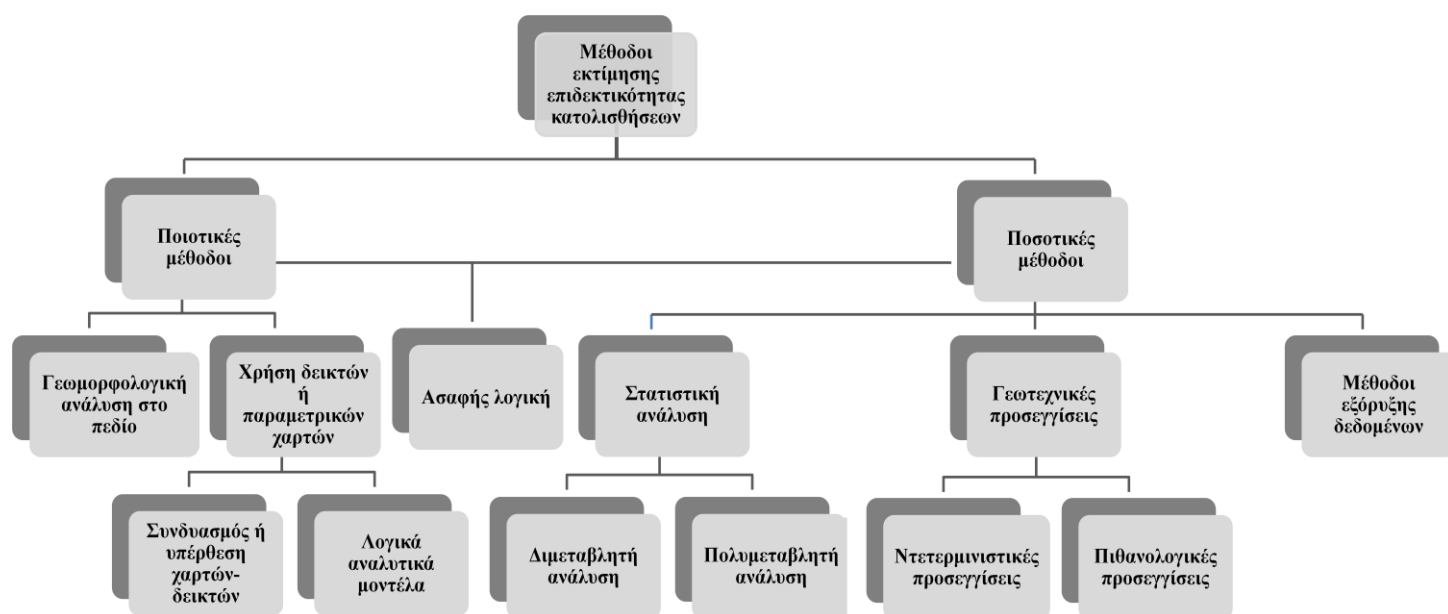


Σχήμα 3.3: Διαφορετικής κλίμακας χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. (α) Παγκόσμιος (Stanley and Kirschbaum, 2017), (β) Ευρώπης (Van Den Eeckhaut et al., 2012), (γ) Ελλάδας (Sakkas et al., 2016), και (δ) δήμου Κύμης στην Εύβοια (Iliia and Tsangaratos, 2016).

Στους περιφερειακής κλίμακας χάρτες, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι αποδεκτό ακόμα και όταν εξετάζονται από κοινού διάφοροι τύποι κατολισθήσεων, καθώς η απαιτούμενη ακρίβεια είναι χαμηλή. Στους μεγάλης κλίμακας χάρτες, όμως, το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τύπο της κατολίσθησης, προκειμένου να αποφευχθούν η ανακρίβεια και η αλλοίωση της πραγματικότητας. Γενικά, η επιλογή της κατάλληλης κλίμακας σχετίζεται με την έκταση της περιοχής μελέτης. Στην πράξη, όμως, καθοριστικό ρόλο σ' αυτή την επιλογή διαδραματίζει η κλίμακα στην οποία διατίθενται τα απαιτούμενα δεδομένα παραγόντων (π.χ. κάλυψη γης, γεωλογία, υψόμετρο, κλίση αναγλύφου, κ.ά.) που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην εκάστοτε ανάλυση του φαινομένου.

3.1.2.3 Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων

Μια πληθώρα μεθόδων/μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση και τη ζωνοποίηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Ζωνοποίηση (zonation) είναι η διαίρεση μιας ευρύτερης περιοχής σε ομοιογενή τμήματα (ζώνες) και η κατάταξή τους ανάλογα με το βαθμό της υφιστάμενης ή δυνητικής επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (Fell et al., 2008).



Σχήμα 3.4: Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα, οι μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις ποιοτικές και τις ποσοτικές μεθόδους. Αναλυτικότερα:

Ποιοτικές μέθοδοι

Οι ποιοτικές μέθοδοι (qualitative methods), που χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1970-1980, βασίζονται στην εμπειρία και στις γνώσεις του ερευνητή/«εμπειρογνώμονα», με αποτέλεσμα να συνοδεύονται από έναν υψηλό βαθμό υποκειμενικότητας. Σ' αυτές θεωρείται ότι η ποιότητα μιας ανάλυσης κατολισθήσεων σχετίζεται περισσότερο με το βαθμό στον οποίο οι σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν αναγνωρίζονται, κατανοούνται και εξηγούνται, και λιγότερο με το βαθμό στον οποίο ποσοτικοποιούνται (Powell, 2000). Γι' αυτό το λόγο, η εφαρμογή τους δεν απαιτεί τη χρήση κατολισθητικών δεδομένων, και κατ'

επέκταση τη δημιουργία ενός χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων. Περιλαμβάνουν τη γεωμορφολογική ανάλυση και τη χρήση δεικτών ή παραμετρικών χαρτών.

Γεωμορφολογική ανάλυση στο πεδίο

Η γεωμορφολογική ανάλυση στο πεδίο (field geomorphological analysis) αποτελεί την πιο απλή μέθοδο ανάλυσης. Ο προσδιορισμός και η ζωνοποίηση του κινδύνου ή της επιδεκτικότητας υλοποιούνται άμεσα στο πεδίο από τον ερευνητή (γεωμορφολόγος τις περισσότερες φορές) και βασίζεται στις γνώσεις του και στην εμπειρία του σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν θεωρείται αναγκαία η χρήση των ΣΓΠ καθώς όποτε αυτά χρησιμοποιούνται, λειτουργούν απλά ως ένα εργαλείο σχεδίασης των δεδομένων του πεδίου.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ✓ Η δυνατότητα απόκτησης μιας άμεσης εκτίμησης του καθεστώτος ευστάθειας που επικρατεί σε μια περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες.
- ✓ Ο μη-περιορισμός της κλίμακας.

Αντίθετα, τα βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ✗ Η υποκειμενικότητα της λόγω του ότι στηρίζεται στην κρίση και τις γνώσεις του «εμπειρογνώμονα» (ανθρώπινος παράγοντας), με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολη η σύγκριση και η συσχέτιση δύο ή περισσότερων διαφορετικών χαρτών κινδύνου ή επιδεκτικότητας για την ίδια περιοχή μελέτης.
- ✗ Η δυσκολία ενημέρωσης των χαρτών κάθε φορά που νέα δεδομένα είναι διαθέσιμα.
- ✗ Οι εκτενείς, χρονοβόρες και πολυδάπανες έρευνες πεδίου που απαιτούνται.
- ✗ Η αδυναμία κάλυψης μεγάλων/εκτεταμένων περιοχών.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα στην πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία χρήσης της μεθόδου της γεωμορφολογικής ανάλυσης αποτελούν οι μελέτες των Santangelo et al. (2010), και Listo and Carvalho Vieira (2012).

Χρήση δεικτών ή παραμετρικών χαρτών

Η χρήση δεικτών ή παραμετρικών χαρτών (use of index or parameter maps) χωρίζεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες μεθόδων: τον *συνδυασμό ή την υπέρθεση χαρτών-δεικτών* και τα *λογικά αναλυτικά μοντέλα*.

Η μέθοδος του συνδυασμού ή της υπέρθεσης χαρτών-δεικτών (combination or overlay of index maps) βασίζεται στην εκ των προτέρων γνώση των αιτιών της κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης (Mihalic, 1998). Τα αίτια αυτά (π.χ. κλίση και προσανατολισμός του αναγλύφου, γεωλογικοί σχηματισμοί, κ.ά.) ο ερευνητής, αφού τα χαρτογραφήσει και τα υποδιαιρέσει σε ομάδες, στη συνέχεια τους αποδίδει συντελεστές βαρύτητας, σύμφωνα με την υποτιθέμενη ή αναμενόμενη συμβολή τους στη δημιουργία αστοχιών. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ✓ Η δυνατότητα αυτοματοποίησης των απαιτούμενων λειτουργιών (δηλαδή της ταξινόμησης και της απόδοσης συντελεστών βαρύτητας) μέσω της αποτελεσματικής αξιοποίησης και χρήσης των ΣΓΠ.
- ✓ Η ύπαρξη τυποποιημένων κανόνων για τον προσδιορισμό και την ζωνοποίηση του κινδύνου ή της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Αυτοί οι κανόνες διαφοροποιούν τη συγκεκριμένη μέθοδο απ' αυτήν της γεωμορφολογική ανάλυσης, διότι στην τελευταία οι κανόνες διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και είναι δύσκολο να τυποποιηθούν.
- ✓ Ο μη-περιορισμός της κλίμακας.

Βιβλιογραφικά παραδείγματα χρήσης της μεθόδου του συνδυασμού ή της υπέρθεσης χαρτών-δεικτών είναι οι μελέτες των Castellanos Abella and Van Westen (2008), και Avtar et al. (2011).

Τα λογικά αναλυτικά μοντέλα (logical analytical models) παρέχουν μια συνοπτική επισκόπηση αναφορικά με τον τρόπο αξιοποίησης μιας μοντελοποίησης για την εκτίμηση του κινδύνου ή της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Η εκτίμηση αυτή στηρίζεται αρχικώς στην απόδοση συντελεστών βαρύτητας σε κάθε έναν από τους παράγοντες που έχουν συλλεχθεί στο πεδίο, με βάση την εξέταση των μεταξύ τους σχέσεων (συγκρίσεις). Μέσω της εξέτασης των σχέσεων τους καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη των μετακινήσεων για κάποιες περιπτώσεις κατολισθήσεων. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με δεδομένα που προέρχονται από ειδικά όργανα παρακολούθησης έτσι ώστε να γίνει έλεγχος της πρόβλεψης. Αν σ' αυτό το στάδιο δεν επιτευχθεί

ικανοποιητικός βαθμός συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης και των ενόργανων μετρήσεων, τότε αποδίδονται νέοι συντελεστές βαρύτητας στις αρχικές σχέσεις μέχρις ότου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Γνωστά παραδείγματα αυτού του είδους των μοντέλων συνιστούν η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (Ενότητα 3.2.2.3), και ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (weighted linear combination – WLC) (Feizizadeh and Blaschke, 2014; Kavzoglu et al., 2014).

Οι δύο αυτές μέθοδοι, τείνουν πλέον να χαρακτηρίζονται κι ως ημι-ποσοτικές (semi-quantitative) καθώς ενσωματώνουν την ιδέα της κατάταξης και στάθμισης των παραγόντων που λαμβάνουν υπόψη τους (Polykretis et al., 2015).

Ποσοτικές μέθοδοι

Οι ποσοτικές μέθοδοι (quantitative methods) βασίζονται στις αριθμητικές εκφράσεις της σχέσης μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν. Δεδομένου ότι η εφαρμογή τους απαιτεί τη συνδυαστική χρήση κατολισθητικών και παραγοντικών δεδομένων, χαρακτηρίζονται και ως «καθοδηγούμενες από τα δεδομένα» (“data-driven”) μέθοδοι. Περιλαμβάνουν τη στατιστική ανάλυση, τις γεωτεχνικές προσεγγίσεις και τις μεθόδους εξόρυξης δεδομένων.

Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση (statistical analysis) επιτρέπει μια καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της εκδήλωσης των κατολισθήσεων και των διαφόρων παραγόντων, και εγγυάται χαμηλότερα επίπεδα υποκειμενικότητας σε σχέση με τις ποιοτικές (ή ημι-ποσοτικές) μεθόδους. Σ' αυτού του τύπου την ανάλυση, οι συνδυασμοί των παραγόντων που οδήγησαν στην εκδήλωση κατολισθήσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο παρελθόν, προσδιορίζονται στατιστικά και βοηθούν στην παραγωγή «ποσοτικών προβλέψεων» για την περιοχή αυτήν, σε μια μεταγενέστερη όμως χρονική περίοδο στην οποία δεν εμφανίζονται κατολισθήσεις, αλλά επικρατούν οι ίδιες συνθήκες (γεωμορφολογικές, γεωλογικές, κλιματικές, κ.ά.) μ' αυτές του παρελθόντος (He and Beighley, 2008). Τα τελευταία χρόνια, λόγω της συνδυαστικής χρήσης της με τη τεχνολογία των ΣΓΠ, η στατιστική ανάλυση έχει καταστεί ως μια αρκετά δημοφιλής κατηγορία μεθόδων. Διακρίνεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: τη *διμεταβλητή ανάλυση* και την *πολυμεταβλητή ανάλυση*.

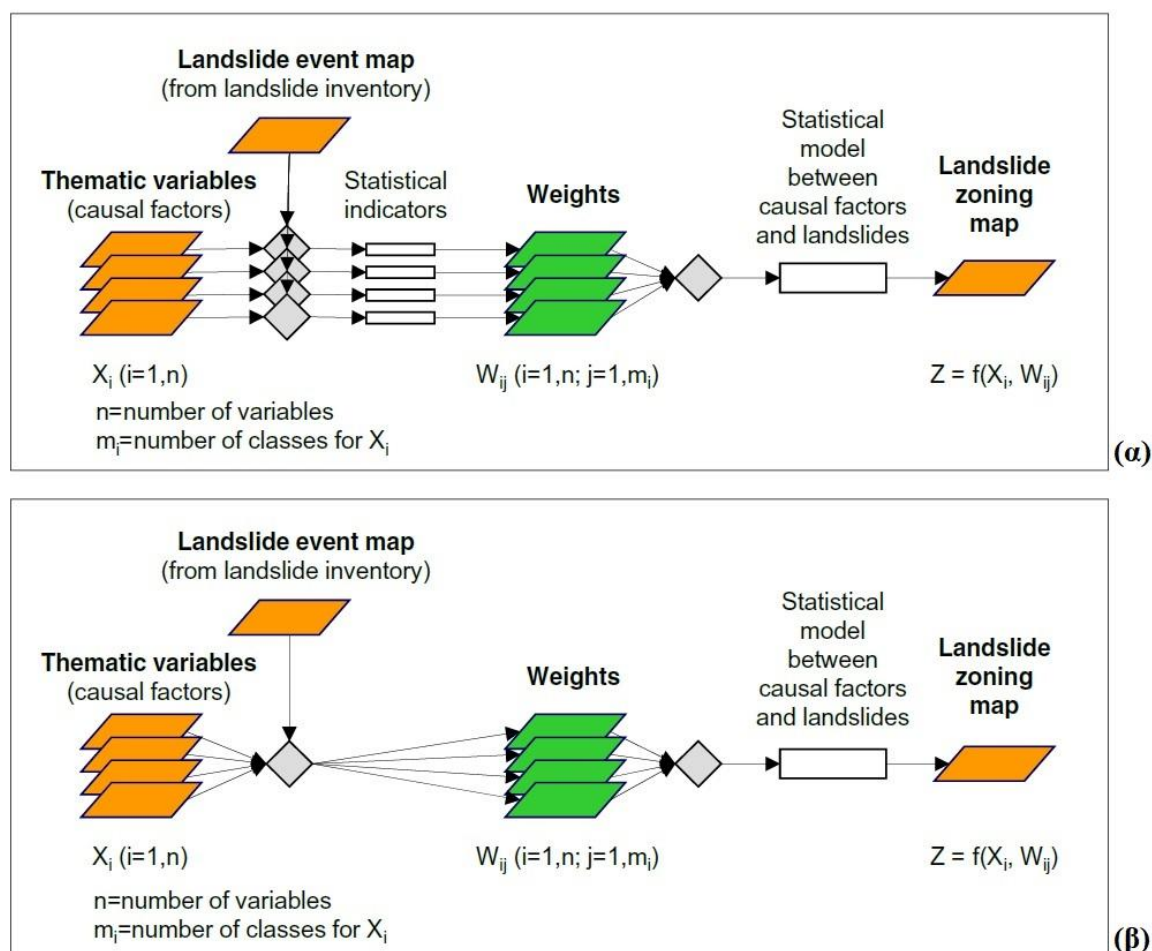
Στη διμεταβλητή ανάλυση (bivariate analysis), οι επιλεγμένοι παράγοντες που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την εκδήλωση κατολισθήσεων, εισάγονται σ' ένα ΣΓΠ και αφού κατηγοριοποιηθούν, συσχετίζονται μ' ένα χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων. Μ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της πιθανότητας κατολίσθησης για όλες τις κατηγορίες κάθε παράγοντα χρησιμοποιώντας την πυκνότητα των κατολισθήσεων (Jimenez-Peralvarez et al., 2009). Το κύριο πλεονέκτημα των διμεταβλητών στατιστικών μεθόδων είναι ότι οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση, προσδιορίζονται από τον ερευνητή ο οποίος εκτελεί την ανάλυση. Αυτό οδηγεί σ' έναν ικανοποιητικό συνδυασμό της «υποκειμενικής» γνώμης του ερευνητή και των «αντικειμενικών» καθοδηγούμενων από τα δεδομένα (data-driven) αναλυτικών δυνατοτήτων ενός ΣΓΠ (Van Westen, 2000). Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός «μη ρεαλιστικών» τιμών πιθανοτήτων, λόγω του γεγονότος ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι βασίζονται στην παραδοχή της ανεξαρτησίας μεταξύ των παραγόντων ως προς την πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου, συνιστά το βασικότερο μειονέκτημά τους.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι διμεταβλητής ανάλυσης είναι ο δείκτης της εντροπίας (index of entropy – IoE) (Youssef et al., 2015a; Youssef et al., 2015b; Pradhan and Kim, 2018), ο συντελεστής βεβαιότητας (certainty factor – CF) (Pourghasemi et al., 2013; Zhao et al., 2015; Wu and Song, 2018), ο λόγος συχνοτήτων (Ενότητα 3.2.2.3), ο δείκτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (Ενότητα 3.2.2.3), και το βάρος της ένδειξης (Ενότητα 3.2.2.3).

Στην πολυμεταβλητή ανάλυση (multivariate analysis), πραγματοποιείται δειγματοληψία (sampling) στους επιλεγμένους παράγοντες, και για κάθε μία από τις προκύπτουσες μονάδες δειγματοληψίας προσδιορίζεται η παρουσία ή απουσία κατολίσθησης. Στη συνέχεια, ένας συντελεστής βαρύτητας υπολογίζεται για κάθε έναν από τους παράγοντες μέσω στατιστικών προσεγγίσεων (Baeza and Corominas, 2001). Σημαντικά πλεονεκτήματά της θεωρούνται (Gorsevski et al., 2000):

- ✓ Η παραγωγή λιγότερων νέων μεταβλητών σε σχέση με τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών.
- ✓ Η εξέταση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών.
- ✓ Ο ευκολότερος εντοπισμός ή προσδιορισμός των ανωμαλιών της.
- ✓ Ο ευκολότερος έλεγχος των υποθέσεων έτσι ώστε να εξακριβωθεί η εγκυρότητά της.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι πολυμεταβλητής ανάλυσης είναι η διαχωριστική ανάλυση (discriminant analysis) (Baeza et al., 2010; He et al., 2012; Reichenbach et al., 2014), η ανάλυση υπό όρους (conditional analysis) (Ozdemir, 2009; Vergari et al., 2011; Costanzo et al., 2012), και η λογιστική παλινδρόμηση (Ενότητα 3.2.2.3).



Σχήμα 3.5: Κατηγορίες στατιστικής ανάλυσης. (α) Διμεταβλητή στατιστική ανάλυση, και (β) πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση.

Γεωτεχνικές προσεγγίσεις

Οι γεωτεχνικές προσεγγίσεις (geotechnical approaches) βασίζονται στις αρχές της μηχανικής που διέπουν την ευστάθεια των πρανών, και διακρίνονται στις ντετερμινιστικές ή αιτιοκρατικές και στις πιθανολογικές προσεγγίσεις.

Οι ντετερμινιστικές ή αιτιοκρατικές προσεγγίσεις (deterministic approaches) απαιτούν λεπτομερή δεδομένα για τις γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές παραμέτρους (π.χ.

τη διατμητική αντοχή του εδάφους, το πάχος και το βάρος των μονάδων του εδάφους, την πίεση των πόρων του νερού, κ.ά.) μιας περιοχής και βασίζονται στη χρήση ειδικών μοντέλων ευστάθειας των πρανών που στόχο έχουν τον υπολογισμό ενός συντελεστή ασφαλείας (safety factor). Ο συντελεστής ασφαλείας εκφράζει το λόγο μεταξύ δυνάμεων ή ροπών (Bell, 1968). Πιο συγκεκριμένα:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (5)$$

όπου F είναι ο συντελεστής ασφαλείας, τ_f η διατμητική αντοχή (shear strength), και τ η διατμητική τάση (shear stress). Όταν ο συντελεστής έχει τιμή μεγαλύτερη από 1, τότε δείχνει ότι το πρανές βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Στην αντίθετη περίπτωση (δηλαδή όταν η τιμή του είναι μικρότερη από 1), έχει αστοχήσει. Τέλος, όταν η τιμή του είναι ίση με 1 τότε το πρανές βρίσκεται σε οριακή ισορροπία.

Με την εισαγωγή μεταβλητών που σχετίζονται με γεγονότα ενεργοποίησης (π.χ. μέση ετήσια βροχόπτωση, σεισμική επιτάχυνση, κ.ά.), ο παραγόμενος, από μια ντετερμινιστική προσέγγιση, χάρτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων μπορεί να απεικονίζει διαφορετικά σενάρια. Η ιδέα πίσω από αυτή τη βασισμένη σε σενάρια προσέγγιση είναι να αναδείξει χωρικά τα τμήματα των πρανών που παρουσιάζουν μια μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας σε μια προβλεπόμενη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, οι ντετερμινιστικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν και μερικά βασικά μειονεκτήματα:

- ✘ Εφαρμόζονται σε μικρές σε έκταση περιοχές με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλης κλίμακας (1:5.000 και λεπτομερέστερη) χαρτών.
- ✘ Απαιτούν μια μεγάλη ποσότητα δεδομένων εισόδου τα οποία, λόγω της σπάνιας διαθεσιμότητάς τους σε μια υψηλή ποιότητα, προκύπτουν μόνο από επίπονες και χρονοβόρες διαδικασίες, όπως εργαστηριακές δοκιμές και εργασίες πεδίου (μη λογική αναλογία «κόστους-οφέλους»).
- ✘ Είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα φυσικά πρανή για τα οποία δεν μπορούν να είναι γνωστές ή με ακρίβεια ποσοτικοποιημένες όλες οι σχετικές παράμετροι.

- ✖ Για να εφαρμοστούν με επιτυχία, απαιτείται πλήρης κατανόηση και κατάλληλη μοντελοποίηση των μηχανισμών που προκαλούν την αστοχία.
- ✖ Πολλές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν, υπόκεινται σε χρονικές μεταβολές. Αυτό δεν ισχύει μόνο για τις συνθήκες του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων, οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, αλλά και για τις πιο «μακροπρόθεσμες» επιδράσεις της αποσάθρωσης που συμβάλλουν σημαντικά στην υποβάθμιση της διατμητικής αντοχής του πρανούς καθιστώντας το έτσι περισσότερο ευπαθές (Korup and Stolle, 2014).

Οι υπολογισμοί που περιλαμβάνουν οι ντετερμινιστικές προσεγγίσεις μπορούν να εκτελεστούν είτε εντός του περιβάλλοντος των ΣΓΠ, είτε εκτός. Πιο συγκεκριμένα, εάν οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται εκτός, τότε τα ΣΓΠ χρησιμεύουν μόνο για την αποθήκευση, την παρουσίαση και την ενημέρωση των δεδομένων εισόδου. Αυτό βέβαια έχει ως αποτέλεσμα τα χωρικά δεδομένα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία τους να μην είναι χωρικά προσδιορισμένα. Όταν οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται εντός των ΣΓΠ, τα παραπάνω προβλήματα επιλύονται και τη θέση τους παίρνει ένα άλλο. Το πρόβλημα αυτό εστιάζεται στο γεγονός ότι λόγω των περιορισμών των ΣΓΠ όσον αφορά τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων, επαναληπτικών διαδικασιών και λειτουργιών γειτνίασης, μόνο τα απλά ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν. Σε αντίθεση με τα προβλήματα/δυσκολίες, η προσφερόμενη από τα ΣΓΠ δυνατότητα ανάπτυξης τρισδιάστατων (3D) μοντέλων αυτού του τύπου ευνοεί τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Αρχικά τα ντετερμινιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τον υπολογισμό της ευστάθειας μεμονωμένων πρανών. Πλέον διάφοροι ερευνητές αξιοποιούν τα ίδια μοντέλα στα πλαίσια της κατασκευής χαρτών ευστάθειας πρανών για μεγαλύτερες εκτάσεις, όπως λεκάνες απορροής. Μερικά από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ντετερμινιστικά μοντέλα είναι το stability index mapping – SINMAP (Pradhan and Kim, 2015; Rabonza et al., 2015), και το shallow landsliding stability model – SHALSTAB (Pradhan and Kim, 2015; Vieira et al., 2018), και το transient

rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability – TRIGRS (Sugiarti and Sukristiyanti, 2018; Vieira et al., 2018).

Οι πιθανολογικές προσεγγίσεις (probabilistic approaches) βασίζονται κυρίως στις σχέσεις που παρατηρούνται μεταξύ των παραγόντων και της κατανομής των κατολισθήσεων και συχνά παρέχουν πιο χρήσιμες πληροφορίες για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας των ντετερμινιστικών προσεγγίσεων. Το πλεονέκτημα τους αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι λαμβάνουν υπόψη τις χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις των ιδιοτήτων των βραχωδών πρανών, καθώς και από το γεγονός ότι μπορούν και υπολογίζουν σχετικά εύκολα τις διακυμάνσεις στη πιεζομετρία των υδροφόρων οριζόντων, παρόλο που αυτή μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και την εποχή. Με λίγα λόγια, κάνοντας χρήση της θεωρίας των πιθανοτήτων, παρέχουν μια συστηματική διαδικασία για την «ποσοτική αντιμετώπιση» της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις τιμές των παραμέτρων. Στην περίπτωση ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών, η θεωρία των πιθανοτήτων εκφράζεται με τον δείκτη αξιοπιστίας (reliability index) και την πιθανότητα αστοχίας (probability of failure). Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής ασφαλείας F ενός πρανού είναι μια τυχαία μεταβλητή με μια αναμενόμενη ή μέση τιμή $\bar{F}$ και μια τυπική απόκλιση σ_F , ο δείκτης αξιοπιστίας (β) μπορεί να καθοριστεί απλά ως (Chowdhury and Flentje, 2003):

$$\beta = \frac{\bar{F} - 1}{\sigma_F} \quad (6)$$

Ενώ, η πιθανότητα αστοχίας δίνεται από τη σχέση:

$$P_f = P[F \leq 1] \quad (7)$$

Χαρακτηριστικά παραδείγματα από την πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία εφαρμογής πιθανολογικών προσεγγίσεων για την ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων αποτελούν οι μελέτες των Park et al. (2013), και Dahal et al. (2014).

Μέθοδοι εξόρυξης δεδομένων

Στην επικρατούσα τα τελευταία χρόνια «εποχή των πληροφοριών», οι τομείς της εξόρυξης δεδομένων (data mining), της αποθήκευσης δεδομένων (data warehousing), της ρομποτικής (robotics) και των ευφών συστημάτων μηχανικής (intelligent engineering systems) ενδιαφέρονται για εργαλεία που μπορούν να καταστήσουν δυνατή την

αυτοματοποίηση των διαδικασιών της ανακάλυψης της γνώσης (knowledge discovery) και της εκμάθησης κανόνων (learning of rules) από δεδομένα. Έτσι, ορμώμενοι από την επιθυμία τους για την αυτοματοποίηση αυτών των διαδικασιών και βασισμένοι στο γεγονός ότι οι άνθρωποι δεν απαιτούν κανέναν εξωτερικό έλεγχο στις διαδικασίες εκμάθησης του εγκεφάλου τους, οι παραπάνω τομείς έθεσαν τις βάσεις και διαμόρφωσαν τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάδειξη τεχνικών και εργαλείων που παρέχουν μια παρόμοια με την ανθρώπινη, αυτοματοποιημένη εκμάθηση. Δηλαδή, μια μηχανική εκμάθηση (machine learning) μέσω λεπτομερών αλγορίθμων των οποίων η καθοδήγηση δεν απαιτεί κανενός είδους – εκτός από τον προσδιορισμό του υπό μελέτη προβλήματος – εξωτερική ανθρώπινη επέμβαση.

Η εξόρυξη δεδομένων, η οποία επίσης αναφέρεται ως ανακάλυψη γνώσης σε βάσεις δεδομένων (knowledge discovery in databases), έχει αναγνωριστεί ως η διαδικασία της εξαγωγής σημαντικών, έμμεσων, προηγούμενων άγνωστων, δυνητικά χρήσιμων και τελικώς κατανοητών πληροφοριών από τα περιεχόμενα στις βάσεις δεδομένα (Huang et al., 2007). Διαφέρει από την παραδοσιακή στατιστική ανάλυση υπό την έννοια ότι έχει ως στόχο την εύρεση ανύποπτων σχέσεων οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τους χρήστες των βάσεων δεδομένων. Αντιθέτως, η παραδοσιακή στατιστική ανάλυση χρησιμοποιεί τα δεδομένα προκειμένου να δοκιμάσει ή να ελέγξει την ανθρώπινη γνώση.

Μια από τις κυριότερες διεργασίες στην εξόρυξη δεδομένων είναι η ταξινόμηση ή κατηγοριοποίηση μοτίβων/προτύπων (pattern classification). Στην ταξινόμηση μοτίβων, οι παρατηρήσεις χωρίζονται σε κατηγορίες (ή κλάσεις) ανάλογα με καθορισμένα χαρακτηριστικά. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά είτε δυαδικές αποφάσεις, είτε πολλαπλών-κατηγοριών αναγνωρίσεις. Στα πλαίσια της εξόρυξης δεδομένων, η ταξινόμηση συνεπάγεται την εκμάθηση μοτίβων σ' ένα σύνολο δεδομένων και την εφαρμογή μιας μεθόδου που είναι ικανή ν' αναγνωρίσει αυτά τα μοτίβα.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι ταξινόμησης είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Ενότητα 3.2.2.3), οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machines – SVM) (Su et al., 2015; Ada and San, 2018; Chen et al., 2018a), και τα δέντρα απόφασης (decision trees) (Palamakumbure et al., 2015; Chen et al., 2018b; Hong et al., 2018). Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η ικανότητά τους να εκφράζουν τις

μη-γραμμικότητες (non-linearities) και αβεβαιότητες στο υπό εξέταση πρόβλημα και να το επιλύουν μ' ένα σκεπτικό παρόμοιο μ' εκείνο του ανθρώπινου εγκεφάλου. Λόγω της μη-γραμμικής φύσης του φαινομένου των κατολισθήσεων, και των αβεβαιοτήτων οι οποίες προκύπτουν από τα δεδομένα και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στις κατολισθητικές εκτιμήσεις, η εφαρμογή τους μπορεί να θεωρηθεί ως η καταλληλότερη επιλογή είτε σε περιπτώσεις απόκτησης ελλιπών ή συνοδευόμενων από θόρυβο δεδομένων, είτε όταν κρίνεται δύσκολη η εκτίμηση της πτυχής (κινδύνου ή επιδεκτικότητας) του φαινομένου μέσω της χρήσης πιο «παραδοσιακών» ποσοτικών μεθόδων, όπως οι στατιστικές και οι γεωτεχνικές (Ercanoglu and Gokceoglu, 2004).

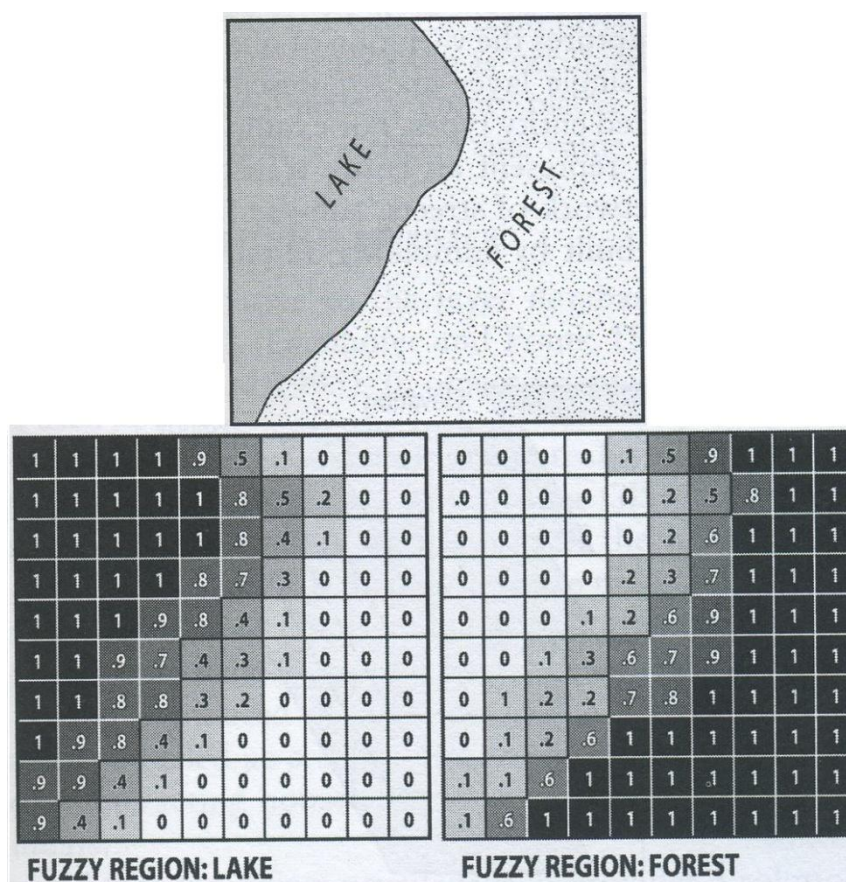
Μια άλλου τύπου προσέγγιση η οποία μπορεί να είναι είτε ποιοτική (ή ημι-ποσοτική), είτε ποσοτική, και εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια στην εκτίμηση και χαρτογράφηση του κινδύνου και της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων είναι η:

Ασαφής λογική

Η θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) προτάθηκε από τον Zadeh (1965) και έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους. Δημιουργήθηκε με στόχο την περιγραφή της αοριστίας των αντικειμένων (ή οντοτήτων) στον πραγματικό κόσμο και βασίστηκε στη θεωρία ότι τα αντικείμενα δεν μπορούν ν' ανήκουν μόνο πλήρως ή καθόλου σ' ένα σύνολο αλλά μπορούν ν' ανήκουν μερικώς σε πολλαπλά σύνολα. Αποτελεί δηλαδή μια λογική με περισσότερες από δύο πιθανές τιμές αλήθειας (πολλαπλών τιμών λογική) η οποία επιτρέπει τον καθορισμό ενδιάμεσων τιμών μεταξύ συμβατικών αξιολογήσεων όπως «ναι/όχι», «σωστό/λάθος», «μαύρο/άσπρο», «υψηλό/χαμηλό», κ.ά. (Malczewski, 1999). Έννοιες όπως «πολύ υψηλό», «μέτρια ζεστό», «μικρή απόσταση» και «απότομο πρηνές» μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικά μέσω της χρήσης ασαφών συνόλων.

Η θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy set theory) μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση της θεωρίας των συνήθων ή διακριτών συνόλων (ordinary or crisp set theory). Στη συνήθη θεωρία συνόλων, ένα στοιχείο ανήκει ή δεν ανήκει σ' ένα σύνολο, με αποτέλεσμα αυτό να περιέχει μόνο τιμές 0 και 1 ως βαθμό συμμετοχής. Με την τιμή 0 να εκφράζει τη μη-συμμετοχή (non-membership) και την τιμή 1 τη συμμετοχή (membership). Στη θεωρία των ασαφών συνόλων, η συμμετοχή εκφράζεται σε μια συνεχή κλίμακα στο διάστημα $[0,1]$, με την τιμή 0 να εκφράζει την πλήρη μη-συμμετοχή

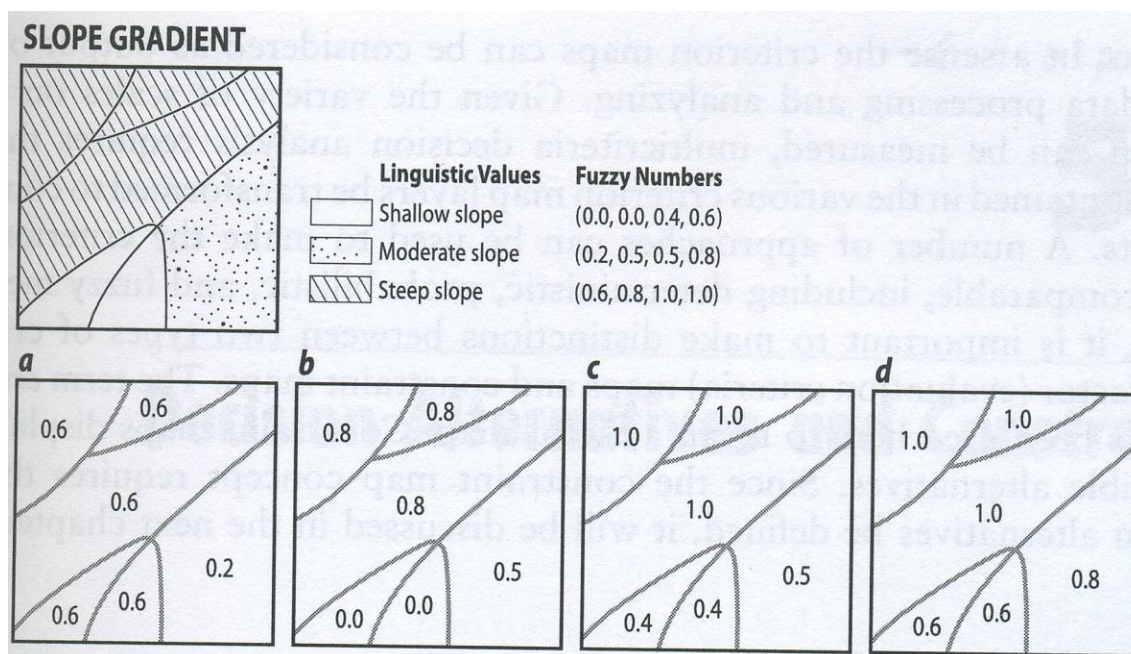
και την τιμή 1 την πλήρη συμμετοχή (Regmi et al., 2010a). Έτσι, ένα ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο στοιχείων τα οποία έχουν ποικίλους βαθμούς συμμετοχής στο σύνολο. Για παράδειγμα, το ασαφές σύνολο «περίπου 8» θα μπορούσε να εκφραστεί ως $(0,1/6, 0,7/7, 1/8, 0,7/9, 0,1/10)$, με τις τιμές μετά τη γραμμή (/) ν' αποτελούν τα στοιχεία ή μέλη (members) του συνόλου, και τις τιμές πριν τη γραμμή τους βαθμούς συμμετοχής τους. Ο βαθμός συμμετοχής κάθε στοιχείου x εκφράζεται μέσω μιας συνάρτησης συμμετοχής (membership function – MF) $\mu(x)$ η οποία μπορεί να είναι τριγωνικής (triangular), τραπεζοειδούς (trapezoidal) ή Gaussian μορφής.



Σχήμα 3.6: Αναπαράσταση δύο διακριτών στοιχείων (λίμνη και δάσος) με βάση την ασαφή λογική (Malczewski, 1999).

Για την απλοποίηση της ασαφούς μοντελοποίησης, η χρήση ασαφών αριθμών έχει προταθεί. Ασαφής αριθμός (fuzzy number) είναι ένα ασαφές σύνολο που ορίζεται στο πεδίο των πραγματικών αριθμών. Πιο συγκεκριμένα, οι ασαφείς αριθμοί αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις μιας γλωσσικής μεταβλητής (linguistic variable). Για

παράδειγμα, στην περίπτωση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, γλωσσικές έννοιες, όπως «πολύ χαμηλή», «χαμηλή», «μέτρια», «υψηλή», «πολύ υψηλή», χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των καταστάσεων της. Αυτές οι έννοιες εκφράζονται σε όρους μιας μεταβλητής βάσης (επιδεκτικότητα κατολισθήσεων), οι τιμές της οποίας είναι πραγματικοί αριθμοί μέσα σ' ένα προκαθορισμένο εύρος. Οι συγκεκριμένες τιμές ασαφούς συμμετοχής αποδίδονται σε κάθε έναν παράγοντα είτε με βάση την υποκειμενική γνώμη/κρίση ενός έμπειρου «εμπειρογνώμονα» ή μιας ομάδας «εμπειρογνομόνων» (ποιοτική ή ημι-ποσοτική εκδοχή) (Zhu et al., 2014; Tsangaratos et al., 2018), είτε μέσω της «αντικειμενικής γνώμης/κρίσης» που προκύπτει από τη συσχέτιση μεταξύ των αναγνωρισμένων παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων και του εκάστοτε παράγοντα (ποσοτική εκδοχή) (Kayastha et al., 2013a; Fatemi Aghda et al., 2018). Η μετατροπή των γλωσσικών μεταβλητών σε τιμές ασαφούς συμμετοχής ονομάζεται ασαφοποίηση (fuzzification), ενώ το αντίστροφο είναι γνωστό ως απο-ασαφοποίηση (defuzzification) (Bortoloti et al., 2015). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την απο-ασαφοποίηση, συνιστούν τις επιθυμητές τιμές εξόδου (συντελεστές βαρύτητας για τους παράγοντες) της ανάλυσης.



Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση καταστάσεων γλωσσικής μεταβλητής με ασαφείς αριθμούς (Malczewski, 1999).

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της βασισμένης στην ασαφή λογική ανάλυσης μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ✓ Επιτρέπεται η αναπαράσταση ασαφών, μη διακριτών γλωσσικών όρων με μεγαλύτερη ακρίβεια και συνέπεια.
- ✓ Εκτιμάται η αβεβαιότητα (ή αοριστία/ανακρίβεια) που συνοδεύει τον τρόπο με τον οποίο ένας ερευνητής/«εμπειρογνώμονας» προσεγγίζει ένα πρόβλημα (Ercanoglu and Gokceoglu, 2002).
- ✓ Είναι εύκολο να κατανοηθεί και να εφαρμοστεί.
- ✓ Παρέχει μια στέρεη μαθηματική βάση.
- ✓ Επιτρέπει το συνδυασμό αριθμητικών και κατηγορικών δεδομένων.
- ✓ Είναι ανεξάρτητη από τη στατιστική κατανομή των δεδομένων και δεν απαιτεί τη χρήση συγκεκριμένων στατιστικών μεταβλητών.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κλίμακα μελέτης. Οι ποιοτικές μέθοδοι θεωρούνται ιδανικές για μικρής κλίμακας μελέτες. Η στατιστική ανάλυση, αν και έχει χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικής κλίμακας μελέτες, και ιδιαιτέρως στις περιφερειακής και μεσαίας κλίμακας μελέτες, δεν είναι πάντα κατάλληλη για την ανάλυση κατολισθήσεων σε μεμονωμένα πρανή ή μικρές περιοχές. Επιπλέον, οι γεωτεχνικές προσεγγίσεις, δεδομένου ότι στηρίζονται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας ή της πιθανότητας αστοχίας μέσω της απόκτησης λεπτομερών παραμετρικών δεδομένων, δεν κρίνονται κατάλληλες για περιφερειακής κλίμακας μελέτες.

Τέλος, η δημιουργία *υβριδικών μεθόδων (hybrid methods)*, μέσα από το συνδυασμό/ενοποίηση των παραπάνω μεθόδων, δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές της αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων περισσότερων της μίας (συνήθως δύο στον αριθμό) μεθόδων στην προσπάθεια τους για την εκτίμηση του κινδύνου ή της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.

3.1.3 Αξιολόγηση μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης

Τις περισσότερες φορές, η διαδικασία της εκτίμησης και χαρτογράφησης του κινδύνου και της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων συνοδεύεται από την ύπαρξη ενός αριθμού

σφαλμάτων. Οι πιθανότερες πηγές αυτών των σφαλμάτων εντοπίζονται στα εξής (Fell et al., 2008):

- Περιορισμοί στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων και συνεπώς στη δημιουργία του αντίστοιχου χάρτη καταγραφής. Οφείλονται κυρίως στην υποκειμενική ερμηνεία των αεροφωτογραφικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων.
- Περιορισμοί λόγω παραδοχών των μεθόδων ανάλυσης (π.χ. σταθερότητα της σχέσης μεταξύ των παραγόντων ενεργοποίησης και της συχνότητας του φαινομένου των κατολισθήσεων).
- Περιορισμοί στο επίπεδο της διαθέσιμης λεπτομέρειας των παραγοντικών δεδομένων (δεδομένα εισόδου).
- Περιορισμοί στα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, οι οποίοι συνήθως περιγράφονται με τον όρο της «αβεβαιότητας των μοντέλων (model uncertainty)».
- Περιορισμοί στην ικανότητα των ατόμων που διενεργούν την εκτίμηση των πτυχών του φαινομένου.

Λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των συγκεκριμένων σφαλμάτων, η αξιολόγηση των μεθόδων/μοντέλων (ή των παραγόμενων χαρτών) που περιγράφηκαν προηγουμένως, αποτελεί στάδιο μείζονος σημασίας για οποιαδήποτε προσπάθεια ανάλυσης του φαινομένου. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας της επικύρωσης (*validation*) η οποία παρέχει τη δυνατότητα της απόκτησης γνώσεων σχετικά με την απόδοση και την ικανότητα πρόβλεψης του εκάστοτε μοντέλου (Remondo et al., 2003). Δεδομένου ότι τα μοντέλα ουσιαστικά αποτελούν «απλοποιήσεις της πραγματικότητας», κανένα μοντέλο δε θεωρείται ότι παρέχει τέλειες προβλέψεις. Γι' αυτό το λόγο, επιθυμητός στόχος του κάθε ερευνητή είναι η μοντελοποίηση των κατολισθητικών γεγονότων του παρελθόντος σ' ένα αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας. Όταν αυτό επιτευχθεί, τα μοντέλα κρίνονται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την πρόβλεψη (πιθανών) μελλοντικών γεγονότων.

Στα πλαίσια της διαδικασίας της επικύρωσης, δύο κύριες προσεγγίσεις παρατηρούνται ως προς τη διαχείριση των κατολισθητικών δεδομένων που έχουν προκύψει από το στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων. Η πρώτη προσέγγιση προϋποθέτει το διαχωρισμό του συνόλου κατολισθητικών δεδομένων σε δύο επιμέρους (υπο)σύνολα: ένα για την εκτέλεση (ή εκπαίδευση) του μοντέλου και ένα για την επικύρωσή του. Σ' αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο εκτελείται σ' ένα συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής μελέτης μ' ένα συγκεκριμένο

αριθμό κατολισθήσεων, ενώ η ακρίβεια του ελέγχεται σ' ένα άλλο τμήμα με διαφορετικές κατολισθήσεις. Στη δεύτερη προσέγγιση, το μοντέλο εκτελείται με κατολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί μια δεδομένη χρονική περίοδο, ενώ η επικύρωσή του υλοποιείται με βάση κατολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί σε διαφορετική περίοδο.

Διάφοροι τρόποι έχουν προταθεί για την εκτίμηση της απόδοσης των μοντέλων και της ικανότητας πρόβλεψης που τα χαρακτηρίζει. Ο πιο απλός περιλαμβάνει την υπέρθεση των κατολισθητικών δεδομένων στις χαρτογραφικώς παραγόμενες κατηγορίες (ή ζώνες) κινδύνου ή επιδεκτικότητας. Άλλοι πιο εξειδικευμένοι τρόποι περιλαμβάνουν τη διενέργεια στατιστικών αναλύσεων, όπως η ανάλυση ROC, και τα αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης (Ενότητα 3.2.3).

Ένας τελείως διαφορετικός, σε σχέση με τους προαναφερθέντες, τρόπος αξιολόγησης των μοντέλων, ο οποίος δε βασίζεται στη χρήση κατολισθητικών δεδομένων, είναι η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) (Chalkias et al., 2014a; Ilia and Tsangaratos, 2016). Αυτή συνήθως εφαρμόζεται μέσω της αλλαγής ενός κάθε φορά από τους συντελεστές βαρύτητας των εξεταζόμενων παραγόντων και έχει ως στόχους (Chen et al., 2010): (α) την εκτίμηση της σταθερότητας του μοντέλου, (β) τον προσδιορισμό των παραγόντων που είναι πιο ευαίσθητοι στις αλλαγές των συντελεστών βαρύτητας, (γ) την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στην κατάταξη των παραγόντων, και (δ) τη χωρική απεικόνιση της επίδρασης των «βαρυτικών» αλλαγών στο τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου.

3.2 Επιλεγμένες προσεγγίσεις στα στάδια ανάλυσης

3.2.1 Αναγνώριση κατολισθήσεων

Για την παρούσα διατριβή, στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του Google Earth το οποίο παρέχει δορυφορικές εικόνες υψηλής ευκρίνειας για όλα σχεδόν τα σημεία του πλανήτη της Γης, με δυνατότητα εξέτασής τους τόσο σε δισδιάστατη (2D), όσο και σε τρισδιάστατη (3D) μορφή. Η χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού έχει υιοθετηθεί σ' ένα σημαντικό αριθμό παρόμοιων ερευνητικών προσπαθειών που σχετίζονται με την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων διαφόρων περιοχών. Σ' ένα δείγμα αυτών των προσπαθειών παρατηρείται από την πλευρά των ερευνητών

η χρήση του Google Earth σε δύο περιπτώσεις: (α) στη δημιουργία του συνόλου δεδομένων κατολισθήσεων (ή χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων) από το οποίο προκύπτουν τα επιμέρους (υπο)σύνολα εκπαίδευσης και επικύρωσης, και (β) στη δημιουργία ενός ανεξάρτητου συνόλου δεδομένων για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της(-ων) χρησιμοποιούμενης(-ων) μεθόδου(-ων).

Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη περίπτωση, οι Costanzo et al. (2012) δημιούργησαν ένα σύνολο δεδομένων κατολισθήσεων (με 703 ροές γαιών) από τη «συνδυαστική» αξιοποίηση των δυνατοτήτων του λογισμικού Google Earth και της εργασίας πεδίου. Το σύνολο αυτό περιλάμβανε κατολισθήσεις για την υδρολογική λεκάνη (έκτασης περίπου 80 χλμ²) του ποταμού Tumarrano στη Σικελία. Οι Xu et al. (2013) χρησιμοποίησαν τις ανεπηρέαστες από νεφοκάλυψη εικόνες του Google Earth για να εντοπίσουν κάποιες εκατοντάδες από τις συνολικά 48.007 κατολισθήσεις – προερχόμενες κυρίως από αεροφωτογραφίες και ανεξάρτητες οπτικές δορυφορικές εικόνες – που προκλήθηκαν από το σεισμό Wenchuan (της 12ης Μαΐου 2008, με μέγεθος 8 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ) σε ορεινή περιοχή της Κίνας (έκτασης 48.678 χλμ² περίπου). Οι Bijukchhen et al. (2013), εκμεταλλευόμενοι εικόνες Google Earth και ψηφιακούς χάρτες κλίμακας 1:25.000, αναγνώρισαν τις τοποθεσίες 77 κατολισθητικών γεγονότων για την περιοχή Ghurmi-Dhad Kholā (έκτασης περίπου 141 χλμ²), στο ανατολικό Νεπάλ. Οι Papathanassiou et al. (2013) κατασκεύασαν ένα χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων για το νησί της Λευκάδας συνδυάζοντας αναφορές από έρευνες πεδίου και εικόνες Google Earth. Ο χάρτης αυτός είχε να κάνει με τις κατολισθήσεις που είχαν εκδηλωθεί στο νησί μετά από τον σεισμό της 14ης Αυγούστου 2003. Με τα ίδια ακριβώς μέσα, οι Meten et al. (2015) και Posner and Georgakakos (2015) εντόπισαν 476 και 545 κατολισθήσεις, αντιστοίχως, για μια περιοχή της κεντρικής Αιθιοπίας (με έκταση 305 χλμ²) και όλο το Ελ Σαλβαδόρ (με έκταση περίπου 21.000 χλμ²). Οι Youssef et al. (2015b), επίσης, απέσπασαν τα απαιτούμενα κατολισθητικά δεδομένα για την υπό εξέταση περιοχή τους (υδρολογική λεκάνη Wadi Itwad, στη Σαουδική Αραβία, με έκταση περίπου 1.479 χλμ²) από διάφορες πηγές μεταξύ των οποίων ήταν και οι υψηλής χωρικής ανάλυσης εικόνες του λογισμικού Google Earth. Οι Zhang et al. (2015) εξέτασαν την κατανομή κατολισθήσεων (609 στον αριθμό) στην επαρχία Badakhshan του Αφγανιστάν (έκτασης 44.000 χλμ² περίπου) χρησιμοποιώντας εικόνες Google Earth. Οι Dagdelenler et al. (2016) συνδύασαν τα ευρήματα των διενεργηθέντων εργασιών πεδίου μαζί με αεροφωτογραφικά, και δορυφορικά Google Earth δεδομένα για να διαμορφώσουν ένα χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων. Ο χάρτης αυτός περιείχε 211

περιστροφικές ολισθήσεις και αφορούσε μια περιοχή (έκτασης περίπου 233 χλμ²) στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου Gallipoli, στη Τουρκία. Τέλος, οι Romer and Ferentinou (2016) αναγνώρισαν και χαρτογράφησαν 125 κατολισθητικά γεγονότα για μια υδρολογική λεκάνη (με έκταση 678 χλμ²) στην περιοχή KwaZulu-Natal της Νότιας Αφρικής, μέσω της χρήσης καταγεγραμμένων ιστορικών δεδομένων και της ερμηνείας τόσο ψηφιακών ορθοφωτοχάρτων, όσο και εικόνων Google Earth.

Για τη δεύτερη περίπτωση, οι Schicker and Moon (2012), αξιοποιώντας το λογισμικό Google Earth, διαμόρφωσαν ένα σύνολο δεδομένων κατολισθήσεων για μια περιοχή στο βόρειο νησί της Νέας Ζηλανδίας (έκτασης 25.000 χλμ² περίπου) με σκοπό να το χρησιμοποιήσουν στην επικύρωση των στατιστικώς παραγόμενων αποτελεσμάτων τους. Επιπροσθέτως, οι Rabonza et al. (2015), μ' ένα προερχόμενο από το Google Earth σύνολο 363 κατολισθήσεων, επικύρωσαν το χαρτογραφικό αποτέλεσμα του ντετερμινιστικού μοντέλου το οποίο εφάρμοσαν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας στο φαινόμενο των περιοχών των κεντρικών Φιλιππίνων που επλήγησαν από τον τυφώνα Haiyan στις 8 Νοεμβρίου του 2013.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διατριβή, η χρήση του λογισμικού Google Earth αποσκοπούσε στη δημιουργία του συνόλου δεδομένων κατολισθήσεων στο οποίο θα βασιζόταν η μετέπειτα εξαγωγή των δύο απαιτούμενων (υπο)συνόλων (πρώτη περίπτωση).

3.2.2 Χαρτογράφηση κατολισθήσεων

Μεταξύ των διαφόρων πτυχών μελέτης και ανάλυσης του φαινομένου των κατολισθήσεων, η παρούσα διατριβή ασχολείται μ' αυτήν της επιδεκτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, επικεντρώνεται στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης και την παραγωγή σχετικών χαρτών. Η προετοιμασία ενός χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων βασίζεται σε δύο παραδοχές (Fell et al., 2008):

- «Το παρελθόν είναι οδηγός για το μέλλον», καθώς περιοχές οι οποίες έχουν υποστεί κατολισθήσεις στο παρελθόν είναι πιθανό να υποστούν κατολισθήσεις και στο μέλλον.
- Περιοχές με παρόμοιες τοπογραφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες με τις περιοχές που έχουν υποστεί κατολισθήσεις στο παρελθόν είναι επίσης πιθανό να υποστούν κατολισθήσεις στο μέλλον.

Συνεπώς, από τις παραπάνω παραδοχές προκύπτει ότι στα πλαίσια της δημιουργία ενός τέτοιου χάρτη για μια υπό εξέταση περιοχή απαιτείται, σε μια προγενέστερη φάση, η κατασκευή δύο άλλων τύπων χαρτών:

- (1) Ενός χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων (landslide inventory map) ο οποίος δείχνει την τοποθεσία, την έκταση και, εφόσον είναι γνωστά, τον τύπο και την κατάσταση δραστηριότητας των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων που έχουν εκδηλωθεί στην περιοχή.
- (2) Χάρτες παραγόντων (factor maps) οι οποίοι παρουσιάζουν (στην ίδια κλίμακα) τους παράγοντες (ή τις συνθήκες) που επιδρούν στην εκδήλωση αυτών των γεγονότων.

3.2.2.1 Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων

Ο χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο σε οποιαδήποτε προσπάθεια εκτίμησης και ζωνοποίησης της επιδεκτικότητας του φαινομένου, καθώς παρέχει την εικόνα σχετικά με τη χωρική κατανομή και συχνότητα εμφάνισης των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων μιας περιοχής. Οι μικρής κλίμακας χάρτες παρουσιάζουν μόνο τις θέσεις των κατολισθήσεων (ως σημειακές οντότητες), ενώ στους μεγάλης κλίμακας χάρτες μπορούν να διακριθούν η κεφαλή και το πόδι των κατολισθήσεων, να ταξινομηθούν οι διαφορετικοί τύποι τους και να παρουσιαστούν άλλα σχετικά χαρακτηριστικά τους (ως πολυγωνικές οντότητες) (Chacon et al., 2006). Τα βήματα που ακολουθούνται συνήθως για τη δημιουργία αυτών των χαρτών είναι τα εξής:

- (1) Αναγνώριση των κατολισθήσεων στην υπό εξέταση περιοχή, κυρίως με μεθόδους φωτοερμηνείας και τηλεπισκόπησης.
- (2) Ψηφιοποίηση των κατολισθήσεων. Αποτελεί το δυσκολότερο και πιο επίπονο βήμα αυτής της διαδικασίας, καθώς απαιτεί τη ψηφιοποίηση και περιγραφή (μέσω της εισαγωγής πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους) όλων των κατολισθήσεων, μία προς μία.
- (3) Απεικόνιση των κατολισθήσεων σε χάρτη.

Η ποιότητα ενός χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων προκύπτει με βάση την ακρίβεια του. Η ακρίβεια σχετίζεται με την πληρότητα του χάρτη, και τη γεωγραφική και θεματική

ορθότητα των πληροφοριών που παρουσιάζονται σ' αυτόν (Guzzetti et al., 2012). Η πληρότητα εκτιμάται με βάση την αναλογία του αριθμού των παρουσιαζόμενων κατολισθήσεων σε σχέση με τον αριθμό των πραγματικών κατολισθήσεων. Η γεωγραφική ακρίβεια μετρά την αντιστοιχία μεταξύ της γραφικής αναπαράστασης μιας κατολίσθησης σ' ένα χάρτη και της θέσης της ίδιας κατολίσθησης στην υπό εξέταση περιοχή. Η θεματική ακρίβεια αναφέρεται στην ορθότητα των βοηθητικών πληροφοριών (όπως για τον τύπο, την ημερομηνία εκδήλωσης, το βάθος, την κατάσταση δραστηριότητας, κ.ά.) που συνοδεύουν κάθε κατολίσθηση σε μια καταγραφή. Σε γενικές γραμμές, η ακρίβεια ενός χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων εξαρτάται κυρίως από:

- Την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά (π.χ. γεωμετρική διακριτική ικανότητα, ημερομηνία λήψης, απόσταση λήψης από το έδαφος, ικανότητα «νεφοκαλυπτικής διαπεραστικότητας», κ.ά.) των χρησιμοποιούμενων αεροφωτογραφικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων.
- Την εμπειρία και τις γνώσεις του(-ων) ατόμου(-ων) που διενεργούν την ερμηνεία αυτών των δεδομένων ή τη χαρτογράφηση στο πεδίο.

3.2.2.2 Χάρτες παραγόντων

Οι κατολισθήσεις, όπως και οι περισσότεροι φυσικοί κίνδυνοι, αποτελούν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων. Συνεπώς, για την αποτελεσματικότερη εκτίμηση και ζωνοποίηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων απαιτείται γενικά η χρήση ενός συνόλου παραγοντικών χαρτών παραγόμενων από την επεξεργασία αντίστοιχων καλής ποιότητας δεδομένων. Αν και δεν υφίστανται επίσημες και κοινώς αποδεκτές οδηγίες για την επιλογή αυτών των παραγόντων, τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η κλίμακα της ανάλυσης, η διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς και οι γενικές «κατευθυντήριες γραμμές» της σχετικής βιβλιογραφίας λαμβάνονται συνήθως υπόψη (Yalcin, 2008). Θεωρητικά, οποιοσδήποτε παράγοντας που συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με το φαινόμενο των κατολισθήσεων και θεωρείται σημαντικός στην πρόβλεψη μελλοντικών γεγονότων, μπορεί να εισαχθεί σε μια ανάλυση για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας. Θα πρέπει, όμως, να ικανοποιεί και κάποιες βασικές προϋποθέσεις, όπως το να μπορεί να εκφραστεί σε κάποια κλίμακα μέτρησης (συνεχής ή τακτική), να έχει χωρική μεταβλητότητα και να ορίζεται σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης.

Δύο είναι οι κύριες ομάδες παραγόντων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων: (α) οι αιτιολογικοί παράγοντες (causal factors), που αναμένεται να έχουν επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου, και (β) οι παράγοντες ενεργοποίησης (triggering factors), που την προκαλούν. Αναλυτικότερα:

Αιτιολογικοί παράγοντες

Ανατρέχοντας στη σχετική βιβλιογραφία, διαπιστώνεται η ύπαρξη μιας πληθώρας αιτιολογικών παραγόντων οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις μελέτες εκτίμησης και ζωνοποίησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Αυτοί μπορούν να υποδιαιρεθούν στους (περισσότερο ή λιγότερο) στατικούς (π.χ. τοπογραφικοί και γεωλογικοί παράγοντες), και στους δυναμικούς που, λόγω των μεταβολών τους στην πάροδο των χρόνων ως απόκριση στις περιβαλλοντικές αλλαγές, πρέπει να ενημερώνονται τακτικά. Το χρονικό πλαίσιο για την ενημέρωση των δυναμικών παραγοντικών δεδομένων μπορεί να κυμαίνεται από ώρες ή ημέρες, όπως στην περίπτωση των υδρολογικών δεδομένων των πρηνών (π.χ. η πίεση των πόρων του νερού), έως μήνες ή χρόνια, όπως στην περίπτωση των δεδομένων χρήσης γης. Ειδικά τα δεδομένα των χρήσεων γης πρέπει να αξιολογούνται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς αποτελούν τόσο αιτιολογικό παράγοντα, ο οποίος καθορίζει την εκδήλωση νέων κατολισθήσεων, όσο και «στοιχείο σε επικινδυνότητα», το οποίο μπορεί να επηρεαστεί από την εκδήλωσή τους (Van Westen et al., 2008).

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα δεδομένα αιτιολογικών παραγόντων είναι τα τοπογραφικά, τα γεωλογικά, τα δεδομένα κάλυψης ή χρήσης γης, και τα δεδομένα εγγύτητας σε γραμμικά χαρακτηριστικά (Guri et al., 2015; Meng et al., 2016; Ada and San, 2018; Aditian et al., 2018; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Chen et al., 2018c; Demir, 2018; Hong et al., 2018; Moayedi et al., 2018; Tsangaratos et al., 2018; Wu and Song, 2018; Zhou et al., 2018). Όντας η τοπογραφία ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, η δημιουργία της ψηφιακής αναπαράστασης της επιφάνειας του εδάφους, γνωστή ως ΨΜΥ, διαδραματίζει έναν καθοριστικό ρόλο. Το ΨΜΥ, το οποίο παρουσιάζει το υψόμετρο πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας, θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο για τον εντοπισμό των σημείων του εδάφους με το μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο (Ayalew and Yamagishi, 2005). Τα ΨΜΥ μπορούν να προέλθουν μέσω μιας ποικιλίας τεχνικών, όπως η ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών από υφιστάμενους τοπογραφικούς χάρτες, η τοπογραφική ισοπέδωση (topographic leveling), η ηλεκτρονική μέτρηση αποστάσεων

(electronic distance measurement), οι μετρήσεις διαφορικού GPS, η φωτογραμμετρία, και η τηλεπισκόπηση. Παραδοσιακά προτιμάται η ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών από τοπογραφικούς χάρτες, και η μετέπειτα μετατροπή τους σε ΨΜΥ. Η ακρίβεια του παραγόμενου ΨΜΥ εξαρτάται από την κλίμακα των τοπογραφικών χαρτών, την ισοδιάσταση των ισοϋψών καμπυλών, τη διαθεσιμότητα επιπρόσθετων υψομετρικών δεδομένων (π.χ. τριγωνομετρικά σημεία), και την ακρίβεια της εκτελεσθείσας ψηφιοποίησης.

Μια πληθώρα τοπογραφικών δεδομένων όπως η γωνία κλίσης, η διεύθυνση κλίσης (ή προσανατολισμός) και η καμπυλότητα των πρανών, μπορούν να παραχθούν από ένα ΨΜΥ, χρησιμοποιώντας βασισμένες στα ΣΓΠ λειτουργίες. Καθένας απ' αυτούς τους παραγόμενους τοπογραφικούς παράγοντες συσχετίζονται με την εκδήλωση των κατολισθητικών γεγονότων. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία κλίσης ενός πρανούς, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να «κατολισθήσει» (Dai and Lee, 2002). Επιπλέον, η διεύθυνση κλίσης, δηλαδή ο αζιμουθιακός προσανατολισμός του πρανούς, αποτελεί μια σημαντική ένδειξη της ευστάθειας του καθώς καταδεικνύει την έκθεσή του στις διάφορες κλιματολογικές συνθήκες, όπως τις βροχοπτώσεις, τους ανέμους, την ηλιακή ακτινοβολία, κ.ά. (Magliulo et al., 2008). Ενώ, από την πλευρά της, η καμπυλότητα σχετίζεται με την ανάδειξη των κοίλων τμημάτων των πρανών τα οποία τείνουν να συγκεντρώνουν περισσότερο νερό και ιζήματα απ' ό,τι τα κυρτά με αποτέλεσμα να καθίστανται πιο επιρρεπή στην αστοχία (Kanwal et al., 2017).

Δεδομένου ότι οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από διαφορετικές τιμές μηχανικής αντοχής, η γεωλογία αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (Carrara et al., 1991). Επιπλέον, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία των γεωλογικών σχηματισμών (ρήγματα, εφιππεύσεις και επωθήσεις) βασίζεται στο σκεπτικό ότι η σεισμική επιτάχυνση και ένταση μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση απ' αυτά.

Η ευστάθεια των πρανών επηρεάζεται έντονα από τον παράγοντα της κάλυψης ή χρήσης γης. Οι αλλαγές στην κάλυψη ή στις χρήσεις γης που προκύπτουν κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αποψίλωση των δασών, η διάνοιξη δρόμων, οι πυρκαγιές και η καλλιέργεια σε απότομα πρανή, μπορούν να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην εκδήλωση του φαινομένου (Glade, 2003). Η διάνοιξη δρόμων, επίσης, οδηγεί στην υποβάθμιση τόσο της γενικής τοπογραφίας, όσο και των βάσεων των πρανών. Ως εκ τούτου, η απόσταση από το οδικό δίκτυο αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα.

Άλλοι τύποι δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων που κάνουν συχνά την εμφάνιση τους στις μελέτες εκτίμησης και ζωνοποίησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων είναι τα υδρολογικά. Τα ποτάμια και τα ρέματα, τα οποία συνθέτουν το υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής, συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη φθορά των βάσεων των πρανών και στον κορεσμό του «υποβρύχιου» τμήματος του υλικού τους (Demir et al., 2013). Χαρακτηριστικά παραδείγματα υδρολογικών δεδομένων είναι η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, η πυκνότητα ρεμάτων, ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας και ο δείκτης χειμαρρικής ισχύος (Tien Bui et al., 2016; Basu and Pal, 2018; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Hong et al., 2018; Karim et al., 2018; Mandal and Mandal, 2018; Moayed et al., 2018; Mondal and Mandal, 2018; Zhou et al., 2018). Η πυκνότητα ρεμάτων προκύπτει από το λόγο του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής προς την έκταση της περιοχής. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο μικρότερη είναι η διείσδυση του νερού στο έδαφος, και συνεπώς τόσο πιο πιθανό το ενδεχόμενο εκδήλωσης κατολίσθησης (Pradhan and Kim, 2014). Ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (topographic wetness index – TWI) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό σε τοπικό επίπεδο της κατάστασης υγρασίας του εδάφους. Συνιστά παράγοντα ο οποίος επιδρά σημαντικά στην αστάθεια των πρανών (ειδικότερα για τις ρηχές κατολισθήσεις) και υπολογίζεται από την Εξίσωση:

$$TWI = \ln(A_s / \tan \beta) \quad (8)$$

όπου A_s είναι η ειδική έκταση της λεκάνης απορροής (μ^2/μ), και β είναι η γωνία κλίσης (σε μοίρες). Όσο υψηλότερες είναι οι τιμές του δείκτη, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση των επιφανειακών υδάτων στα πρανά, με αποτέλεσμα η αυξανόμενη πίεση των πόρων του νερού να συμβάλλει στη διαμόρφωση συνθηκών αστάθειας (μείωση της αντοχής των πρανών). Το γεγονός ότι η διαβρωτική δύναμη του τρεχούμενου νερού επηρεάζει άμεσα τις βάσεις των πρανών και τις διατομές των ποταμών, καθιστά τη χειμαρρική ισχύ ως έναν καθοριστικό παράγοντα κατολισθητικότητας. Ο σχετικός δείκτης (stream power index – SPI) βασίζεται στην παραδοχή ότι η παροχή¹ του νερού είναι ανάλογη με την ειδική έκταση της λεκάνης απορροής και υπολογίζεται από την Εξίσωση (Moore et al., 1991):

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad (9)$$

¹ Ως παροχή ορίζεται ο όγκος του νερού που διέρχεται από μια διατομή του ποταμού στη μονάδα του χρόνου (Μοντεσάντου, 1999).

Εδαφολογικά δεδομένα όπως ο τύπος, η υφή και η διαβρωσιμότητα των ανώτερων εδαφικών στρωμάτων (Oh and Lee, 2011a; Sujatha et al., 2013; Mandal and Mandal, 2018; Moayedi et al., 2018; Mondal and Mandal, 2018), καθώς και δεδομένα βλάστησης όπως ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (Kavzoglu et al., 2015; Youssef, 2015; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Chen et al., 2018c; Hong et al., 2018; Mandal and Mandal, 2018; Mondal and Mandal, 2018; Wu and Song, 2018), αποτελούν μερικούς ακόμη τύπους δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων οι οποίοι συναντώνται στη σχετική βιβλιογραφία. Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (normalized difference vegetation index – NDVI) υποδεικνύει τη φυτοκάλυψη μιας περιοχής και προκύπτει από την Εξίσωση:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (10)$$

όπου *NIR* είναι η ενέργεια που ανακλάται στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και *R* είναι η ενέργεια που ανακλάται στο ορατό κόκκινο τμήμα (ή φασματικό κανάλι στην περίπτωση των δορυφορικών συστημάτων). Μ' ένα εύρος τιμών από -1 έως 1, οι τιμές που είναι πιο κοντά στο 1 αναφέρονται σε υψηλή φυτοκάλυψη, ενώ οι τιμές που είναι κοντινές ή μικρότερες του 0 σε μικρή ή καθόλου φυτοκάλυψη (Intarawichian and Dasananda, 2011). Οι περιοχές με μικρή ή καθόλου φυτοκάλυψη τείνουν να είναι πιο επιρρεπείς στην εκδήλωση κατολισθήσεων λόγω της απουσίας ενός εκ των βασικών μέσων διατήρησης της ευστάθειας των πρανών όπως είναι η βλάστηση, και του επακόλουθου, απ' αυτήν την απουσία, κορεσμού του εδάφους με νερό από διάφορες πηγές όπως η βροχόπτωση.

Παράγοντες ενεργοποίησης

Οι παράγοντες ενεργοποίησης προκύπτουν από την εκτίμηση για μεγάλες χρονικές περιόδους της σχέσης «μεγέθους-συχνότητας» γεγονότων ενεργοποίησης τα οποία έχουν άμεση (ή σχεδόν άμεση) επίδραση στην ευστάθεια των πρανών. Τέτοια γεγονότα είναι κυρίως οι βροχοπτώσεις και οι σεισμοί. Παγκοσμίως, ένας σημαντικός αριθμός καταστροφικών κατολισθήσεων οφείλεται στην εκδήλωση προηγούμενων έντονων βροχοπτώσεων και των «παραγόμενων» πλημμυρικών γεγονότων τους. Ο κορεσμός του εδάφους και η μεταφορά (χαλαρών κυρίως) υλικών από τα προκύπτοντα επιφανειακά ύδατα (χερσαίες ροές) επηρεάζουν αρνητικώς την ευστάθεια των πρανών και συμβάλλουν στην ενεργοποίηση κατολισθήσεων. Από την άλλη πλευρά, η καταγραφή, διαχρονικώς, εκτεταμένων κατολισθήσεων ως αποτέλεσμα της εκδήλωσης ισχυρών σεισμικών γεγονότων αναδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο η σεισμική δραστηριότητα συνδέεται με την ενεργοποίηση του φαινομένου. Πιο

συγκεκριμένα, οι σεισμοί, μέσω της δόνησης του εδάφους, καθώς επίσης και της προκαλούμενης απ' αυτή διαστολής των εδαφικών σχηματισμών που επιτρέπει την ταχεία διείσδυση του νερού, αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα άμεσης εμφάνισης κατολισθήσεων κυρίως σε απότομα πρανή.

Λόγω της ιδιότητας των προαναφερθέντων γεγονότων να συμβάλλουν όχι μόνο στην εκδήλωση νέων κατολισθήσεων, αλλά και στην επαναδραστηριοποίηση παλαιότερων, αρκετοί ερευνητές έχουν επισημάνει την αναγκαιότητα ενσωμάτωσης των σχετικών παραγόντων στις μελέτες τους (Kayastha, 2015; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2015; Basu and Pal, 2018; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018c; Hong et al., 2018; Mandal and Mandal, 2018; Mondal and Mandal, 2018). Εκτός από τις μικρής κλίμακας μελέτες, σ' όλες τις άλλες περιπτώσεις, τα προερχόμενα απ' αυτούς τους παράγοντες δεδομένα έχουν γενικά περισσότερο χρονική απ' ό,τι χωρική σημασία (Van Westen et al., 2008). Τα δεδομένα βροχοπτώσεων μετρώνται σε μεμονωμένους μετεωρολογικούς σταθμούς (π.χ. της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας – EMY, http://www.hnms.gr/hnms/greek/Paroxi/paroxi_meteorologika11, 14/01/2018), ενώ τα σεισμικά δεδομένα είναι συνήθως διαθέσιμα ως κατάλογοι σεισμών (π.χ. του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, <http://www.gein.noa.gr/el/seismikotita/katalogoi-seismwn>, 14/01/2018). Η χωρική κατανομή τους στα όρια μιας περιοχής μελέτης μπορεί να αναπαρασταθεί χαρτογραφικώς μέσω της παρεμβολής ενός αρκετά μεγάλου – για λόγους ακρίβειας – αριθμού σημειακών δεδομένων. Μ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η δημιουργία των αντίστοιχων χαρτών, όπως είναι ο χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (mean annual precipitation) ή ο χάρτης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (peak ground acceleration). Ωστόσο, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η σύνδεση της εμφάνισης κατολισθήσεων σε μια περιοχή ως άμεσο αποτέλεσμα της εκδήλωσης σ' αυτήν γεγονότων ενεργοποίησης, απαιτείται μια εκτεταμένη και λεπτομερής, από άποψη χρονικών πληροφοριών, βάση δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων.

Όπως είναι φυσικό, η συχνή εκδήλωση κατολισθήσεων στην Ελλάδα έχει οδηγήσει στη διενέργεια ενός σημαντικού αριθμού μελετών οι οποίες, κάνοντας χρήση των παραπάνω παραγόντων, στοχεύουν στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας του φαινομένου για διάφορες περιοχές της χώρας. Έτσι, οι Rozos et al. (2010) δημιούργησαν ένα χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το βορειοανατολικό τμήμα του Νομού Αχαΐας. Για την κατασκευή του εκτέλεσαν τη μέθοδο της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης και έλαβαν υπόψη τους έξι

παράγοντες (λιθολογία, χρήσεις γης, γωνία κλίσης, απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, γεωμετρία κύριων ασυνεχειών, βροχόπτωση) που σχετίζονται με την ευστάθεια των πρανών. Οι Gemitzi et al. (2011), χρησιμοποιώντας έξι αιτιολογικούς παράγοντες (υψόμετρο, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, χρήσεις γης, γεωλογία, απόσταση από τα ρήγματα), εφάρμοσαν μια βασισμένη στα ΣΓΠ μεθοδολογία η οποία συνδύαζε την παραγοντική ανάλυση με μια μέθοδο ασαφούς λογικής. Η μεθοδολογία τους είχε ως στόχο την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το ορεινό τμήμα του Νομού Ξάνθης (με έκταση περίπου 850 χλμ²). Οι Rozos et al. (2011) κατασκεύασαν δύο χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για να συγκρίνουν την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης, του συστήματος μηχανικής βράχων (rock engineering system) και της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης. Δέκα παράγοντες (λιθολογία, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, υψόμετρο, βροχόπτωση, χρήσεις γης, απόσταση από δρόμους, απόσταση από ποτάμια, απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, γεωμετρία κύριων ασυνεχειών) χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο μεθόδους, ενώ ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το βορειοανατολικό τμήμα του Νομού Αχαΐας (με έκταση περίπου 420 χλμ²). Οι Parathanassiou et al. (2013) εκτέλεσαν μια βασισμένη στα ΣΓΠ διμεταβλητή στατιστική ανάλυση για την παραγωγή του χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων που είχαν προκληθεί από το σεισμό του 2003 στο νησί της Λευκάδας. Ο συγκεκριμένος χάρτης προήλθε από τη συνδυαστική χρήση τριών αιτιολογικών παραγόντων (γεωλογία, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης). Οι Sabatakakis et al. (2013), επίσης, συνδύασαν την παραγοντική ανάλυση και το λόγο συχνοτήτων προκειμένου να επιτύχουν τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για όλη την έκταση της Ελλάδας. Καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια τους αυτή έπαιξε η συμμετοχή δέκα παραγόντων (λιθολογία, γωνία κλίσης, υψόμετρο, πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου, βροχόπτωση, κλίμα, σεισμικότητα, χρήσεις γης, πυκνότητα οδικού δικτύου, πληθυσμιακή πυκνότητα) που συνδέονται με το φαινόμενο. Οι Chalkias et al. (2014c), στα πλαίσια της εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου (έκτασης 21.439 χλμ²), εξέτασαν συγκριτικώς δύο διαφορετικούς τύπους παλινδρόμησης, τη γεωγραφική σταθμισμένη παλινδρόμηση και την τυπική λογιστική παλινδρόμηση. Για τους σκοπούς της μελέτης τους επεξεργάστηκαν πέντε παράγοντες (γεωλογία, κάλυψη γης, βροχόπτωση, υψόμετρο, γωνία κλίσης) που επιδρούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Οι Kouli et al. (2014) χρησιμοποίησαν τις μεθόδους του σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού, του βάρους της ένδειξης και του συνδυασμού τους (υβριδική μέθοδος) με στόχο την παραγωγή χαρτών επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το νομό

Χανίων, στη Κρήτη. Η προσπάθεια τους αυτή βασίστηκε σε δέκα παράγοντες (γεωλογία, υψόμετρο, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, καμπυλότητα, χρήσεις γης, βροχόπτωση, απόσταση από ρήγματα, απόσταση από ποτάμια, απόσταση από δρόμους) που επιδρούν έμμεσα ή άμεσα στην εκδήλωση του φαινομένου. Οι Tsangaratos and Benardos (2014) εκτίμησαν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για μια περιοχή του νομού Ξάνθης χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων και οκτώ αιτιολογικούς παράγοντες (λιθολογία, υψόμετρο, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, απόσταση από γεωλογικά όρια, απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο, απόσταση από οδικό δίκτυο). Οι Ilia and Tsangaratos (2016) παρουσίασαν μια βασισμένη στα ΣΓΠ στατιστική μέθοδο (βάρος της ένδειξης) η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για την περιοχή της Κύμης (με έκταση 167,6 χλμ²), στην Εύβοια. Για την εκτέλεση της μεθόδου τους, επέλεξαν τη χρήση οκτώ αιτιολογικών παραγόντων (λιθολογία, υψόμετρο, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, καμπυλότητα, απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο, τοπογραφικός δείκτης υγρασίας). Οι Sakkas et al. (2016) παρουσίασαν, σε εθνική κλίμακα (για το σύνολο της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας), τη χωρική κατανομή των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε φαινόμενα κατολισθήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους τόσο αιτιολογικούς παράγοντες (γωνία κλίσης, γεωλογία, χρήσεις γης), όσο και παράγοντες ενεργοποίησης (βροχόπτωση, σεισμικότητα). Η ανάλυσή τους περιλάμβανε την εφαρμογή της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης για δύο διαφορετικές εκδοχές, χρησιμοποιώντας στην πρώτη το σύνολο των παραγόντων, ενώ στη δεύτερη μόνο τους παράγοντες που σχετίζονταν με φυσικές διεργασίες (όλους εκτός από τις χρήσεις γης). Οι Tsangaratos and Ilia (2016), τέλος, κατασκεύασαν ένα χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για μια περιοχή του νομού Ξάνθης μέσω της εφαρμογής ενός δέντρου απόφασης και την αξιοποίηση οκτώ αιτιολογικών παραγόντων (λιθολογία, υψόμετρο, γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, απόσταση από γεωλογικά όρια, απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο, απόσταση από οδικό δίκτυο).

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων μελετών, στις περισσότερες απ' αυτές, οι αιτιολογικοί παράγοντες της γωνίας κλίσης των πρανών (με συντελεστή βαρύτητας που κυμαίνεται από 0,18 έως 0,55) και της γεωλογίας (με συντελεστή βαρύτητας που κυμαίνεται από 0,18 έως 0,24) αναδεικνύονται ως οι παράγοντες που συμβάλλουν σε μεγαλύτερο βαθμό, σε σχέση με τους υπόλοιπους, στην εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μελέτες εκείνες που

συμπεριλαμβάνουν, επιπροσθέτως των αιτιολογικών, και παράγοντες ενεργοποίησης, εντάσσουν, στην πλειοψηφία τους, τη βροχόπτωση στη συγκεκριμένη «δυάδα σημαντικότητας» (με συντελεστή βαρύτητας που κυμαίνεται από 0,14 έως 0,22) αντικαθιστώντας κυρίως τη γεωλογία. Από το σύνολο των μελετών, επίσης, καταδεικνύεται η διεύθυνση κλίσης (ή προσανατολισμός) των πρανών ως ο παράγοντας με τη μικρότερη συμβολή στην εκδήλωση του φαινομένου (με συντελεστή βαρύτητας που κυμαίνεται από 0,03 έως 0,11).

Ένα κρίσιμο θέμα σχετικά με τους παράγοντες που χρησιμοποιούνται σ' αυτού του είδους τις μελέτες, είναι η ποιότητα των αντίστοιχων δεδομένων η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες των γεωχωρικών δεδομένων η οποία προδίδει την ποιότητά τους είναι η χωρική ανάλυση (spatial resolution) που διαθέτουν. Σε όρους ΣΓΠ και με βάση τη δομή ψηφιδωτών δεδομένων, η χωρική ανάλυση εκφράζεται μέσω του μεγέθους της ψηφίδας (ή κελιού). Οι ψηφίδες είναι τα βασικά χωρικά συστατικά μέρη στα οποία χωρίζεται μια περιοχή μελέτης και για τα οποία ένα μοντέλο εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης είναι σε θέση να παράγει μια πρόβλεψη (επιδεκτική ή μη επιδεκτική) (Cama et al., 2016). Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους για τη ψηφίδα εξαρτάται κυρίως από την κλίμακα ανάλυσης. Σε μικρής κλίμακας αναλύσεις, κρίνεται ωφέλιμη η χρήση μια μεγάλου μεγέθους ψηφίδας, ενώ σε μεγαλύτερης κλίμακας αναλύσεις μια μικρότερου μεγέθους ψηφίδα. Ουσιαστικά, το μέγεθος της ψηφίδας τείνει να είναι αντιστρόφως ανάλογο του μεγέθους της κλίμακας ανάλυσης.

Ο ορισμός των κατηγοριών/κλάσεων (ή αλλιώς η κατηγοριοποίηση) των παραγοντικών δεδομένων αποτελεί ένα ακόμα κρίσιμο θέμα. Στην περίπτωση των παραγόντων συνεχούς κλίμακας (όπως το υψόμετρο, η γωνία κλίσης, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, κ.ά.) η υποδιαίρεση τους σ' έναν «ωφέλιμο» αριθμό κατηγοριών αποτελεί επιλογή του ερευνητή. Αντίθετα, στην περίπτωση των παραγόντων κατηγορικής κλίμακας (όπως η γεωλογία, η κάλυψη/χρήση γης, κ.ά.), οι κατηγορίες διαμορφώνονται με βάση τις αρχικώς προσδιορισμένες διαφορές τους. Στις μεσαίας και μικρής κλίμακας μελέτες, όμως, η υποδιαίρεση των κατηγορικών παραγόντων σε μεμονωμένες χαρτογραφικές μονάδες συχνά δημιουργεί πρόβλημα. Γι' αυτό το λόγο, στις συγκεκριμένες μελέτες, προτιμάται η διαμόρφωση των τελικών κατηγοριών τους μέσω μιας, βασισμένης σε κάποιο κοινό χαρακτηριστικό, ομαδοποίησης των αρχικώς προσδιορισμένων κατηγοριών τους. Πρόβλημα προκύπτει, επίσης,

κι από τον ορισμό μικρών σε έκταση κατηγοριών καθώς στις μελέτες εφαρμογής ποσοτικών (κυρίως στατιστικών) μοντέλων, αν και μπορεί να αντιπροσωπεύουν ουσιαστικές συνθήκες, παρουσιάζουν συνήθως μικρή «ποσοτική σημαντικότητα».

3.2.2.3 Μέθοδοι/μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων

Διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης

Η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (analytical hierarchy process – AHP) αναπτύχθηκε αρχικώς από τον Saaty (1980) και αποτελεί μια μέθοδο λήψης αποφάσεων η οποία μπορεί να ιεραρχεί και να «ποσοτικοποιεί» τη διαδικασία σκέψης του ατόμου με βάση τα χαρακτηριστικά της γραμμικής άλγεβρας, έτσι ώστε ένα περίπλοκο πολλών-κριτηρίων πρόβλημα να μπορεί να επιλυθεί. Γενικά, θεωρείται μια από τις πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις για την ανάδειξη της σημαντικότητας των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση των διαφόρων φυσικών κινδύνων.

Στην περίπτωση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, ειδικότερα, η διαδικασία ιεραρχεί τους παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου, καθώς και τις κατηγορίες τους. Στα πλαίσια της εφαρμογής της, τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- (1) Δημιουργία του πίνακα των ανά ζεύγη συγκρίσεων: η ανά ζεύγη σύγκριση πραγματοποιείται για κάθε πιθανό ζευγάρι παραγόντων και κατηγοριών (δύο παράγοντες ή κατηγορίες κάθε φορά) και στηρίζεται στην υποκειμενική γνώμη ενός έμπειρου «εμπειρογνώμονα» (ανθρώπινος παράγοντας). Κάθε τέτοια σύγκριση έχει στόχο ν' απαντήσει στη διμερή ερώτηση «ποιος(-α) από τους(-ις) δύο παράγοντες (ή κατηγορίες) είναι σημαντικότερος(-η) και πόσο σημαντικότερος(-η);», χρησιμοποιώντας μια κλίμακα με τιμές από το σύνολο:

$$\{1/9, 1/8, 1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

όπου η τιμή $1/9$ αντιπροσωπεύει τον(-ην) λιγότερο σημαντικό(-η) παράγοντα (ή κατηγορία), η τιμή 1 τους ίσης σημασίας παράγοντες (ή κατηγορίες), και η τιμή 9 τον(-ην) σημαντικότερο(-η) παράγοντα (ή κατηγορία). Οι τιμές αυτές καταγράφονται σ' έναν πίνακα που διαθέτει έναν αριθμό σειρών και στηλών ίσο με τον αριθμό των παραγόντων (ή κατηγοριών).

- (2) Υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας για τους παράγοντες και τις κατηγορίες τους: περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Malczewski, 1999): (α) υπολογισμός του αθροίσματος των τιμών σε κάθε στήλη του πίνακα των ανά ζεύγη συγκρίσεων, (β) τη διαίρεση κάθε στοιχείου του πίνακα με το σύνολο της αντίστοιχης στήλης, και (γ) τον υπολογισμό του μέσου όρου των στοιχείων σε κάθε σειρά του κανονικοποιημένου πλέον πίνακα, διαιρώντας το άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών για κάθε σειρά του πίνακα με τον αριθμό των παραγόντων (ή κατηγοριών).
- (3) Έλεγχος των λογικών σφαλμάτων στη συμπλήρωση του πίνακα των ανά ζεύγη συγκρίσεων: περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Malczewski, 1999): (α) υπολογισμός του διανύσματος σταθμισμένου αθροίσματος (weighted sum vector), πολλαπλασιάζοντας αρχικώς το συντελεστή βαρύτητας του(-ης) κάθε παράγοντα (ή κατηγορίας) με την αντίστοιχη στήλη του αρχικού πίνακα των ανά ζεύγη συγκρίσεων και αθροίζοντας ακολούθως τις προκύπτουσες τιμές για κάθε σειρά, (β) προσδιορισμός του διανύσματος συνέπειας (consistency vector), διαιρώντας το διάνυσμα σταθμισμένου αθροίσματος κάθε παράγοντα (ή κατηγορίας) με τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας, (γ) υπολογισμός του όρου λ , διαιρώντας το άθροισμα των παραγόμενων διανυσμάτων συνέπειας με τον αριθμό των παραγόντων (ή κατηγοριών), n , (δ) υπολογισμός του δείκτη συνέπειας (consistency index – CI) μέσω της Εξίσωσης:

$$CI = \lambda - n / n - 1 \quad (11)$$

και (ε) υπολογισμός του λόγου συνέπειας (consistency ratio – CR) μέσω της Εξίσωσης:

$$CR = CI / RI \quad (12)$$

όπου RI είναι ένας τυχαίος δείκτης (random index) ο οποίος, ανάλογα με τον αριθμό των παραγόντων (ή κατηγοριών), παίρνει συγκεκριμένες τιμές (Πίνακας 3.2). Σε περίπτωση ασυνέπειας ($CR \geq 0,10$), οι αρχικές τιμές στον πίνακα των ανά ζεύγη συγκρίσεων πρέπει ν' αναθεωρηθούν και η διαδικασία να επαναληφθεί. Αφού επιτευχθεί και η συνέπεια ($CR < 0,10$), οι συντελεστές βαρύτητας που

έχουν προκύψει, χρησιμοποιούνται για τη στάθμιση των παραγόντων και των κατηγοριών τους.

Πίνακας 3.2: Τιμές RI ανάλογα με τον αριθμό των παραγόντων (Saaty, 1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

- (4) Υπολογισμός της συνολικής τιμής επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, LS , για κάθε ψηφίδα (pixel) του τελικού ψηφιδωτού επιπέδου (grid) μέσω της σταθμισμένης άθροισης των παραγόντων:

$$LS = \sum_{i=1}^n fw_i \times w_{i,j} \quad (13)$$

όπου fw_i είναι ο συντελεστής βαρύτητας του παράγοντα i , $w_{i,j}$ ο συντελεστής βαρύτητας για την κατηγορία j του παράγοντα i , και n ο αριθμός των παραγόντων.

Αν και η μέθοδος AHP έχει ως σημαντικό της πλεονέκτημα την πολλών-κριτηρίων λήψη αποφάσεων, χαρακτηρίζεται επίσης από πολλές ανεπάρκειες δεδομένου ότι δεν μπορεί ν' απεικονίσει αποτελεσματικά τη χωρική κατανομή των αποτελεσμάτων που παράγει. Ωστόσο, τις ανεπάρκειες αυτές καλύπτει η τεχνολογία των ΣΓΠ με τις ισχυρές ικανότητες χωρικής ανάλυσης που διαθέτει.

Η μέθοδος AHP έχει εφαρμοσθεί σε μια πληθώρα (πρόσφατων) μελετών εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι Kayastha et al. (2013b) χαρτογράφησαν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για την υδρολογική λεκάνη Tinau (έκτασης περίπου 562 χλμ²), στο δυτικό Νεπάλ, εκτελώντας την AHP με βάση έντεκα παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου. Οι Chen et al. (2015a) εκτίμησαν την επιδεκτικότητα σε εκδήλωση ροών κορημάτων για την κοιλάδα του ποταμού Subao (με έκταση 72,2 χλμ²), στην Κίνα, χρησιμοποιώντας πέντε αιτιολογικούς παράγοντες. Οι συντελεστές βαρύτητας αυτών των παραγόντων προσδιορίστηκαν μέσω της AHP. Οι Mandal and Mandal (2018) παρήγαγαν ένα χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Lish (με έκταση 51,7 χλμ²), στην Ινδία, αξιοποιώντας την AHP και δεκαπέντε παράγοντες. Επιπλέον, οι Youssef (2015), Meng et al. (2016), και Demir (2018)

σύγκριναν την AHP με άλλες ημι-ποσοτικές (WLC), διμεταβλητές (όπως ο λόγος συχνοτήτων) και πολυμεταβλητές (όπως η λογιστική παλινδρόμηση) ποσοτικές, καθώς και υβριδικές (συνδυασμός ασαφούς λογικής και SVM) μεθόδους. Στα πλαίσια αυτών των προσπαθειών τους κατασκεύασαν χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για περιοχές του Μπανγκλαντές (με έκταση περίπου 20 χλμ²), της Κίνας (με έκταση περίπου 3.600 χλμ²), και της Τουρκίας (με έκταση 147 χλμ²), αντιστοίχως.

Τραπεζοειδής ασαφής αριθμητική στάθμιση

Η τραπεζοειδής ασαφής αριθμητική στάθμιση (trapezoidal fuzzy number weighting – TFNW) αναπτύχθηκε αρχικώς από τους Wang et al. (2009). Συνιστά μια μέθοδο λήψης αποφάσεων η οποία αξιοποιεί την ασαφή λογική. Σ' ένα ασαφές περιβάλλον οι αρχικοί συντελεστές βαρύτητας τόσο των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων, όσο και των κατηγοριών τους, προσδιορίζονται είτε από μεμονωμένους «εμπειρογνώμονες» (ατομικό πλαίσιο αποφάσεων), είτε από ομάδες «εμπειρογνωμόνων» (ομαδικό πλαίσιο αποφάσεων). Με δεδομένη την υποδεικνυόμενη από πειραματικά στοιχεία ανωτερότητα (ως προς την ακρίβεια) των «ομαδικών κρίσεων (group judgments)» έναντι της κρίσης ενός μεμονωμένου ατόμου, το ομαδικό πλαίσιο αποφάσεων είναι αυτό που συνήθως προτιμάται (Lee and Jones, 2004). Για την υλοποίηση της απαιτούνται τα ακόλουθα βήματα:

- (1) Καθορισμός του βαθμού σημαντικότητας (ή αξιοπιστίας), R_t , των «εμπειρογνωμόνων» που συμμετέχουν στην ομάδα προσδιορισμού των αρχικών συντελεστών βαρύτητας, μέσω της Εξίσωσης:

$$R_t = \frac{w_t}{\sum_{t=1}^k w_t} \quad (14)$$

όπου w_t είναι η σημαντικότητα που αποδίδεται από τον ερευνητή στον t «εμπειρογνώμονα», και k ο αριθμός των «εμπειρογνωμόνων». Εάν η σημαντικότητα που αποδίδεται σε κάθε «εμπειρογνώμονα» είναι η ίδια, τότε οι βαθμοί σημαντικότητας τους είναι ίσοι ($R_1 = R_2 = \dots = R_k$) και η ομάδα ονομάζεται ομοιογενής (homogeneous). Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στην εκχώρηση διαφορετικής σημαντικότητας στα μέλη της ομάδας λόγω της συμμετοχής σ' αυτήν «εμπειρογνωμόνων» με περισσότερη εμπειρία ή υψηλότερη επαγγελματική/ακαδημαϊκή θέση έναντι των υπολοίπων, η ομάδα ονομάζεται ετερογενής (heterogeneous).

- (2) Εισαγωγή κατάστασης γλωσσικής μεταβλητής από κάθε «εμπειρογνώμονα» σε κάθε έναν παράγοντα και παραγοντική κατηγορία με στόχο την ανάδειξη της εκτιμώμενης επίδρασής τους στην εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων (αρχικοί συντελεστές βαρύτητας).
- (3) Υπολογισμός από τον ερευνητή των συναθροιστικών ασαφών συντελεστών βαρύτητας (aggregated fuzzy weights) για τους παράγοντες και τις κατηγορίες τους με βάση τους αντίστοιχους τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς τους. Για παράδειγμα, εάν $(a_{jt}, b_{jt}, c_{jt}, d_{jt})$ είναι ο ασαφής αριθμός που δίνεται στην κατηγορία j του παράγοντα i από τον t «εμπειρογνώμονα», τότε ο συναθροιστικός ασαφής συντελεστής βαρύτητας, w'_j , που εκτιμάται από την ομάδα των «εμπειρογνομόνων» για την συγκεκριμένη κατηγορία ορίζεται ως:

$$w'_j = (a_j, b_j, c_j, d_j) = (\sum_{t=1}^k R_t a_{jt}, \sum_{t=1}^k R_t b_{jt}, \sum_{t=1}^k R_t c_{jt}, \sum_{t=1}^k R_t d_{jt}) \quad (15)$$

Πίνακας 3.3: Καταστάσεις γλωσσικής μεταβλητής και οι αντίστοιχοι ασαφείς αριθμοί και συμμετοχές.

Καταστάσεις γλωσσικής μεταβλητής (επιδεκτικότητα)	Ασαφείς αριθμοί	Ασαφής συμμετοχή
Πολύ Υψηλή (ΠΥ)	(7,10,10,10)	
Υψηλή (Υ)	(5,7,7,10)	
Μέτρια (Μ)	(2,5,5,8)	
Χαμηλή (Χ)	(0,3,3,5)	
Πολύ Χαμηλή (ΠΧ)	(0,0,0,3)	

- (4) Απο-ασαφοποίηση των συναθροιστικών ασαφών συντελεστών βαρύτητας. Στην περίπτωση της κατηγορίας j , η απο-ασαφοποίηση, $d(w'_j)$, διενεργείται μέσω της Εξίσωσης:

$$d(w'_j) = (a_j + b_j + c_j + d_j) / 4 \quad (16)$$

- (5) Υπολογισμός των κανονικοποιημένων συντελεστών βαρύτητας. Για την κατηγορία j , ο κανονικοποιημένος συντελεστής βαρύτητας, w_j , δίνεται από την Εξίσωση:

$$w_j = \frac{d(w'_j)}{\sum_{j=1}^m d(w'_j)} \quad (17)$$

όπου m είναι ο αριθμός των κατηγοριών του παράγοντα i .

- (6) Εκτίμηση της συνολικής τιμής επιδεκτικότητας κατολισθήσεων μέσω της Εξίσωσης (13). Σ' αυτήν την περίπτωση, όμως, ο όρος fw_i αναπαριστά τον κανονικοποιημένο συντελεστή βαρύτητας του παράγοντα i , και ο w_{ij} τον κανονικοποιημένο συντελεστή βαρύτητας για την κατηγορία j του παράγοντα i .

Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης της μεθόδου TFNW αποτελούν οι μελέτες των Wang et al. (2009), και Chalkias et al. (2014a). Πιο συγκεκριμένα, οι Wang et al. (2009), χρησιμοποιώντας έξι παράγοντες, εκτίμησαν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για την επαρχία Guizhou (έκτασης 176.167 χλμ²), στη νοτιοδυτική Κίνα. Επίσης, οι Chalkias et al. (2014a) κατασκεύασαν ένα χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της TFNW, και επτά παράγοντες (αιτιολογικούς και ενεργοποίησης).

Λόγος συχνοτήτων

Ο λόγος συχνοτήτων (frequency ratio – FR) είναι μια απλή στατιστική διμεταβλητή μέθοδος η οποία, βασιζόμενη στις χωρικές συσχετίσεις μεταξύ της κατανομής των κατολισθήσεων και των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωσή τους, εκτιμάει το βαθμό της μεταξύ τους συσχέτισης. Υπολογίζεται για κάθε κατηγορία των παραγόντων διαιρώντας το λόγο κατολισθήσεων με το λόγο εκτάσεων:

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(S_{i,j})}{\sum N_{pix}(S_{i,j})}}{\frac{N_{pix}(N_{i,j})}{\sum N_{pix}(N_{i,j})}} \quad (18)$$

όπου $N_{pix}(S_{i,j})$ είναι το πλήθος των ψηφίδων κατολίσθησης στην κατηγορία j του παράγοντα i , και $N_{pix}(N_{i,j})$ είναι το συνολικό πλήθος των ψηφίδων στην ίδια κατηγορία. Μια FR τιμή ίση με 1 (μέση τιμή) σημαίνει ότι η πυκνότητα των κατολισθήσεων στη συγκεκριμένη κατηγορία

είναι ανάλογη με το μέγεθος της κατηγορίας. Εάν η τιμή είναι μεγαλύτερη από 1, τότε υπάρχει μια υψηλή συσχέτιση, ενώ μια τιμή μικρότερη από 1 υποδεικνύει μια χαμηλή συσχέτιση (Choi et al., 2012).

Η συνολική τιμή επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για κάθε ψηφίδα του τελικού επιπέδου μπορεί να ληφθεί αθροίζοντας τις FR τιμές των εξεταζόμενων παραγόντων:

$$LS = \sum_{i=1}^n FR_{i,j} \quad (19)$$

όπου $FR_{i,j}$ είναι η FR τιμή για την κατηγορία j του παράγοντα i , και n είναι ο αριθμός των παραγόντων.

Οι μελέτες των Oh and Lee (2011a), Sujatha et al. (2013), και Kayastha (2015) για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων σε περιοχές της Κορέας (τρεις περιοχές μελέτης με εκτάσεις 66, 41 και 68 χλμ², αντιστοίχως), της Ινδίας (με έκταση περίπου 63 χλμ²), και του Νεπάλ (με έκταση περίπου 228 χλμ²), αντιστοίχως, αποτελούν μερικά παραδείγματα χρήσης της συγκεκριμένης μεθόδου. Σ' αυτές, δεκατρείς, δέκα, και εννιά, αντιστοίχως, παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου, εξετάστηκαν. Επιπροσθέτως, οι Guo et al. (2015), Youssef et al. (2015a), και Aditian et al. (2018) σύγκριναν τη μέθοδο FR με άλλες ποσοτικές στατιστικές (IoE, βάρος της ένδειξης, λογιστική παλινδρόμηση), και βασισμένες στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μεθόδους. Για την επίτευξη των επιθυμητών συγκρίσεων, οι προαναφερθέντες ερευνητές έλεγξαν την απόδοση των μεθόδων μέσω της επικύρωσης των παραγόμενων αποτελεσμάτων τους. Τα αποτελέσματα αυτά είχαν τη μορφή χαρτών επιδεκτικότητας κατολισθήσεων και αφορούσαν περιοχές της Κίνας (έκτασης 7.339 χλμ²), της Σαουδικής Αραβίας (έκτασης 324 χλμ²), και της Ινδονησίας (έκτασης 377 χλμ²), αντιστοίχως.

Δείκτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων

Ο δείκτης επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (landslide susceptibility index – LSI) προτάθηκε από τον Van Westen (1997) και έχει στόχο τον προσδιορισμό της σημαντικότητας των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου, μέσα από την ανάλυση της χωρικής σχέσης μεταξύ της έκτασής τους και της κατολισθείσας έκτασης. Η διμεταβλητή αυτή μέθοδος υπολογίζει την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για κάθε κατηγορία όλων των παραγόντων που έχουν επιλεχθεί να εξεταστούν στην εκάστοτε μελέτη. Έτσι, η LSI τιμή για την κατηγορία j του παράγοντα i ορίζεται ως (Tien Bui et al., 2011):

$$LSI_{i,j} = \ln \left[\frac{\frac{N_{pix}(S_{i,j})}{N_{pix}(N_{i,j})}}{\frac{\sum N_{pix}(S_{i,j})}{\sum N_{pix}(N_{i,j})}} \right] \quad (20)$$

όπου $N_{pix}(S_{i,j})$ είναι το πλήθος των ψηφίδων κατολίσθησης στην κατηγορία j του παράγοντα i , και $N_{pix}(N_{i,j})$ είναι το συνολικό πλήθος των ψηφίδων στην ίδια κατηγορία. Εάν μια κατηγορία σχετίζεται σε υψηλό βαθμό με την εκδήλωση του φαινομένου, τότε θα έχει υψηλή θετική LSI τιμή. Αντίθετα, μια αρνητική τιμή της κατηγορίας υποδεικνύει τη χαμηλή συσχέτισή της με την εκδήλωση του φαινομένου.

Εκτελώντας την Εξίσωση (20), τα χωρικά κατανεμημένα παραγοντικά δεδομένα μετατρέπονται σε επίπεδα επιδεκτικότητας. Ως εκ τούτου, η συνολική τιμή επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για κάθε ψηφίδα του τελικού επιπέδου προκύπτει από την άθροιση αυτών των επιπέδων:

$$LS = \sum_{i=1}^n LSI_{i,j} \quad (21)$$

όπου $LSI_{i,j}$ είναι η LSI τιμή για την κατηγορία j του παράγοντα i , και n είναι ο αριθμός των παραγόντων.

Αρκετά μεγάλο είναι το πλήθος των μελετών που εφαρμόζουν τη μέθοδο LSI για την εκτίμηση και χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων συγκεκριμένων περιοχών. Παρακάτω παρατίθενται μόνο κάποιες (πρόσφατες) απ' αυτές. Πιο αναλυτικά, οι De Guidi and Scudero (2013), χρησιμοποιώντας έξι αιτιολογικούς παράγοντες, εκτίμησαν την επιδεκτικότητα για τις κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από μια υψηλής έντασης βροχόπτωση (της 1ης Οκτωβρίου 2009) στην ορεινή περιοχή Peloritani, στη Σικελία της Ιταλίας. Οι Pareek et al. (2013), επίσης, κατασκεύασαν χάρτες επιδεκτικότητας για τις κατολισθήσεις που εντόπισαν πριν και μετά από το σεισμό Chamoli στα Ιμαλάια. Για το σκοπό αυτό εξέτασαν οκτώ παράγοντες, ενώ ως περιοχής μελέτης επέλεξαν ένα τμήμα των Garhwal Himalayas (έκτασης περίπου 1.300 χλμ²). Οι Sarkar et al. (2013), και Chalkias et al. (2014b) ζωνοποίησαν και χαρτογράφησαν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων σε περιοχές των Ιμαλαΐων (τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Rilli, με έκταση περίπου 49 χλμ²), και της Ελλάδας (το γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου), αντιστοίχως. Στα πλαίσια αυτών των ερευνητικών προσπαθειών τους, ανέλυσαν επτά (αιτιολογικούς), και επτά (τόσο αιτιολογικούς, όσο και ενεργοποίησης) παράγοντες, αντιστοίχως. Επιπλέον, οι Zhao et al. (2015), και οι Chen

et al. (2018c) σύγκριναν τη μέθοδο LSI με άλλες πολυμεταβλητές (λογιστική παλινδρόμηση) και διμεταβλητές (CF, IoE) μεθόδους, αντιστοίχως. Για την εκπόνηση των συγκριτικών τους μελετών, εκτίμησαν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για περιοχές της Κίνας (έκτασης 2.672 χλμ² και 2.780 χλμ², αντιστοίχως) λαμβάνοντας υπόψη τους δέκα και δώδεκα, αντιστοίχως, παράγοντες (τόσο αιτιολογικούς, όσο και ενεργοποίησης).

Βάρος της ένδειξης

Το βάρος της ένδειξης (weight of evidence – WoE) είναι μια διμεταβλητή στατιστική μέθοδος η οποία βασίζεται στο θεώρημα του Μπέϋζ (Bayes). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί μια λογαριθμική γραμμική μορφή της Μπεϋζιανής προσέγγισης με στόχο την εκτίμηση της σημαντικότητας ενδεικτικών μοτίβων μέσω στατιστικών εργαλείων (Bonham-Carter, 1994). Ένα βασικό πλεονέκτημα της Μπεϋζιανής μοντελοποίησης είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας στο μοντέλο.

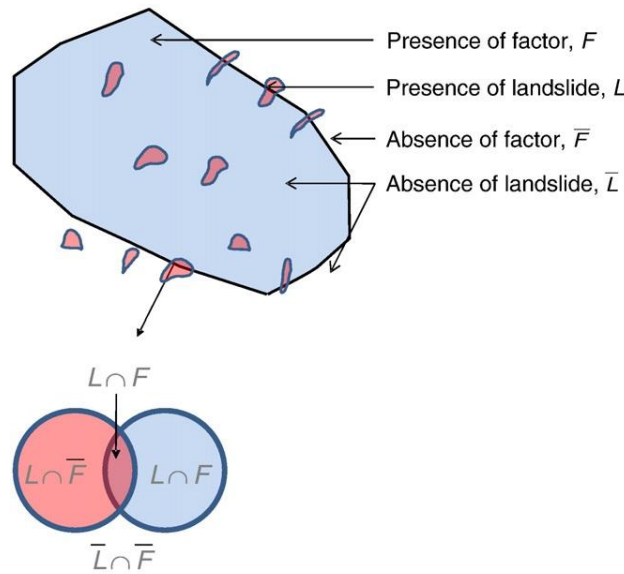
Οι βασικές αρχές της μεθόδου WoE είναι οι έννοιες της εκ των προτέρων (prior probability) και της εκ των υστέρων πιθανότητας (posterior probability). Στα πλαίσια της εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για μια περιοχή μελέτης, η εκ των προτέρων πιθανότητα είναι η πιθανότητα (P) εκδήλωσης μιας κατολίσθησης (L) η οποία καθορίζεται από τους ίδιους τύπους κατολισθητικών γεγονότων που συνέβησαν στο παρελθόν κάτω από παρόμοιες συνθήκες, για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Η πιθανότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος της κατολισθείσας έκτασης (ή του πλήθους των ψηφίδων κατολίσθησης) προς τη συνολική έκταση (ή το συνολικό πλήθος των ψηφίδων) της περιοχής μελέτης:

$$P\{L\} = \frac{N\{L\}}{N\{T\}} \quad (22)$$

Η παραπάνω πιθανότητα μπορεί να τροποποιηθεί με την προσθήκη δεδομένων που την επηρεάζουν. Τα επιπρόσθετα αυτά δεδομένα αντιπροσωπεύονται από τους παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου και χαρακτηρίζονται ως «ενδείξεις (evidences)». Όταν οι ενδείξεις ενσωματώνονται στον υπολογισμό της πιθανότητας, αυτή μετατρέπεται στην εκ των υστέρων πιθανότητα και εκφράζει την πιθανότητα ένα κατολισθητικό γεγονός (L) να συμβεί υπό την παρουσία (B) ή την απουσία ($\bar{B}$) μιας ένδειξης (ή ενός παράγοντα):

$$P\{L|B\} = \frac{P\{L \cap B\}}{P\{B\}} = P\{L\} \frac{P\{B|L\}}{P\{B\}} \quad (23)$$

$$P\{L|\bar{B}\} = \frac{P\{L \cap \bar{B}\}}{P\{\bar{B}\}} = P\{L\} \frac{P\{\bar{B}|L\}}{P\{\bar{B}\}} \quad (24)$$



Σχήμα 3.8: Σχέσεις μεταξύ κατολίσθησης και παράγοντα στη μέθοδο WoE (Regmi et al., 2010b).

Αντιπαραβάλλοντας τα κατολισθητικά δεδομένα με κάθε παράγοντα (ένδειξη), η μεταξύ τους «στατιστική σχέση» μπορεί να μετρηθεί και ν' αξιολογηθεί ως προς το εάν και σε ποιο βαθμό ο κάθε παράγοντας είναι υπεύθυνος για την εκδήλωση των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων (Neuhäuser and Terhorst, 2007). Ένα ζευγάρι συντελεστών βαρύτητας υπολογίζεται για κάθε κατηγορία των παραγόντων. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται ένας θετικός συντελεστής βαρύτητας, W^+ , ο οποίος δείχνει ότι η παραγοντική κατηγορία είναι παρούσα στα κατολισθητικά γεγονότα, και ένας αρνητικός συντελεστής βαρύτητας, W^- , ο οποίος δείχνει ότι η κατηγορία είναι απύσα. Ο υπολογισμός τους βασίζεται στους ακόλουθους φυσικούς λογαρίθμους (Dahal et al., 2008):

$$W^+ = \ln \frac{P\{B|L\}}{P\{B|\bar{L}\}} = \ln \left(\frac{\frac{A_1}{A_1 + A_2}}{\frac{A_3}{A_3 + A_4}} \right) \quad (25)$$

$$W^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|L\}}{P\{\bar{B}|\bar{L}\}} = \ln \left(\frac{\frac{A_2}{A_1 + A_2}}{\frac{A_4}{A_3 + A_4}} \right) \quad (26)$$

όπου A_1 είναι το πλήθος των ψηφίδων κατολίσθησης σε μια δεδομένη κατηγορία ενός παράγοντα, A_2 είναι το πλήθος των ψηφίδων κατολίσθησης στις υπόλοιπες κατηγορίες του παράγοντα, A_3 είναι το πλήθος των ψηφίδων μη-κατολίσθησης στη δεδομένη κατηγορία, και A_4

είναι το πλήθος των ψηφίδων μη-κατολίσθησης στις υπόλοιπες κατηγορίες του παράγοντα. Εάν η παρουσία της κατηγορίας και τα κατολισθητικά γεγονότα συσχετίζονται θετικά, η τιμή του W^+ είναι θετική και η τιμή του W^- αρνητική. Εάν η παρουσία της κατηγορίας και τα κατολισθητικά γεγονότα συσχετίζονται αρνητικά, η τιμή του W^+ είναι αρνητική και η τιμή του W^- θετική. Εάν οι τιμές των W^+ και W^- ισούνται με μηδέν, τότε η εκ των υστέρων πιθανότητα ισούται με την εκ των προτέρων πιθανότητα, και η πιθανότητα να εκδηλωθεί μια κατολίσθηση θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από την παρουσία ή την απουσία της κατηγορίας (μη-συσχέτιση).

Η στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών βαρύτητας μπορεί να επαληθευτεί μέσω των διακυμάνσεων τους (variances, S^2). Η διαφορά μεταξύ των θετικών και των αρνητικών συντελεστών βαρύτητας είναι γνωστή ως αντίθεση (contrast), C :

$$C = W^+ - W^- \quad (27)$$

Η αντίθεση αποτελεί ένα χρήσιμο μέτρο της χωρικής σύνδεσης μεταξύ μιας δεδομένης κατηγορίας ενός παράγοντα και της εκδήλωσης των κατολισθητικών γεγονότων. Για μια θετική χωρική συσχέτιση, η τιμή της C είναι θετική, ενώ για μια αρνητική χωρική συσχέτιση, η τιμή είναι αρνητική.

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω στατιστικών μέτρων, σειρά έχει η επιλογή των παραγόντων που τελικώς θα συμμετάσχουν στη δημιουργία του επιθυμητού χάρτη επιδεκτικότητας, μέσω του ελέγχου της μεταξύ τους ανεξαρτησίας. Διάφοροι τύποι στατιστικών μεθόδων μπορούν να εκτελεστούν για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των παραγόντων. Μεταξύ αυτών, η βασισμένη στο χ^2 ανά ζεύγος σύγκριση (chi-square-based pairwise comparison) είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στη τιμή του χ^2 και εφαρμόζεται μέσω της δημιουργίας ενός πίνακα συνάφειας (contingency table) για κάθε ένα ζεύγος παραγόντων. Ο πίνακας αυτός (με r γραμμές ίσες με τον αριθμό των κατηγοριών του ενός παράγοντα, και c στήλες ίσες με τον αριθμό των κατηγοριών του άλλου παράγοντα) καταγράφει τον αντίστοιχο αριθμό κατολισθητικών γεγονότων που παρατηρούνται για μια δεδομένη επικάλυψη των δύο παραγόντων (Σχήμα 3.9). Για κάθε ζεύγος παραγόντων, ο αριθμός που έχει καταγραφεί συγκρίνεται με τον αριθμό που αναμένεται, μέσω της Εξίσωσης (Oh and Lee, 2011b):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_{oi} - f_{ei})^2}{f_{ei}} \quad (28)$$

όπου f_{oi} είναι οι παρατηρούμενες συχνότητες (observed frequencies), και f_{ei} οι αναμενόμενες συχνότητες (expected frequencies). Λαμβάνοντας υπόψη τους βαθμούς ελευθερίας και το επίπεδο εμπιστοσύνης του ελέγχου, οι εκτιμώμενες τιμές του χ^2 που είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή του (Πίνακας 3.4), υποδεικνύουν ότι οι παράγοντες των συγκεκριμένων ζευγών δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητοι, και συνεπώς πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο αποκλεισμού τους από τη συνέχεια της μεθόδου WoE προκειμένου να σημειωθεί μια όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση.

Factor 2	Factor 1			Total
	Class 1	...	Class n	
Class 1	$N\{\text{Class 1 of Factor 1} \cap \text{Class 1 of Factor 2} \cap D\}$	...	$N\{\text{Class } n \text{ of Factor 1} \cap \text{Class 1 of Factor 2} \cap D\}$	$N\{\text{Class 1 of Factor 2} \cap D\}$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	
Class n	$N\{\text{Class 1 of Factor 1} \cap \text{Class } n \text{ of Factor 2} \cap D\}$	...	$N\{\text{Class } n \text{ of Factor 1} \cap \text{Class } n \text{ of Factor 2} \cap D\}$	$N\{\text{Class } n \text{ of Factor 2} \cap D\}$
Total	$N\{\text{Class 1 of Factor 1} \cap D\}$	...	$N\{\text{Class } n \text{ of Factor 1} \cap D\}$	$N\{D\}$

Σχήμα 3.9: Γραφική αναπαράσταση ενός πίνακα συνάφειας για τον έλεγχο ανεξαρτησίας των παραγόντων (Oh and Lee, 2011b).

Πίνακας 3.4: Θεωρητικές τιμές του χ^2 ανάλογα με τον βαθμό ελευθερίας (ν) και το επίπεδο εμπιστοσύνης (Bonham-Carter, 1994).

ν	0,10	0,05	0,025	0,01	0,001
1	2,706	3,841	5,024	6,635	10,828
2	4,605	5,991	7,378	9,210	13,816
3	6,251	7,815	9,348	11,345	16,266
4	7,779	9,488	11,143	13,277	18,467
5	9,236	11,070	12,833	15,086	20,515
6	10,645	12,592	14,449	16,812	22,458
7	12,017	14,067	16,013	18,475	24,322
8	13,362	15,507	17,535	20,090	26,125
9	14,684	16,919	19,023	21,666	27,877
10	15,987	18,307	20,483	23,209	29,588
11	17,275	19,675	21,920	24,725	31,264
12	18,549	21,026	23,337	26,217	32,910
13	19,812	22,362	24,736	27,688	34,528
14	21,064	23,685	26,119	29,141	36,123

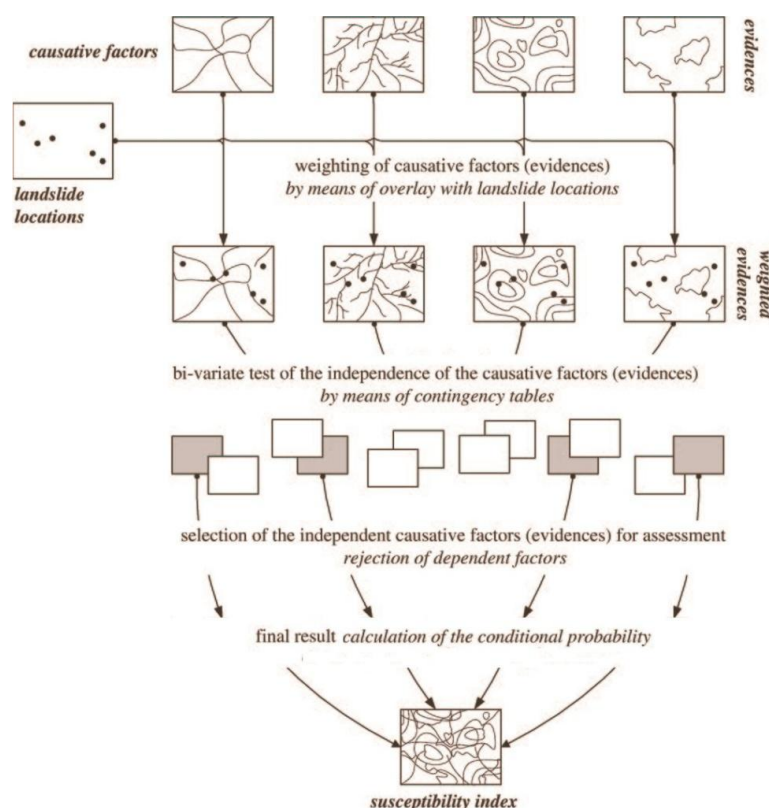
Πίνακας 3.4: (Συνέχεια).

v	0,10	0,05	0,025	0,01	0,001
15	22,307	24,996	27,488	30,578	37,697
16	23,542	26,296	28,845	32,000	39,252
17	24,769	27,587	30,191	33,409	40,790
18	25,989	28,869	31,526	34,805	42,312
19	27,204	30,144	32,852	36,191	43,820
20	28,412	31,410	34,170	37,566	45,315

Η συνολική τιμή επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για κάθε ψηφίδα του τελικού επιπέδου μπορεί να προσδιοριστεί αθροίζοντας τις τιμές αντίθεσης των «εγκεκριμένων από τον έλεγχο ανεξαρτησίας» παραγόντων:

$$LS = \sum_{i=1}^n C_{i,j} \quad (29)$$

όπου $C_{i,j}$ είναι η τιμή της αντίθεσης για την κατηγορία j του παράγοντα i , και n είναι ο αριθμός των παραγόντων.



Σχήμα 3.10: Παρουσίαση απαιτούμενων ενεργειών στη μέθοδο WoE (Neuhäuser and Terhorst, 2007).

Πρόσφατα παραδείγματα μελετών που έκαναν χρήση της μεθόδου WoE είναι αυτές των Sujatha et al. (2014), Guri et al. (2015), Piacentini et al. (2015), και Zhang et al. (2015). Στόχος των συγκεκριμένων ερευνητικών προσπαθειών ήταν η εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για περιοχές της νότιας Ινδίας (έκτασης περίπου 63 χλμ²), της βόρειας Ινδίας (έκτασης 834 χλμ²), της Μάλτα και του Αφγανιστάν (έκτασης περίπου 44.000 χλμ²), αντιστοίχως. Με μοναδική εξαίρεση αυτή των Zhang et al. (2015) (εννιά παράγοντες εκ των οποίων ο ένας ήταν ενεργοποίησης), οι υπόλοιπες μελέτες βασίστηκαν στην ανάλυση μόνο αιτιολογικών παραγόντων (εννιά, δεκαπέντε, και επτά, αντιστοίχως). Επιπλέον, οι Barella et al. (2018), και Mahdadi et al. (2018), προκειμένου να συγκρίνουν τη WoE με άλλες διμεταβλητές (FR) και πολυμεταβλητές (λογιστική παλινδρόμηση, διαχωριστική ανάλυση) στατιστικές μεθόδους, κατασκεύασαν έναν αντίστοιχο αριθμό χαρτών επιδεκτικότητας κατολισθήσεων που αφορούσαν περιοχές της Βραζιλίας (με έκταση περίπου 642 χλμ²), και της Αλγερίας (με έκταση περίπου 345 χλμ²), αντιστοίχως.

Λογιστική παλινδρόμηση

Η λογιστική παλινδρόμηση (logistic regression – LR) περιλαμβάνεται στην κατηγορία των στατιστικών μοντέλων με την ονομασία γενικευμένα γραμμικά μοντέλα (generalized linear models), η οποία ασχολείται με τη χρήση ενός συνόλου μεταβλητών πρόβλεψης για τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου που προβλέπει την πιθανότητα εμφάνισης ενός γεγονότος/φαινομένου σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επιτρέπει το σχηματισμό μιας πολυμεταβλητής συσχέτισης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών (Atkinson and Massari, 1998). Η αρχή της LR είναι ότι η εξαρτημένη μεταβλητή (dependent variable) είναι γενικά δυαδική (π.χ. τιμές 0 και 1). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (independent variables), με τη σειρά τους, προβλέπουν την εξαρτημένη μεταβλητή και μπορεί να είναι είτε συνεχείς, είτε διακριτές, είτε οποιοσδήποτε συνδυασμός των δύο αυτών τύπων. Η LR έχει το πλεονέκτημα ότι επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό όταν η βασική υπόθεση της κανονικής κατανομής των μεταβλητών δεν ικανοποιείται (García-Rodríguez et al., 2008).

Στην περίπτωση της εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων, ο στόχος της LR είναι να βρει το «βέλτιστο» μοντέλο για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της απουσίας ή παρουσίας (τιμή 0 ή 1) των κατολισθήσεων (εξαρτημένη μεταβλητή) και ενός συνόλου παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου (ανεξάρτητες μεταβλητές). Αυτό το μοντέλο μπορεί να εκφραστεί στην απλούστερη μορφή του ως:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (30)$$

όπου P είναι η πιθανότητα εκδήλωσης ενός κατολισθητικού γεγονότος η οποία κυμαίνεται από 0 έως 1 σε μια καμπύλη σχήματος S, και z είναι το γραμμικό άθροισμα μιας σταθεράς και των σταθμισμένων με συντελεστές (coefficients) ανεξάρτητων μεταβλητών. Η τιμή του z κυμαίνεται από $-\infty$ έως $+\infty$ και υπολογίζεται από την Εξίσωση:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (31)$$

όπου n είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών, x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές, b_0 είναι η σταθερά του μοντέλου, και b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) είναι οι συντελεστές. Με βάση τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών και την κατάσταση της εξαρτημένης μεταβλητής σ' ένα συγκεκριμένο δείγμα ψηφίδων, το μοντέλο υπολογίζει τους συντελεστές και τα στατιστικά μέτρα απόδοσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood method) (Kundu et al., 2013). Μέσω των στατιστικών εκτιμήσεων που προέρχονται από την εφαρμογή του μοντέλου στο επιλεγμένο δείγμα, η πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθήσεων μπορεί να υπολογιστεί (Εξίσωση 30) για κάθε μια ψηφίδα του τελικού επιπέδου επιδεκτικότητας.

Ένας άλλος τρόπος γραφής του μοντέλου LR είναι ο λογαριθμικός μετασχηματισμός (logit transformation) χρησιμοποιώντας μια εξίσωση της μορφής:

$$\text{Logit}(p) = \ln\left(\frac{p(Y=1)}{1-p(Y=1)}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (32)$$

όπου p είναι η πιθανότητα ότι η εξαρτημένη μεταβλητή Y είναι 1 (πιθανότητα εκδήλωσης ενός κατολισθητικού γεγονότος), και $p(Y=1)/1-p(Y=1)$ είναι ο λεγόμενος λόγος πιθανοφάνειας (likelihood ratio). Το αποτέλεσμα αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ένα γεγονός να συμβεί διαιρούμενη με την πιθανότητα να μη συμβεί. Αν ένας συντελεστής είναι θετικός, η λογαριθμικά μετασχηματισμένη τιμή του θα είναι μεγαλύτερη από 1, πράγμα που σημαίνει ότι το γεγονός είναι πιο πιθανό να συμβεί. Αν ένας συντελεστής είναι αρνητικός, η αντίστοιχη τιμή του θα είναι μικρότερη από 1 και οι πιθανότητες εκδήλωσης του γεγονότος μειώνονται. Ένας συντελεστής 0 έχει μια λογαριθμικά μετασχηματισμένη τιμή ίση με 1, και δεν αλλάζει τις πιθανότητες με τον έναν ή με τον άλλο τρόπο (Ayalew and Yamagishi, 2005). Για την ανάδειξη της σημαντικότητας των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων, η ύπαρξη ενός υπολογιζόμενου διαστήματος εμπιστοσύνης (confidence

interval) είναι επίσης απαραίτητη. Ως εκ τούτου, ένας παράγοντας μπορεί να χαρακτηριστεί ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εκδήλωση του φαινομένου, αν ο λόγος πιθανοφάνειας του είναι μεγαλύτερος από 1 και η στατιστική σημαντικότητα (significance) του είναι μέσα στα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης.

Σ' αυτό το σημείο αξίζει ν' αναφερθεί ότι πριν την εφαρμογή του μοντέλου LR, είναι απαραίτητη η διάγνωση της πολυσυγγραμμικότητας (multicollinearity) προκειμένου να ελεγχθεί η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος διάγνωσης της πολυσυγγραμμικότητας είναι ο υπολογισμός δύο ειδικών γι' αυτό το σκοπό δεικτών: της ανοχής (tolerance – TOL) και του συντελεστή πληθωριστικής διακύμανσης (variance inflation factor – VIF). Η ανοχή υπολογίζεται ως $1 - R^2$, όπου R^2 είναι η διακύμανση της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής που προκύπτει από την παλινδρόμηση της ενάντια σ' όλες τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εξαρτημένη μεταβλητή. Μια τιμή TOL μικρότερη από 0,2 υποδεικνύει πολυσυγγραμμικότητα μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών, ενώ σοβαρή πολυσυγγραμμικότητα σημειώνεται όταν η τιμή αυτή είναι μικρότερη από 0,1 (Menard, 2001). Ο συντελεστής πληθωριστικής διακύμανσης υπολογίζεται από τη διαίρεση της μονάδας με την ανοχή ($1/\text{tolerance}$). Μια τιμή VIF μεγαλύτερη από 10 υποδηλώνει την ύπαρξη ενός σοβαρού προβλήματος πολυσυγγραμμικότητας.

Εξετάζοντας κανείς τη (διεθνή κυρίως) βιβλιογραφία, μπορεί να χαρακτηρίσει τη LR ως μία από τις πλέον εφαρμοσμένες μεθόδους, καθώς δεν είναι λίγες οι μελέτες εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων που κάνουν χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου. Για παράδειγμα, οι Chen et al. (2015b), Dagdelenler et al. (2016), Basu and Pal (2018), Mondal and Mandal (2018), και Tekin and Çan (2018) λαμβάνοντας υπόψη τους πέντε, οκτώ, δεκαέξι, δεκαεπτά, δεκαεπτά, και είκοσι, αντιστοίχως, παράγοντες, κατασκεύασαν χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για περιοχές της ανατολικής Κίνας (με έκταση 27 χλμ²), της Τουρκίας (με έκταση περίπου 233 χλμ²), της Ινδίας (με έκταση περίπου 265 χλμ²), της Ινδίας (με έκταση περίπου 379 χλμ²), και της Τουρκίας (με έκταση 523 χλμ²), αντιστοίχως. Οι Shou and Yang (2015), επίσης, μέσω της LR, έλεγξαν την επίδραση που είχαν στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων οι υψηλής έντασης βροχοπτώσεις οι οποίες προκλήθηκαν στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Chingshui (στην Ταϊβάν) κατά τη διάρκεια των τυφώνων Toraji (το 2001) και Mindulle (το 2004). Επιπλέον, οι Kavzoglu et al. (2015), Wang et al. (2015), και Karim et al. (2018) σύγκριναν τη LR με άλλες ποσοτικές διμεταβλητές

μεθόδους (FR, WoE), καθώς και με μεθόδους εξόρυξης δεδομένων (SVM, δέντρα απόφασης). Για το σκοπό αυτό, οι προαναφερθέντες ερευνητές έλεγξαν την απόδοση των μεθόδων τους μέσω της επικύρωσης των παραγόμενων χαρτών επιδεκτικότητας. Οι χάρτες αυτοί αφορούσαν περιοχές της Τουρκίας (περιοχή Duzkoy, με έκταση περίπου 171 χλμ²), της Ιαπωνίας (πόλη Mizunami, με έκταση 175 χλμ²), και της Αλγερίας (περιοχή Bouandas, με έκταση περίπου 38 χλμ²), αντιστοίχως.

Γεωγραφικά σταθμισμένη παλινδρόμηση

Το κύριο πρόβλημα με τη χρήση των καθολικών μοντέλων παλινδρόμησης (global regression models) – όπως η λογιστική παλινδρόμηση – στα χωρικά δεδομένα είναι ότι σ' αυτού του τύπου τα μοντέλα, ο συντελεστής που υπολογίζεται για τη σχέση μεταξύ κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής και της εξαρτημένης μεταβλητής βασίζεται στην παραδοχή ότι η σχέση αυτή είναι στατική και συνεπής σ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης (Fotheringham et al., 2001). Ωστόσο, οι συνθήκες αυτές είναι συνήθως δύσκολο ν' ανταποκρίνονται στον πραγματικό κόσμο, ιδιαίτερα στην περίπτωση των κατολισθήσεων οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως «χωρικά ασταθείς» διεργασίες. Ως εκ τούτου, ένα τοπικό μοντέλο παλινδρόμησης (local regression model) κρίνεται πιο κατάλληλο γι' αυτές τις «μη στατικές» διεργασίες. Η γεωγραφικά σταθμισμένη παλινδρόμηση (geographically weighted regression – GWR) προτάθηκε αρχικώς από τους Brunsdon et al. (1996) και αποτελεί μια τοπική τεχνική μοντελοποίησης η οποία προεκτείνει το συμβατικό πλαίσιο παλινδρόμησης επιτρέποντας στις παραμέτρους της να ποικίλουν στο χώρο ανάλογα με τη θέση τους. Για να συμβεί αυτό, η GWR ενσωματώνει χωρικές συντεταγμένες στο μοντέλο. Έτσι, η γενική εξίσωσή της παίρνει την ακόλουθη μορφή (Feuillet et al., 2014):

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i)x_{i2} + \dots + \beta_n(u_i, v_i)x_{in} + \varepsilon_i \quad (33)$$

όπου y είναι η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στη θέση i , (u_i, v_i) είναι οι συντεταγμένες της θέσης i στο χώρο, β_0 είναι η τιμή της σταθεράς για τη θέση i , n είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών, $\beta_1 \dots \beta_n$ είναι οι τοπικές παράμετροι του μοντέλου για τη θέση i , x_{in} είναι η αξία της n^{th} ανεξάρτητης μεταβλητής στη θέση i , και ε είναι ο όρος σφάλματος.

Στα πλαίσια της εφαρμογής ενός μοντέλου GWR, η εκτίμηση των τοπικών παραμέτρων $\beta_n(u_i, v_i)$ πραγματοποιείται μέσω μιας βασισμένης στη απόσταση συνάρτησης στάθμισης (distance-based weighting function), έτσι ώστε οι θέσεις που είναι πλησιέστερες στη θέση

εκτίμησης i να θεωρούνται ότι έχουν μεγαλύτερη επιρροή στην εκτίμηση των παραμέτρων (Trgovac et al., 2015):

$$\beta'(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (34)$$

όπου β' είναι η εκτίμηση του β , X είναι η μήτρα (matrix) που σχηματίζεται από τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, W είναι μια $n \times n$ μήτρα χωρικής στάθμισης, και y είναι το διάνυσμα που σχηματίζεται από τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Στη μήτρα χωρικής στάθμισης, τα μη-διαγώνια στοιχεία είναι μηδέν, ενώ τα διαγώνια στοιχεία είναι οι γεωγραφικοί συντελεστές βαρύτητας των n δεδομένων για τη θέση i (Fotheringham et al., 2002):

$$W_i = \begin{bmatrix} w_{i1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{i2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_{i3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & w_{in} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Σ' αυτή την μήτρα, ο συντελεστής βαρύτητας που εκχωρείται σε κάθε ένα στοιχείο δεδομένων γύρω από μια θέση i προσδιορίζεται μέσω μιας χωρικής συνάρτησης πυρήνα (kernel function). Δύο είναι οι κύριοι τύποι πυρήνων για τις συγκεκριμένες συναρτήσεις: ο σταθερός (fixed) πυρήνας και ο προσαρμοστικός (adaptive) πυρήνας. Ο σταθερός πυρήνας, βασιζόμενος στον προσδιορισμό μιας τιμής απόστασης, επιλέγει ένα σταθερού μεγέθους εύρος ζώνης (bandwidth) για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και όλα τα δεδομένα που εμπίπτουν σ' αυτό χρησιμοποιούνται στο σύνολο παλινδρόμησης. Από την άλλη πλευρά, ο προσαρμοστικός πυρήνας, βασιζόμενος στον προσδιορισμό ενός αριθμού εγγύτερων γειτόνων, τροποποιεί το μέγεθος του εύρους ζώνης ανάλογα με τις χωρικές διακυμάνσεις στην πυκνότητα των δεδομένων, έτσι ώστε σε περιπτώσεις ανομοιόμορφης κατανομής το εύρος ζώνης να είναι μεγαλύτερο όπου τα δεδομένα είναι αραιά και μικρότερο όπου τα δεδομένα είναι πυκνά (Tu, 2013). Οι σταθεροί και προσαρμοστικοί πυρήνες μπορούν να είναι είτε Gaussian, είτε bi-square. Στον πυρήνα Gaussian, οι συντελεστές βαρύτητας μειώνονται συνεχώς και σταδιακά σε σχέση με το κέντρο του πυρήνα αλλά ποτέ δεν φτάνουν το μηδέν. Αντίθετα, ο bi-square πυρήνας έχει ένα ξεκάθαρο εύρος ολοκλήρωσης της διαδικασίας στις θέσεις που η στάθμιση είναι μη μηδενική (Nakaya et al., 2014). Από τα παραπάνω, συνεπώς, προκύπτουν οι εξής συναρτήσεις πυρήνα:

- Σταθερή Gaussian: $w_{ij} = \exp(-d_{ij}^2/\theta^2)$ (36)

- Σταθερή bi-square: $w_{ij} = \begin{cases} (1-d_{ij}^2/\theta^2)^2, & d_{ij} < \theta \\ 0, & d_{ij} > \theta \end{cases}$ (37)

- Προσαρμοστική bi-square: $w_{ij} = \begin{cases} (1-d_{ij}^2/\theta_{i(k)}^2)^2, & d_{ij} < \theta_{i(k)} \\ 0, & d_{ij} > \theta_{i(k)} \end{cases}$ (38)

- Προσαρμοστική Gaussian: $w_{ij} = \exp(-d_{ij}^2/\theta_{i(k)}^2)$ (39)

όπου w_{ij} είναι ο συντελεστής βαρύτητας του στοιχείου στη θέση j για τον υπολογισμό της παραμέτρου στη θέση i , d_{ij} είναι η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ j και i , θ είναι ένα σταθερού μεγέθους εύρος ζώνης προσδιορισμένο από μια τιμή απόστασης, και $\theta_{i(k)}$ είναι ένα προσαρμοστικού μεγέθους εύρος ζώνης προσδιορισμένο ως η απόσταση του k^{th} εγγύτερου γείτονα. Ο προσδιορισμός του μεγέθους για το εύρος ζώνης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του μοντέλου. Ο πιο γνωστός τρόπος προσδιορισμού του είναι μέσω της διενέργειας δοκιμαστικών ελέγχων που στόχο έχουν την εύρεση μιας όσο το δυνατόν μικρότερης τιμής για το διορθωμένο κριτήριο πληροφορίας του Ακαϊκε (corrected Akaike Information Criterion – AICc) (Chalkias et al. 2013; Tu, 2013).

Όσο αναφορά την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων, η μέθοδος GWR εφαρμόζεται κυρίως για να εξετάσει τη χωρική μη-στασιμότητα ή ετερογένεια (non-stationarity or heterogeneity) στις σχέσεις μεταξύ της απουσίας ή παρουσίας των κατολισθήσεων (εξαρτημένη μεταβλητή) και των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου (ανεξάρτητες μεταβλητές). Η δυαδικότητα της εξαρτημένης μεταβλητής (τιμή 0 για την απουσία και τιμή 1 για την παρουσία κατολίσθησης) μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι οδηγεί σε μια λογιστική GWR μοντελοποίηση. Αποτέλεσμα της μοντελοποίησης αυτής είναι η εκτίμηση ενός συνόλου στατιστικών μέτρων μεταξύ των οποίων είναι και οι τοπικές παράμετροι. Κάθε τέτοια παράμετρος υποδεικνύει τη σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής για κάθε μια ψηφίδα του επιλεγμένου δείγματος. Μια αρνητική τιμή της παραμέτρου υποδηλώνει μια αρνητική σχέση, ενώ μια θετική τιμή μια θετική σχέση. Μάλιστα, όσο υψηλότερη είναι η τιμή της τοπικής παραμέτρου, τόσο ισχυρότερη είναι η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και της αντίστοιχης ανεξάρτητης μεταβλητής (Huang et al., 2015).

Την τελευταία δεκαετία, η GWR έχει εφαρμοστεί σε πολλές μελέτες που αναφέρονται στη φυσική (Tu, 2013; Huang et al., 2015) ή την ανθρώπινη γεωγραφία (Chalkias et al., 2013; Trgovac et al., 2015). Ωστόσο, η χρήση της στην ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων

είναι πολύ περιορισμένη. Συγκεκριμένα, οι Erenner and Düzgün (2010) αξιολόγησαν και σύγκριναν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή δύο διαφορετικών καθολικών μοντέλων παλινδρόμησης (LR και χωρική παλινδρόμηση) για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων σε μια περιοχή της Νορβηγίας (με έκταση περίπου 12.168 χλμ²). Διερεύνησαν, επίσης, τις επιδόσεις αυτών των μοντέλων σε τοπική κλίμακα, βρίσκοντας τις διαφορές που παρουσίαζαν οι παραγόμενοι χάρτες τους σε σχέση με προερχόμενους από τη GWR χάρτες. Επιπλέον, οι Chalkias et al. (2014c) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καθολικά μοντέλα παλινδρόμησης, η GWR παρείχε μια δυνητική βελτίωση στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για το γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου. Τέλος, οι Feuillet et al. (2014) εκτέλεσαν σε μια περιοχή της βόρειας Ισλανδίας ένα καθολικό (LR) και ένα τοπικό μοντέλο παλινδρόμησης (GWR) για να εξετάσουν τη μη-στασιμότητα των παραγόντων που θεωρήθηκαν ότι συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην εκδήλωση παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων.

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

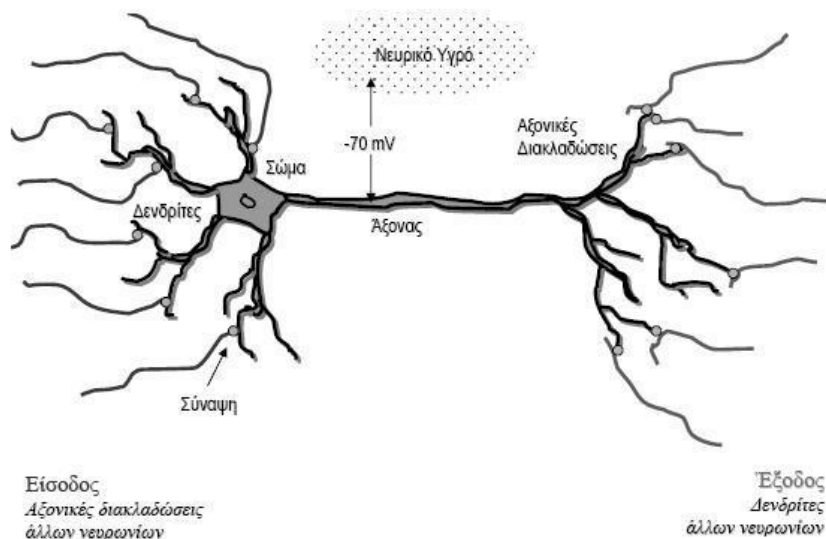
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα – ΤΝΔ (artificial neural networks – ANN) προτάθηκαν αρχικώς από τους McCulloch and Pitts (1943) οι οποίοι παρουσίασαν το έργο τους σχετικά με την ικανότητα των απλών νευρωνικών δικτύων να υπολογίζουν αριθμητικές και λογικές συναρτήσεις. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει κάποιος κοινά αποδεκτός ορισμός σχετικά με το τί είναι ΤΝΔ ή τί θα έπρεπε να είναι. Γενικά, όμως, μπορεί να οριστεί ως ένα μαθηματικό ή υπολογιστικό μοντέλο επεξεργασίας πληροφοριών που βασίζεται στις γνωστικές διαδικασίες και την οργανωτική δομή (ή αρχιτεκτονική) των νευρο-βιολογικών δικτύων (Shachmurove and Witkowska, 2000). Με λίγα λόγια, αποτελεί ένα υπερβολικά απλοποιημένο μοντέλο του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η δημιουργία του στηρίχτηκε στην ιδέα ότι ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των βιολογικών νευρώνων μπορούσαν ν' απομονωθούν και να χρησιμοποιηθούν για το σχηματισμό ενός μοντέλου που θα μπορεί να μιμείται κάποιες από τις ικανότητες του ανθρώπινου εγκεφάλου, όπως είναι η απόκριση στα διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα, η αναγνώριση μοτίβων, και η εκπαίδευσή του με σκοπό την προσαρμογή του σ' ένα συνεχώς εξελισσόμενο περιβάλλον. Με τα ΤΝΔ δεν επιχειρείται η μαθηματική προσομοίωση των εξεταζόμενων προβλημάτων/φαινομένων, αλλά η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων για συγκεκριμένα δεδομένα με βάση ανάλογες περιπτώσεις. Επομένως, τα δίκτυα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν η μαθηματική προσομοίωση ενός φυσικού

προβλήματος δεν είναι δυνατή ή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, και όταν τα δεδομένα που πρόκειται ν' αναλυθούν παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις.

Τα ΤΝΔ αποτελούνται από έναν αριθμό απλών διασυνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας, που ονομάζονται τεχνητοί νευρώνες ή κόμβοι (*artificial neurons or nodes*), οι οποίοι λειτουργούν με ένα μη-γραμμικό, κατανεμημένο, παράλληλο και τοπικό τρόπο για να εκτελέσουν μια κοινή καθολική εργασία, όπως μαζικούς παράλληλους υπολογισμούς για την επεξεργασία δεδομένων και την αναπαράσταση της γνώσης. Από την εξομοίωση των ΤΝΔ με τα βιολογικά δίκτυα του ανθρώπινου εγκεφάλου προκύπτει ότι οι τεχνητοί νευρώνες είναι ανάλογοι με τους βιολογικούς νευρώνες. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, στην ουσία, συνιστά μια συλλογή από περισσότερους από 10 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένους νευρώνες διαφόρων τύπων και μηκών. Κάθε τέτοιος νευρώνας είναι ένα κύτταρο που χρησιμοποιεί βιοχημικές αντιδράσεις προκειμένου να παραλαμβάνει, να επεξεργάζεται και να διαβιβάζει πληροφορίες. Οι βασικές λειτουργικές μονάδες των βιολογικών αυτών νευρώνων, που είναι σημαντικές στη μελέτη προσομοίωσης των ΤΝΔ, είναι οι εξής (Bakro and Kabari, 2011):

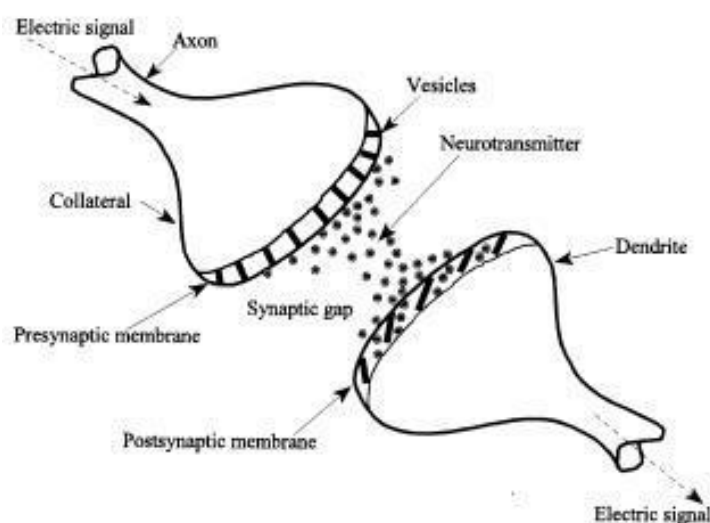
- *Σώμα (soma)*: το μεγάλο κεντρικό τμήμα (στρογγυλού σχήματος) του νευρώνα στο οποίο λαμβάνουν χώρα όλες οι λογικές λειτουργίες. Περιέχει τον κυτταρικό πυρήνα ο οποίος διαθέτει πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά κληρονομικότητας. Επίσης, περιέχει το γενετικό και μεταβολικό μηχανισμό που διατηρεί ζωντανό τον νευρώνα.
- *Άξονας (axon)*: η νευρική ίνα που είναι επισυναπτόμενη στο σώμα και έχει σαν ρόλο την μεταφορά των ερεθισμάτων. Το αρχικό τμήμα του άξονα ονομάζεται ύψωμα άξονα (*axon hillock*), ενώ στο τέλος διαχωρίζεται σε νήματα (*strands*) και υπονήματα (*substrands*).
- *Δενδρίτες (dendrites)*: οι μεγάλες ακανόνιστου σχήματος νευρικές ίνες που αντιπροσωπεύουν ένα υψηλά διακλαδωμένο δέντρο ινών. Είναι συνδεδεμένες με το σώμα και συνδέουν έναν νευρώνα με ένα σύνολο από άλλους νευρώνες. Υπάρχουν περίπου 10^3 με 10^4 δενδρίτες ανά νευρώνα με συνολική έκταση περίπου $0,25 \text{ mm}^2$. Λαμβάνουν σήματα από άλλους νευρώνες ενεργώντας ως οι είσοδοι στον νευρώνα.
- *Συνάψεις (synapses)*: το μικροσκοπικό διάκενο (*gap*) που βρίσκεται σε κάθε δενδρίτη. Πρόκειται για την έξοδο του νευρώνα και την σύνδεσή του με άλλους

νευρώνες. Μπορούν επίσης να βρεθούν στο σώμα του νευρώνα. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από πάνω από 10^{14} συνάψεις. Οι συνάψεις είναι σε θέση να αλλάζουν το τοπικό δυναμικό ενός νευρώνα σε μια θετική ή αρνητική κατεύθυνση μέσω της διεγερτικής ή ανασταλτικής φύσης τους.



Σχήμα 3.11: Σχηματική αναπαράσταση βιολογικού νευρώνα (Κοτοπούλη και λοιποί, 2009).

Η διαδρομή που ακολουθείται διαμέσου των παραπάνω λειτουργικών μονάδων με σκοπό την μεταφορά των πληροφοριών/σημάτων από τον ένα βιολογικό νευρώνα στον άλλον, είναι η ακόλουθη. Αρχικά, ένα νευρικό ερέθισμα, με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος (ή παλμού), ταξιδεύει στο εσωτερικό των δενδριτών και διαμέσου του σώματος του νευρώνα προς την προ-συναπτική μεμβράνη (pre-synaptic membrane) της σύναψης. Κατά την άφιξη στη μεμβράνη, απελευθερώνεται ένα σήμα εξόδου, σε ποσότητες ανάλογες με τη δύναμη του αρχικού σήματος. Έπειτα, το σήμα αυτό διαχέεται στη σύναψη (ή συναπτικό διάκενο) κι από εκεί προς την μετα-συναπτική μεμβράνη (post-synaptic membrane), φθάνοντας τελικώς στους δενδρίτες του γειτονικού νευρώνα(-ων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το εισερχόμενο σήμα να αυξήσει ή να μειώσει το ηλεκτρικό δυναμικό του σώματος του νευρώνα(-ων) υποδοχής (ανάλογα με το κατώφλι που τον χαρακτηρίζει), αναγκάζοντας τον έτσι να δημιουργήσει ένα νέο ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια, το νέο αυτό σήμα μεταφέρεται μέσω του νευρώνα(-ων) υποδοχής στον επόμενο(-ους) ακολουθώντας την ίδια διαδικασία (Basheer and Hajmeer, 2000).



Σχήμα 3.12: Μηχανισμός μετάδοσης σημάτων μεταξύ δύο βιολογικών νευρώνων (Basheer and Hajmeer, 2000).

Τη δομή και λειτουργικότητα του βιολογικού νευρώνα ενστερνίζεται σε μεγάλο βαθμό ο αντίστοιχος τεχνητός νευρώνας των ΤΝΔ. Πιο συγκεκριμένα, από δομικής απόψεως, οι άξονες και οι δενδρίτες αντιπροσωπεύονται από τις συνδέσεις μεταξύ των τεχνητών νευρώνων, οι συνάψεις από τους συντελεστές βαρύτητας των συνδέσεων, ενώ η δραστηριότητα στο σώμα (του οποίου η έννοια διατηρείται και στο τεχνητό νευρώνα) προσεγγίζεται από το κατώφλι (threshold) ή πόλωση (bias). Οι (συναπτικές) συνδέσεις χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των σημάτων (εισόδου και εξόδου) από τον ένα νευρώνα στον άλλον, ενώ οι συντελεστές βαρύτητας των συνδέσεων (με είτε θετική, είτε αρνητική τιμή) χρησιμεύουν στη διαμόρφωση της επίδρασης των σημάτων εισόδου. Έτσι, οι θετικοί συντελεστές βαρύτητας ενεργοποιούν τον νευρώνα, ενώ οι αρνητικοί τον αναστέλλουν. Σε αντιστοιχία με τη λειτουργικότητα του βιολογικού νευρώνα, τα σήματα εισέρχονται στο σώμα του τεχνητού νευρώνα ως σταθμισμένοι είσοδοι. Η στάθμιση αυτή απορρέει από το γεγονός ότι κάθε είσοδος μπορεί μεμονωμένα να πολλαπλασιάζεται με το συντελεστής βαρύτητας μιας σύνδεσης (Krenker et al., 2011). Το σώμα του νευρώνα αθροίζει, τότε, τις σταθμισμένες εισόδους σύμφωνα με την Εξίσωση:

$$net = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (40)$$

όπου w_i είναι η τιμή του συντελεστή βαρύτητας, και x_i η τιμή της εισόδου. Στη συνέχεια, το σώμα «επεξεργάζεται» το άθροισμα. Αν αυτό υπερβαίνει το κατώφλι τότε ο νευρώνας ενεργοποιείται και παράγει μια έξοδο την οποία, τελικώς, μεταδίδει (ως σήμα) στους παρακείμενους σ' αυτόν νευρώνες. Η τιμή της παραγόμενης εξόδου, y_i , προκύπτει μέσω μιας συνάρτησης f η οποία ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function):

$$y_i = f(net) \quad (41)$$

Η συγκεκριμένη συνάρτηση καθορίζει τις ιδιότητες του τεχνητού νευρώνα. Πρέπει να συνοδεύεται από συγκεκριμένες μαθηματικές ιδιότητες, όπως συνέχεια και ομαλότητα, ενώ η επιλογή της εξαρτάται από τη φύση των δεδομένων και την κατανομή των μεταβλητών εξόδου. Για ένα κλασικό πρόβλημα γραμμικής παλινδρόμησης, η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να έχει τη μορφή:

$$f(x) = x \quad (42)$$

Σε πιο σύνθετα, όμως, προβλήματα στα οποία απαιτείται η διάκριση των πολύπλοκων σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ των μεταβλητών, η συνάρτηση ενεργοποίησης πρέπει να παρουσιάζει μια μη-γραμμική (non-linear) συμπεριφορά. Τέτοιες μη-γραμμικές συναρτήσεις είναι οι εξής (Karlik and Olgac, 2010):

- Βηματική (step): $f(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } x < 0 \\ 1, & \text{αν } x \geq 0 \end{cases} \quad (43)$

- Μονοπολική σιγμοειδής (unipolar sigmoid): $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (44)$

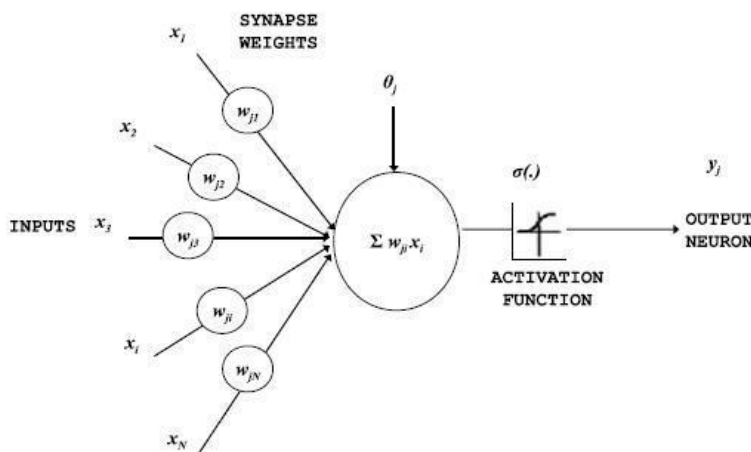
- Διπολική σιγμοειδής (bipolar sigmoid): $f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (45)$

- Υπερβολική εφαπτομένη (hyperbolic tangent): $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (46)$

- Gaussian: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (47)$

Από τις παραπάνω συναρτήσεις, εκείνη που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι η σιγμοειδής (δηλαδή σχήματος S) της οποίας η έξοδος, ανάλογα με τον τύπο συνάρτησης που έχει επιλεγεί, ανήκει είτε στο διάστημα $[0,1]$ (μονοπολική), είτε στο διάστημα $[-1,1]$ (διπολική) (Κοτοπούλη και λοιποί, 2009). Και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές εξόδου λαμβάνονται για το μείον και το συν άπειρο, αντίστοιχα. Παρόμοια με τη σιγμοειδή

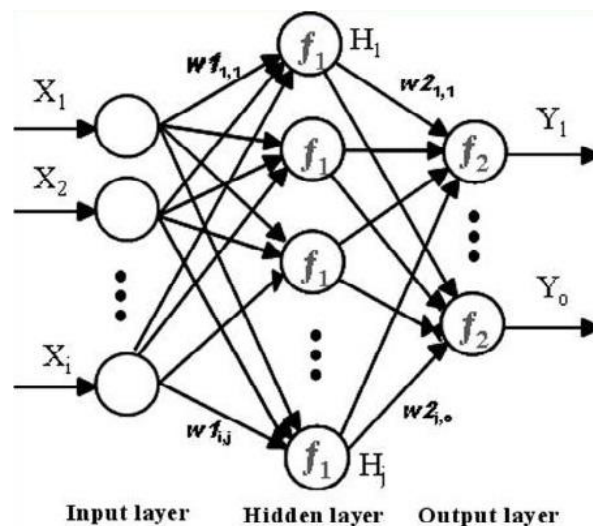
είναι η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης της οποίας, όμως, η έξοδος κυμαίνεται μόνο στο διάστημα $[-1,1]$.



Σχήμα 3.13: Σχηματική αναπαράσταση τεχνητού νευρώνα (Caliusco and Stegmayer, 2010).

Η αρχιτεκτονική (ή τοπολογία) ενός ΤΝΔ ορίζει τη δομή του και περιλαμβάνει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά: (α) τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ των νευρώνων, (β) τον αριθμό των νευρώνων, και (γ) τον αριθμό των επιπέδων. Η ικανότητα εκμάθησης και η απόδοση ενός ΤΝΔ εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την καταλληλότητα της αρχιτεκτονικής του. Στις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις, οι νευρώνες ενός ΤΝΔ είναι διατεταγμένοι σε τριών ειδών επίπεδα: ένα επίπεδο εισόδου (input layer), ένα ή περισσότερα κρυμμένα επίπεδα (hidden layers), και ένα επίπεδο εξόδου (output layer). Στο επίπεδο εισόδου γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων του εξεταζόμενου προβλήματος/φαινομένου και η διανομή τους σ' όλο το δίκτυο. Οι πιο κοινοί τύποι δεδομένων που μπορούν να επεξεργαστούν οι νευρώνες ενός ΤΝΔ, είναι ο δυαδικός (0 και 1), ο διπολικός (-1 και 1) και ο συνεχής (συνεχείς πραγματικοί αριθμοί σε ένα ορισμένο εύρος). Μετά το επίπεδο εισόδου είναι ένα ή περισσότερα κρυμμένα επίπεδα στα οποία τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί, υποβάλλονται σε επεξεργασία από προσανατολισμένους κανόνες. Η χρήση του όρου «κρυμμένα» οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι δεν είναι προσβάσιμα από τον εξωτερικό χώρο του ΤΝΔ (Karageridis, 2002). Ο προσδιορισμός του κατάλληλου αριθμού των κρυμμένων κόμβων σε κάθε ένα απ' αυτά τα επίπεδα είναι μία από τις πιο κρίσιμες εργασίες στο σχεδιασμό ενός ΤΝΔ. Σε αντίθεση με τα επίπεδα εισόδου και εξόδου, ο χρήστης ξεκινά χωρίς προηγούμενη γνώση ως προς το μέγεθος των κρυμμένων επιπέδων. Η επιλογή ενός μεγάλου αριθμού κρυμμένων κόμβων εξασφαλίζει μια «σωστή»

εκμάθηση, καθιστώντας το δίκτυο ικανό να «προβλέπει σωστά» τα δεδομένα στα οποία έχει εκπαιδευτεί. Ωστόσο, με την συγκεκριμένη επιλογή, η απόδοση του δικτύου σε νέα δεδομένα, δηλαδή η ικανότητά του να γενικεύει, διακυβεύεται (κίνδυνος υπερ-εκπαίδευσης). Αντιθέτως, μ' έναν πολύ μικρό αριθμό κρυμμένων κόμβων, το δίκτυο δεν είναι σε θέση να μαθαίνει τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων με αποτέλεσμα το σφάλμα ν' αποτυγχάνει να πέσει κάτω από ένα αποδεκτό όριο. Η πιο γνωστή προσέγγιση στην εξεύρεση του βέλτιστου αριθμού των κρυμμένων κόμβων είναι η διαδικασία «δοκιμής και σφάλματος (trial and error)». Σύμφωνα μ' αυτή, ο χρήστης αρχικά ξεκινά με ένα χαμηλό αριθμό κρυμμένων κόμβων τον οποίο στη συνέχεια αυξάνει προκειμένου να αντιμετωπίσει τα διάφορα προβλήματα εκμάθησης που συναντά. Στο τελευταίο τμήμα της αρχιτεκτονικής του ΤΝΔ είναι το επίπεδο εξόδου στο οποίο παράγονται τα δεδομένα εξόδου (ή αποτελέσματα) που έχουν προκύψει από την επεξεργασία στα κρυμμένα επίπεδα. Μέσω του συγκεκριμένου επιπέδου, επίσης, επιστρέφονται τα παραγόμενα δεδομένα εξόδου στο εξωτερικό περιβάλλον του ΤΝΔ. Ο αριθμός των νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου προβλήματος. Οι νευρώνες των διαφόρων επιπέδων είναι πυκνά διασυνδεδεμένοι με απευθείας συνδέσεις, έτσι ώστε ο κάθε νευρώνας του ενός επιπέδου να συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου (πλήρης σύνδεση).



Σχήμα 3.14: Αρχιτεκτονική ενός τυπικού ΤΝΔ (Bianconi et al., 2010).

Η επίτευξη της κατάλληλης αρχιτεκτονικής για ένα ΤΝΔ δεν σημαίνει ότι αυτό μπορεί ν' αρχίσει να χρησιμοποιείται άμεσα για την εξέταση ενός προβλήματος, καθώς προηγουμένως

απαιτείται η εκπαίδευσή του. Γενικά, ως εκπαίδευση (training) ή εκμάθηση (learning) ενός ΤΝΔ ορίζεται η διαδικασία με την οποία οι ελεύθερες παράμετροι του (συντελεστές βαρύτητας) προσαρμόζονται μέσω μιας συνεχιζόμενης διαδικασίας διέγερσης από το περιβάλλον στο οποίο το δίκτυο είναι ενσωματωμένο (Bakro and Kabari, 2011). Οι μέθοδοι εκπαίδευσης/εκμάθησης των ΤΝΔ είναι οι εξής:

- *Εκμάθηση με εποπτεία (supervised learning)*: ορίζει τις παραμέτρους ενός ΤΝΔ μέσω της χρήσης δεδομένων εκπαίδευσης. Τα δεδομένα εκπαίδευσης αποτελούνται από ζεύγη τιμών εισόδου και επιδιωκόμενων τιμών εξόδου που παραδοσιακά αναπαριστώνται από διανύσματα. Καθήκον της συγκεκριμένης μεθόδου εκμάθησης είναι να ορίζει την τιμή των παραμέτρων του δικτύου για κάθε έγκυρη τιμή εισόδου δεδομένου ότι γνωρίζει την αντίστοιχη επιδιωκόμενη τιμή εξόδου. Ο όρος «με εποπτεία» βασίζεται στο γεγονός ότι οι επιδιωκόμενες τιμές εξόδου που παρέχονται στους επιμέρους κόμβους του επιπέδου εξόδου, προέρχονται από έναν «εξωτερικό δάσκαλο» (Abraham, 2005).
- *Εκμάθηση χωρίς εποπτεία (unsupervised learning)*: το σύνολο εκπαίδευσης που εισάγεται στο ΤΝΔ, αποτελείται μόνο από δεδομένα (διανύσματα) εισόδου, ενώ οι εξόδοι καθορίζονται από το ίδιο το δίκτυο.
- *Ενισχυτική εκμάθηση (reinforcement learning)*: μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ενδιάμεση μορφή των παραπάνω δύο μεθόδων εκμάθησης. Σ' αυτήν την περίπτωση, οι επιθυμητές τιμές εξόδου δεν δίνονται στο δίκτυο, αλλά παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον.

Τρία είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ΤΝΔ που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία εκμάθησής του: (α) η αρχιτεκτονική του, (β) η συνάρτηση ενεργοποίησης με την οποία υπολογίζεται η έξοδος του κάθε νευρώνα για ένα δεδομένο άθροισμα εισόδων, και (γ) ο αλγόριθμος εκμάθησης, η μέθοδος δηλαδή που ακολουθείται για την τροποποίηση/προσαρμογή των (συναπτικών) συντελεστών βαρύτητας. Μεταξύ των διαφόρων αλγορίθμων εκμάθησης με εποπτεία, ο αλγόριθμος οπισθόδρομης διάδοσης (back-propagation algorithm) είναι αυτός που κυρίως χρησιμοποιείται. Η εκμάθηση μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου αποτελείται από δύο «περάσματα/σαρώσεις»: ένα «προς τα εμπρός» (ορθό) και ένα «προς τα πίσω» (οπισθόδρομο). Το «προς τα εμπρός πέρασμα» περιλαμβάνει βασικά την εισαγωγή στους κόμβους εισόδου του ΤΝΔ ενός συνόλου εκπαιδευτικών διανυσμάτων που

ανήκουν στον τομέα του παρεχόμενου προβλήματος/φαινομένου. Καθένα απ' αυτά τα διανύσματα – γνωστά και ως μοτίβα (training patterns) – αποτελείται από μερικές εισόδους (inputs) και τις συναφείς επιδιωκόμενες εξόδους (outputs). Οι εισοδοί προέρχονται από ένα σύνολο τιμών $x = (x_1, ..., x_n) \in R^n$, ενώ οι εξοδοί από ένα αντίστοιχο σύνολο τιμών $t = (t_1, ..., t_m) \in R^m$ (Caliusco and Stegmayer, 2010). Έπειτα, οι τιμές εισόδου σταθμίζονται (δηλαδή τους αποδίδονται οι συντελεστές βαρύτητας των συνδέσεων) και συσσωρεύονται σε κάθε κόμβο του (πρώτου) κρυμμένου επιπέδου. Σ' αυτό το σημείο αξίζει να ειπωθεί ότι μια κοινή πρακτική για την ανάθεση των αρχικών τιμών στους συντελεστές βαρύτητας (και στα κατώφλια) των συνδέσεων του δικτύου είναι η επιλογή τους μ' έναν τυχαίο τρόπο. Στη συνέχεια, το προκύπτον σύνολο μετατρέπεται, μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης, στην τιμή ενεργοποίησης του κόμβου. Αυτή με τη σειρά της γίνεται είσοδος στους κόμβους του επόμενου επιπέδου, μέχρι που τελικά παράγονται οι τιμές εξόδου του ΤΝΔ με τη μορφή διανυσμάτων. Το διάνυσμα αυτό, y_i , για κάθε κόμβο εξόδου προκύπτει από την Εξίσωση (Καραμπερίδου και λοιποί, 2008):

$$y_i = f_2(\sum_j w_{ij} f_1(\sum_k w_{jk} x_k)) \quad (48)$$

όπου x_k είναι ένα διάνυσμα εισόδου, w_{ij} είναι ο συντελεστής βαρύτητας ανάμεσα στον κρυμμένο κόμβο και τον κόμβο εξόδου, w_{jk} είναι ο συντελεστής βαρύτητας ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και τον κρυμμένο κόμβο, και f_1, f_2 είναι οι συναρτήσεις ενεργοποίησης για το κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου, αντιστοίχως. Το «προς τα πίσω πέρασμα», με τη σειρά του, περιλαμβάνει τον υπολογισμό του σφάλματος (δηλαδή της διαφοράς μεταξύ του υπολογιζόμενου και επιδιωκόμενου διανύσματος εξόδου) για όλους τους κόμβους του επιπέδου εξόδου και τη διάδοση αυτού του σφάλματος στα προηγούμενα επίπεδα επεξεργασίας με σκοπό την ενημέρωση/προσαρμογή των συντελεστών βαρύτητας του δικτύου. Αυτή η ενημέρωση αναμένεται να προκαλέσει την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Το σφάλμα υπολογίζεται ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean square error – MSE) και ορίζεται από τη συνάρτηση:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2 \quad (49)$$

όπου y_i είναι η εκτιμώμενη έξοδος για κάθε κόμβο εξόδου, d_i είναι η επιδιωκόμενη έξοδος για κάθε κόμβο εξόδου, και n είναι ο αριθμός των δεδομένων. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της συγκεκριμένης συνάρτησης, τόσο καλύτερη είναι η ικανότητα πρόβλεψης του δικτύου.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος, εφαρμόζεται ο κανόνας μείωσης της βαθμίδας (gradient descent rule) για την ενημέρωση των συντελεστών βαρύτητας του δικτύου. Έτσι, κάθε συντελεστής βαρύτητας, αρχίζοντας από το επίπεδο εξόδου και καταλήγοντας, μέσω του(-ων) κρυμμένου(-ων) επιπέδου(-ων), στο επίπεδο εισόδου, ενημερώνεται σύμφωνα με τη σχέση (Schneider and Wredde, 1998):

$$\Delta w_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_i} \quad (50)$$

όπου η είναι μια σταθερά που ονομάζεται ρυθμός εκμάθησης (learning rate). Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισόδου τροφοδοτούνται «προς τα εμπρός» πάλι, παράγοντας νέα έξοδο και νέο σφάλμα για όλους τους κόμβους του επιπέδου εξόδου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πολλές φορές, μέχρις ότου το ΤΝΔ να φθάσει μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλιού σφάλματος η οποία απενεργοποιεί τον μηχανισμό προσαρμογής των συντελεστών βαρύτητάς του (κριτήριο διακοπής) (Harudeniya, 2010). Ο προσδιορισμός της βασίζεται στο γεγονός ότι, για τα περισσότερα προβλήματα του πραγματικού κόσμου, τα ΤΝΔ δεν παρουσιάζουν ποτέ μηδενικό σφάλμα. Στην περίπτωση, ωστόσο, που η επίτευξη της συγκεκριμένης τιμής δε καθίσταται δυνατή, ως κριτήριο διακοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, πέρα από τον οποίο το σφάλμα παύει πλέον να παρουσιάζει σημαντική μείωση.

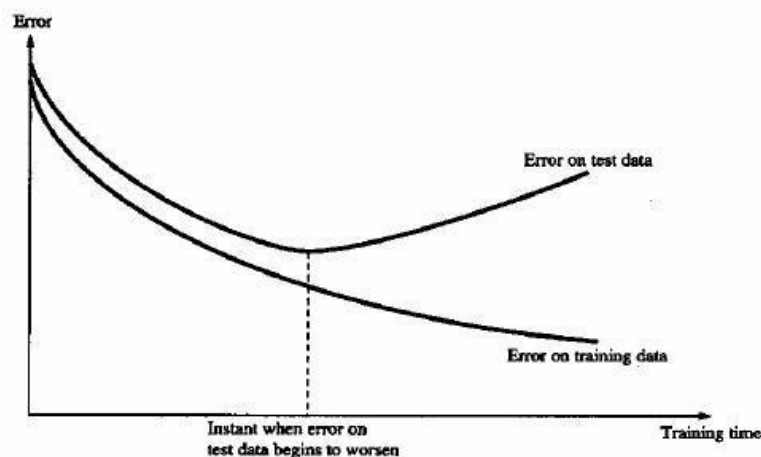
Η επιλογή χρήσης σ' ένα ΤΝΔ του αλγόριθμου οπισθόδρομης διάδοσης επιφέρει την ανάγκη διευθέτησης δύο σημαντικών παραμέτρων: του ρυθμού εκμάθησης και της ορμής. Ο ρυθμός εκμάθησης (learning rate) προσδιορίζει την ταχύτητα σύγκλισης του δικτύου. Ένας υψηλός ρυθμός εκμάθησης θα επιταχύνει την εκπαίδευση (λόγω του μεγάλου βήματος) αλλάζοντας σημαντικά τους συντελεστές βαρύτητας, από την μία επανάληψη (epoch) στην άλλη. Σε γενικές γραμμές, είναι επιθυμητή μια ταχεία εκπαίδευση, αλλά όχι τόσο γρήγορή ώστε να προκαλέσει αστάθεια των επαναλήψεων της. Ξεκινώντας με έναν μεγάλο ρυθμό εκμάθησης και μειώνοντας τον όσο η διαδικασία εκπαίδευσης εξελίσσεται, μια γρήγορη εκπαίδευση με σταθερές επαναλήψεις επιτυγχάνεται. Η βασική, ωστόσο, βελτίωση στον αλγόριθμο οπισθόδρομης διάδοσης είναι η εισαγωγή ενός όρου ορμής (momentum) στη σχέση ενημέρωσης των συντελεστών βαρύτητας του δικτύου:

$$\Delta w_i(n) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_i} + \alpha \Delta w_i(n-1) \quad (51)$$

όπου α είναι η ορμή, και n είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. Όπως γίνεται αντιληπτό από τη σχέση, η ορμή προσδιορίζει την επίδραση των παρελθοντικών βαρυτικών αλλαγών στις

τρέχουσες βαρυτικές αλλαγές. Η προσθήκη της βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης και βοηθάει το δίκτυο έτσι ώστε να μην παγιδευτεί σε τοπικά ελάχιστα.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της ανάπτυξης ενός ΤΝΔ είναι η πρόληψη και αντιμετώπιση του προβλήματος της υπερ-εκπαίδευσης (over-training). Δηλαδή, του κινδύνου το δίκτυο, μετά το πέρας της εκπαίδευσης, να έχει απλώς «απομνημονεύσει» τα δεδομένα εκπαίδευσης και να μην έχει μάθει να γενικεύει σε νέα δεδομένα. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων αποφυγής του συγκεκριμένου κινδύνου, η πρόωρη διακοπή (early stopping) είναι η πιο διαδεδομένη. Αυτή περιλαμβάνει τη χρήση ενός επιπλέον συνόλου δεδομένων – γνωστό ως σύνολο ελέγχου (checking or test dataset) – και την παρακολούθηση της απόδοσης του δικτύου σ' αυτό το σύνολο. Οι ελεύθεροι παράμετροι του δικτύου θα πρέπει να προσαρμοστούν μόνο για λογαριασμό του συνόλου εκπαίδευσης, αλλά το σφάλμα θα πρέπει να παρακολουθείται και για το σύνολο ελέγχου. Τα σφάλματα στα σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου κανονικά θα μειώνονται κατά τη διάρκεια των αρχικών επαναλήψεων της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ωστόσο, όταν το δίκτυο αρχίσει να υπερ-εκπαιδεύεται, το σφάλμα στο σύνολο ελέγχου θα αρχίσει να αυξάνεται (Σχήμα 3.15). Η εκπαίδευση τότε σταματά και οι ελεύθεροι παράγοντες που παράγουν το ελάχιστο σφάλμα στο σύνολο ελέγχου, επιστρέφονται. Συνεπώς, η έναρξη μιας αύξησης στο σφάλμα του συνόλου ελέγχου θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το βέλτιστο αριθμό επαναλήψεων για την εκπαίδευση του δικτύου.



Σχήμα 3.15: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον χρόνο εκπαίδευσης (Lekkas et al., 2004).

Τα τελευταία χρόνια, ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών τύπων ΤΝΔ έχει προταθεί. Το perceptron, το πολυεπίπεδο perceptron (multi-layer perceptron), τα δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης (radial basis function network), τα δίκτυα Hopfield, τα δίκτυα προσαρμοστικής θεωρίας αντήχησης (adaptive resonance theory networks), και τα δίκτυα Kohonen ή χάρτες αυτο-οργάνωσης (Kohonen networks or self-organizing maps) αποτελούν μόνο μερικούς απ' αυτούς. Η διαφοροποίησή τους βασίζεται κυρίως στα εξής κριτήρια:

- Το είδος του προβλήματος που το δίκτυο έχει σχεδιαστεί να εξετάσει, π.χ. ταξινόμηση ή κατηγοριοποίηση μοτίβων, ομαδοποίηση, κ.ά.
- Το βαθμό διασύνδεσης (μερική ή πλήρη) των νευρώνων του δικτύου.
- Την κατεύθυνση ροής των πληροφοριών στο εσωτερικό του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των ΤΝΔ σε εμπροσθοτροφοδοτούμενα και επανατροφοδοτούμενα. Στα εμπροσθοτροφοδοτούμενα δίκτυα (feed-forward networks), οι πληροφορίες κινούνται πάντα προς μία κατεύθυνση, ξεκινώντας από τους νευρώνες εισόδου και καταλήγοντας στους νευρώνες εξόδου. Αντίθετα, στα επανατροφοδοτούμενα δίκτυα (recurrent networks), οι πληροφορίες δεν μεταδίδονται πλέον προς μία μόνο κατεύθυνση αλλά και προς την αντίθετη. Αυτή η αμφίδρομη ροή καθίσταται δυνατή μέσω της ύπαρξης συνδέσεων ανατροφοδότησης μεταξύ των νευρώνων διαφορετικών επιπέδων.
- Τον τύπο του αλγόριθμου εκμάθησης.
- Το βαθμό εποπτείας στη διαδικασία εκμάθησης.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ένα πολυεπίπεδο perceptron επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Ως εμπροσθοτροφοδοτούμενο δίκτυο που είναι, ο υπολογισμός των τελικών τιμών εξόδου σ' αυτόν τον τύπο ΤΝΔ διεξάγεται με έναν από-επίπεδο-σε-επίπεδο τρόπο. Κατά συνέπεια, ο νευρώνας κάθε επιπέδου υπολογίζει ένα γραμμικό συνδυασμό των εξόδων του αμέσως προηγούμενου επιπέδου.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου των κατολισθήσεων, η ικανότητα των ΤΝΔ να ασχολούνται με πολύπλοκες, άγνωστες και μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ των δεδομένων καθιστά τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση ως ένα από τα πλέον κατάλληλα εργαλεία για την ανάλυση του φαινομένου. Για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων μέσω της χρήσης ενός μοντέλου ΤΝΔ, τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται στο δίκτυο αναπαριστώνται από τους παράγοντες (σε μια επανακλιμακοποιημένη/κανονικοποιημένη μορφή) που επιδρούν

στην εκδήλωση του φαινομένου, ενώ τα επιδιωκόμενα δεδομένα εξόδου από την απουσία ή παρουσία (τιμές 0 και 1) του φαινομένου στο επιλεγμένο εκπαιδευτικό δείγμα ψηφίδων. Με βάση τους παραγόμενους από την εκπαιδευτική διαδικασία συντελεστές βαρύτητας των συνδέσμων του δικτύου, υπολογίζεται ο βαθμός σημαντικότητας (τελικός συντελεστής βαρύτητας) για κάθε παράγοντα. Έτσι, είναι δυνατή η εκτίμηση της συνολικής τιμής επιδεκτικότητας κατολισθήσεων με βάση την Εξίσωση (13). Σ' αυτήν την περίπτωση, όμως, ο όρος $f w_i$ αντιπροσωπεύει τον τελικό συντελεστή βαρύτητας του παράγοντα i , ενώ ο w_{ij} την επανακλιμακοποιημένη/κανονικοποιημένη τιμή για την κατηγορία j του παράγοντα i .

Μια πληθώρα ερευνητών έχουν αναπτύξει μοντέλα ΤΝΔ για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Αναλυτικότερα, οι Das et al. (2013), μέσω της χρήσης ενός μοντέλου ΤΝΔ, προσδιόρισαν την επίδραση της σεισμικής δραστηριότητας στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Το μοντέλο αυτό εκτελέστηκε για την κοιλάδα Kelkit, στη βορειοανατολική Τουρκία, και βασίστηκε σε οκτώ παράγοντες που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου. Οι Conforti et al. (2014), Gorsevski et al. (2016), και Moayedi et al. (2018), επίσης, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του εμπροσθοτροφοδοτούμενου πολυεπίπεδου perceptron και χρησιμοποιώντας έξι, έξι, και δώδεκα, αντιστοίχως, αιτιολογικούς παράγοντες, κατασκεύασαν χάρτες επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για περιοχές της Ιταλίας (υδρολογική λεκάνη του ποταμού Turbolo, με έκταση περίπου 30 χλμ²), των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (εθνικό πάρκο της κοιλάδας Cuyahoga, με έκταση περίπου 133 χλμ²), και του Ιράν (κοιλάδα Layleh, με έκταση περίπου 528 χλμ²) αντιστοίχως. Επιπλέον, οι Romer and Ferentinou (2016), Tien Bui et al. (2016), και Zhou et al. (2018), σύγκριναν μοντέλα ΤΝΔ με άλλα ποσοτικά διμεταβλητά (FR), πολυμεταβλητά (LR), και βασισμένα στην εξόρυξη δεδομένων (SVM, δέντρα απόφασης) μοντέλα. Για την εκπόνηση αυτών των συγκριτικών μελετών, οι προαναφερθέντες ερευνητές έλεγξαν την απόδοση των μοντέλων τους μέσω της επικύρωσης χαρτών επιδεκτικότητας για περιοχές της Νότιας Αφρικής (υδρολογική λεκάνη Mgeni Tertiary, με έκταση 678 χλμ²), του Βιετνάμ (περιοχή στο βόρειο τμήμα της επαρχίας Son La, με έκταση περίπου 2.253 χλμ²), και της Κίνας (περιοχή Longju, με έκταση περίπου 440 χλμ²), αντιστοίχως.

Προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού

Το προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού (adaptive neuro-fuzzy inference system – ANFIS) μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα υβριδικό μοντέλο, καθώς

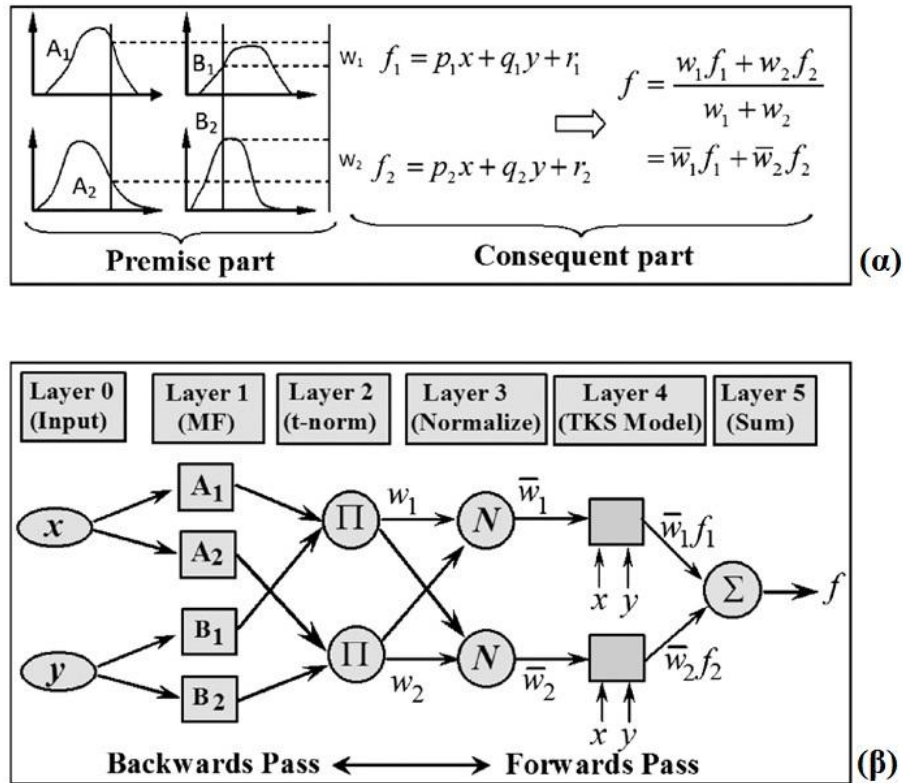
αντιπροσωπεύει την ενοποίηση των μεθόδων των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και της ασαφούς λογικής. Στην πραγματικότητα, αποτελεί ένα ΤΝΔ το οποίο είναι λειτουργικά ισοδύναμο μ' ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού (fuzzy inference system – FIS). Ασαφής συμπερασμός είναι η διαδικασία της αντιστοίχισης ενός συνόλου εισόδων με μια έξοδο, χρησιμοποιώντας ασαφή λογική (Oh and Pradhan, 2011). Ένα FIS, ουσιαστικά, αναπτύσσει ασαφείς κανόνες «εάν...τότε... (if...then...)» και καθορίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιούνται σ' αυτούς για την αντιστοίχιση των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Οι ασαφείς κανόνες συνιστούν έναν τρόπο περιγραφής ενός φαινομένου σε γλωσσικούς όρους. Το αριστερό μέρος ενός κανόνα (εάν...) ονομάζεται προηγούμενο (antecedent or premise), ενώ το δεξί μέρος του (τότε...) επακόλουθο (consequent). Τα μέρη αυτά μπορούν να αποτελούνται από οποιονδήποτε συνδυασμό ασαφών προτάσεων μέσω της χρήσης ειδικών τελεστών όπως το «ασαφές ΚΑΙ (fuzzy AND)», το «ασαφές Ή (fuzzy OR)», κ.ά. Συνεπώς, ένας ασαφής κανόνας μπορεί να έχει τη μορφή:

«εάν (X είναι LX) ΚΑΙ (Y είναι LY) ΚΑΙ ... ΚΑΙ (Z είναι LZ), τότε (U είναι LU)»

όπου X , Y , Z είναι οι γλωσσικές μεταβλητές, LX , LY , LZ είναι τα ασαφή σύνολα για αυτές τις μεταβλητές, U είναι η ασαφής έξοδος, και LU είναι το ασαφές σύνολο της εξόδου (Sdao et al., 2013).

Δύο είναι οι πιο γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι FIS: (α) το Mamdani μοντέλο, και (β) το Takagi and Sugeno μοντέλο. Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στον τρόπο προσδιορισμού των παραμέτρων του consequent τμήματος. Στο μοντέλο Mamdani, οι ασαφείς κανόνες δημιουργούνται, αρχικώς, μ' έναν αυτόματο τρόπο. Στη συνέχεια, επεξεργάζονται από έναν «εμπειρογνώμονα» ο οποίος «αντανακλά» τις απόψεις του σχετικά με το εξεταζόμενο φαινόμενο/πρόβλημα στην περιοχή μελέτης. Ακολούθως, οι κανόνες, με γλωσσικές μεταβλητές στο antecedent τμήμα τους, αξιολογούνται σύμφωνα με τις υποκειμενικώς επιλεγμένες τιμές ασαφούς συμμετοχής, και η έξοδος του ασαφούς συνόλου στο consequent τμήμα τους δίνεται ως ο εκτιμώμενος βαθμός συμμετοχής (Osna et al., 2014). Στο προτεινόμενο από τους Takagi and Sugeno (1983) μοντέλο, οι ασαφείς κανόνες περιλαμβάνουν γλωσσικές μεταβλητές εισόδου στο antecedent τμήμα, και μαθηματική συνάρτηση στο consequent τμήμα (Σχήμα 3.16α). Εάν η μαθηματική συνάρτηση είναι σταθερή, τότε το μοντέλο ονομάζεται μηδενικής τάξεως (zero order), ενώ εάν η συνάρτηση είναι πολυωνυμική πρώτης τάξεως, τότε αντιστοίχως το μοντέλο ονομάζεται πρώτης τάξεως

(first order) (Sezer et al., 2011). Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, ένα πρώτης τάξεως Takagi and Sugeno μοντέλο εφαρμόστηκε.



Σχήμα 3.16: Πρώτης τάξεως Takagi and Sugeno μοντέλο. (α) Τα τμήματα, και (β) η αρχιτεκτονική ενός τυπικού μοντέλου (Tien Bui et al., 2012).

Το ANFIS, λοιπόν, χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική και τους τυπικούς αλγόριθμους εκμάθησης των ΤΝΔ, έχει την ικανότητα ν' «αποκτάει γνώση» από ένα αρκετά μεγάλο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, και να παράγει μ' έναν αυτόματο τρόπο ασαφείς κανόνες και ασαφή σύνολα σ' ένα προκαθορισμένο επίπεδο ακρίβειας. Από αρχιτεκτονικής απόψεως, συνιστά ένα πολυεπίπεδο εμπροσθοτροφοδοτούμενο ΤΝΔ οργανωμένο σε πέντε διαφορετικά επίπεδα (Σχήμα 3.16β). Καθένα απ' αυτά τα επίπεδα αποτελείται από είτε προσαρμοστικούς, είτε σταθερούς κόμβους, και από τις αντίστοιχες συναρτήσεις τους. Πιο αναλυτικά, οι κόμβοι του πρώτου επιπέδου είναι προσαρμοστικοί και ευθύνονται για την ασαφοποίηση των εισόδων. Δέχονται, δηλαδή, διακριτές τιμές ως εισόδους και τις μετατρέπουν σε συμμετοχές:

$$O_i^1 = \mu A_i(x), \quad i = 1, 2 \quad (52)$$

$$O_i^1 = \mu B_i(y), \quad i = 1, 2 \quad (53)$$

όπου x και y οι διακριτές είσοδοι, A_i και B_i είναι τα ασαφή σύνολα, και $\mu A_i(x)$ και $\mu B_i(y)$ είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής. Οι κόμβοι του δεύτερου επιπέδου, με τη σειρά τους, είναι σταθεροί και ενσωματώνουν τις παραμέτρους του antecedent τμήματος των ασαφών κανόνων χρησιμοποιώντας έναν από τους προαναφερθέντες ασαφείς τελεστές. Η έξοδος κάθε τέτοιου κόμβου αντιπροσωπεύει τη δύναμη πυροδότησης (firing strength), w_i , ενός κανόνα (Jang, 1993):

$$O_i^2 = w_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y), \quad i = 1, 2 \quad (54)$$

Το τρίτο επίπεδο αποτελείται από σταθερούς κόμβους και είναι υπεύθυνο για την κανονικοποίηση των τιμών που προέρχονται από το δεύτερο επίπεδο. Έτσι, κάθε έξοδος αυτού του επιπέδου ονομάζεται κανονικοποιημένη δύναμη πυροδότησης, $\bar{w}_i$:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2), \quad i = 1, 2 \quad (55)$$

Οι προσαρμοστικοί κόμβοι του τέταρτου επιπέδου ενσωματώνουν τις παραμέτρους του consequent τμήματος των ασαφών κανόνων και ευθύνονται για την απο-ασαφοποίηση:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (56)$$

όπου p_i , q_i και r_i οι παράμετροι του consequent τμήματος. Τέλος, το πέμπτο επίπεδο περιλαμβάνει έναν μεμονωμένο σταθερό κόμβο ο οποίος διενεργεί την άθροιση όλων των απο-ασαφοποιημένων εξόδων του τέταρτου επιπέδου και παράγει την τελική έξοδο του συστήματος:

$$O_i^5 = \sum \bar{w}_i f_i = \sum w_i f_i / \sum w_i, \quad i = 1, 2 \quad (57)$$

Ο αλγόριθμος εκμάθησης που κυρίως χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του ANFIS είναι ο υβριδικός (hybrid learning algorithm). Το όνομα του οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελεί ένα συνδυασμό της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (least squares method) και της μεθόδου μείωσης της βαθμίδας (gradient descent method). Στα πλαίσια της εκπαίδευσης του μοντέλου, κάθε επανάληψη (epoch) περιλαμβάνει ένα «προς τα εμπρός» και ένα «προς τα πίσω πέρασμα». Πιο συγκεκριμένα, στο «προς τα εμπρός πέρασμα» πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων του consequent τμήματος (στο τέταρτο επίπεδο) μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, καθώς επίσης κι ο υπολογισμός του σφάλματος ως η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error – RMSE):

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2}{n}} \quad (58)$$

όπου y_i είναι η εκτιμώμενη έξοδος για κάθε κόμβο εξόδου, d_i είναι η επιδιωκόμενη έξοδος για κάθε κόμβο εξόδου, και n είναι ο αριθμός των δεδομένων. Μόλις εντοπιστούν οι βέλτιστοι παράμετροι του consequent τμήματος, ξεκινά το «προς τα πίσω πέρασμα». Στο συγκεκριμένο «πέρασμα», οι παράμετροι του consequent τμήματος διατηρούνται σταθεροί και το εκτιμώμενο σφάλμα διαδίδεται προς τα πίσω με στόχο την ενημέρωση των παραμέτρων του antecedent τμήματος (Tien Bui et al., 2012). Για την ενημέρωση αυτή, η μέθοδος μείωσης της βαθμίδας εκτελείται (Εξίσωση 50). Όπως στα ΤΝΔ, έτσι και στο ANFIS, μόλις το μοντέλο φθάσει μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλιού σφάλματος (ή στην αντίθετη περίπτωση, έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων), οι επαναλήψεις τερματίζονται και η εκπαίδευση ολοκληρώνεται.

Και στην περίπτωση χρήσης ενός ANFIS, ο υπολογισμός του βαθμού σημαντικότητας (τελικού συντελεστή βαρύτητας) κάθε παράγοντα στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων βασίζεται στην ανάλυση των τιμών που προκύπτουν από την ολοκλήρωση της εκπαίδευσής του. Έτσι, είναι δυνατή η εκτίμηση της συνολικής τιμής επιδεκτικότητας κατολισθήσεων με βάση την Εξίσωση (13).

Οι μελέτες των Oh and Pradhan (2011), Tien Bui et al. (2012), και Sdao et al. (2013), αντιστοίχως, συνιστούν μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης του ANFIS για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων σε περιοχές της Μαλαισίας (με έκταση 8.064 χλμ²), του Βιετνάμ (με έκταση περίπου 4.660 χλμ²), και της Ιταλίας, αντιστοίχως.

Υβριδική μέθοδος

Η συγκεκριμένη υβριδική μέθοδος συνιστά τον συνδυασμό/ενοποίηση δύο τελείως διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων. Αυτές είναι η βασισμένη στην εμπειρία των «εμπειρογνώμωνων» (ποιοτική ή ημι-ποσοτική) μέθοδος της τραπεζοειδούς ασαφούς αριθμητικής στάθμισης (TFNW) και η καθοδηγούμενη από τα δεδομένα (ποσοτική) μέθοδος του δείκτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων (LSI) (Chalkias et al., 2016). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης ενοποίησης, η μέθοδος TFNW επανεκτελέστηκε λαμβάνοντας υπόψη της αυτή τη φορά τη «γνώμη» ενός επιπλέον αντικειμενικού «στατιστικού εμπειρογνώμονα» ο οποίος προστέθηκε στην υφιστάμενη ομάδα των υποκειμενικών «εμπειρογνώμωνων». Η «γνώμη» του συγκεκριμένου «στατιστικού εμπειρογνώμονα» βασίστηκε στα εκτιμώμενα, από τη μέθοδο LSI, αποτελέσματα και εκφράστηκε μέσω της

εισαγωγής «αντικειμενικών» γλωσσικών μεταβλητών σε κάθε έναν παράγοντα και παραγοντική κατηγορία. Κύριο στόχος για την ανάπτυξη αυτού του υβριδικού μοντέλου αποτελούσε η επιδίωξη για μια ακριβέστερη εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων μέσα από την ουσιαστική μείωση της υποκειμενικότητας (ή αντιστοίχως αύξηση της αντικειμενικότητας) και αβεβαιότητας που απέρρεαν από την αυτόνομη εφαρμογή των μεμονωμένων μεθόδων.

Η ιδέα της εφαρμογής υβριδικών μοντέλων για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρόσφατη εξέλιξη. Την τελευταία δεκαετία, παρατηρείται η χρήση όλο και περισσότερων τέτοιων μοντέλων γι' αυτό το σκοπό. Πρόσφατα παραδείγματα αποτελούν οι ερευνητικές προσπάθειες των Yang et al. (2015), Youssef et al. (2015c), Abuzied and Alrefaee (2018), και Mallick et al. (2018). Πιο συγκεκριμένα, οι Yang et al. (2015) υπολόγισαν συντελεστές βαρύτητας για κάθε παράγοντα και παραγοντική κατηγορία ξεχωριστά, μέσω της «συνδυαστικής» χρήσης μιας ημι-ποσοτικής (AHP) και μιας ποσοτικής διμεταβλητής (LSI) μεθόδου. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η λόγω του σεισμού Lushan (της 20ης Απριλίου 2013, με μέγεθος 7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ) επείγουσα ανάγκη εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για μια περιοχή της επαρχίας Sichuan, στην Κίνα. Οι Youssef et al. (2015c) σύγκριναν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή δύο μεμονωμένων στατιστικών μεθόδων (FR και LR), τόσο μεταξύ τους, όσο και με το προερχόμενο από την ενοποίησή τους αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα αυτά είχαν τη μορφή χαρτών επιδεκτικότητας κατολισθήσεων και αφορούσαν την περιοχή Fayfa (έκτασης περίπου 261 χλμ²), στο νοτιοδυτικό τμήμα της Σαουδικής Αραβίας. Οι Abuzied and Alrefaee (2018) ενοποίησαν δύο στατιστικές διμεταβλητές μεθόδους (LSI και IoE), προκειμένου να εκτιμήσουν την επιδεκτικότητα κατολισθήσεων για την ορεινή περιοχή El-Qaá (έκτασης 6.070 χλμ²), στην Αίγυπτο. Οι Mallick et al. (2018), προκειμένου να μπορέσουν να κατασκευάσουν ένα χάρτη επιδεκτικότητας κατολισθήσεων για την ορεινή υδρολογική λεκάνη Abha (έκτασης 370 χλμ²), στη Σαουδική Αραβία, συνδύασαν την ασαφή λογική με τη μέθοδο της AHP.

Πίνακας 3.5: Λίστα βιβλιογραφικών αναφορών εφαρμογής των επιλεγμένων μεθόδων/μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας κατολισθήσεων.

Μέθοδος	Συγγραφείς	Χρονολογία
AHP	Rozos et al.	2010

	Rozos et al.	2011
	Kayastha et al.	2013b
	Chen et al.	2015a
	Youssef	2015
	Meng et al.	2016
	Sakkas et al.	2016
	Mandal and Mandal	2018
	Demir	2018
TFNW	Wang et al.	2009
	Chalkias et al.	2014a
FR	Oh and Lee	2011a
	Sabatakakis et al.	2013
	Sujatha et al.	2013
	Guo et al.	2015
	Kavzoglu et al.	2015
	Kayastha	2015
	Youssef	2015
	Youssef et al.	2015a
	Youssef et al.	2015c
	Romer and Ferentinou	2016
	Aditian et al.	2018
	Karim et al.	2018
LSI	De Guidi and Scudero	2013
	Papathanassiou et al.	2013
	Pareek et al.	2013
	Sarkar et al.	2013
	Chalkias et al.	2014b
	Kavzoglu et al.	2015
	Polykretis et al.	2015
	Zhao et al.	2015
	Romer and Ferentinou	2016
	Chen et al.	2018c

Πίνακας 3.5: (Συνέχεια).

Μέθοδος	Συγγραφείς	Χρονολογία
WoE	Kouli et al.	2014

	Sujatha et al.	2014
	Guri et al.	2015
	Guo et al.	2015
	Kavzoglu et al.	2015
	Piacentini et al.	2015
	Zhang et al.	2015
	Ilia and Tsangaratos	2016
	Barella et al.	2018
	Mahdadi et al.	2018
	Karim et al.	2018
LR	Erener and Düzgün	2010
	Chalkias et al.	2014c
	Feuillet et al.	2014
	Chen et al.	2015b
	Kavzoglu et al.	2015
	Shou and Yang	2015
	Wang et al.	2015
	Youssef	2015
	Youssef et al.	2015c
	Dagdelenler et al.	2016
	Meng et al.	2016
	Romer and Ferentinou	2016
	Aditian et al.	2018
	Barella et al.	2018
	Basu and Pal	2018
	Karim et al.	2018
	Mahdadi et al.	2018
	Mondal and Mandal	2018
GWR	Erener and Düzgün	2010
	Chalkias et al.	2014c
	Feuillet et al.	2014

Πίνακας 3.5: (Συνέχεια).

Μέθοδος	Συγγραφείς	Χρονολογία
---------	------------	------------

ANN	Das et al.	2013
	Conforti et al.	2014
	Tsangaratos and Benardos	2014
	Polykretis et al.	2015
	Gorsevski et al.	2016
	Romer and Ferentinou	2016
	Tien Bui et al.	2016
	Aditian et al.	2018
	Moayedi et al.	2018
	Zhou et al.	2018
ANFIS	Oh and Pradhan	2011
	Tien Bui et al.	2012
	Sdao et al.	2013
Hybrid	Yang et al.	2015
	Youssef et al.	2015c
	Abuzied and Alrefaee	2018
	Mallick et al.	2018

3.2.3 Αξιολόγηση μεθόδων/μοντέλων ανάλυσης

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, για την αξιολόγηση των επιλεγμένων μεθόδων/μοντέλων (ή επικύρωση των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας) χρησιμοποιήθηκαν οι εξής εξειδικευμένες μέθοδοι:

Ανάλυση ROC

Η ανάλυση ROC (receiver operating characteristics) μετράει τη δύναμη διάκρισης (ή την πόλωση) μιας μεθόδου ταξινόμησης και αποτελεί έναν από τους πιο κοινούς τρόπους επικύρωσης. Χρησιμοποιείται για την ανάδειξη της ικανότητας πρόβλεψης τόσο των μεμονωμένων μοντέλων (Conforti et al., 2014; Dagdelenler et al., 2016; Basu and Pal, 2018; Hong et al., 2018; Mallick et al., 2018; Mondal and Mandal, 2018; Pradhan and Kim, 2018), όσο και των συγκριτικώς εξεταζόμενων μοντέλων (Kavzoglu et al., 2015; Youssef et al., 2015a; Romer and Ferentinou, 2016; Aditian et al., 2018; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Chen et al., 2018c; Karim et al., 2018; Zhou et al., 2018). Η ανάλυση ROC, μέσω μιας καμπύλης, καταδεικνύει την ικανότητα του μοντέλου να διακρίνει σωστά μεταξύ θετικών και

αρνητικών παρατηρήσεων σ' ένα σύνολο επικύρωσης (validation dataset) (Montrasio et al., 2011). Καθοριστικό ρόλο σ' αυτό διαδραματίζουν οι όροι της ευαισθησίας (sensitivity) και της ειδικότητας (specificity). Η ευαισθησία εκφράζεται ως ο λόγος του αριθμού των θετικών προβλέψεων προς το σύνολο των θετικών παρατηρήσεων (Althuwaynee et al., 2014):

$$\text{Sensitivity} = n(TP) / [n(TP) + n(FN)] \quad (59)$$

όπου $n(TP)$ είναι ο αριθμός των αληθών θετικών προβλέψεων, και $n(FN)$ είναι ο αριθμός των ψευδών αρνητικών προβλέψεων. Από την άλλη πλευρά, η ειδικότητα εκφράζεται ως ο λόγος του αριθμού των αρνητικών προβλέψεων προς το σύνολο των αρνητικών παρατηρήσεων:

$$\text{Specificity} = n(TN) / [n(TN) + n(FP)] \quad (60)$$

όπου $n(TN)$ είναι ο αριθμός των αληθών αρνητικών προβλέψεων, και $n(FP)$ είναι ο αριθμός των ψευδών θετικών προβλέψεων. Μια αληθής θετική (true positive) είναι η πρόβλεψη κατολίσθησης σε μια θέση όπου έχει εκδηλωθεί παλιότερα κατολίσθηση, ενώ μια ψευδής θετική (false positive) είναι η πρόβλεψη κατολίσθησης σε μια θέση όπου δεν έχει εκδηλωθεί παλιότερα κατολίσθηση (Akgun, 2012).

Στο διάγραμμα της ανάλυσης ROC, το ποσοστό των αληθών θετικών προβλέψεων (ευαισθησία) τοποθετείται στον άξονα των Y και το ποσοστό των ψευδών θετικών προβλέψεων ($1 - \text{ειδικότητα}$) στον άξονα των X (Fawcett, 2006). Ως εκ τούτου, μια υψηλή ευαισθησία υποδεικνύει ένα μεγάλο ποσοστό αληθών θετικών (σωστών) προβλέψεων, ενώ μια υψηλή ειδικότητα υποδεικνύει ένα μικρό ποσοστό ψευδών θετικών (λανθασμένων) προβλέψεων.

Η τιμή της «περιοχής κάτω από την καμπύλη (area under curve – AUC)» περιγράφει την ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει σωστά την εκδήλωση ή μη-εκδήλωση των προκαθορισμένων γεγονότων (Devkota et al., 2013). Στην πράξη, η τιμή AUC κυμαίνεται από 0,5 (τυχαία προσαρμογή) έως 1 (τέλεια προσαρμογή). Πιο αναλυτικά, μια τιμή στο εύρος 0,5-0,6 παραπέμπει σε μια κακή ικανότητα πρόβλεψης, στο εύρος 0,6-0,7 σε μια φτωχή ικανότητα πρόβλεψης, στο εύρος 0,7-0,8 σε μια καλή ικανότητα πρόβλεψης, στο εύρος 0,8-0,9 σε μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης, και στο εύρος 0,9-1 σε μια εξαιρετική ικανότητα πρόβλεψης.

Αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης

Ο συγκεκριμένος τρόπος επικύρωσης περιλαμβάνει την υλοποίηση των ακόλουθων βημάτων:

- (1) Την κατάταξη των τιμών επιδεκτικότητας σε φθίνουσα σειρά (από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες τιμές).
- (2) Το διαχωρισμό των διατεταγμένων πλέον τιμών επιδεκτικότητας σ' έναν αριθμό κατηγοριών ίσου αθροιστικού διαστήματος (συνήθως 100 κατηγορίες με αθροιστικό διάστημα 1%).
- (3) Τον υπολογισμό του αθροιστικού ποσοστού των κατολισθητικών δεδομένων για κάθε μία από τις προκύπτουσες κατηγορίες.
- (4) Τον σχηματισμό της αντίστοιχης καμπύλης σ' ένα διάγραμμα αθροιστικών συχνοτήτων (cumulative frequency diagram) το οποίο παρουσιάζει την σχέση μεταξύ της κατάταξης των τιμών επιδεκτικότητας (άξονας των X) και του αθροιστικού ποσοστού της εκδήλωσης κατολισθήσεων (άξονας των Y).
- (5) Τον υπολογισμό της τιμής της «περιοχής κάτω από την καμπύλη (AUC)».

Όταν στην προαναφερθείσα διαδικασία χρησιμοποιείται το σύνολο κατολισθητικών δεδομένων στο οποίο βασίστηκε η εφαρμογή του μοντέλου (σύνολο εκπαίδευσης), τότε προκύπτει το ποσοστό επιτυχίας (success rate). Αντιθέτως, όταν γίνεται χρήση ενός ανεξάρτητου συνόλου κατολισθητικών δεδομένων (σύνολο επικύρωσης), τότε προκύπτει το ποσοστό πρόβλεψης (prediction rate). Δεδομένου ότι το ποσοστό επιτυχίας, ουσιαστικά, μετράει την «καλή προσαρμογή (goodness of fit)» του μοντέλου στο σύνολο εκπαίδευσης του, δε θεωρείται ως ο καταλληλότερος τρόπος για την εκτίμηση της ικανότητας πρόβλεψης του. Αυτό όμως δεν ισχύει με το ποσοστό πρόβλεψης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «μετρητής» του πόσο καλά το μοντέλο μπορεί να προβλέψει την κατανομή μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (Chung and Fabbri, 1999).

Όπως η ανάλυση ROC, έτσι και τα ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης εφαρμόζονται για την επικύρωση των αποτελεσμάτων τόσο μεμονωμένων μοντέλων (Chen et al., 2015b; Guri et al., 2015; Kayastha, 2015; Ilia and Tsangaratos, 2016; Tsangaratos and Ilia, 2016; Tekin and Çan, 2018; Tsangaratos et al., 2018; Wu and Song, 2018), όσο και συγκριτικώς εξεταζόμενων μοντέλων (Choi et al., 2012; Zhao et al., 2015; Meng et al., 2016; Barella et al., 2018; Demir, 2018; Mahdadi et al., 2018).

Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης

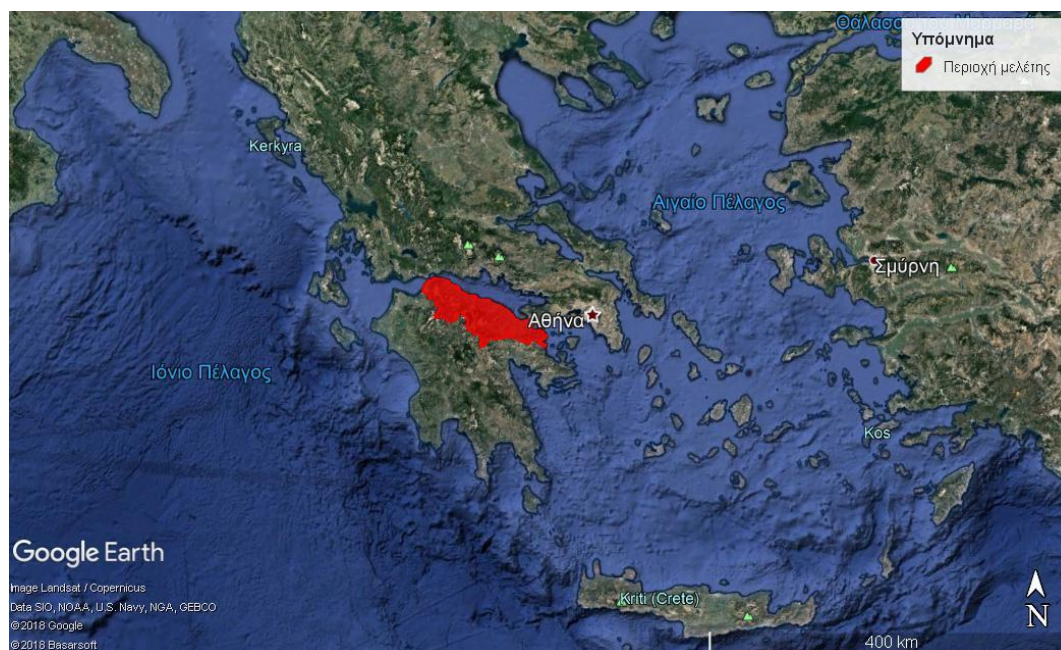
Κύριο αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνιστά η αξιολόγηση των επιλεγμένων μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης μέσω της συγκριτικής εξέτασης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν τόσο απ' αυτή καθ' εαυτή την εφαρμογή τους, όσο και από την επίδραση που θα είχε στην εφαρμογή και κυρίως στην απόδοση των «καθοδηγούμενων από τα δεδομένα» ποσοτικών μοντέλων μια ενδεχόμενη μεταβολή της κλίμακας ανάλυσης. Εξαιρώντας, συνεπώς, τα ποιοτικά (ή ημι-ποσοτικά) μοντέλα τα οποία για πρακτικούς λόγους εφαρμόστηκαν αποκλειστικά σε μια μόνο κλίμακα ανάλυσης (περιοχή μελέτης), τα υπόλοιπα ποσοτικά μοντέλα εφαρμόστηκαν σε δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, και κατ' επέκταση σε δύο διαφορετικού μεγέθους περιοχές του Ελληνικού χώρου. Αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης που επιλέχθηκε, των συνόλων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, και γενικά της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για κάθε μια απ' αυτές τις δύο κλίμακες ανάλυσης παρατίθενται παρακάτω:

4.1 Περιφερειακή κλίμακα (1:250.000)

4.1.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή που επιλέχθηκε να μελετηθεί για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης σε περιφερειακή κλίμακα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα σύστημα λεκανών απορροής. Ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα βόρειας Πελοποννήσου το οποίο αποτελεί ένα από τα δεκατέσσερα υδατικά διαμερίσματα του Ελληνικού χώρου (σύμφωνα με το Νόμο 1739/1987, ΦΕΚ 201/Α/20-11-1987, [http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/201\(20-11-87\)_1739.pdf](http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/201(20-11-87)_1739.pdf), 23/05/2018). Γεωγραφικώς εντοπίζεται στο βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα του γεωγραφικού διαμερίσματος της Πελοποννήσου (Σχήμα 4.1), ενώ τα όρια της συνιστούν ο Κορινθιακός κόλπος στα βόρεια, ο Σαρωνικός κόλπος στα ανατολικά, ο ορειογραφικός άξονας Ερύμανθος-Χελμός-Ολίγυρτος-Λύρκειο-Ονείων-Τραπεζώνα στα νότια και οι ορεινοί όγκοι των Δήμων Πατρέων και Ερυμάνθου στα δυτικά. Η περιοχή εκτείνεται στις περιφερειακές ενότητες Αχαΐας, Κορινθίας και Αργολίδας, καταλαμβάνοντας συνολικά μια έκταση 3.685

τετραγωνικών χιλιομέτρων. Περιλαμβάνει 42 λεκάνες απορροής από τις οποίες οι τρεις (Αλέας, Φενεού, Στυμφαλίας) είναι κλειστές και οι υπόλοιπες είναι παράκτιες. Τις λεκάνες αυτές διατρέχουν σημαντικοί ποταμοί όπως ο Σελινούντας, ο Βουραϊκός, ο Κράθις, ο Κριός και ο Γλαύκος (Πίνακας 4.1).



Σχήμα 4.1: Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης.

Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής χαρακτηρίζεται γενικά ορεινό (με υψόμετρο που φτάνει τα 2.370 μέτρα, και σημαντικούς ορεινούς όγκους όπως το Παναχαϊκό όρος και το όρος Κυλλήνη) και απότομο στο εσωτερικό της (με γωνία κλίσης που φτάνει τις 81 μοίρες), ημι-ορεινό στην εξωτερική της περίμετρο, και πεδινό στην παράκτια ζώνη της στην οποία η ύπαρξη των τεκτονικώς διαμορφωμένων θαλάσσιων αναβαθμίδων έχει αποτελέσει την κύρια αιτία για το σχηματισμό ενδιάμεσων ήπιων πεδινών εκτάσεων σε διαφορετικά υψόμετρα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή κυμαίνεται από 697 έως 1.178 χιλιοστά. Οι περισσότερες βροχοπτώσεις εκδηλώνονται κατά τους μήνες Νοέμβριο έως και Ιανουάριο, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο. Η ένταση αυτών των βροχοπτώσεων είναι μικρότερη στα ανατολικά, και μεγαλύτερη στα δυτικά και στα τμήματα με μεγάλο υψόμετρο λόγω της σαφούς συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου.

Πίνακας 4.1: Κυριότεροι ποταμοί στην περιοχή μελέτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων/Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012).

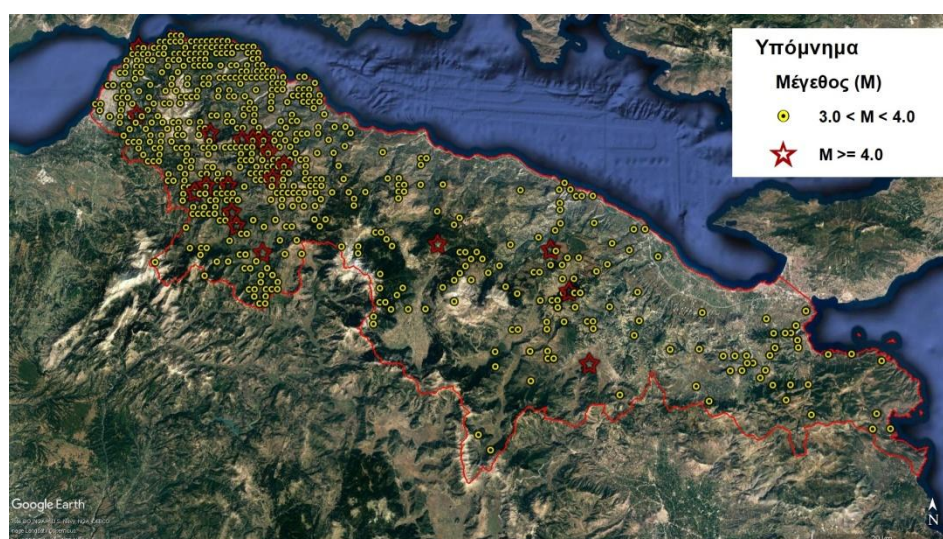
Όνομα	Μήκος κύριας κοίτης (χλμ.)	Έκταση λεκάνης απορροής (χλμ ²)
Σελινούντας Π.	47,82	386,60
Ασωπός Π.	38,24	281,28
Βουραϊκός Π.	37,51	254,35
Τρικαλίτικος Π.	31,98	177,77
Ραιζάνη Ρ.	23,58	165,70
Ποταμιά Ρ.	9,59	162,91
Κράθις Π.	32,58	153,97
Κριός Π.	20,32	113,88
Γλαύκος Π.	26,31	109,38
Φοίνικας Π.	22,83	95,85
Μεγανείτας Ρ.	16,01	81,75
Κυρίλλου Ρ.	4,32	74,59
Δερβένιο Ρ.	8,12	68,17
Φόνισσα Ρ.	13,00	53,08
Σκουπαίικο Ρ.	10,83	46,39
Χάραδρος Ρ.	7,61	36,74
Θολοπόταμο Ρ.	6,69	14,08

Ως προς τη γεωλογική δομή της, η περιοχή αποτελείται τόσο από αλπικούς σχηματισμούς των γεωτεκτονικών ζωνών Τρίπολης, Πίνδου και Πελαγονικής, όσο και από σύγχρονες τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις οι οποίες έχουν πληρώσει τα τεκτονικά βυθίσματα της παράκτιας ζώνης της (βόρειο τμήμα). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται σ' αυτές τις ενότητες, είναι οι εξής:

- *Ζώνη Τρίπολης:* περιλαμβάνει κυρίως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους και μικρές εμφανίσεις του φλύσχη. Σχιστόλιθοι, ψαμμίτες, φυλλίτες, χαλαζίτες και εκρηξιγενή κάνουν, επίσης, την εμφάνιση τους στη βάση της συγκεκριμένης ζώνης.
- *Ζώνη Πίνδου:* συναντάται στο δυτικό τμήμα της περιοχής, και περιλαμβάνει εντόνως πολυπτυχωμένα και διαρρηγμένα στρώματα ασβεστόλιθων, κερατολίθων, όπως επίσης και στρώματα του φλύσχη.

- *Πελαγονική ζώνη*: εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, με κύριο γεωλογικό σχηματισμό της τους παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους.
- *Μεταλικοί σχηματισμοί του νεογενούς και τεταρτογενούς*: αποτελούμενοι από εναλλαγές αδρομερών υλικών (κροκάλες, κροκαλοπαγή) με πλέον λεπτομερή υλικά (αργίλους, μάργες), συναντώνται σε μεγάλες εκτάσεις του δυτικού και κυρίως βόρειου (παράκτιου) τμήματος της περιοχής. Η ενότητα αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της εμφάνισης συνεκτικών κροκαλοπαγών με ανθρακικό συνδετικό υλικό, καθώς και παραλιακών σύγχρονων αλλουβιακών αποθέσεων οι οποίες στις περισσότερες των περιπτώσεων έχουν ως υπόβαθρο νεογενείς και πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.

Με την πάροδο των χρόνων, η επίδραση στην περιοχή από την επαναλαμβανόμενη εκδήλωση τεκτονικών/σεισμικών γεγονότων (Σχήμα 4.2) είχε ως αποτέλεσμα τόσο την πτύχωση και διάρρηξη των παραπάνω γεωλογικών σχηματισμών, όσο και τις ευρύτερες μετακινήσεις ζωνών με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα την επώθηση της ζώνης Πίνδου επί της ζώνης Τρίπολης. Γενικά, η έντονη τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών σε συνδυασμό με τις εναλλαγές διαπερατών και αδιαπερατών ζωνών έχουν συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση των επιμέρους υδρογεωλογικών συστημάτων και λεκανών απορροής της περιοχής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων/Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012).



Σχήμα 4.2: Κατανομή καταγεγραμμένων σεισμικών γεγονότων στην περιοχή μελέτης (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, <http://www.gein.noa.gr/el/seismikotita/xartes>, 22/06/2018).

Όσο αναφορά τα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό έκτασης των δημοτικών ενοτήτων που βρίσκονται εντός των ορίων της (Πίνακας 4.2), καθίσταται δυνατή μια προσεγγιστική εκτίμηση του συνολικού πληθυσμού της. Με βάση την απογραφή του 2011 από την Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ (<http://www.statistics.gr/el/statistics/pop>, 23/05/2018), αυτός υπολογίζεται στους 372.068 κατοίκους. Όπως είναι λογικό, η πλειοψηφία των κατοίκων είναι συγκεντρωμένη στον αστικό ιστό της ο οποίος, εντοπισμένος γεωγραφικά κυρίως στο βόρειο τμήμα της (παράκτια ζώνη), περιλαμβάνει δύο από τις σημαντικότερες πόλεις όχι μόνο της Πελοποννήσου, αλλά και ολόκληρης της χώρας, όπως είναι η Πάτρα και η Κόρινθος. Ειδικότερα, η Πάτρα, με το λιμάνι της που αποτελεί βασικό κόμβο συνδυσασμένων μεταφορών στη νοτιοανατολική Ευρώπη, έχει διαχρονικά διαδραματίσει πρωτεύοντα οικονομικό ρόλο τόσο σε τοπικό, όσο και σε εθνικό επίπεδο. Σε αντίθεση με τις αστικές επιφάνειες, οι καλλιεργήσιμες και οι μη-παραγωγικές (π.χ. βοσκότοποι) εκτάσεις καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής. Ο υψηλός βαθμός φυτοκάλυψης, και η παρουσία δασικών και υδατικών (όπως η λίμνη Στυμφαλία) οικοσυστημάτων μεγάλης οικολογικής αξίας καθιστούν την ποικιλόμορφη χλωρίδα της (διάφορα είδη αυτοφυών δέντρων και θάμνων) ιδιαίτερος σημαντική. Βασικές οικονομικές δραστηριότητες της περιοχής αποτελούν η καλλιέργεια της γης (κυρίως αμπελώνες και δενδρώδεις καλλιέργειες), καθώς και οι βιομηχανίες παραγωγής τροφίμων (ελαιόλαδο, γαλακτοκομικά προϊόντα, κ.ά.) και χημικών προϊόντων (χρώματα, πλαστικά, κ.ά.).

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ολόκληρο το γεωγραφικό διαμέρισμα της Πελοποννήσου έχει πληγεί από την εκδήλωση πολλών και αρκετά σοβαρών φυσικών κινδύνων στο εσωτερικό του (π.χ. σεισμοί, πλημμύρες, κατολισθήσεις, κ.ά.) οι οποίοι έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη ζωής των κατοίκων του. Αυτό το γεγονός, όπως επίσης και οι ιδιαίτερες μορφολογικές και γεωτεκτονικές του συνθήκες που επιτρέπουν στο φαινόμενο των κατολισθήσεων να παρουσιάζει υψηλή χωρική μεταβλητότητα, αποτελούν τους κυριότερους λόγους για τους οποίους η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ν' ανήκει στο συγκεκριμένο γεωγραφικό διαμέρισμα.

Πίνακας 4.2: Διοικητικός διαχωρισμός της περιοχής μελέτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων/Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012).

Περιφερειακή ενότητα	Δήμος	Δημοτική ενότητα	Ποσοστό (%) έκτασης δημοτικής ενότητας
Αργολίδας	Άργους - Μυκηνών	Αλέας	95,29
Αργολίδας	Άργους - Μυκηνών	Κουτσοποδίου	2,35
Αργολίδας	Άργους - Μυκηνών	Λυρκείας	8,71
Αργολίδας	Άργους - Μυκηνών	Μυκηναίων	4,81
Αργολίδας	Επιδάουρου	Επιδάουρου	10,23
Αργολίδας	Ναυπλίων	Μιδέας	0,06
Αρκαδίας	Τρίπολης	Λεβιδίου	0,35
Αρκαδίας	Τρίπολης	Μαντινείας	0,10
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Αιγείρας	100,00
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Αιγίου	100,00
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Ακράτας	99,94
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Διακοπτού	100,00
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Ερινέου	100,00
Αχαΐας	Αιγιαλείας	Συμπολιτείας	100,00
Αχαΐας	Ερυμάνθου	Λεοντίου	100,00
Αχαΐας	Ερυμάνθου	Φάρρων	5,71
Αχαΐας	Καλαβρύτων	Αροανίας	0,63
Αχαΐας	Καλαβρύτων	Καλαβρύτων	93,06
Αχαΐας	Καλαβρύτων	Κλειτορίας	1,25
Αχαΐας	Πατρέων	Μεσσήτιδος	61,04
Αχαΐας	Πατρέων	Παραλίας	3,28
Αχαΐας	Πατρέων	Πατρέων	99,98
Αχαΐας	Πατρέων	Ρίου	100,00
Κορινθίας	Βέλου - Βόχας	Βέλου	100,00
Κορινθίας	Βέλου - Βόχας	Βόχας	100,00
Κορινθίας	Κορινθίων	Άσσου - Λεχαίου	100,00
Κορινθίας	Κορινθίων	Κορινθίων	100,00
Κορινθίας	Κορινθίων	Σαρωνικού	99,71
Κορινθίας	Κορινθίων	Σολυγείας	79,00
Κορινθίας	Κορινθίων	Τενέας	77,26
Κορινθίας	Λουτρακίου - Αγίων Θεοδώρων	Λουτρακίου Περαχώρας	5,56

Πίνακας 4.2: (Συνέχεια).

Περιφερειακή ενότητα	Δήμος	Δημοτική ενότητα	Ποσοστό (%) έκτασης δημοτικής ενότητας
Κορινθίας	Νεμέας	Νεμέας	93,56
Κορινθίας	Ξυλοκάστρου - Ευρωστίνης	Ευρωστίνης	100,00
Κορινθίας	Ξυλοκάστρου - Ευρωστίνης	Ξυλοκάστρου	100,00
Κορινθίας	Σικυνίων	Σικυνίων	100,00
Κορινθίας	Σικυνίων	Στυμφαλίας	100,00
Κορινθίας	Σικυνίων	Φενεού	99,30

4.1.2 Σύνολα δεδομένων

Προκειμένου να υλοποιηθεί η εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για την επιλεγμένη περιοχή μελέτης, μια χωρική βάση δεδομένων σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον ΣΓΠ μέσω της χρήσης του λογισμικού ArcGIS (version 10.2.2). Αυτή η βάση δεδομένων αποτελούταν από δύο κύρια μέρη: (α) το σύνολο δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων, και (β) τα σύνολα δεδομένων των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου. Αναλυτικότερα:

4.1.2.1 Δεδομένα καταγραφής κατολισθήσεων

Ένα σύνολο δεδομένων που αναπαριστά τα κατολισθητικά γεγονότα που έχουν εκδηλωθεί κατά το παρελθόν σε μια περιοχή, αποτελεί το πιο κρίσιμο είδος πληροφορίας για οποιαδήποτε προσπάθεια εκτίμησης της επιδεκτικότητας της στο φαινόμενο, και ειδικότερα όταν αυτή η προσπάθεια αφορά την εφαρμογή ποσοτικών μοντέλων ανάλυσης. Στην παρούσα διατριβή, ένα σύνολο δεδομένων καταγραφής των παρελθοντικών κατολισθήσεων της περιοχής μελέτης κατασκευάστηκε ως αποτέλεσμα του σταδίου της αναγνώρισης κατολισθήσεων. Όπως ειπώθηκε σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 3.2.1), για την υλοποίηση του συγκεκριμένου σταδίου χρησιμοποιήθηκαν οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ευκρίνειας και τα εξειδικευμένα εργαλεία που παρέχονται από το λογισμικό του Google Earth. Αξιοποιώντας,

συνεπώς, τις δυνατότητες του εν λόγω λογισμικού επετεύχθη η αναγνώριση και οριοθέτηση (ψηφιοποίηση) των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων που εντοπίζονταν εντός των ορίων της υπό μελέτη περιοχής. Στον εντοπισμό αυτών των γεγονότων, καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισαν δύο διαφορετικές «υποστηρικτικής χρήσεως» βάσεις δεδομένων:

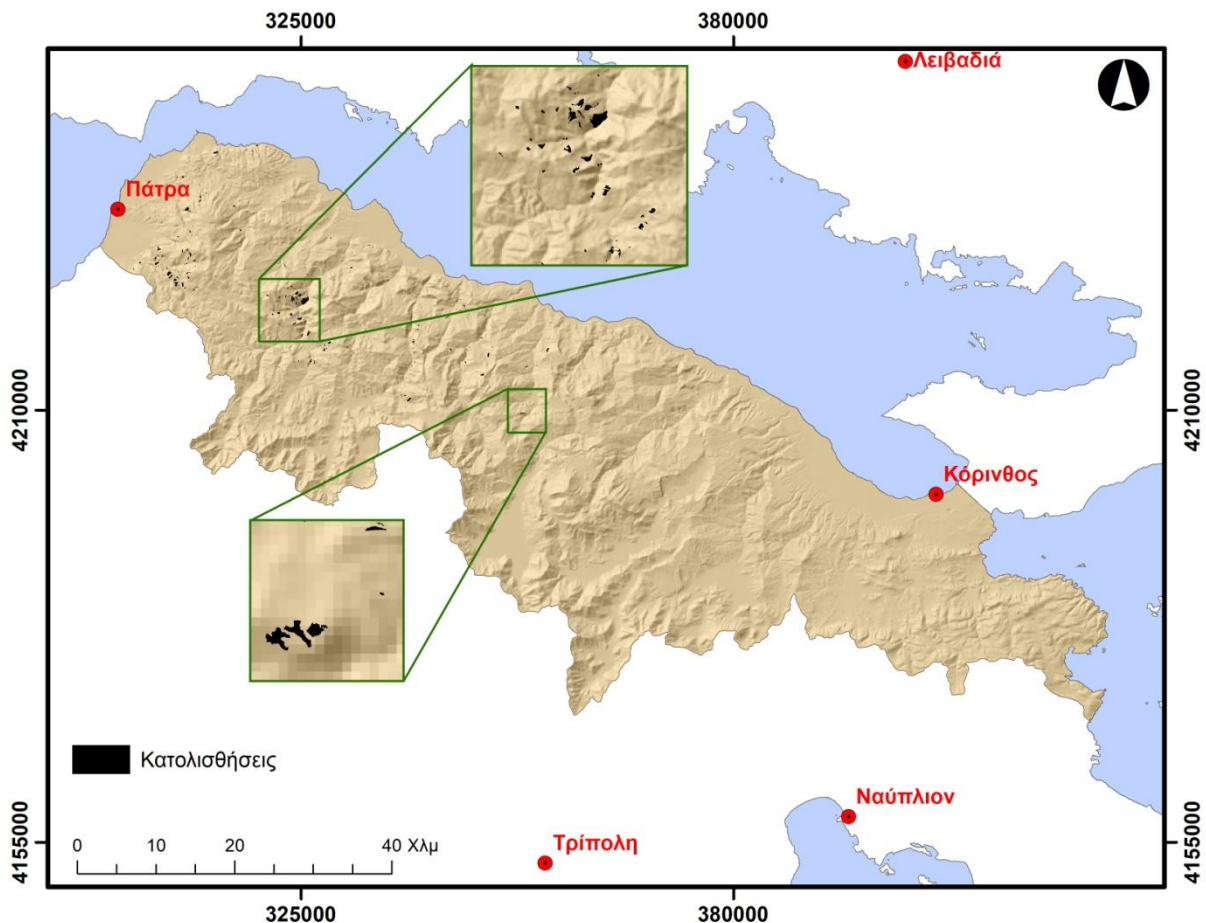
- (1) Μια βάση δεδομένων κατολισθήσεων του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών η οποία αφορά το βόρειο και δυτικό τμήμα της Πελοποννήσου (συγκεκριμένα τους νομούς Αχαΐας και Ηλείας) και καλύπτει χρονικά την περίοδο 1920-2015 (<http://www.geoarch.gr/>, 21/04/2016).
- (2) Μια βάση δεδομένων με τις κατολισθήσεις της χρονικής περιόδου 1906-2003 για τη βόρεια Πελοπόννησο (Τσαγκάς, 2011).

Και οι δύο παραπάνω «υποστηρικτικές» βάσεις δεδομένων περιείχαν πληροφορίες τόσο για τις θέσεις των καταγεγραμμένων κατολισθήσεων (δημοτικό διαμέρισμα, και κυρίως συντεταγμένες με βάση το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς – ΕΓΣΑ '87), όσο και για τα χαρακτηριστικά τους, όπως την ημερομηνία εκδήλωσης, τον τύπο μετακίνησης, το ύψος και την κλίση του πρανούς, τα πιθανά αίτια, κ.ά.



Σχήμα 4.3: Αναγνώριση και οριοθέτηση παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων (καφέ πολύγωνα) της περιοχής μελέτης στο λογισμικό Google Earth. Κίτρινες πινέζες η βάση δεδομένων από Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, και μπλε πινέζες η βάση δεδομένων από Τσαγκάς (2011).

Από την ολοκλήρωση του σταδίου αναγνώρισης κατολισθήσεων προέκυψε το επιθυμητό σύνολο δεδομένων. Το σύνολο αυτό περιλάμβανε 411 κατολισθητικά γεγονότα τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων στο Σχήμα 4.4. Δεδομένου ότι στα πλαίσια της αναγνώρισης κατολισθήσεων που έχουν εκδηλωθεί σε φυσικά πρηνή, δεν καθίσταται συνηθώς δυνατός ο διαχωρισμός των ζωνών βύθισης και διόγκωσης τους (Dagdelenler et al., 2016), στην συγκεκριμένη περίπτωση, αυτές οι ζώνες χαρτογραφήθηκαν μαζί ως ενιαίες εκτάσεις σχηματίζοντας έτσι μια πολυγωνική οντότητα για κάθε ένα από τα κατολισθητικά γεγονότα.

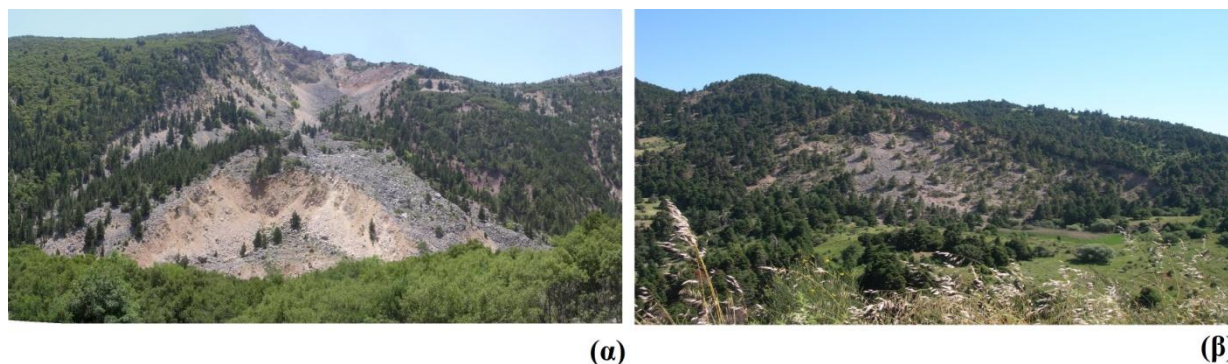


Σχήμα 4.4: Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων της περιοχής μελέτης.

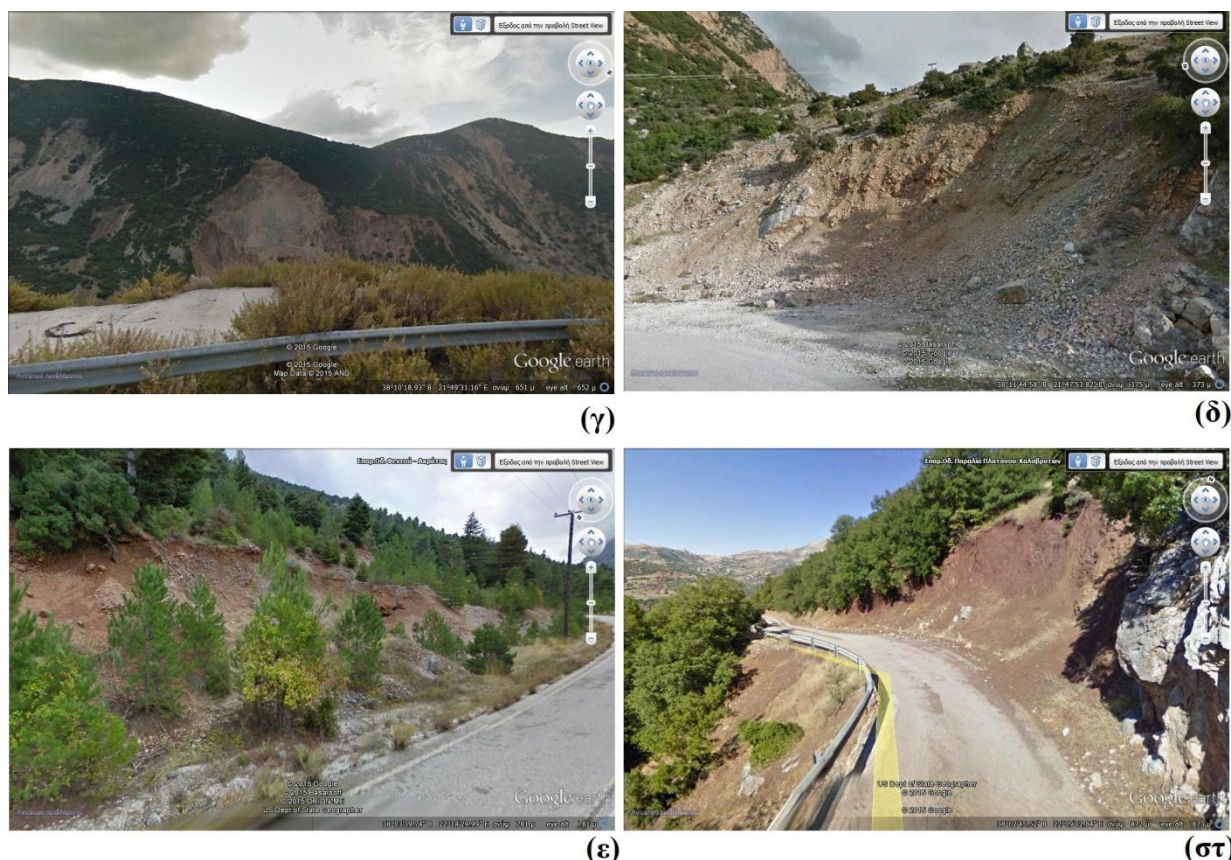
Σύμφωνα με την προτεινόμενη ταξινόμηση κατολισθήσεων (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996), στην παρούσα διατριβή, ο όρος κατολίσθηση χρησιμοποιείται για να περιγράψει ολισθήσεις (μεταθετικές και περιστροφικές), ροές και σύνθετες μετακινήσεις

(Εικόνα 4.1). Αυτοί οι τύποι κατολισθήσεων αποτελούν την πλειοψηφία των καταγεγραμμένων κατολισθητικών γεγονότων της περιοχής μελέτης και μπορούν να χαρακτηριστούν από εξαιρετικά αργές (<16 χιλ./έτος) έως εξαιρετικά γρήγορες (>5 μ./δευτ.) μετακινήσεις μαζών. Ο όγκος τους ποικίλλει από 4 έως 6.000.000 μ³, ενώ το μέγεθός τους κυμαίνεται από 5 έως 930 μέτρα για το μήκος και από 5 έως 580 μέτρα για το πλάτος. Κύριες αιτίες εκδήλωσής τους αποτελούν οι ιδιαίτερες κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής οι οποίες εκφράζονται μέσω της υψηλής βροχόπτωσης και της εκτεταμένης διάβρωσης των μετώπων των πρανών. Η ικανότητα της επιφανειακής απορροής να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες υλικού από τις λεκάνες απορροής οφείλεται στην αναμενόμενη αλληλένδετη σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και της διάβρωσης του εδάφους. Στην άνυδρη (χωρίς βροχές) περίοδο, το έδαφος «αφυδατώνεται» και η επιφάνεια συχνά καλύπτεται από χαλαρό υλικό το οποίο μπορεί εύκολα ν' απομακρυνθεί όταν αρχίσει η μεσογειακή υγρή περίοδος. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, η κυρίαρχη δράση του νερού της βροχής χαλαρώνει τα σωματίδια του εδάφους με αποτέλεσμα αυτά στη συνέχεια ν' απομακρύνονται αρκετά εύκολα (Stournaras et al., 1998).

Τέλος, αξίζει ν' αναφερθεί ότι στην περιοχή μελέτης, εκτός των προαναφερθέντων τύπων κατολισθήσεων, αναγνωρίστηκε επίσης ένας σημαντικός αριθμός (41) πτώσεων βράχων. Ωστόσο, τα γεγονότα αυτά δεν συμπεριλήφθηκαν στο τελικό σύνολο δεδομένων, καθώς κρίθηκε προτιμότερο να τεθούν υπό ανάλυση τύποι μετακινήσεων με σχετικά παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας.



Εικόνα 4.1: Εκδηλωμένες κατολισθήσεις στην περιοχή μελέτης. (α) Σύνθετη μετακίνηση βορειοανατολικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 600 μ., και (β) ροή βόρειας-βορειοανατολικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 1.080 μ. (Τσαγκάς, 2011).



Εικόνα 4.1: (Συνέχεια). (γ) Σύνθετη μετακίνηση βορειοανατολικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 733 μ., (δ) ροή βορειοδυτικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 370 μ., (ε) μεταθετική ολίσθηση σε υψόμετρο 770 μ., και (στ) περιστροφική ολίσθηση νοτιοδυτικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 884 μ. (από υπηρεσία Google Street View).

4.1.2.2 Δεδομένα παραγόντων

Με δεδομένη την μη ύπαρξη επισήμως διαμορφωμένων και κοινώς αποδεκτών οδηγιών, η επιλογή των παραγόντων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια μελέτη εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης, εξαρτάται από διάφορα κριτήρια όπως τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, την κλίμακα της ανάλυσης, τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, και τις γενικές «κατευθυντήριες γραμμές» της σχετικής βιβλιογραφίας. Επιπλέον, με βάση την εξαγωγή των δεδομένων των παραγόντων ενεργοποίησης μέσα από την εκτίμηση για μεγάλες χρονικές περιόδους της σχέσης «μεγέθους-συχνότητας» αντίστοιχων γεγονότων (όπως βροχοπτώσεις, σεισμοί) και τη χαρτογραφική αναπαράσταση αυτής της σχέσης μέσω της παρεμβολής σημειακών δεδομένων, οι συγκεκριμένοι παράγοντες εμφανίζονται να έχουν

μεγαλύτερη χρησιμότητα σε αναλύσεις μικρής κλίμακας οι οποίες αφορούν μεγάλου μεγέθους περιοχές μελέτης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθώς επίσης και την επιθυμία για ομοιότητα μεταξύ των εξεταζόμενων παραγόντων στις δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, η παρούσα διατριβή επιλέχθηκε να επικεντρωθεί αποκλειστικά στη χρήση αιτιολογικών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι εξής:

- Υψόμετρο
- Γωνία κλίσης
- Διεύθυνση κλίσης
- Γενική καμπυλότητα
- Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης
- Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης
- Κάλυψη γης
- Γεωλογία
- Απόσταση από το οδικό δίκτυο
- Απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία
- Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο
- Πυκνότητα ρεμάτων
- Τοπογραφική υγρασία (TWI)
- Χειμαρρική ισχύς (SPI)
- Βλάστηση (NDVI)

Αυτοί οι δεκαπέντε συνολικά αιτιολογικοί παράγοντες οργανώθηκαν στα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα δεδομένων (thematic data layers) των οποίων τα πρωτογενή δεδομένα, η πηγή προέλευσης των δεδομένων, και η αρχική μορφή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Το επίπεδο του υψομέτρου (ΨΜΥ) παρουσίαζε τις υψομετρικές τιμές του αναγλύφου και προήλθε από το παγκόσμιο σύνολο δεδομένων “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)”, χωρικής ανάλυσης 90 μέτρων. Πρόσβαση στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων παρείχε η διαδικτυακή χαρτογραφική υπηρεσία “EarthExplorer” της Γεωλογικής Υπηρεσίας Ηνωμένων Πολιτειών (United States Geological Survey – USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>, 12/11/2015). Η εκτέλεση βασισμένων στο ΨΜΥ αναλύσεων μέσω της χρήσης των

εξειδικευμένων μορφομετρικών και υδρολογικών εργαλείων του λογισμικού SAGA GIS (version 2.2.3), είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή των επιπέδων της γωνίας κλίσης, της διεύθυνσης κλίσης, της γενικής καμπυλότητας, της καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης, της καμπυλότητας παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, της τοπογραφικής υγρασίας (TWI), και της χειμαρρικής ισχύος (SPI).

Η δημιουργία του επιπέδου της κάλυψης γης βασίστηκε στα δεδομένα του πανευρωπαϊκού χαρτογραφικού προγράμματος “Coordination of Information on the Environment – CORINE”¹ για το 2012 (Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση – ΕΚΧΑ Α.Ε., <https://www.ktimatologio.gr/forestmaps/Pages/xrisis-gis.aspx>, 09/05/2016). Το αρχικό σύνολο δεδομένων παρουσίαζε τις πολυγωνικές οντότητες για την κάλυψη γης της περιοχής μελέτης διαχωρισμένες σε κατηγορίες σύμφωνα με την τρίτου επιπέδου (level-3) ταξινόμηση του προγράμματος.

Το επίπεδο της γεωλογίας προέκυψε μέσω της ψηφιοποίησης των γεωλογικών σχηματισμών που εντοπίζονταν εντός των ορίων της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρα 18 (Ευηνοχώρι, Ναύπακτος, Αμυγδαλέα, Πάτρα, Χαλανδρίτσα, Αίγιο, Δερβένι, Ξυλόκαστρο, Περαχώρα, Κερτέζι, Δάφνη, Κανδήλα, Νεμέα, Κόρινθος, Σοφικό, Τρίπολη, Ναύπλιο, Λυγουριό) από τα συνολικά 327 φύλλα του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας, κλίμακας 1:50.000 (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών – ΙΓΜΕ, 1993). Λόγω της διαφορετικότητας μεταξύ της κλίμακας των χρησιμοποιούμενων φύλλων χάρτη και της επιλεγμένης κλίμακας ανάλυσης, η αναπαράσταση των αρχικών γεωλογικών σχηματισμών (ή κατηγοριών) συνοδευόταν από έναν υψηλό βαθμό λεπτομέρειας.

Πίνακας 4.3: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή αιτιολογικών παραγόντων.

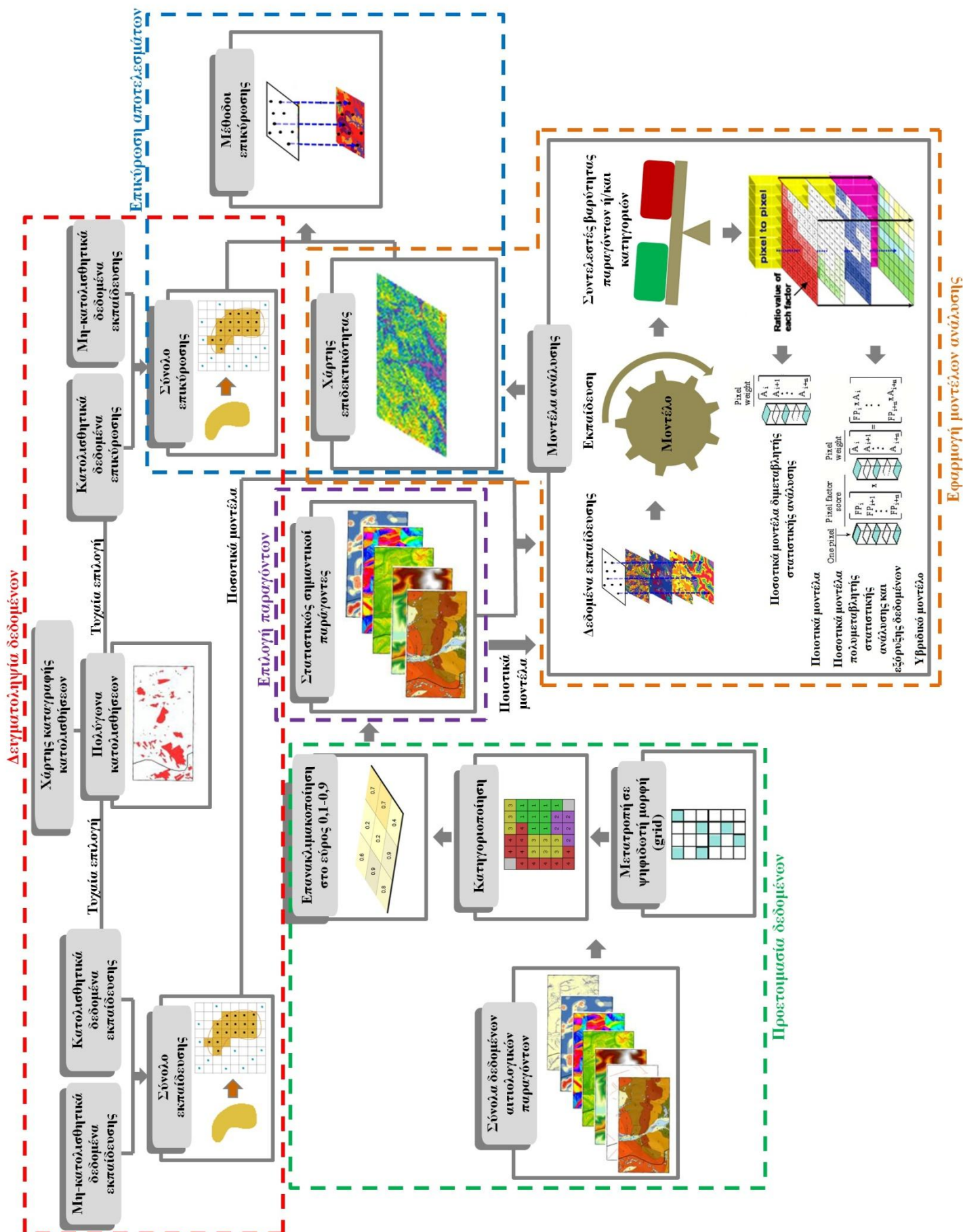
¹ Το πρόγραμμα “CORINE” ξεκίνησε το 1985 και είχε ως στόχο την παροχή τοπικών γεωχωρικών πληροφοριών κάλυψης γης για τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η βάση δεδομένων έχει προκύψει από την καταγραφή της κάλυψης γης σε 44 κατηγορίες, διαχωρισμένες σε τρία διαφορετικά επίπεδα ταξινόμησης (διαφορετικός βαθμός λεπτομέρειας). Βρίσκεται υπό τη διαχείριση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environmental Agency – EEA) και είναι λειτουργικώς διαθέσιμη για τις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης (EEA, 1995).

Τύπος	Παράγοντας	Επιμέρους παράγοντας	Πρωτογενή δεδομένα	Πηγή δεδομένων	Αρχική μορφή
Τοπογραφία	Υψόμετρο		Σύνολο δεδομένων SRTM (90 μ.)	USGS	Ψηφιδωτή (ΨΜΥ)
	Γωνία κλίσης		—	Από SRTM ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
	Διεύθυνση κλίσης		—	Από SRTM ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
	Καμπυλότητα	Γενική	—	Από SRTM ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
		Κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	—	Από SRTM ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
		Παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	—	Από SRTM ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
Γεωλογία	Γεωλογία		Γεωολογικοί σχηματισμοί	Γεωολογικός Χάρτης της Ελλάδας, 1:50.000 (ΓΓΜΕ)	Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία		Ρήγματα, επιπτεύσεις, επωθήσεις	Γεωολογικός Χάρτης της Ελλάδας, 1:50.000 (ΓΓΜΕ)	Διανυσματική (γραμμές)
Υδρολογία	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		Κύριο υδρογραφικό δίκτυο	Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:250.000 (ΓΥΣ)	Διανυσματική (γραμμές)
	Πυκνότητα ρεμάτων		Κύριο υδρογραφικό δίκτυο	Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:250.000 (ΓΥΣ)	Διανυσματική (γραμμές)
	Τοπογραφική υγρασία (TWI)		Συσώρευση ροής	Υδρολογική ανάλυση (SAGA GIS)	Ψηφιδωτή
	Χειμαρρική ισχύς (SPI)		Συσώρευση ροής	Υδρολογική ανάλυση (SAGA GIS)	Ψηφιδωτή
Ανθρώπινη παρέμβαση	Κάλυψη γης		Κατηγορίες “CORINE 2012”	EKXA A.E.	Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από οδικό δίκτυο		Κύριο οδικό δίκτυο	OpenStreetMap	Διανυσματική (γραμμές)
Βλάστηση	Βλάστηση (NDVI)		Δορυφορικές εικόνες “Landsat-8” (30 μ., Φεβ. 2016)	USGS	Ψηφιδωτή

Για τη δημιουργία των επιπέδων απόστασης (ή εγγύτητας) και πυκνότητας, ήταν προηγουμένως απαραίτητη η απόκτηση των κατάλληλων γραμμικών οντοτήτων, και πιο συγκεκριμένα του οδικού δικτύου, του υδρογραφικού δικτύου και των τεκτονικών στοιχείων. Το οδικό δίκτυο περιλάμβανε τους κύριους οδικούς άξονες (εθνικές οδούς, αυτοκινητόδρομους, πρωτεύοντες και δευτερεύοντες δρόμους) της περιοχής μελέτης και για την κατασκευή του αξιοποιήθηκαν τα «ανοιχτά» δεδομένα της διαδικτυακής χαρτογραφικής υπηρεσίας “OpenStreetMap” (<https://www.openstreetmap.org/>, 22/02/2016). Τελείως διαφορετικός από την περίπτωση του οδικού δικτύου ήταν ο τρόπος απόκτησης του υδρογραφικού δικτύου και των τεκτονικών στοιχείων. Για την απόκτηση του υδρογραφικού δικτύου, διενεργήθηκε η ψηφιοποίηση των αντίστοιχων γραμμικών οντοτήτων χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρα 4 (Πάτραι, Χαλκίς, Αθήναι, Καλαμάτα) από τα συνολικά 32 φύλλα του Χάρτη Γενικής Χρήσεως της Ελλάδας, κλίμακας 1:250.000 (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού – ΓΥΣ, 1978). Τα τεκτονικά στοιχεία, με τη σειρά τους, αποκτήθηκαν μέσω της ψηφιοποίησης των αντίστοιχων γραμμικών οντοτήτων στα προαναφερθέντα 18 φύλλα του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας, κλίμακας 1:50.000. Γενικά, η εξεταζόμενη περιοχή χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός μεγάλου σε έκταση οδικού και υδρογραφικού δικτύου, καθώς και ενός σημαντικού αριθμού τεκτονικών στοιχείων. Τα τεκτονικά αυτά στοιχεία, με τη μορφή ρηγμάτων, εφίππευσεων και επωθήσεων, συνιστούν αποτέλεσμα της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που επικρατεί στην περιοχή.

Το επίπεδο της βλάστησης (NDVI), τέλος, διαμορφώθηκε από την επεξεργασία, στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI (version 4.7), δεδομένων του δορυφορικού συστήματος “Landsat-8” τα οποία επίσης παρέχονται από τη διαδικτυακή χαρτογραφική υπηρεσία “EarthExplorer” της USGS. Τα δεδομένα αυτά είχαν τη μορφή οπτικών εικόνων (με ημερομηνίες λήψης 2 και 9 Φεβρουαρίου 2016), χωρικής ανάλυσης 30 μέτρων, και αφορούσαν τα απαιτούμενα για την κατασκευή του NDVI φασματικά κανάλια του συστήματος: κανάλι 4 για το ορατό κόκκινο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και κανάλι 5 για το κοντινό υπέρυθρο.

4.1.3 Μεθοδολογία

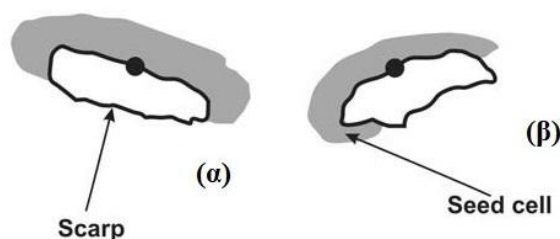


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ακολουθούμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.

Η «συνδυαστική» αξιοποίηση του λογισμικού ArcGIS και διάφορων λογισμικών εφαρμοσμένων μαθηματικών/στατιστικής ανάλυσης αποτέλεσαν τη βάση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην επιλεγμένη περιοχή μελέτης. Τα κύρια βήματα αυτής της μεθοδολογίας ήταν αναλυτικά τα εξής:

4.1.3.1 Δειγματοληψία δεδομένων

Σε γενικές γραμμές, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παράγονται από τα ποσοτικά μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνικές δειγματοληψίας των δεδομένων. Συνεπώς, η δειγματοληψία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα – αν όχι το σημαντικότερο – ζητήματα στην εφαρμογή των συγκεκριμένων μοντέλων. Δύο είναι οι κύριες τεχνικές δειγματοληψίας που έχουν αναγνωριστεί στη σχετική βιβλιογραφία: (α) η δειγματοληψία από την κατολισθείσα έκταση (Bhandary et al., 2013; Youssef et al., 2015c; Romer and Ferentinou, 2016) και, (β) η δειγματοληψία “seed cell” (Yilmaz, 2010; Che et al., 2012; Dagdelenler et al., 2016).



Σχήμα 4.6: Τεχνικές δειγματοληψίας. (α) Από την κατολισθείσα έκταση, και (β) δειγματοληψία “seed cell” (Yilmaz, 2010).

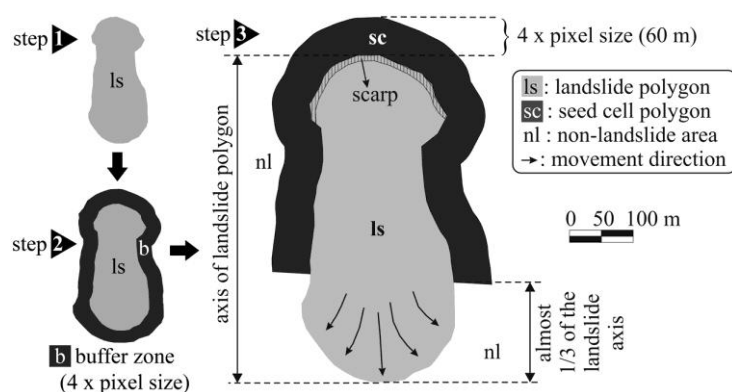
Η δειγματοληψία από την κατολισθείσα έκταση χωρίζεται σε δύο προσεγγίσεις. Η διαφορά τους εντοπίζεται στο γεγονός ότι η πρώτη επικεντρώνεται στις κατολισθήσεις ως πολυγωνικές οντότητες («διανυσματική οπτική»), ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται στις κατολισθήσεις ως ψηφίδες ή αλλιώς ως κεντροειδή σημεία των ψηφίδων που τις απαρτίζουν («ψηφιδωτή οπτική»). Πιο αναλυτικά, η πρώτη προσέγγιση δειγματοληψίας (Chen et al., 2009; Pradhan et al., 2010; Romer and Ferentinou, 2016) περιλαμβάνει, για αρχή, τον διαχωρισμό των κατολισθητικών πολυγωνικών οντοτήτων σε δύο (υπο)σύνολα: ένα σύνολο εκπαίδευσης

(training dataset) και ένα σύνολο επικύρωσης (validation dataset). Το σύνολο εκπαίδευσης χρησιμοποιείται στην εφαρμογή των μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας, ενώ το σύνολο επικύρωσης στην μετέπειτα αξιολόγηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων τους. Το μέγεθος των δύο συνόλων καθορίζεται από τον ίδιο τον ερευνητή, επιλέγοντας με τυχαίο τρόπο τις οντότητες που θα συμπεριληφθούν σε κάθε ένα απ' αυτά. Στη συνέχεια, ακολουθεί η μετατροπή των πολυγωνικών οντοτήτων στα επιμέρους κεντροειδή σημεία των ψηφίδων τους και η εκ νέου τυχαία επιλογή, για κάθε ένα σύνολο ξεχωριστά, ενός ίσου ή άνισου αριθμού σημείων προερχόμενων από το «κατολισθητικώς ανεπηρέαστο» (δηλαδή που δεν έχει εμφανίσει κατολισθητικά γεγονότα στο παρελθόν) τμήμα της περιοχής μελέτης.

Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη προσέγγιση δειγματοληψίας από την κατολισθείσα έκταση έχει ως πρώτο της βήμα την μετατροπή των κατολισθητικών πολυγωνικών οντοτήτων, καθώς και του «κατολισθητικώς ανεπηρέαστου» τμήματος της περιοχής μελέτης, στα προκύπτοντα από τις ψηφίδες τους κεντροειδή σημεία. Ακολούθως, απαιτεί τον προσδιορισμό του μεγέθους των επιθυμητών δειγμάτων μ' έναν από τους παρακάτω τρόπους: (α) τη χρησιμοποίηση των σημείων απ' όλη την περιοχή μελέτης, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μιας άνισης αναλογίας μεταξύ των κατολισθητικών και μη-κατολισθητικών σημείων (Ohlmacher and Davis 2003; Ayalew and Yamagishi, 2005), (β) τη χρησιμοποίηση όλων των κατολισθητικών σημείων και ενός ίσου αριθμού μη-κατολισθητικών σημείων (Mousavi et al., 2011; Bhandary et al., 2013), και (γ) το διαχωρισμό των κατολισθητικών σημείων σε σύνολα εκπαίδευσης και επικύρωσης στα οποία προστίθεται ένας ίσος (Kundu et al., 2013; Bai et al., 2014) ή άνισος (Poiraud, 2014; Polykretis et al., 2015) αριθμός τυχαίως επιλεγμένων μη-κατολισθητικών σημείων.

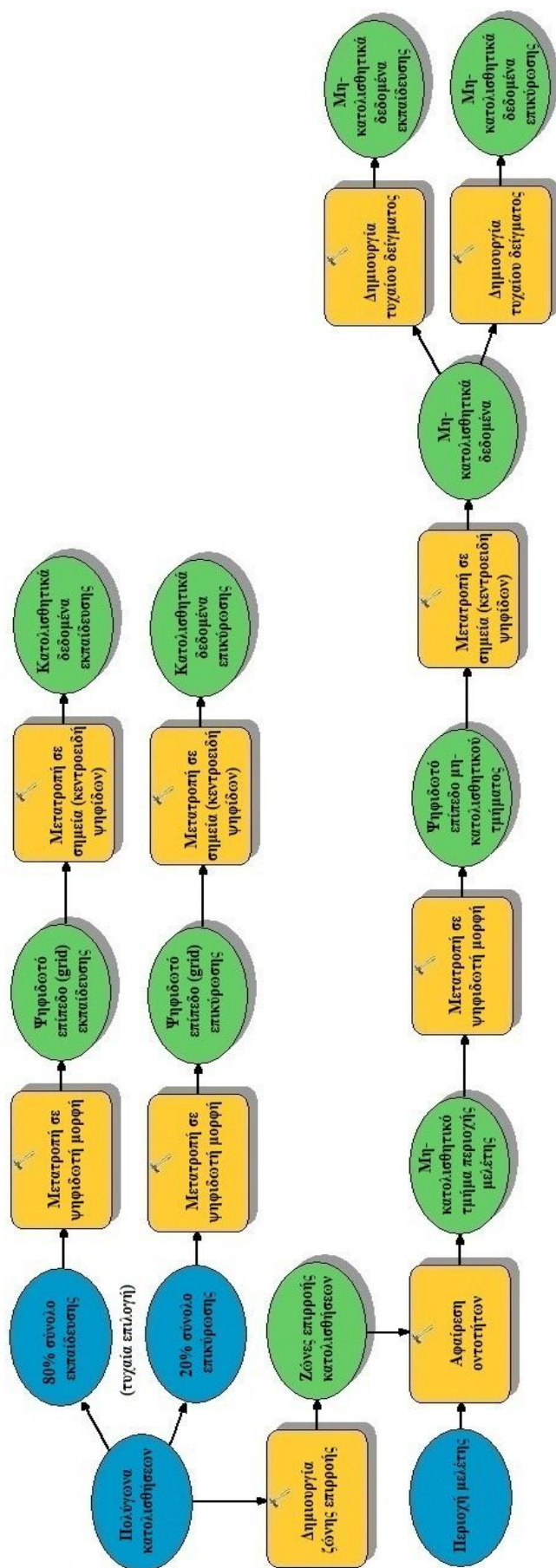
Η τεχνική δειγματοληψίας “seed cell” προτάθηκε από τους Süzen και Doyuran (2004) οι οποίοι υποστήριζαν ότι τα επιθυμητά δείγματα μπορούν επίσης να προέρχονται από τη περιοχή που περιβάλλει την κατολισθείσα έκταση καθώς αυτή αντιπροσωπεύει με τον καλύτερο τρόπο τις «άθικτες» (πριν την εκδήλωση κατολίσθησης) μορφολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη μιας ζώνης επιρροής (buffer zone) στη στέψη και στις πλευρές των κατολισθήσεων (Σχήμα 4.7). Ο προσδιορισμός του μεγέθους της ζώνης βασίζεται στους εξής κανόνες: (α) εάν η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ορίων των κατολισθητικών πολυγωνικών οντοτήτων και του ορίου της περιοχής μελέτης είναι μικρότερη από 100 μέτρα, τότε ως μέγεθος της ζώνης ορίζεται η συγκεκριμένη τιμή απόστασης, και (β)

εάν η αντίστοιχη απόσταση είναι μεγαλύτερη από 100 μέτρα, τότε το μέγεθος της ζώνης ορίζεται στα 100 μέτρα. Μετά από το σχηματισμό της ζώνης επιρροής, ακολουθεί η εξαγωγή των κεντροειδών σημείων από τις ψηφίδες ολόκληρης της περιοχής μελέτης. Έπειτα, τα σημεία που εντοπίζονται εντός της ζώνης επιρροής διαχωρίζονται έτσι ώστε ν' αποτελέσουν το σύνολο εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.7: Βήματα δειγματοληψίας “seed cell” (San, 2014).

Μεταξύ των δύο τεχνικών δειγματοληψίας που μόλις περιγράφηκαν, η «διανυσματικής οπτικής» δειγματοληψία από την κατολισθείσα έκταση ήταν αυτή η οποία προτιμήθηκε να εφαρμοστεί στην παρούσα διατριβή. Έτσι, από τις συνολικά 411 χαρτογραφημένες κατολισθητικές πολυγωνικές οντότητες, το 80% (329 οντότητες) επιλέχθηκε μ' έναν τυχαίο τρόπο ως σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% (82 οντότητες) διατηρήθηκε ως σύνολο επικύρωσης (Nefeslioglu et al., 2008; Chen et al., 2009; Pradhan et al., 2010). Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα ανάλυσης, τόσο τα προκύπτοντα (υπο)σύνολα κατολισθητικών δεδομένων, όσο και το «κατολισθητικώς ανεπηρέαστο» τμήμα της περιοχής μελέτης – αφαιρώντας από τη συνολική έκταση τις κατολισθητικές πολυγωνικές οντότητες και μια ζώνης επιρροής 100 μέτρων – μετατράπηκαν σε ψηφιδωτά επίπεδα με μέγεθος ψηφίδας 90 μέτρα. Η εξαγωγή των κεντροειδών σημείων από τις ψηφίδες αυτών των επιπέδων είχε ως αποτέλεσμα τη λήψη 721 κατολισθητικών σημείων για το σύνολο εκπαίδευσης, 201 κατολισθητικών σημείων για το σύνολο επικύρωσης, και 450.824 σημείων για την μη-κατολισθητική περιοχή. Έπειτα, απ' αυτά τα μη-κατολισθητικά σημεία, επιλέχθηκε μέσω τυχαίας δειγματοληψίας ένας ίσος αριθμός σημείων για κάθε ένα από τα (υπο)σύνολα κατολισθητικών δεδομένων. Από την πρόσθεση των δειγμάτων προέκυψε τελικώς ένα σύνολο



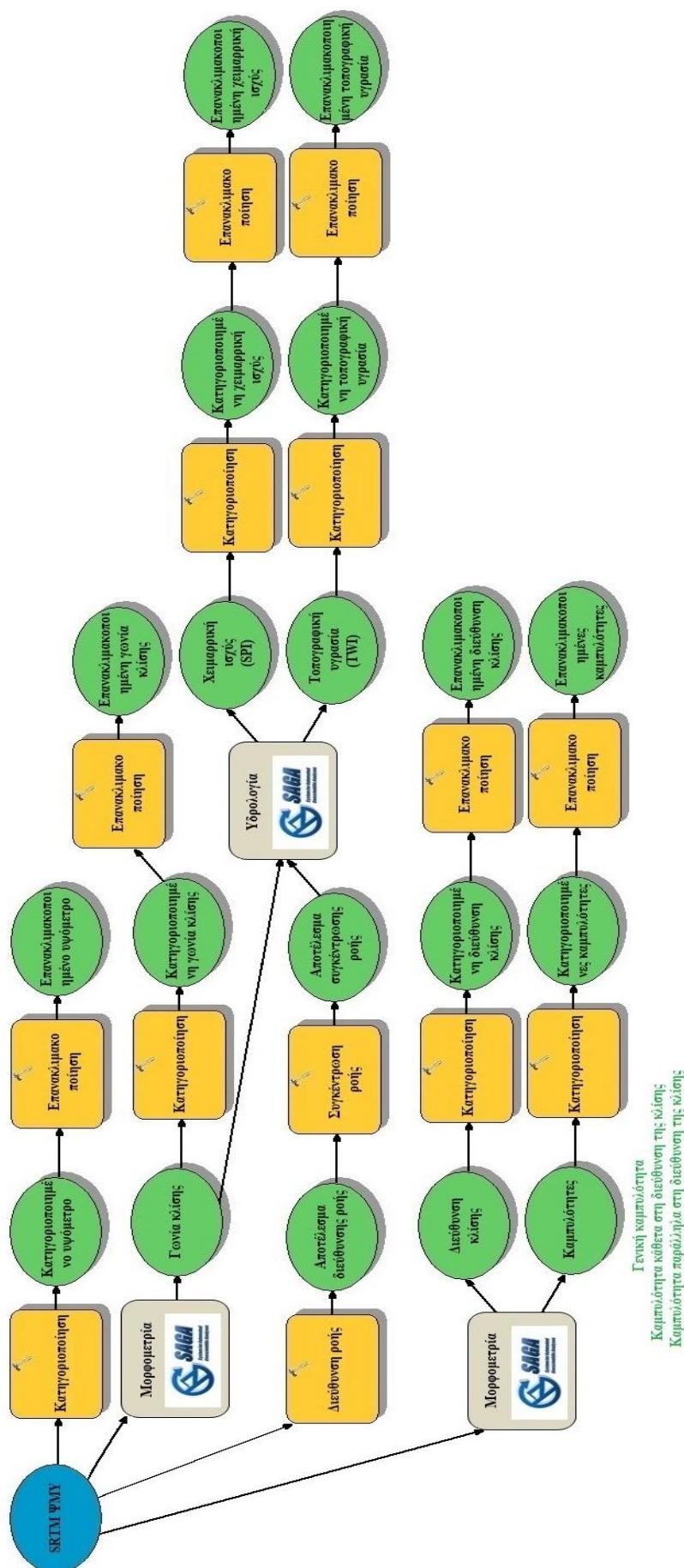
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα βημάτων δειγματοληψίας κατολίσθητικών και μη-κατολίσθητικών δεδομένων με τη μορφή model builder του λογισμικού ArcGIS.

εκπαίδευσης με συνολικά 1.442 σημεία, καθώς και ένα σύνολο επικύρωσης με συνολικά 402 σημεία. Για την ολοκλήρωση της δειγματοληπτικής διαδικασίας, οι τιμές 0 και 1 εκχωρήθηκαν στα μη-κατολισθητικά και κατολισθητικά, αντιστοίχως, σημεία των τελικώς διαμορφωμένων (υπο)συνόλων δεδομένων.

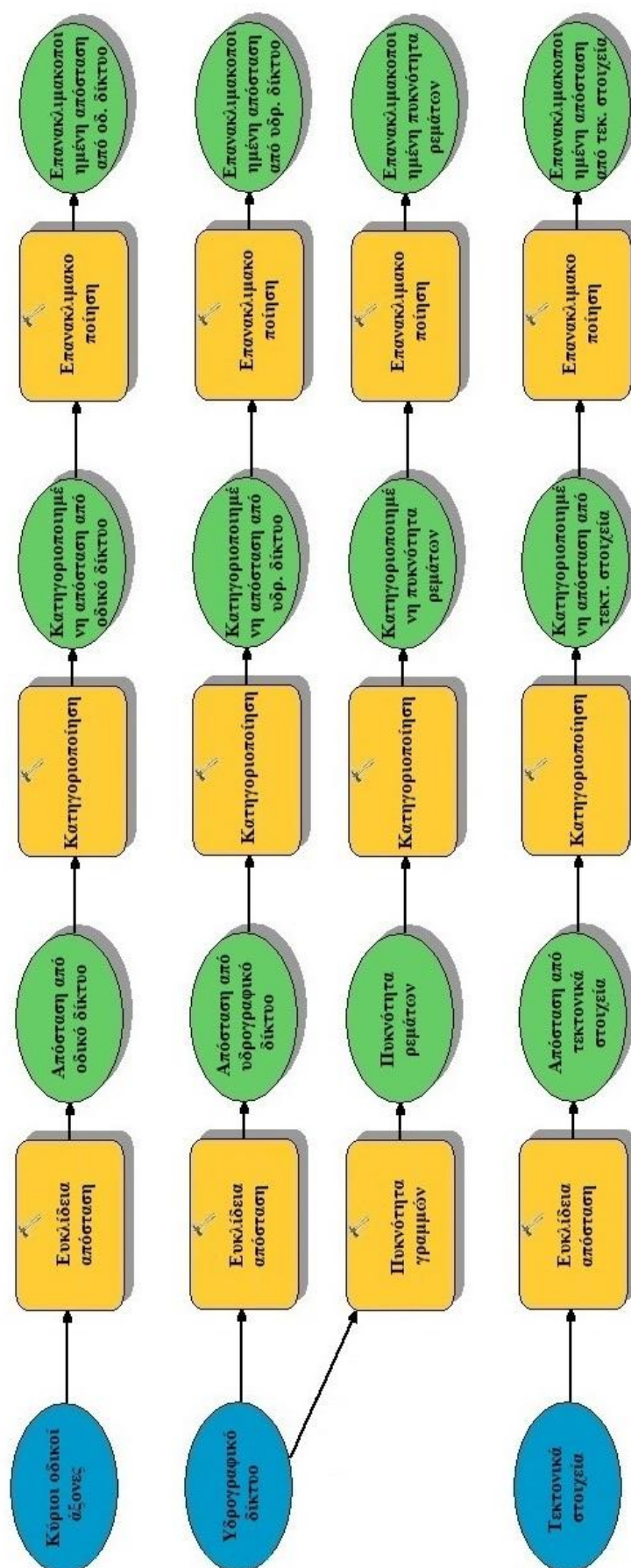
4.1.3.2 Προετοιμασία δεδομένων

Οι αιτιολογικοί παράγοντες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή, αποτελούν μεταβλητές συνεχών (αριθμητικών) και διακριτών δεδομένων. Αν και διέφεραν μεταξύ τους ως προς την αρχική μορφή, όλα τα παραγόμενα επίπεδά τους μεταφέρθηκαν σε ψηφιδωτή μορφή με μέγεθος ψηφίδας (χωρική ανάλυση) 90 μέτρα.

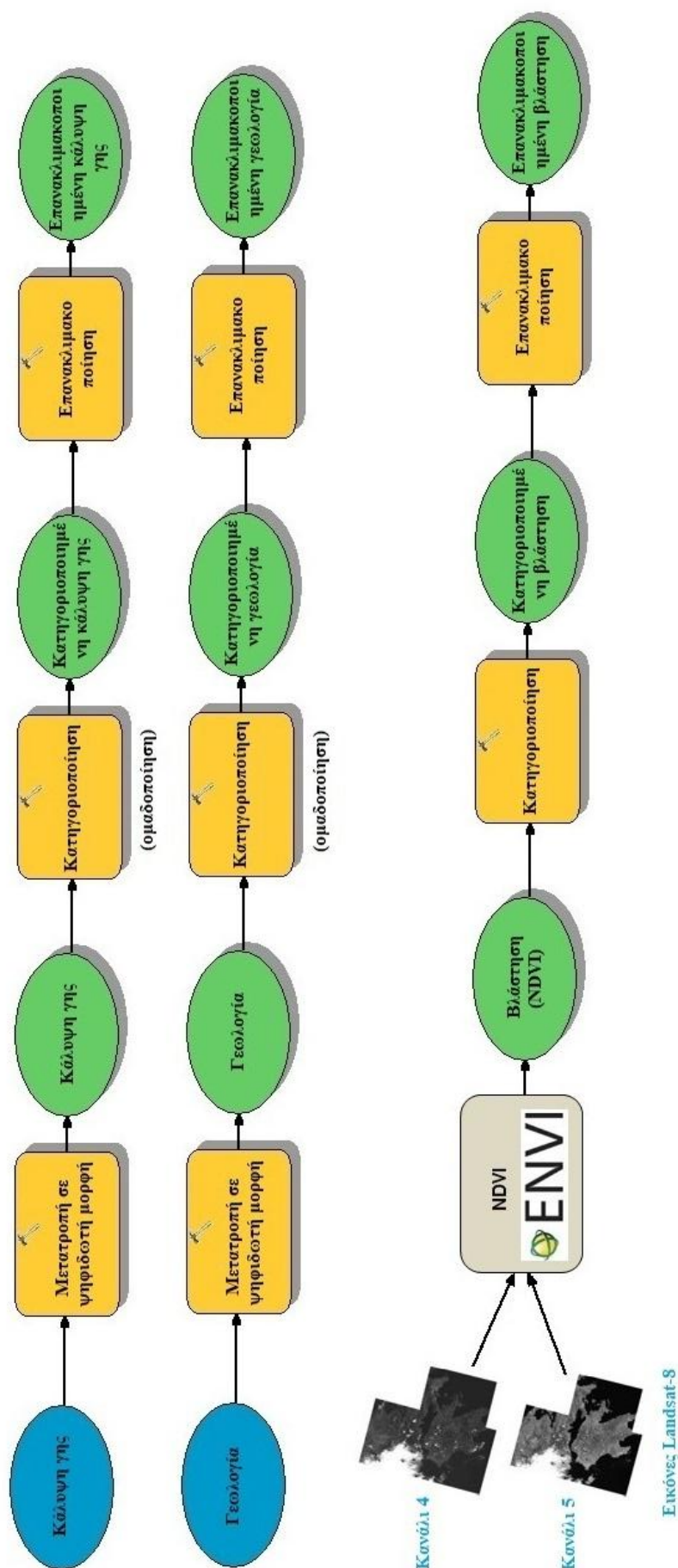
Για την πλειοψηφία των συνεχών παραγοντικών επιπέδων (υψόμετρο, γωνία κλίσης, απόσταση από το οδικό δίκτυο, απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, πυκνότητα ρεμάτων, τοπογραφική υγρασία, χειμαρρική ισχύς, βλάστηση), εκτελέστηκε η κατηγοριοποίηση τους (πέντε κατηγορίες) σύμφωνα με τη διαθέσιμη από το λογισμικό ArcGIS μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων (natural breaks)». Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται σ' έναν αλγόριθμο ταξινομικής ανάλυσης ο οποίος, για τον εκάστοτε αριθμό κατηγοριών, αναζητεί εκείνες για τις οποίες η διακύμανση ελαχιστοποιείται στο εσωτερικό των ομάδων των δεδομένων (ενδοομαδική διακύμανση) και μεγιστοποιείται μεταξύ των ομάδων (διαομαδική διακύμανση) (Jenks, 1967). Αναζητεί, δηλαδή, τις πλέον ομοιογενείς κατηγορίες τιμών. Για τα υπόλοιπα συνεχή παραγοντικά επίπεδα (διεύθυνση κλίσης, γενική καμπυλότητα, καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης, καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης), κρίθηκε πιο ωφέλιμη η διενέργεια με «χειροκίνητο τρόπο» μιας γενικευμένης κατηγοριοποίησης των τιμών τους και η μετέπειτα διατύπωση τους σε «διακριτούς όρους». Επιπλέον, με δεδομένη την αναντιστοιχία μεταξύ της κλίμακας ανάλυσης και της υψηλής λεπτομέρειας που χαρακτήριζε την αρχική μορφή των διακριτών παραγοντικών επιπέδων (κάλυψη γης, γεωλογία), αποφασίστηκε η κατηγοριοποίηση τους να προέλθει μέσα από μια βασισμένη σε κοινά χαρακτηριστικά ομαδοποίηση των αρχικών κατηγοριών τους.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα βημάτων προετοιμασίας δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων με τη μορφή «τροποποιημένου» model builder.



Σχήμα 4.9: (Συνέχεια).

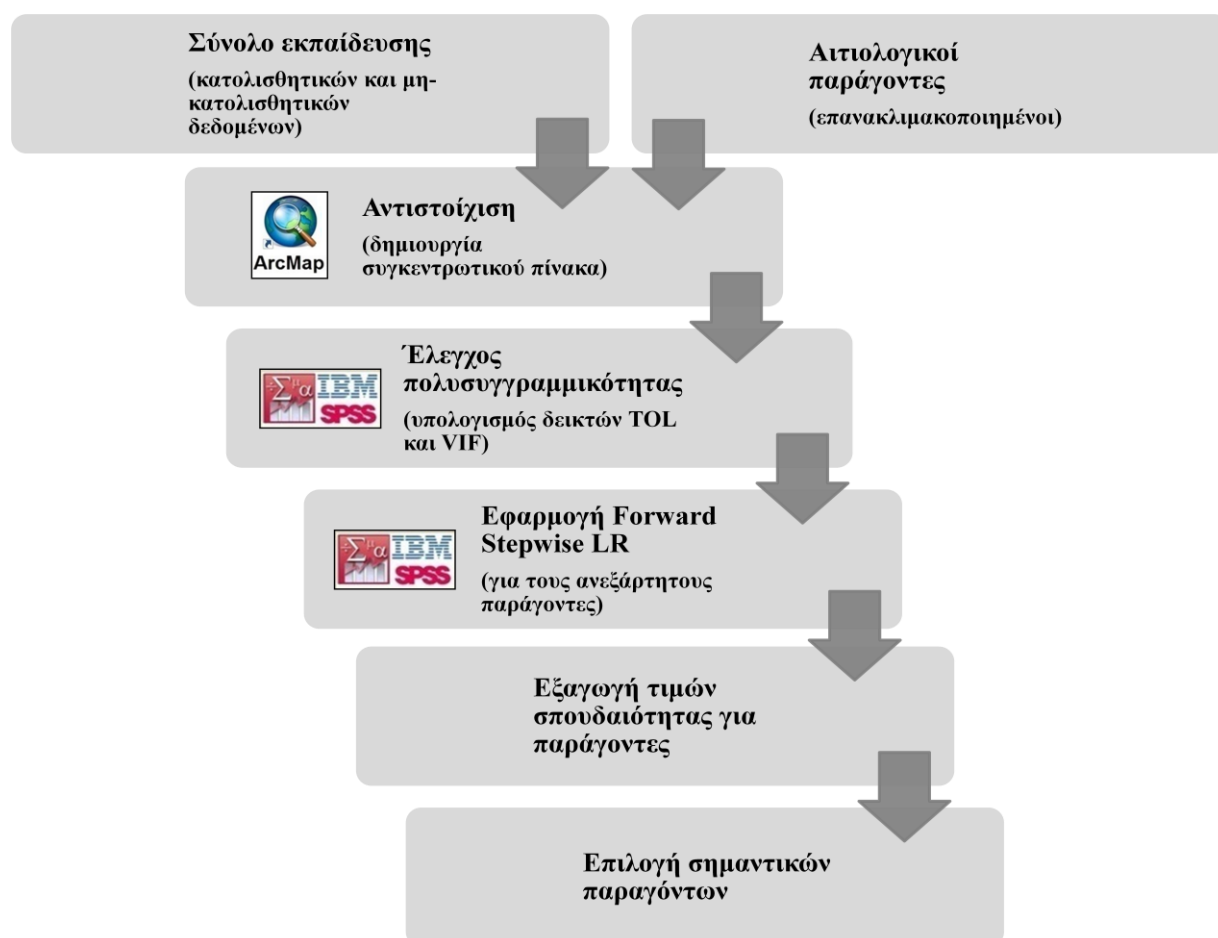


Σχήμα 4.9: (Συνέχεια).

Μετά από την κατηγοριοποίηση των αιτιολογικών παραγόντων, σειρά είχε η επανακλιμακοποίηση τους σε μια κοινή κλίμακα συνεχών τιμών. Σε περιπτώσεις εφαρμογών ποσοτικών μοντέλων πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης και εξόρυξης δεδομένων, η διαδικασία αυτή της επανακλιμακοποίησης (ενίοτε και κανονικοποίησης) θεωρείται ιδιαίτερος κρίσιμη, καθώς μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση προσαρμογής/σύγκλισης του μοντέλου στα εξεταζόμενα δεδομένα. Στην παρούσα διατριβή, οι δεκαπέντε αιτιολογικοί παράγοντες επανακλιμακοποιήθηκαν στο εύρος τιμών 0,1-0,9 με βάση τις τιμές που προέκυψαν από την εκτέλεση ενός εκ των τριών μοντέλων διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης, και πιο συγκεκριμένα του λόγου συχνотήτων (FR) (Meng et al., 2016; Moosavi and Niazi, 2016; Romer and Ferentinou, 2016). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης επανακλιμακοποίησης, οι διάφορες κατηγορίες των κατηγοριοποιημένων πλέον παραγοντικών επιπέδων κωδικοποιήθηκαν και κατατάχθηκαν με βάση τις αντίστοιχες FR τιμές τους.

4.1.3.3 Επιλογή παραγόντων

Η επιλογή των σημαντικών προς εξέταση παραγόντων έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια της εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Στη συγκεκριμένη διατριβή, η επιλογή αυτών των παραγόντων από τους συνολικά δεκαπέντε αιτιολογικούς παράγοντες που αρχικώς συλλέχθηκαν, επετεύχθη μέσω της μεθόδου της βηματικής λογιστικής παλινδρόμησης (stepwise logistic regression). Βασισμένη στο θεωρητικό πλαίσιο της απλής λογιστικής παλινδρόμησης (Ενότητα 3.2.2.3), η βηματική χωρίζεται σε δύο κύριες μορφές: την «προς τα εμπρός» ένταξη (forward inclusion) και την «προς τα πίσω» αποβολή (backward elimination). Στην «προς τα εμπρός» μορφή, όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές εξαιρούνται αρχικώς από το μοντέλο και ακολούθως αξιολογούνται μία-προς-μία για την είσοδό τους σ' αυτό με κριτήριο το εάν συμβάλλουν επαρκώς στην εξίσωση της παλινδρόμησης (Mousavi et al., 2011). Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στην «προς τα πίσω» μορφή στην οποία όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές συμπεριλαμβάνονται αρχικώς στο μοντέλο (García-Rodríguez et al., 2008). Στα επόμενα στάδια της διαδικασίας, οι μεταβλητές αυτές αξιολογούνται μία-προς-μία και εκείνες που θεωρούνται ασήμαντες αποβάλλονται από το μοντέλο. Το αποτέλεσμα, τελικώς, είναι ένα μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει μόνο τις σημαντικές γι' αυτό μεταβλητές.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα βημάτων διαδικασίας επιλογής παραγόντων.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας επιλογής ήταν η αντιστοίχιση των 1.442 (κατολισθητικών και μη-κατολισθητικών) σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των επανακλιμακοποιημένων παραγόντων. Από το συγκεκριμένο βήμα προέκυψαν τα δεδομένα εισόδου σε μορφή συγκεντρωτικών πινάκων οι οποίοι για κάθε εγγραφή (σημείο) παρέθεταν τους δεκαπέντε επανακλιμακοποιημένους παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές) και την, εκφρασμένη σε τιμές 0 και 1, απουσία και παρουσία κατολίσθησης (εξαρτημένη μεταβλητή). Οι πίνακες αυτοί, ακολούθως, εισήχθησαν στο λογισμικό στατιστικών αναλύσεων SPSS (version 22.0). Στη συνέχεια, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η εκτέλεση της βηματικής λογιστικής παλινδρόμησης, ήταν αναγκαίος ο έλεγχος της συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκε η πολυσυγγραμμικότητά τους μέσω του υπολογισμού των δεικτών TOL και VIF.

Πίνακας 4.4: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.

Παράγοντας	Δείκτης TOL	Δείκτης VIF
Υψόμετρο	0,9	1,1
Γωνία κλίσης	0,6	1,8
Διεύθυνση κλίσης	0,9	1,0
Γενική καμπυλότητα	0,4	2,6
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	0,6	1,5
Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	0,5	2,1
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,9	1,1
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,8	1,2
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0,9	1,1
Πυκνότητα ρεμάτων	0,8	1,2
Χειμαρρική ισχύς (SPI)	0,6	1,6
Τοπογραφική υγρασία (TWI)	0,8	1,2
Βλάστηση (NDVI)	0,9	1,1
Κάλυψη γης	0,7	1,4
Γεωλογία	0,6	1,6

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4, οι αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερες από 0,3 για το δείκτη TOL και μικρότερες από 3 για το δείκτη VIF, καταδεικνύοντας ότι δεν υφίσταται θέμα πολυσυγγραμμικότητας για κανέναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες.

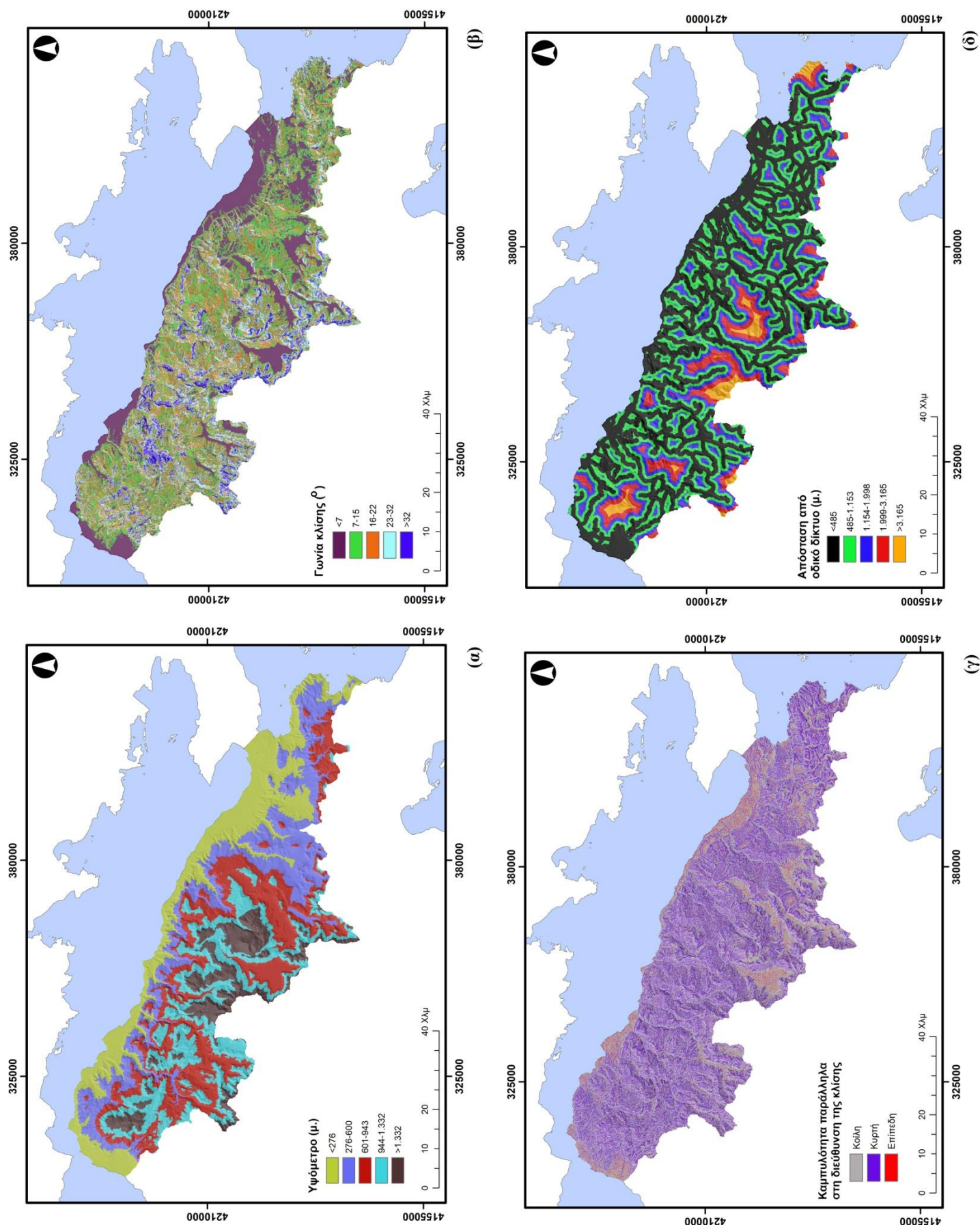
Μετά από τον έλεγχο της πολυσυγγραμμικότητας, σειρά είχε η διενέργεια μιας βασισμένης στο λόγο πιθανοφάνειας «προς τα εμπρός» βηματικής λογιστικής παλινδρόμησης. Ο συγκεκριμένος τύπος παλινδρόμησης περιλάμβανε τον υπολογισμό των στατιστικών μέτρων απόδοσης του μοντέλου για κάθε είσοδο μεταβλητής και την παρατήρηση της μεταβολής που επέφερε αυτή η είσοδος στο λογάριθμο της πιθανοφάνειας. Εάν η τιμή σπουδαιότητας (significance) μιας μεταβλητής ήταν μικρότερη από την τιμή πιθανότητας (probability) για παραμονή στο μοντέλο, η μεταβλητή αυτή εισερχόταν στο μοντέλο και τα στατιστικά μέτρα απόδοσης του υπολογιζόντουσαν εκ νέου έτσι ώστε να εξεταζόταν το ενδεχόμενο κάποια άλλη μεταβλητή να πληρούσε τις προϋποθέσεις για είσοδο. Στο παρόν μοντέλο, αυτή η τιμή πιθανότητας ορίστηκε να ισούται με 0,05.

Πίνακας 4.5: Τιμή σπουδαιότητας αιτιολογικών παραγόντων.

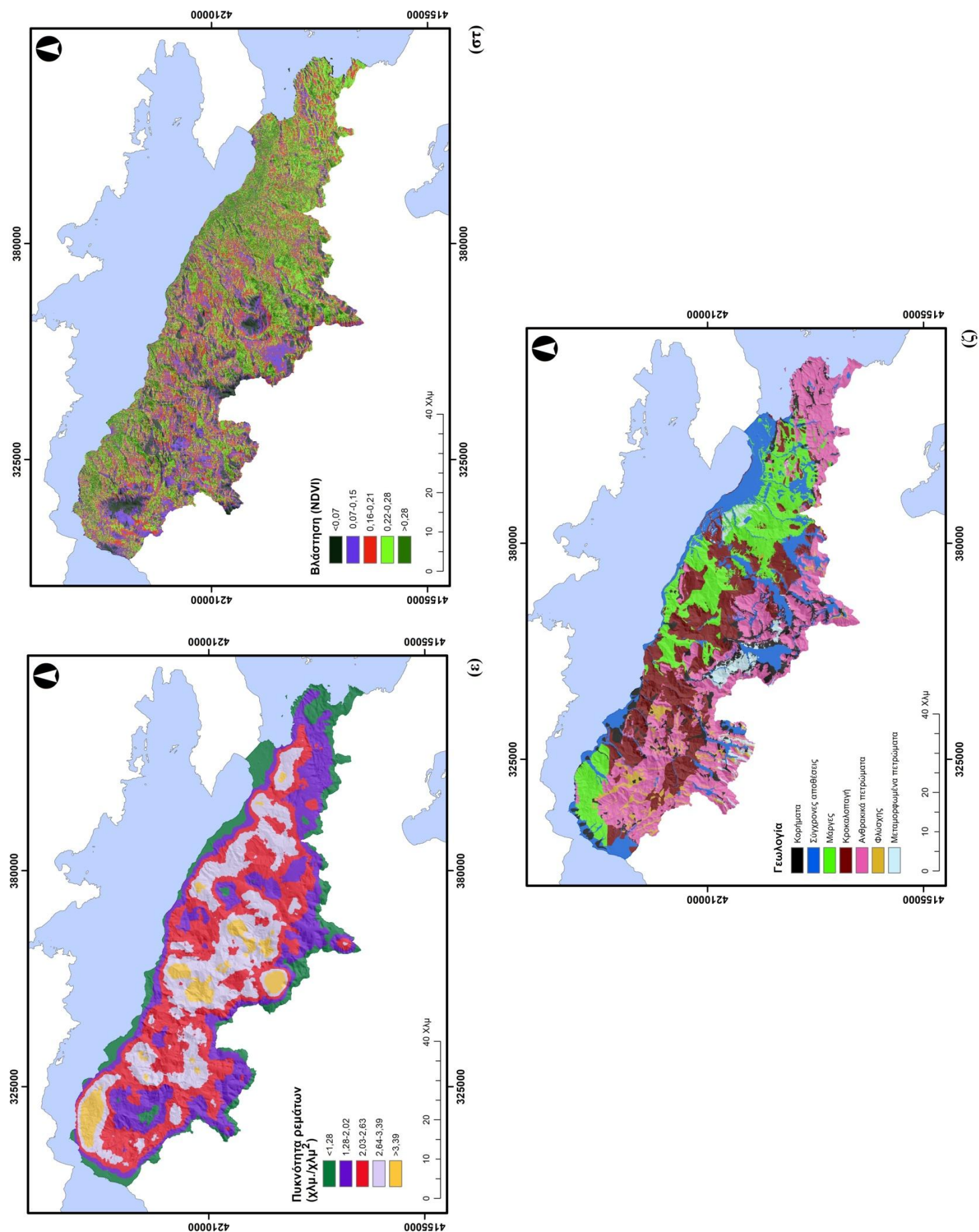
Στάδιο	Παράγοντας	Τιμή σπουδαιότητας
7 ^ο	Υψόμετρο	0,00
	Γωνία κλίσης	0,00
	Διεύθυνση κλίσης	0,20
	Γενική καμπυλότητα	0,16
	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	0,00
	Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	0,98
	Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,00
	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,21
	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0,83
	Πυκνότητα ρεμάτων	0,00
	Χειμαρρική ισχύς (SPI)	0,30
	Τοπογραφική υγρασία (TWI)	0,78
	Βλάστηση (NDVI)	0,04
	Κάλυψη γης	0,97
	Γεωλογία	0,00

*Με πλάγια μορφή στις τιμές σπουδαιότητας οι εκτιμώμενοι ως σημαντικοί παράγοντες.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5, η παλινδρόμηση τερματίστηκε στο 7^ο στάδιο δίνοντας ένα μοντέλο το οποίο είχε εισάγει όλες τις σημαντικές μεταβλητές και είχε αποκλείσει τις υπόλοιπες ασήμαντες. Πιο συγκεκριμένα, στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%, μεταβλητές όπως η διεύθυνση κλίσης, η γενική καμπυλότητα, η καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης, η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, η τοπογραφική υγρασία (TWI), η χειμαρρική ισχύς (SPI) και η κάλυψη γης, δεν εμφάνισαν στατιστική συσχέτιση (τιμή σπουδαιότητας μεγαλύτερη από 0,05) με την εκδήλωση κατολισθήσεων. Αντιθέτως, στο ίδιο διάστημα εμπιστοσύνης, μεταβλητές όπως το υψόμετρο, η γωνία κλίσης, η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η πυκνότητα ρεμάτων, η βλάστηση (NDVI) και η γεωλογία, παρουσίασαν μια στατιστικώς σημαντική συσχέτιση (τιμή σπουδαιότητας μικρότερη από 0,05) με την εκδήλωση του φαινομένου.



Σχήμα 4.11: Επιλεγμένοι προς ανάλυση αιτιολογικοί παράγοντες. (α) Υψόμετρο, (β) γωνία κλίσης, (γ) καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, και (δ) απόσταση από οδικό δίκτυο.

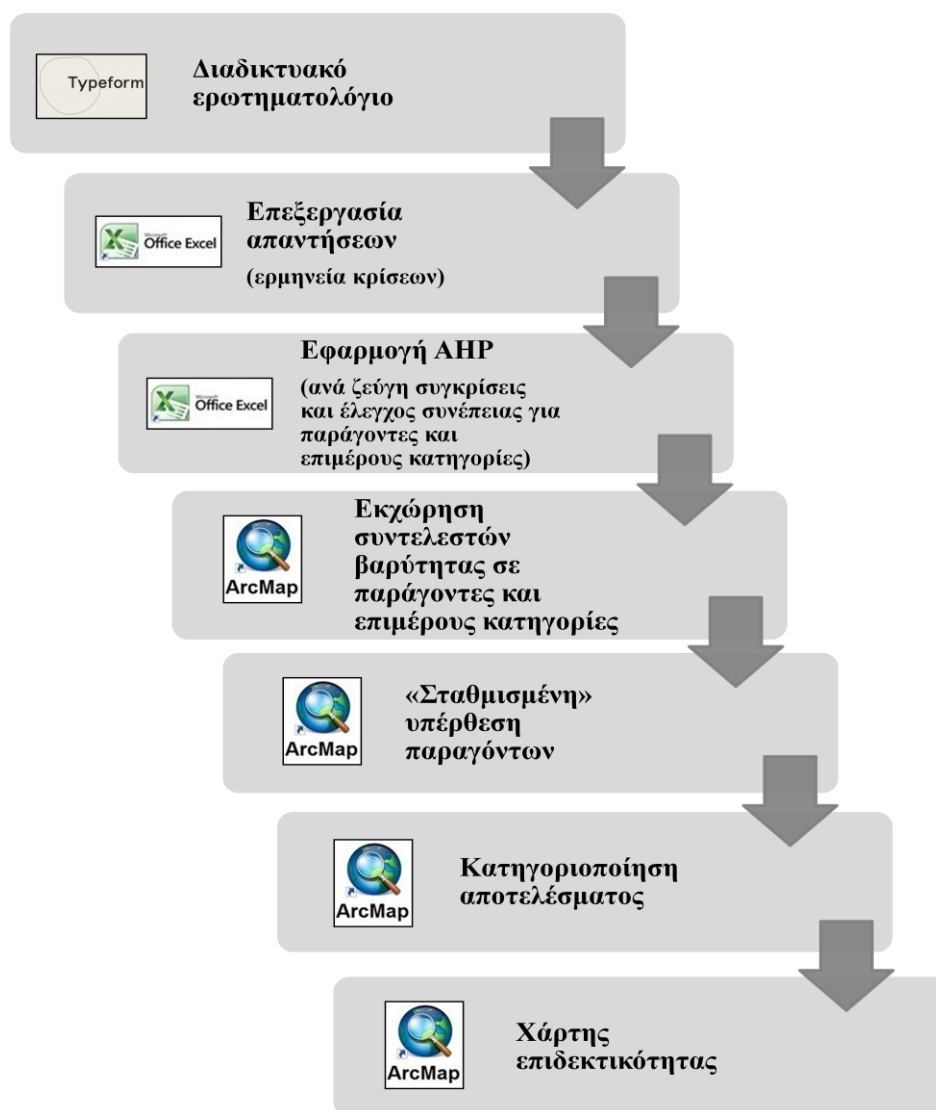


Σχήμα 4.11: (Συνέχεια). (ε) Πυκνότητα ρεμάτων, (στ) βλάστηση (NDVI), και (ζ) γεωλογία.

Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των ακόλουθων μοντέλων εκτίμησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης επιλέχθηκε τελικώς να βασιστεί στην εξέταση και ανάλυση αυτών των επτά αιτιολογικών παραγόντων.

4.1.3.4 Εφαρμογή μοντέλων ανάλυσης

Διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP)



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου AHP.

Ως ποιοτικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην εμπειρία και στις γνώσεις «εμπειρογνομόνων» (ως προς το φαινόμενο των κατολισθήσεων), η εφαρμογή της AHP,

αρχικώς, απαιτούσε την απόκτηση των υποκειμενικών γνώψεων/κρίσεων τους αναφορικά με την ανά ζεύγη σύγκριση των εξεταζόμενων παραγόντων και των αντίστοιχων κατηγοριών τους. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένα διαδικτυακό ερωτηματολόγιο το οποίο στάλθηκε σε διάφορους «εμπειρογνώμονες» ζητώντας τους να εκφράσουν τη γνώμη τους τόσο για την ανά ζεύγη σύγκριση μεταξύ των επτά αιτιολογικών παραγόντων, όσο και για τη συμβολή των κατηγοριών τους στην εκδήλωση του φαινομένου (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ). Η κατασκευή του συγκεκριμένου ερωτηματολογίου (<https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B>) βασίστηκε στο διαδικτυακό εργαλείο “Typeform” (<https://www.typeform.com/>, 23/12/2016) το οποίο ειδικεύεται στο «χτίσιμο» διαδικτυακών ερευνών. Η επεξεργασία, στο λογισμικό Microsoft Office Excel (version 2013), των απαντήσεων των «εμπειρογνομώνων» που ανταποκρίθηκαν (οχτώ στον αριθμό) στο ερωτηματολόγιο κατέστησε δυνατή τη διαμόρφωση των ανά ζεύγη συγκρίσεων (Πίνακας 4.6), καθώς και τον υπολογισμό των (κανονικοποιημένων) συντελεστών βαρύτητας για τους επτά αιτιολογικούς παράγοντες και τις αντίστοιχες κατηγορίες τους. Στη συνέχεια, ακολούθησε ο έλεγχος της συνέπειας των ανά ζεύγη συγκρίσεων μέσω του υπολογισμού του CR (Εξίσωση 12). Η αντίστοιχη τιμή για κάθε μια σύγκριση βρέθηκε να είναι μικρότερη από 0,10 καταδεικνύοντας την ύπαρξη συνέπειας.

Πίνακας 4.6: Ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων και των επιμέρους κατηγοριών τους.

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
[1] Υψόμετρο		1						
[2] Γωνία κλίσης		8	1					
[3] Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης		3	1/7	1				
[4] Απόσταση από οδικό δίκτυο		4	1/5	2	1			
[5] Πυκνότητα ρεμάτων		4	1/5	2	1/2	1		
[6] Βλάστηση (NDVI)		3	1/7	1/2	1/3	1/2	1	
[7] Γεωλογία		7	2	5	3	4	6	1

Πίνακας 4.6: (Συνέχεια).

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Υψόμετρο (μ.)	[1] <276	1						
	[2] 276-600	2	1					
	[3] 601-943	4	2	1				
	[4] 944-1.332	6	4	2	1			
	[5] >1.332	8	6	4	2	1		
Γωνία κλίσης (°)	[1] <7	1						
	[2] 7-15	2	1					
	[3] 16-22	4	3	1				
	[4] 23-32	6	5	3	1			
	[5] >32	8	7	5	3	1		
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	[1] Κοίλη	1						
	[2] Κυρτή	1/3	1					
	[3] Επίπεδη	1/7	1/5	1				
Απόσταση από οδικό δίκτυο (μ.)	[1] <485	1						
	[2] 485-1.153	1/3	1					
	[3] 1.154-1.998	1/5	1/3	1				
	[4] 1.999-3.165	1/7	1/5	1/3	1			
	[5] >3.165	1/8	1/7	1/5	1/3	1		
Πυκνότητα ρεμάτων (χλμ./χλμ ²)	[1] <1.28	1						
	[2] 1,28-2,02	2	1					
	[3] 2,03-2,63	3	2	1				
	[4] 2,64-3,39	4	3	2	1			
	[5] >3,39	6	4	3	2	1		
Βλάστηση (NDVI)	[1] <0,07	1						
	[2] 0,07-0,15	1/2	1					
	[3] 0,16-0,21	1/3	1/2	1				
	[4] 0,22-0,28	1/5	1/3	1/2	1			
	[5] >0,28	1/7	1/5	1/3	1/2	1		

Πίνακας 4.6: (Συνέχεια).

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Γεωλογία	[1] Κορήματα	1						
	[2] Σύγχρονες αποθέσεις	1/3	1					
	[3] Μάργες	1/2	2	1				
	[4] Κροκαλοπαγή	1/5	1/4	1/4	1			
	[5] Ανθρακικά πετρώματα	1/4	1/3	1/3	2	1		
	[6] Φλύσχης	4	6	6	8	7	1	
	[7] Μεταμορφωμένα πετρώματα	1/7	1/5	1/5	1/3	1/4	1/9	1

Μετά από την κατάδειξη της απαιτούμενης συνέπειας στον έλεγχο, σειρά είχε ο υπολογισμός της τιμής επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για όλη την έκταση της περιοχής μελέτης μέσω της «σταθμισμένης» άθροισης/υπέρθεσης των «σταθμισμένων» κατηγοριών των παραγόντων (Εξίσωση 13). Για την ολοκλήρωση της εφαρμογής του μοντέλου, τέλος, ήταν απαραίτητος ο διαχωρισμός του παραγόμενου συνόλου τιμών επιδεκτικότητας σε διακριτές κατηγορίες. Βιβλιογραφικώς, τέσσερις βασισμένες στα ΣΓΠ μέθοδοι ταξινόμησης έχουν χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό. Αυτές είναι: η μέθοδος των «ποσοστημορίων (quantiles)» (Bathrellos et al., 2009; Akgun et al., 2012), η μέθοδος των «ίσων διαστημάτων (equal intervals)» (Oh and Pradhan, 2011; Ramesh et al., 2016), η μέθοδος της «τυπικής απόκλισης» (Ayalew and Yamagishi, 2005; Chalkias et al., 2014a), και η αναφερθείσα παραπάνω μέθοδος των «φυσικών ορίων» (Conforti et al., 2014; Guo et al., 2015; Polykretis et al., 2015; Romer and Ferentinou, 2016). Στη μέθοδο των «ποσοστημορίων» το σύνολο των τιμών διαχωρίζεται μ' έναν τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κάθε κατηγορία να περιέχει τον ίδιο αριθμό τιμών. Στην μέθοδο των «ίσων διαστημάτων», ο διαχωρισμός του συνόλου των τιμών σε κατηγορίες προκύπτει από τη διαίρεση του εύρους των τιμών με τον επιθυμητό αριθμό κατηγοριών. Τελείως διαφορετική είναι η μέθοδος της «τυπικής απόκλισης» η οποία χρησιμοποιεί τη μέση τιμή για τη δημιουργία των ορίων των κατηγοριών, προσθέτοντας ή αφαιρώντας μια τυπική απόκλιση τη φορά (Ayalew and Yamagishi, 2005). Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμφανιζόμενη στο ιστόγραμμα

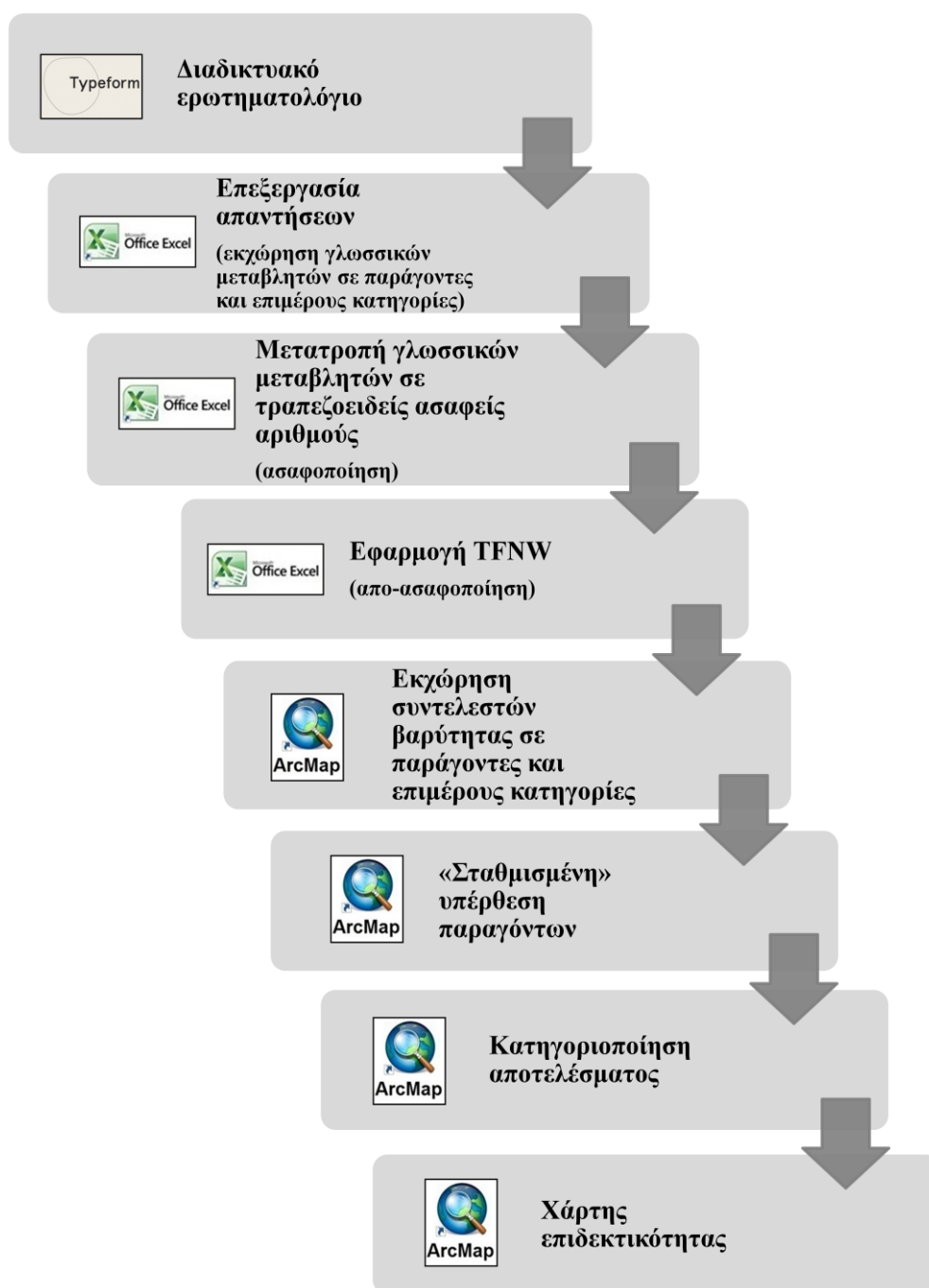
κατανομή των τιμών (Akgun et al., 2012). Πιο συγκεκριμένα, εάν η κατανομή των τιμών των δεδομένων τείνει να είναι κανονική ή ομοιόμορφη, οι μέθοδοι της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων» είναι αυτές που προτιμώνται. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις ύπαρξης μεγάλων διαφορών στις τιμές των δεδομένων (ακανόνιστη κατανομή), η χρήση των μεθόδων των «φυσικών ορίων» και των «ποσοστημορίων» ενδείκνυται.

Στην παρούσα διατριβή, λαμβάνοντας υπόψη την ακανόνιστη κατανομή των παραγόμενων τιμών επιδεκτικότητας, επιλέχθηκε ο διαχωρισμός τους σε πέντε κατηγορίες («Πολύ Χαμηλή», «Χαμηλή», «Μέτρια», «Υψηλή», και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα), όπως αυτές προέκυψαν από τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων». Μ' αυτό τον τρόπο, δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος χάρτης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης.

Τραπεζοειδής ασαφής αριθμητική στάθμιση (TFNW)

Το προαναφερθέν διαδικτυακό ερωτηματολόγιο σχεδιάστηκε έτσι ώστε η χρησιμότητα του να ωφελήσει την εφαρμογή όχι μόνο του μοντέλου AHP, αλλά και ενός άλλου ποιοτικού μοντέλου, του TFNW. Αποδίδοντας, συνεπώς, τον ίδιο βαθμό σημαντικότητας (Εξίσωση 14) σε κάθε έναν από τους ανταποκριθέντες στο ερωτηματολόγιο «εμπειρογνώμονες» (ομοιογενής ομάδα) και επεξεργάζοντας εκ νέου τις απαντήσεις τους στο λογισμικό Microsoft Office Excel, εκχωρήθηκαν οι απαιτούμενες γλωσσικές μεταβλητές σε κάθε έναν παράγοντα και παραγοντική κατηγορία με στόχο την ανάδειξη της εκτιμώμενης επίδρασής τους στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Στη συνέχεια, ερμηνεύοντας τις γλωσσικές μεταβλητές στους αντίστοιχους τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς, και εκτελώντας τις Εξισώσεις (15), (16) και (17), υπολογίστηκαν οι (κανονικοποιημένοι) συντελεστές βαρύτητας των επτά αιτιολογικών παραγόντων και των κατηγοριών τους.

Η αξιοποίηση των παραγόμενων συντελεστών βαρύτητας στην υλοποίηση της «σταθμισμένης» άθροισης/υπέρθεσης των «σταθμισμένων» κατηγοριών των παραγόντων (Εξίσωση 13) είχε ως αποτέλεσμα την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Ο διαχωρισμός του παραγόμενου αποτελέσματος επιδεκτικότητας σε πέντε κατηγορίες, με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», αποτέλεσε το τελευταίο βήμα της εφαρμογής του μοντέλου TFNW.

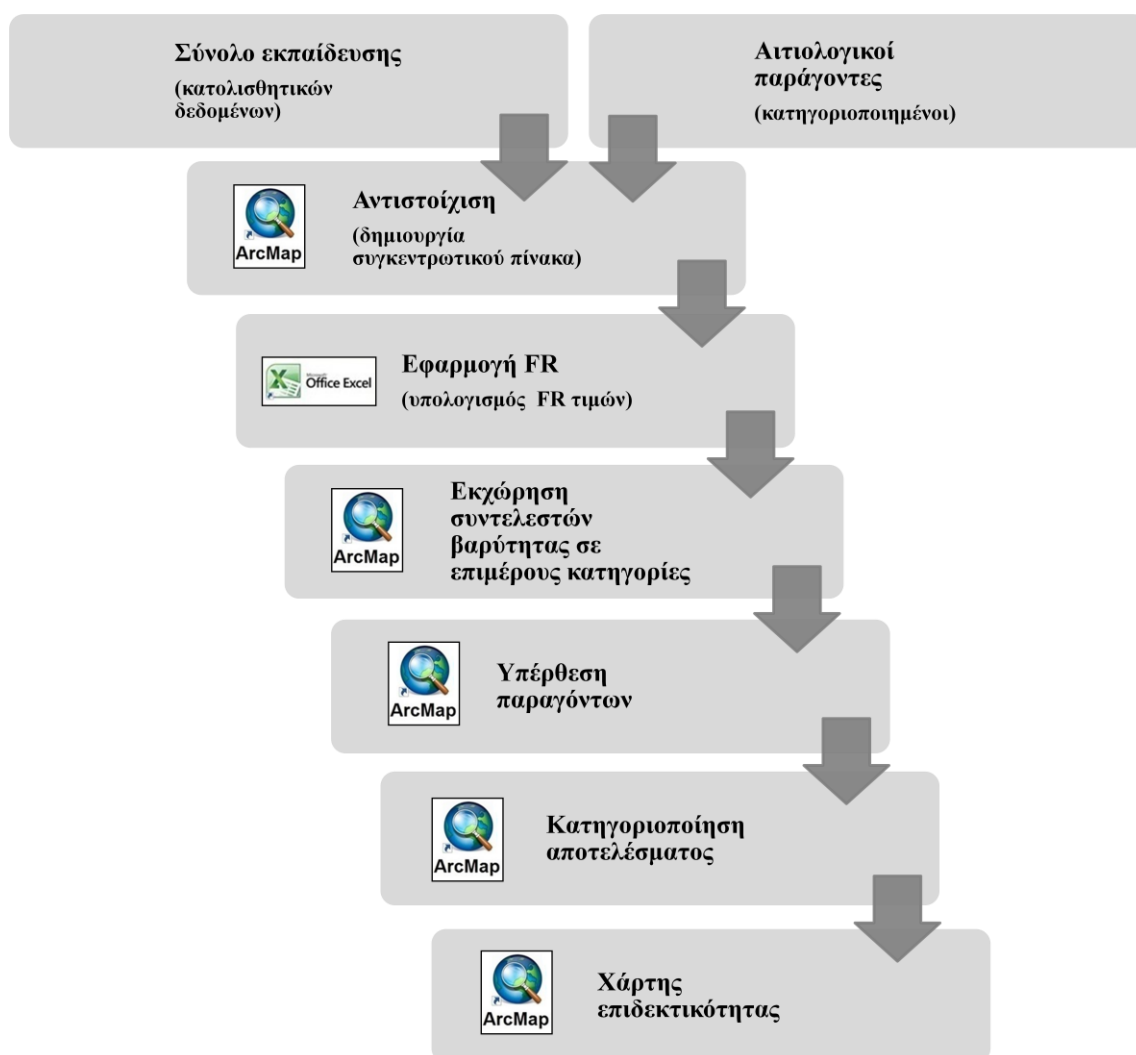


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου TFNW.

Λόγος συχνότητας (FR)

Για την εφαρμογή του μοντέλου FR, διενεργήθηκε, αρχικώς, η αντιστοίχιση των 721 κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των επτά (κατηγοριοποιημένων) αιτιολογικών παραγόντων που προκρίθηκαν από το προαναφερθέν στάδιο επιλογής. Αποτέλεσμα αυτού του βήματος ήταν ένας συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος

για κάθε εγγραφή (κατολισθητικό σημείο) παρέθετε τις αντίστοιχες κατηγορίες παραγόντων. Ο παραγόμενος πίνακας, στη συνέχεια, εισήχθηκε στο λογισμικό Microsoft Office Excel. Έπειτα, μέσα από την αξιοποίηση των λειτουργιών του συγκεκριμένου λογισμικού, ήταν εφικτός ο προσδιορισμός των παραμέτρων που απαιτούνταν για τον υπολογισμό των FR τιμών. Οι παράμετροι αυτοί ήταν το πλήθος των ψηφίδων κατολίσθησης και το συνολικό πλήθος των ψηφίδων για όλες τις κατηγορίες των επτά εξεταζόμενων παραγόντων (Εξίσωση 18). Επιπλέον, προκειμένου να καταδειχθεί η σημαντικότητα του κάθε παράγοντα ως προς το βαθμό επίδρασης του στην εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων, υπολογίστηκαν για κάθε έναν απ' αυτούς το εύρος και η τυπική απόκλιση τους με βάση τις παρουσιαζόμενες FR τιμές τους. Το εύρος (range) συνιστά τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής, ενώ η τυπική απόκλιση (standard deviation) μετρά την εξάπλωση των τιμών γύρω από τη μέση τιμή.

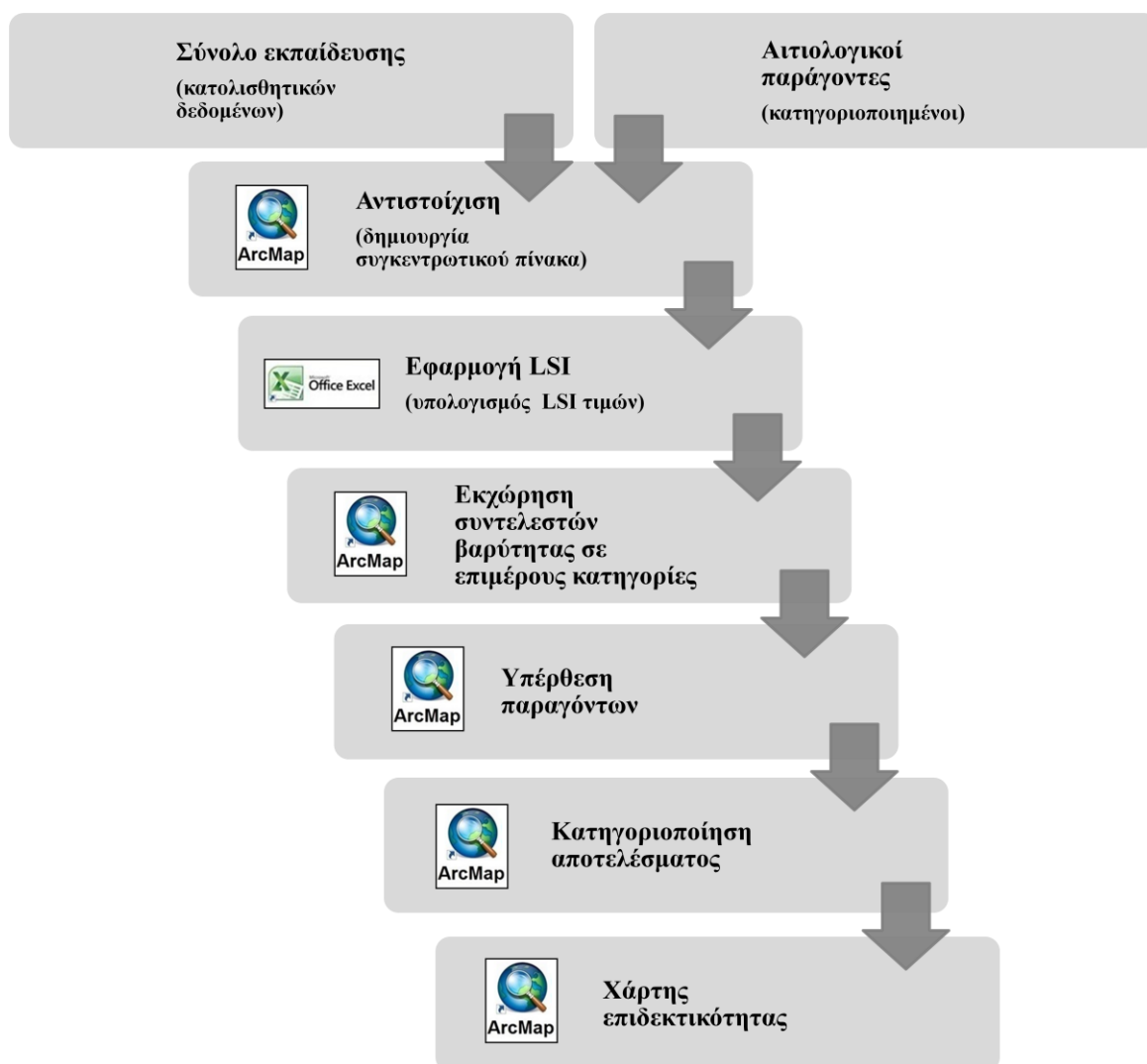


Σχήμα 4.14: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου FR.

Μετά από τον υπολογισμό των FR τιμών, σειρά είχε η εκχώρησή τους (ως συντελεστές βαρύτητας) στις αντίστοιχες κατηγορίες των παραγόντων. Ακολούθως, μέσω της άθροισης/υπέρθωσης των «σταθμισμένων» πλέον κατηγοριών των παραγόντων (Εξίσωση 19), εκτιμήθηκε η επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίσθησης για όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας, τέλος, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

Δείκτης επιδεκτικότητας κατολίσθησεων (LSI)

Λόγω ενός πανομοιότυπου με το μοντέλο FR τρόπου εφαρμογής, το μοντέλο LSI απαιτούσε την υλοποίηση των ίδιων ακριβώς βημάτων. Δηλαδή, πιο αναλυτικά:



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου LSI.

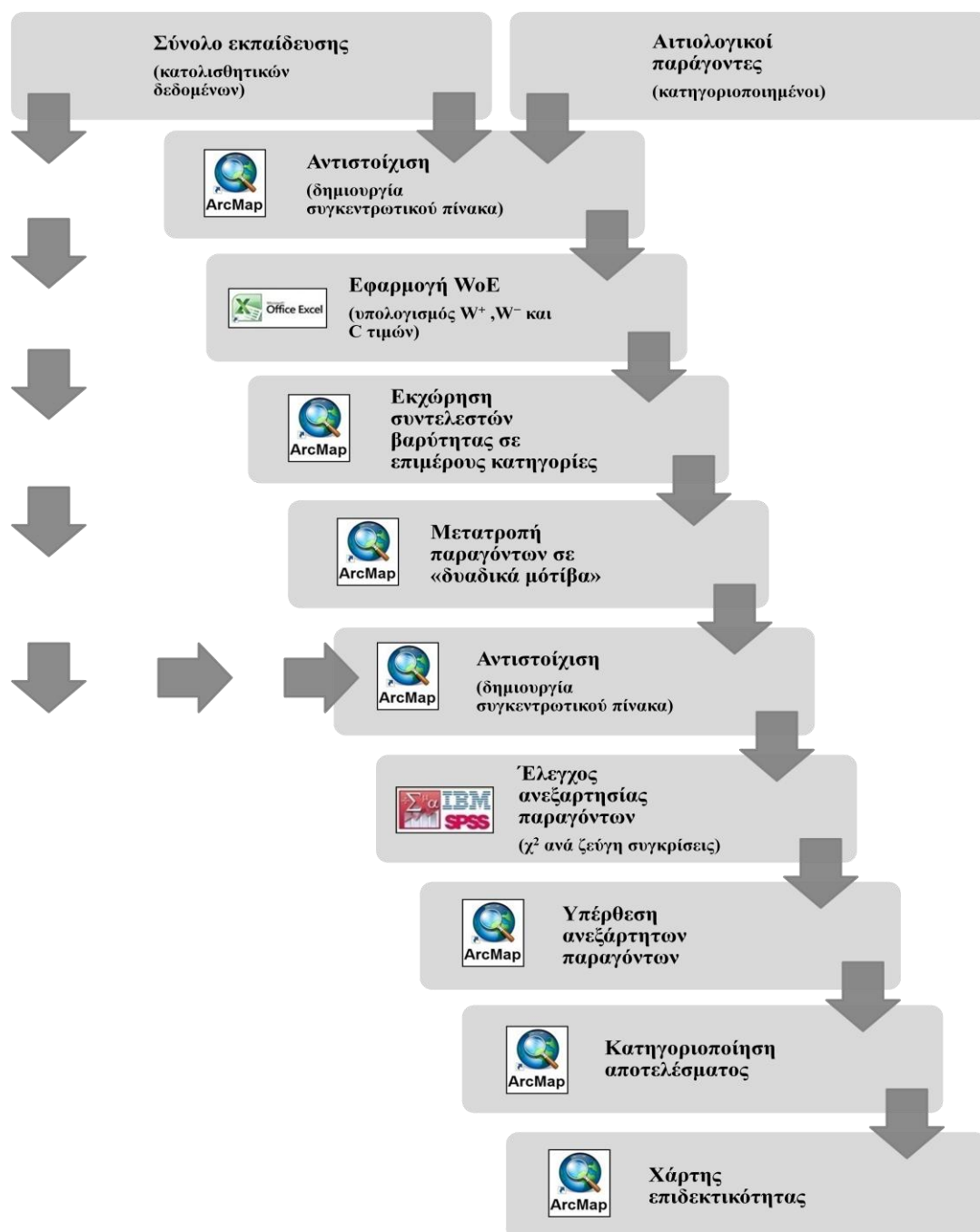
- (1) Την αντιστοίχιση των 721 κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των επτά εξεταζόμενων παραγόντων.
- (2) Την εισαγωγή του παραγόμενου συγκεντρωτικού πίνακα στο λογισμικό Microsoft Office Excel, και την αξιοποίηση των εξαγόμενων παραμέτρων πλήθους των ψηφίδων (ή έκτασης) για τον υπολογισμό, αυτή τη φορά, των LSI τιμών για όλες τις κατηγορίες των επτά παραγόντων (Εξίσωση 20).
- (3) Την κατάδειξη της σημαντικότητας των παραγόντων μέσω του, βασισμένου στις κατηγορικές LSI τιμές, υπολογισμού των απαιτούμενων στατιστικών μέτρων (εύρος και τυπική απόκλιση).
- (4) Την εκχώρηση των LSI τιμών στις αντίστοιχες κατηγορίες των παραγόντων (κατηγορικοί συντελεστές βαρύτητας).
- (5) Την άθροιση/υπέρθωση των «σταθμισμένων» κατηγοριών των παραγόντων (Εξίσωση 21) για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης.
- (6) Τον διαχωρισμό του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

Βάρος της ένδειξης (WoE)

Για την εφαρμογή του WoE, διενεργήθηκε, αρχικώς, η αντιστοίχιση των 721 κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των επτά αιτιολογικών παραγόντων. Ο παραγόμενος συγκεντρωτικός πίνακας, στη συνέχεια, εισήχθη στο λογισμικό Microsoft Office Excel. Έπειτα, αξιοποιώντας τις λειτουργίες του συγκεκριμένου λογισμικού, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι πλήθους των ψηφίδων που χρειαζόνταν στον υπολογισμό του θετικού (W^+) και του αρνητικού (W^-) συντελεστή βαρύτητας για κάθε μια κατηγορία των εξεταζόμενων παραγόντων (Εξισώσεις 25 και 26). Με δεδομένη την απόκτηση των τιμών γι' αυτούς του δύο τύπους συντελεστών βαρύτητας, ακολούθησε ο υπολογισμός της τιμής αντίθεσης (C) για κάθε μια κατηγορία παραγόντων (Εξίσωση 27). Και σ' αυτήν την περίπτωση, προκειμένου να καταδειχθεί η σημαντικότητα του κάθε παράγοντα ως προς το βαθμό επίδρασης του στην εκδήλωση του φαινομένου των κατολισθήσεων, εκτιμήθηκαν για κάθε έναν απ' αυτούς το εύρος και η τυπική απόκλιση τους με βάση τις παρουσιαζόμενες C

τιμές τους. Τον υπολογισμό των C τιμών διαδέχθηκε η εκχώρησή τους (ως συντελεστές βαρύτητας) στις αντίστοιχες κατηγορίες των παραγόντων.

Μετά από την εκχώρηση των συντελεστών βαρύτητας στις κατηγορίες, σειρά είχε ο έλεγχος ανεξαρτησίας των παραγόντων, με στόχο την επιλογή εκείνων που τελικώς θα συμμετείχαν στη δημιουργία του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας. Στα πλαίσια αυτού



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου WoE.

του ελέγχου, αποδίδοντας την τιμή 0 στις κατηγορίες με αρνητικές C τιμές (απουσία κατολίσθησης) και την τιμή 1 στις κατηγορίες με θετικές C τιμές (παρουσία κατολίσθησης), οι παράγοντες μεταφέρθηκαν σε μια μορφή «δυαδικού μοτίβου». Ακολούθως, ο συγκεντρωτικός πίνακας που προέκυψε από την αντιστοίχιση των κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις παραγόμενες δυαδικές κατηγορίες των παραγόντων, εισήχθηκε στο λογισμικό SPSS. Στο λογισμικό αυτό, υλοποιήθηκε ο έλεγχος ανεξαρτησίας μέσω της εκτέλεσης βασισμένων στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεων μεταξύ των παραγόντων, με 1 βαθμό ελευθερίας και 99% επίπεδο εμπιστοσύνης. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων εμφανίζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 4.7: Βασισμένες στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων για τον έλεγχο ανεξαρτησίας τους.

Παράγοντας	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
[1] Υψόμετρο		2,97	2,73	1,77	0,42	4,39	15,95
[2] Γωνία κλίσης			5,86	56,70	1,03	8,69	113,65
[3] Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης				0,54	0,88	0,09	0,18
[4] Απόσταση από οδικό δίκτυο					0,39	16,60	94,07
[5] Πυκνότητα ρεμάτων						1,57	0,62
[6] Βλάστηση (NDVI)							15,88
[7] Γεωλογία							

*Με πλάγια μορφή οι εκτιμώμενες τιμές του χ^2 που υποδεικνύουν μια ανεξαρτησία μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων των συγκεκριμένων ζευγών.

Λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό ελευθερίας και το επίπεδο εμπιστοσύνης του διενεργηθέντος ελέγχου, οι εκτιμώμενες τιμές του χ^2 που είναι μεγαλύτερες από τη θεωρητική τιμή 6,635 (Πίνακας 3.4), υποδεικνύουν ότι οι παράγοντες των συγκεκριμένων ζευγών δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητοι, και συνεπώς πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο αποκλεισμού τους από τη συνέχεια της εφαρμογής του μοντέλου. Από την εξέταση αυτού του ενδεχομένου προέκυψαν τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί παραγόντων (Πίνακας 4.8). Δεδομένης της συμμετοχής σ' αυτόν του μέγιστου δυνατού αριθμού παραγόντων (τέσσερις) – τρεις από τους οποίους (γωνία κλίσης,

πυκνότητα ρεμάτων, υψόμετρο) συγκαταλέγονται στους ιδιαίτερος σημαντικούς (με βάση την τυπική απόκλιση των C τιμών τους) – ο πρώτος συνδυασμός παραγόντων ήταν αυτός που τελικώς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για την υπό μελέτη περιοχή.

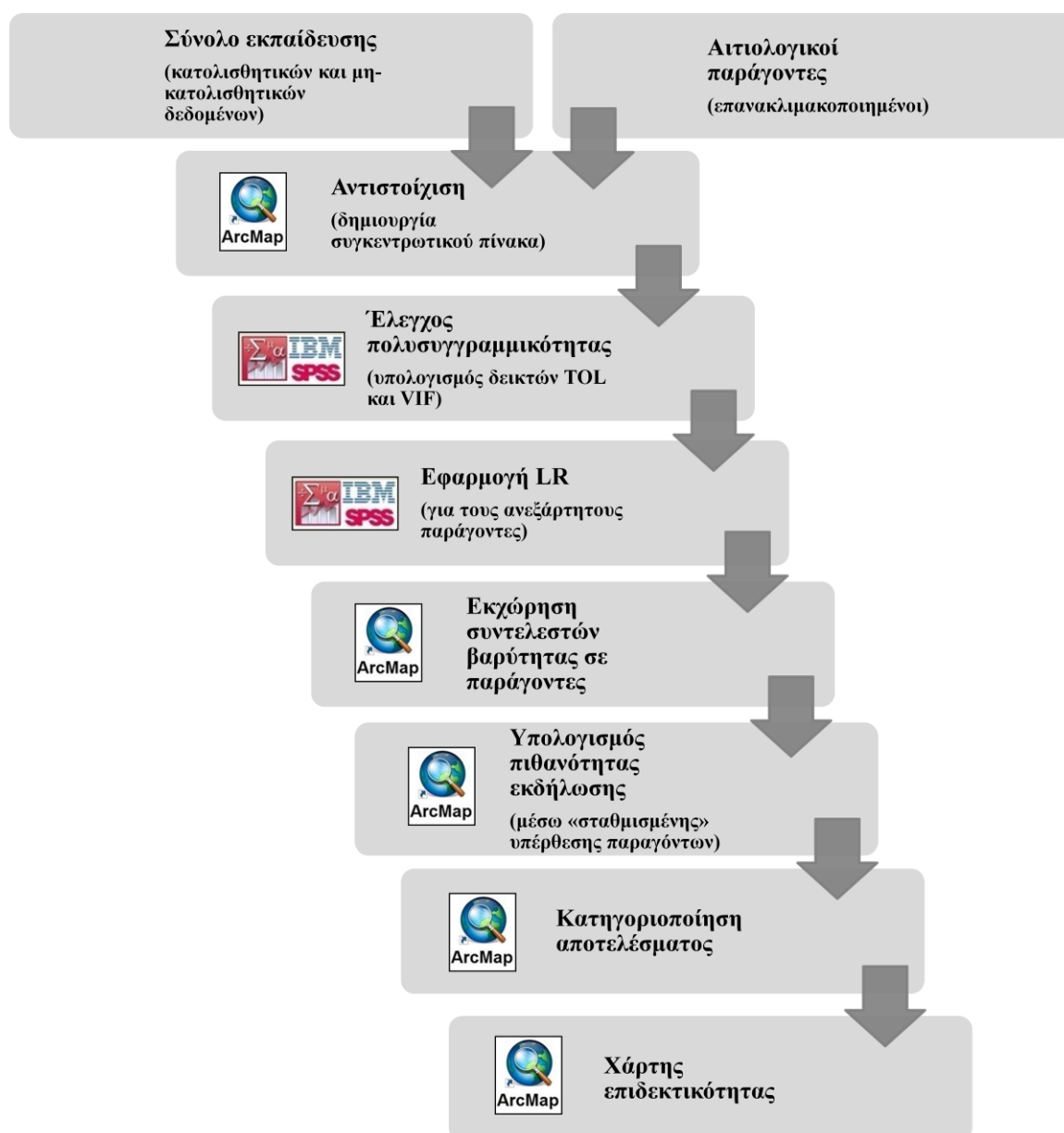
Πίνακας 4.8: Δυνατοί συνδυασμοί αιτιολογικών παραγόντων.

Τύπος παράγοντα	Συνδυασμός παραγόντων			
	1	2	3	4
Τοπογραφία	Υψόμετρο		Υψόμετρο	Υψόμετρο
	Γωνία κλίσης			
	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης
Υδρολογία	Πυκνότητα ρεμάτων	Πυκνότητα ρεμάτων	Πυκνότητα ρεμάτων	Πυκνότητα ρεμάτων
Γεωλογία		Γεωλογία		
Βλάστηση			Βλάστηση	
Ανθρώπινη παρέμβαση				Απόσταση από οδικό δίκτυο

Το επόμενο βήμα, συνεπώς, ήταν η δημιουργία του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας μέσω της άθροισης/υπέρθωσης των «σταθμισμένων» (με τις C τιμές) κατηγοριών των τεσσάρων ανεξάρτητων παραγόντων (Εξίσωση 29). Το παραγόμενο αποτέλεσμα, τέλος, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

Λογιστική παλινδρόμηση (LR)

Η εφαρμογή του μοντέλου LR απαιτούσε την υλοποίηση των ίδιων ακριβώς βημάτων με την αντίστοιχη βηματική, στο στάδιο επιλογής των τελικώς χρησιμοποιούμενων παραγόντων. Οι μόνες διαφορές μεταξύ των δύο μεθοδολογιών εντοπίζονταν στη χρήση ενός διαφορετικού, γι' αυτήν την περίπτωση, τύπου παλινδρόμησης, και στην προσθήκη των απαραίτητων βημάτων για τη δημιουργία και κατηγοριοποίηση του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Δηλαδή, πιο αναλυτικά, τα βήματα για την εφαρμογή του μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης ήταν τα εξής:



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου LR.

- (1) Αντιστοίχιση των 1.442 σημείων του συνόλου εκπαίδευσης (εξαρτημένη μεταβλητή, εκφρασμένη σε τιμές 0 και 1 για την απουσία και παρουσία κατολίσθησης) με τις τιμές των επτά επανακλιμακοποιημένων παραγόντων (ανεξάρτητες μεταβλητές), και εισαγωγή των παραγόμενων συγκεντρωτικών πινάκων στο λογισμικό SPSS.
- (2) Έλεγχος για το ενδεχόμενο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών, μέσω του υπολογισμού των δεικτών TOL και VIF.

Πίνακας 4.9: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.

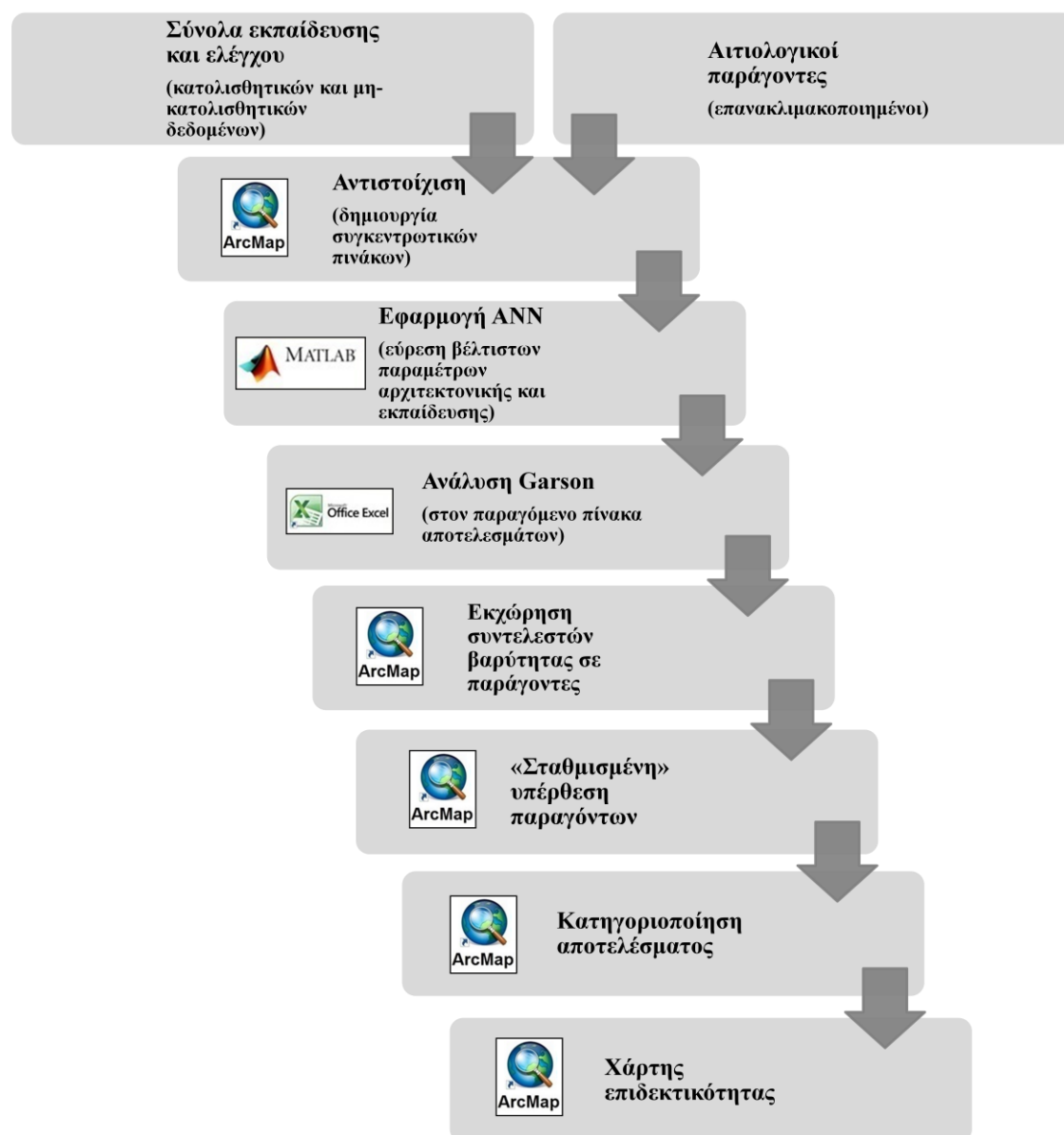
Παράγοντας	Δείκτης TOL	Δείκτης VIF
Υψόμετρο	0,9	1,1
Γωνία κλίσης	0,6	1,5
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	1,0	1,0
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,9	1,1
Πυκνότητα ρεμάτων	0,9	1,1
Βλάστηση (NDVI)	0,9	1,1
Γεωλογία	0,7	1,5

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα, οι αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερες από 0,5 για το δείκτη TOL και μικρότερες από 2 για το δείκτη VIF, καταδεικνύοντας ότι δεν υφίσταται θέμα πολυσυγγραμμικότητας για κανέναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες.

- (3) Εκτέλεση μιας βασισμένης στο λόγο πιθανοφάνειας απλής λογιστικής παλινδρόμησης. Σε αντίθεση με τη βηματική, ο συγκεκριμένος τύπος παλινδρόμησης περιλάμβανε τον υπολογισμό των στατιστικών μέτρων απόδοσης του μοντέλου για την ταυτόχρονη είσοδο όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών (τερματισμός παλινδρόμησης στο 1^ο στάδιο), και την εκχώρηση σε κάθε μια απ' αυτές ενός συντελεστή βαρύτητας.
- (4) «Σταθμισμένη» άθροιση/υπέρθωση των επανακλιμακοποιημένων παραγόντων με βάση τους προκύπτοντες συντελεστές και την Εξίσωση (31).
- (5) Δημιουργία του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας, μέσω του υπολογισμού της πιθανότητας εκδήλωσης ενός κατολισθητικού γεγονότος. Ο υπολογισμός αυτός επετεύχθη με την εισαγωγή του παραγόμενου, από το προηγούμενο βήμα, αποτελέσματος στην Εξίσωση (30).

- (6) Διαχωρισμός του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

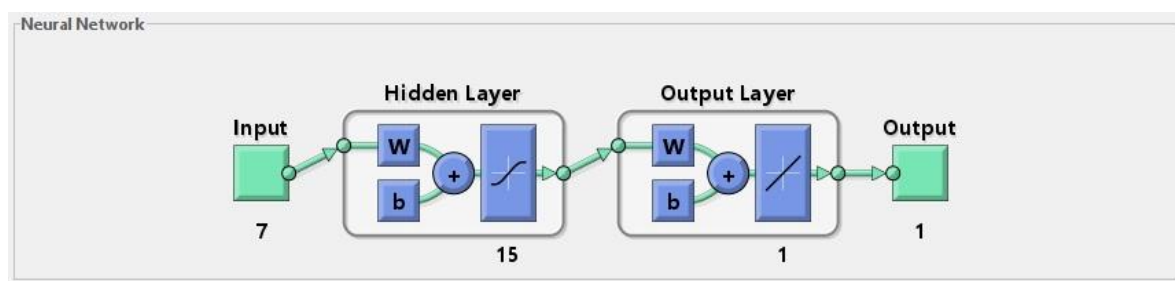
Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN)



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου ANN.

Όπως στα προαναφερθέντα μοντέλα παλινδρόμησης, έτσι και στην περίπτωση εφαρμογής του μοντέλου ANN, η αντιστοίχιση των 1.442 σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τους εξεταζόμενους αιτιολογικούς παράγοντες (σε επανακλιμακοποιημένη μορφή) αποτελούσε το πρώτο βήμα. Στη συνέχεια, ένα εμπροσθοτροφοδοτούμενο πολυεπίπεδο δίκτυο

αναπτύχθηκε και εκπαιδεύτηκε μέσω της συγγραφής ενός εξειδικευμένου τμήματος υπολογιστικού κώδικα (script) στο λογισμικό MATLAB (version R2017b) (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ). Το δίκτυο αυτό, ακολούθως, «τροφοδοτήθηκε» με τους παραγόμενους από την αντιστοίχιση συγκεντρωτικούς πίνακες οι οποίοι διαδραμάτισαν το ρόλο των εκπαιδευτικών μοτίβων καθώς περιείχαν τόσο τις εισόδους (τιμές επανακλιμακοποιημένων παραγόντων), όσο και τις συναφείς επιδιωκόμενες εξόδους (τιμές 0 και 1 για την απουσία και παρουσία κατολίσθησης). Η αρχιτεκτονική του δικτύου αποτελούταν από ένα επίπεδο εισόδου, ένα κρυμμένο επίπεδο, και ένα επίπεδο εξόδου. Το επίπεδο εισόδου περιείχε 7 κόμβους που αντιπροσώπευαν τους επτά αιτιολογικούς παράγοντες. Από την άλλη μεριά, το επίπεδο εξόδου περιλάμβανε έναν μόνο κόμβο ο οποίος παρήγαγε το τελικό αποτέλεσμα του δικτύου για την απουσία ή παρουσία κατολίσθησης. Για το κρυμμένο επίπεδο, ο βέλτιστος αριθμός κόμβων εντοπίστηκε μέσω της διαδικασίας «δοκιμής και σφάλματος». Ως εκ τούτου, ένας σημαντικός αριθμός αρχιτεκτονικών του δικτύου ελέγχθηκε μεταβάλλοντας κάθε φορά τον αριθμό των κόμβων στο αντίστοιχο επίπεδο. Αυτό είχε αποτέλεσμα την ανάδειξη τελικώς ενός αριθμού 15 κρυμμένων κόμβων ως τη βέλτιστη επιλογή. Για τους συγκεκριμένους κόμβους, ως συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκε η υπερβολική εφαπτομένη (Εξίσωση 46), ενώ για τους κόμβους του επιπέδου εξόδου η γραμμική (Εξίσωση 42).



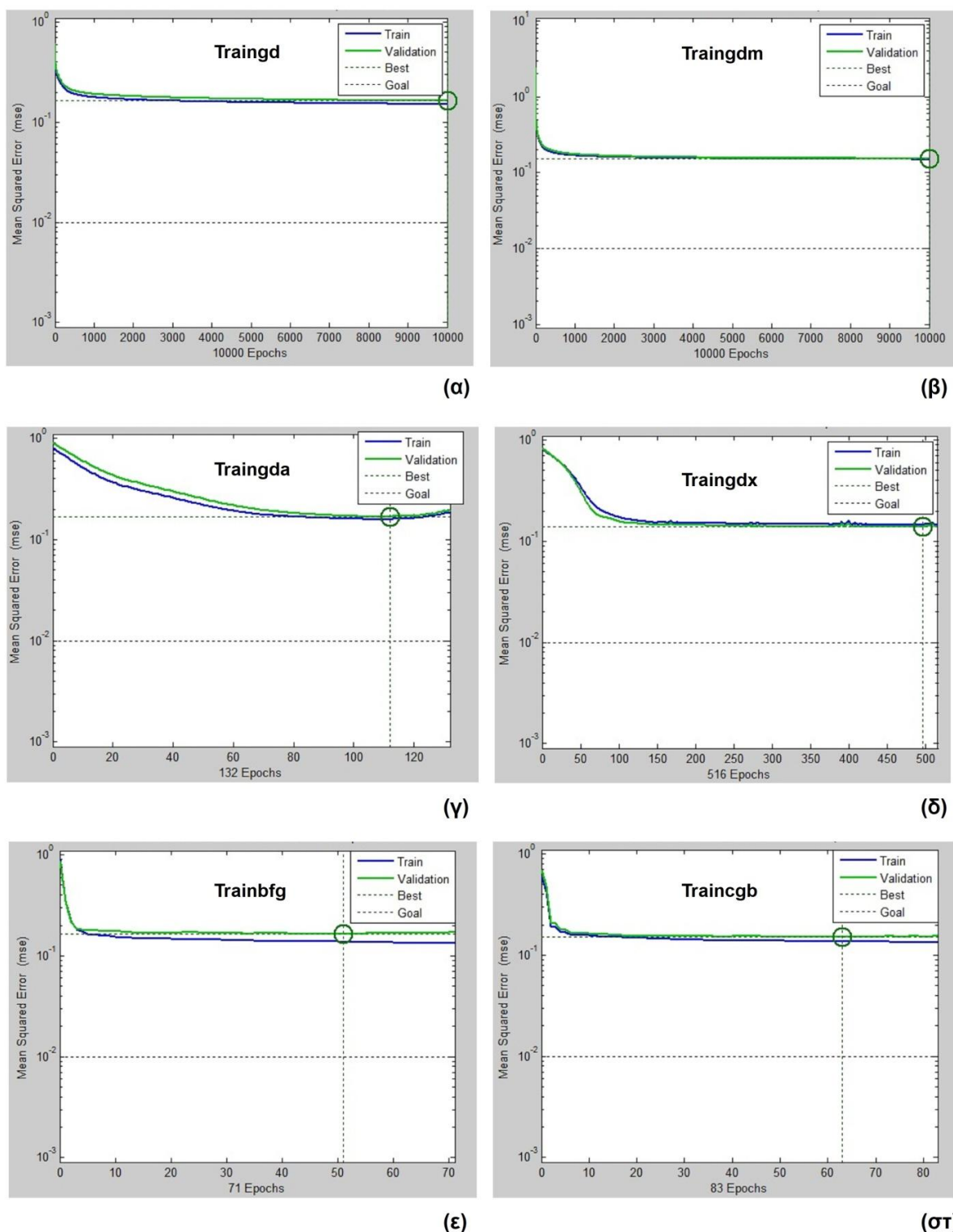
Σχήμα 4.19: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος δικτύου.

Για την εκπαίδευση του διαμορφωμένου δικτύου, το 80% (1.154 εγγραφές πίνακα) των «τροφοδοτημένων» σ' αυτό δεδομένων (αρχικό σύνολο εκπαίδευσης) επιλέχθηκε ν' αποτελέσει το (τελικό) σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% (288 εγγραφές πίνακα) το σύνολο ελέγχου. Όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το σκεπτικό χρήσης του συνόλου ελέγχου βασίζεται στην ικανότητά του να καταδεικνύει τη στιγμή (στην προκειμένη περίπτωση, την επανάληψη/epoch) κατά την οποία είναι εφικτή η απόκτηση ενός «βέλτιστου», ανεπηρέαστου από το πρόβλημα της υπερ-εκπαίδευσης, δικτύου. Ο αλγόριθμος οπισθόδρομης

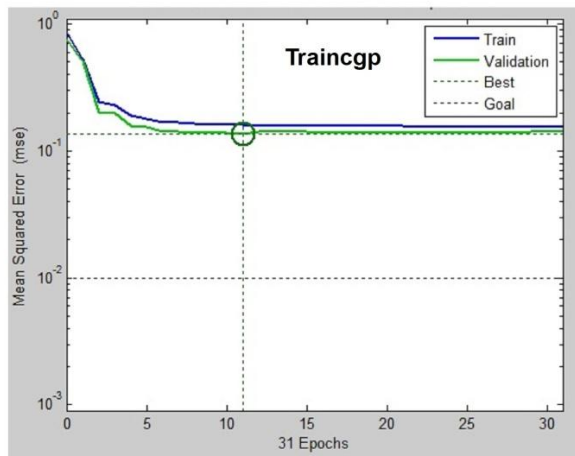
διάδοσης χρησιμοποιήθηκε για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των επιδιωκόμενων και των εκτιμώμενων εξόδων. Σημαντικοί παράμετροι αυτού του αλγορίθμου, όπως ο ρυθμός εκμάθησης (0,01) και η ορμή (0,9), προσδιορίστηκαν μέσω μιας εκ νέου εκτέλεσης της διαδικασίας «δοκιμής και σφάλματος». Η ανάθεση των αρχικών συντελεστών βαρύτητας στους συνδέσμους του δικτύου κρίθηκε προτιμότερο να υλοποιηθεί μ' έναν τυχαίο τρόπο από το ίδιο το λογισμικό, ενώ η τιμή σφάλματος (MSE) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ως κριτήρια διακοπής της εκπαιδευτικής διαδικασίας ορίστηκαν σε 0,01 και 10.000, αντιστοίχως. Έπειτα, προκειμένου να εντοπιστεί η εκδοχή του δικτύου με τη βέλτιστη απόδοση, ένας αριθμός παραλλαγών του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης – όπως αυτές παρέχονταν από το λογισμικό MATLAB – εξετάστηκαν.

Πίνακας 4.10: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης της βέλτιστης παραλλαγής του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης.

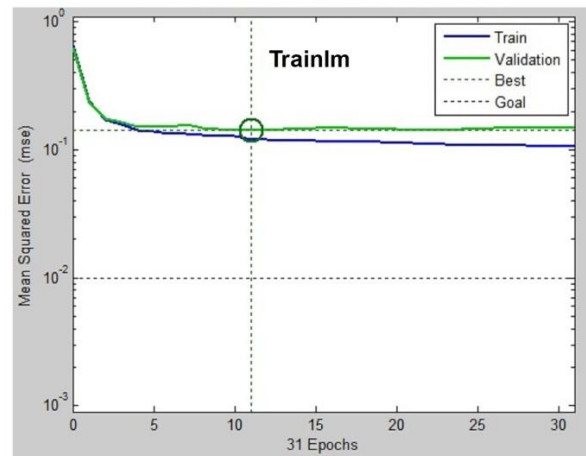
Ονομασία	Παραλλαγή αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	Επανάληψη «βέλτιστου» μοντέλου (πριν την έναρξη υπερ-εκπαίδευσης)	Σφάλμα (MSE) στο σύνολο εκπαίδευσης	Σφάλμα (MSE) στο σύνολο ελέγχου
Traingd	Gradient descent back-propagation	10.000	–	0,151	0,163
Traingdm	Gradient descent with momentum back-propagation	10.000	–	0,150	0,161
Traingda	Gradient descent with adaptive learning rule back-propagation	10.000	112	0,157	0,168
Traingdx	Gradient descent with momentum and adaptive learning rule back-propagation	10.000	496	0,145	0,138
Trainbfg	BFGS Algorithm	10.000	51	0,138	0,163
Traincgb	Powell-Beale Restarts	10.000	63	0,136	0,150
Traincgp	Polak-Ribière Update	10.000	11	0,160	0,139
Trainlm	Levenberg-Marquardt	10.000	11	0,121	0,141
Trainrp	Resilient Backpropagation	10.000	35	0,154	0,154
Trainscg	Scaled Conjugate Gradient	10.000	43	0,146	0,155



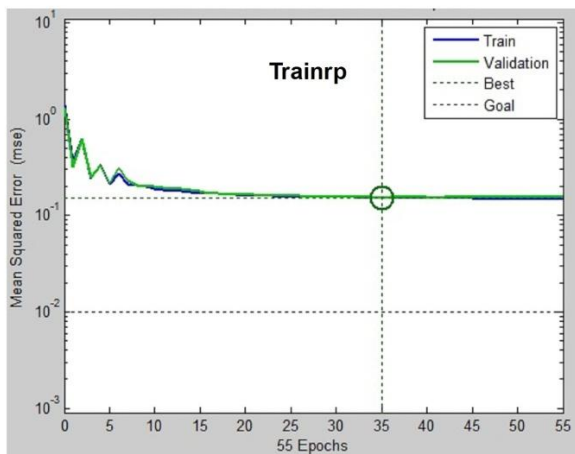
Σχήμα 4.20: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων (epochs) για τις διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης. (α) Traingd, (β) Traingdm, (γ) Traingda, (δ) Traingdx, (ε) Trainbfg, και (στ) Traincgb.



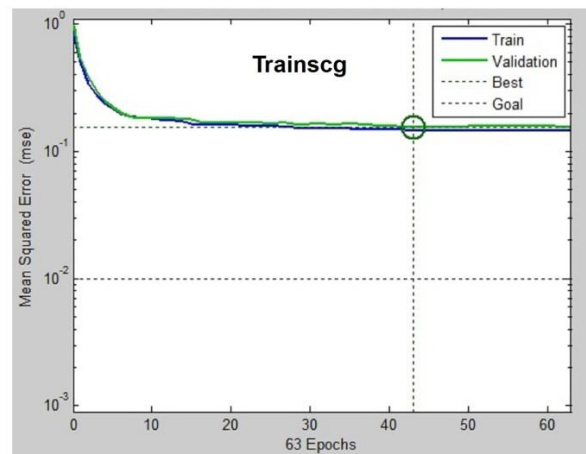
(ζ)



(η)



(θ)



(ι)

Σχήμα 4.20: (Συνέχεια). (ζ) Traincgp, (η) Trainlm, (θ) Trainrp, και (ι) Trainscg.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.10, η παραλλαγή “Gradient descent with momentum and adaptive learning rule back-propagation (Traingdx)” παρουσιάζει τη χαμηλότερη MSE τιμή στο σύνολο ελέγχου. Αν και το ίδιο δε συμβαίνει με την MSE τιμή της στο σύνολο εκπαίδευσης, ωστόσο η πολύ μικρή διαφορά (της τάξης του 0,007) που παρατηρείται μεταξύ αυτής και της αντίστοιχης τιμής στο σύνολο ελέγχου, μαρτυράει ότι το εκπαιδευμένο, με τη συγκεκριμένη παραλλαγή, δίκτυο αποδίδει καλύτερα. Συνεπώς, η παραλλαγή “Gradient descent with momentum and adaptive learning rule backpropagation (Traingdx)” μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον βέλτιστη επιλογή.

Η ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας του «βέλτιστου» δικτύου είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός πίνακα ο οποίος περιείχε τους τελικούς συντελεστές βαρύτητας των συνδέσμων του. Μέσα από τη διενέργεια μιας εξειδικευμένης ανάλυσης στους παραγόμενους συνδετικούς συντελεστές ήταν δυνατός ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας για τις μεταβλητές εισόδου. Η ανάλυση αυτή προτάθηκε από τον Garson (1991) και συνιστά τη, για κάθε κόμβο, διαμέριση των συντελεστών βαρύτητας του κρυμμένου επιπέδου προς το επίπεδο εξόδου στα αντίστοιχα συστατικά τα οποία συνδέονται με κάθε μεταβλητή εισόδου. Έστω, λοιπόν, ένα εμπροσθοτροφοδοτούμενο δίκτυο μ' ένα κρυμμένο επίπεδο, όπου w_{jk} αναπαριστά τον παραγόμενο συντελεστή βαρύτητας από το επίπεδο εισόδου στο κρυμμένο επίπεδο για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από το κρυμμένο επίπεδο στο επίπεδο εξόδου και να παράξει το w_{ij} . Σ' αυτήν την περίπτωση, η ανάλυση της διαμέρισης των βαρών περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- (1) Για κάθε κόμβο του κρυμμένου επιπέδου j , πολλαπλασιάζεται η απόλυτη τιμή του συντελεστή βαρύτητας κρυμμένου επιπέδου-επιπέδου εξόδου (w_{ij}) με την απόλυτη τιμή του συντελεστή βαρύτητας κρυμμένου επιπέδου-επιπέδου εισόδου (w_{jk}). Αυτό το βήμα εφαρμόζεται για κάθε μεταβλητή εισόδου k . Προκύπτει ένα μητρώο (P_{jk}) από το γινόμενο των δύο μητρώων των συντελεστών βαρύτητας:

$$P_{jk} = \text{abs}(w_{jk} \times w_{ik}) \quad (61)$$

- (2) Διαιρείται το μητρώο P_{jk} με το άθροισμα του συνόλου των μεταβλητών εισόδου έτσι ώστε, για κάθε κόμβο, να προκύψει το:

$$Q_{jk} = \frac{P_{jk}}{\sum P_{jk}} \quad (62)$$

- (3) Για κάθε κόμβο εισόδου, υπολογίζεται το S_k που προκύπτει από το άθροισμα του Q_{jk} τιμών:

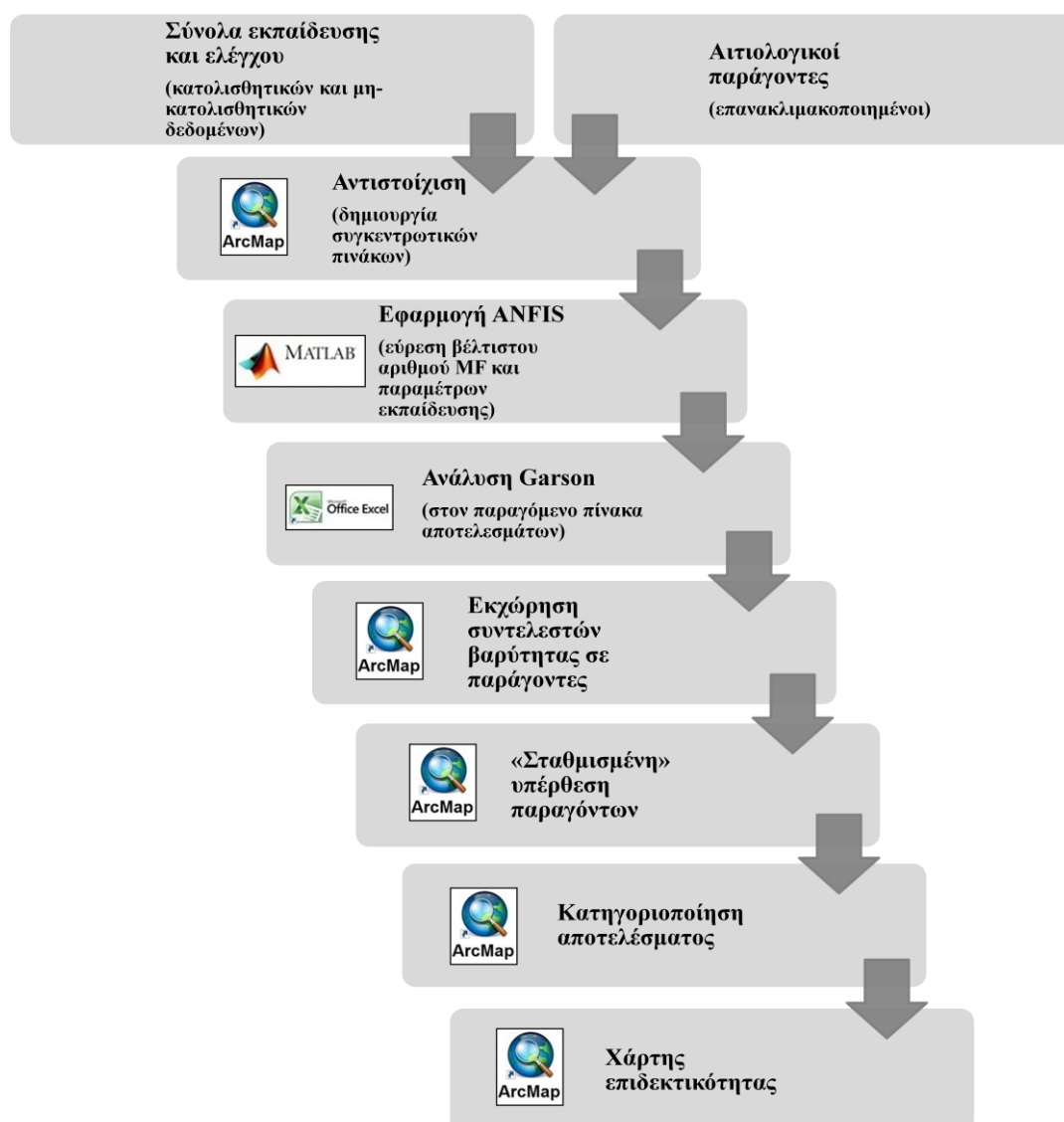
$$S_k = \sum Q_{jk} \quad (63)$$

- (4) Διαιρείται το S_k με το άθροισμα όλων των μεταβλητών εισόδου. Η προκύπτουσα τιμή υποδεικνύει την κατανομή των συντελεστών βαρύτητας στο επίπεδο εξόδου και οφείλεται στο σύνολο των μεταβλητών εισόδου.

$$\frac{S_k}{\sum S_k} = w_k \quad (64)$$

Από την υλοποίηση των παραπάνω βημάτων, συνεπώς, ένας (κανονικοποιημένος) συντελεστής βαρύτητας για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους αιτιολογικούς παράγοντες εξήχθηκε. Την εξαγωγή των παραγοντικών συντελεστών βαρύτητας, τέλος, ακολούθησε η δημιουργία του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας μέσω της «σταθμισμένης» άθροισης/υπέρθησης των επανακλιμακοποιημένης μορφής παραγόντων (Εξίσωση 13, όπου fw_i ο συντελεστής βαρύτητας του παράγοντα i , και $w_{i,j}$ η επανακλιμακοποιημένη τιμή για την κατηγορία j του παράγοντα i), και ο διαχωρισμός του σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

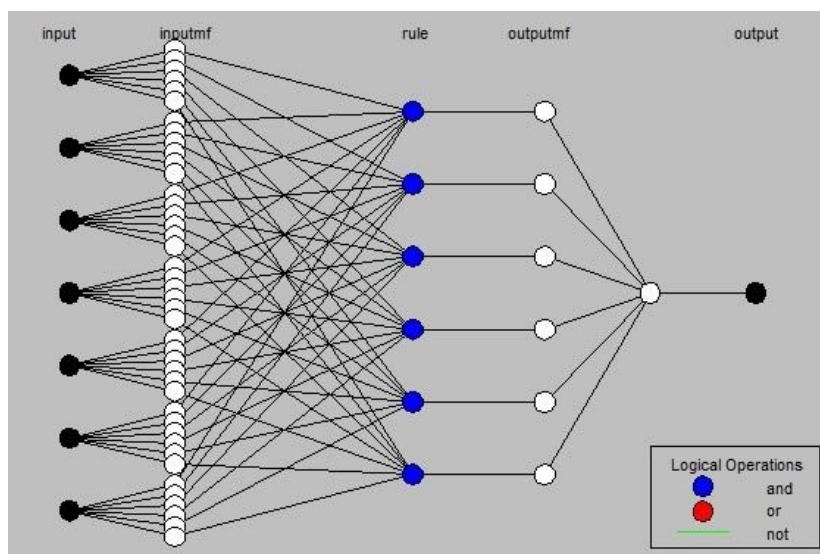
Προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού (ANFIS)



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου ANFIS.

Για αρχή, η εφαρμογή του μοντέλου ANFIS απαιτούσε τη διαμόρφωση των συγκεντρωτικών πινάκων αντιστοίχισης μεταξύ των 1.442 σημείων του συνόλου εκπαίδευσης (με τιμές 0 και 1) και των υπό εξέταση αιτιολογικών παραγόντων (σε επανακλιμακοποιημένη μορφή). Στη συνέχεια, οι παραγόμενοι πίνακες διαχωρίστηκαν μ' ένα τυχαίο τρόπο σε δύο μέρη, έτσι ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά σύνολα δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου. Ακολουθώντας την ίδια τακτική με προηγουμένως, το 80% των πινακοποιημένων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε τελικώς ως σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% ως σύνολο ελέγχου.

Έπειτα, με την αξιοποίηση ενός ειδικού εργαλείου του λογισμικού MATLAB, ένα ANFIS μοντέλο σχεδιάστηκε και εκπαιδεύτηκε. Χρησιμοποιώντας τα δύο προαναφερθέντα σύνολα δεδομένων, το μοντέλο αυτό «τροφοδοτήθηκε» με τους επτά (επανακλιμακοποιημένους) παράγοντες ως εισόδους. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού συναρτήσεων συμμετοχής (MF) για κάθε μια από τις εισόδους αποτελούσε το επόμενο βήμα. Μια διαδικασία «δοκιμής και σφάλματος» εκτελέστηκε για την εξεύρεση του εν λόγω αριθμού, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις τιμές των παραμέτρων της επιλεγμένης τεχνικής ασαφοποίησης. Η τεχνική αυτή, γνωστή ως αφαιρετική συσταδοποίηση (subtractive clustering), θεωρείται ιδιαίτερως ωφέλιμη στην επεξεργασία μιας μεγάλης ποσότητας δεδομένων εισόδου, και έχει ως στόχο την συνοπτική αναπαράσταση της συμπεριφοράς ενός συστήματος μέσω της εξαγωγής ενός μικρού αριθμού φυσικών συστάδων/ομάδων από τα δεδομένα (Chiu, 1994). Περιλαμβάνει, ουσιαστικά, την τοποθέτηση κέντρων συστάδων (cluster centers) εντός του χώρου εισόδων (input space), με κάθε ένα απ' αυτά τα κέντρα να χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός αρχικού ασαφούς κανόνα με «πρόχειρες/χοντρικές» εκτιμήσεις των συναρτήσεων συμμετοχής (Buragohain and Mahanta, 2008). Η διαδικασία «δοκιμής και σφάλματος», συνεπώς, συνέβαλε στην ανάδειξη των βέλτιστων τιμών για τις παραμέτρους της συγκεκριμένης τεχνικής ασαφοποίησης. Οι τιμές αυτές, 0,90 , 1,25 , 0,5 και 0,15 , των παραμέτρων εύρους επιρροής (range of influence), παράγοντα «στριμώγματος» (squash factor), λόγου αποδοχής (accept ratio) και λόγου απόρριψης (reject ratio), αντιστοίχως, είχαν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό 6 MF για κάθε μια είσοδο, και επομένως 6 «εάν-τότε (if-then)» ασαφών κανόνων για το μοντέλο.

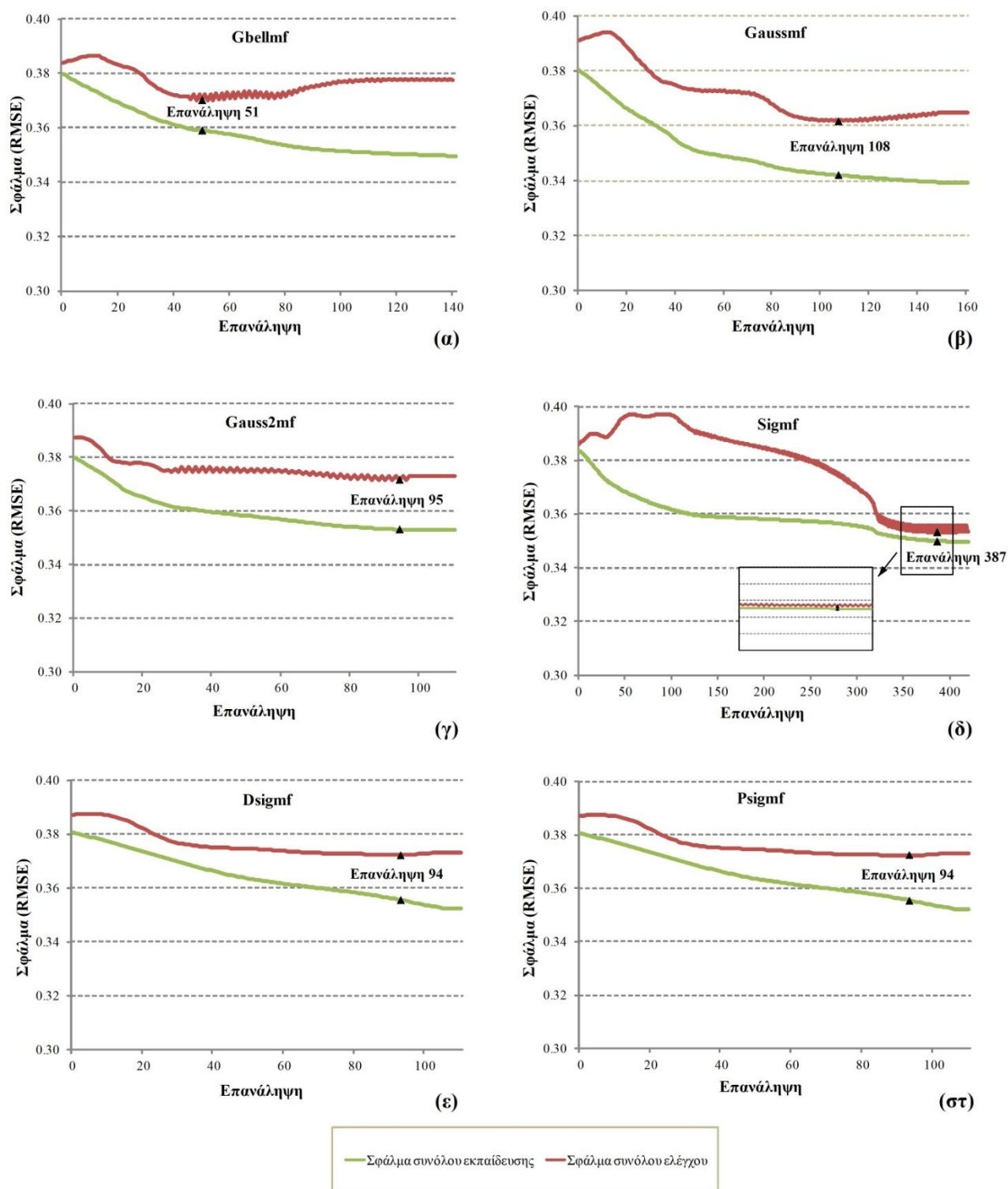


Σχήμα 4.22: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος ANFIS.

Στα πλαίσια της εκπαίδευσης του διαμορφωμένου ANFIS μοντέλου, ο υβριδικός αλγόριθμος εκμάθησης χρησιμοποιήθηκε για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των επιδιωκόμενων και των εκτιμώμενων εξόδων. Η τιμή σφάλματος (RMSE) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ως κριτήρια διακοπής της εκπαιδευτικής διαδικασίας ορίστηκαν σε 0,01 και 500, αντιστοίχως. Ακολούθως, προκειμένου να εντοπιστεί η εκδοχή του μοντέλου με τη βέλτιστη απόδοση, έξι διαφορετικοί τύποι MF εξετάστηκαν.

Πίνακας 4.11: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης του βέλτιστου τύπου MF.

Ονομασία	Τύπος MF	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	Επανάληψη «βέλτιστου» μοντέλου (πριν την έναρξη υπερ-εκπαίδευσης)	Σφάλμα (RMSE) στο σύνολο εκπαίδευσης	Σφάλμα (RMSE) στο σύνολο ελέγχου
Gbellmf	Generalized bell-shaped	500	51	0,359	0,370
Gaussmf	Gaussian	500	108	0,342	0,362
Gauss2mf	Two-sided Gaussian	500	95	0,353	0,372
Sigmf	Sigmoidally shaped	500	387	0,350	0,353
Dsigmf	Difference of two sigmoidally shaped	500	94	0,356	0,372
Psigmf	Product of two sigmoidally shaped	500	94	0,356	0,372



Σχήμα 4.23: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους διάφορους τύπους MF. (α) Gbellmf, (β) Gaussmf, (γ) Gauss2mf, (δ) Sigmf, (ε) Dsigmf, και (στ) Psigmf.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.11, ο τύπος “Sigmoidally shaped (Sigmf)” παρουσιάζει τη χαμηλότερη RMSE τιμή στο σύνολο ελέγχου και τη δεύτερη χαμηλότερη RMSE τιμή στο σύνολο εκπαίδευσης. Ωστόσο, και σ’ αυτήν την περίπτωση, η πολύ μικρή διαφορά (της τάξης του 0,003) που παρατηρείται μεταξύ αυτών των δύο τιμών, μαρτυράει ότι το εκπαιδευμένο, με τον συγκεκριμένο τύπο συνάρτησης συμμετοχής, μοντέλο αποδίδει καλύτερα. Συνεπώς, ο τύπος “Sigmoidally shaped (Sigmf)” μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον βέλτιστη επιλογή.

Μετά από την ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας του «βέλτιστου» μοντέλου, σειρά είχε η ανάλυση των παραγόμενων απ’ αυτό πινακοποιημένων τιμών, με στόχο την εκχώρηση συντελεστών βαρύτητας στις μεταβλητές εισόδου. Λαμβάνοντας υπόψη την παρόμοια, μ’ ένα ANN μοντέλο, φύση του ANFIS, η προτεινόμενη από τον Garson (1991) ανάλυση επιλέχθηκε κι εδώ να εφαρμοστεί. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, στην περίπτωση του ANN μοντέλου, η συγκεκριμένη ανάλυση περιλαμβάνει τη, για κάθε κόμβο, διαμέριση των συντελεστών βαρύτητας του κρυμμένου επιπέδου προς το επίπεδο εξόδου στα αντίστοιχα συστατικά τα οποία συνδέονται με κάθε μεταβλητή εισόδου. Επομένως, στην περίπτωση του ANFIS μοντέλου, η ίδια ανάλυση περιλαμβάνει τη, για κάθε κόμβο, διαμέριση των δυνάμεων πυροδότησης του τέταρτου επιπέδου προς το πέμπτο επίπεδο στα αντίστοιχα συστατικά. Από την υλοποίηση των βημάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, ένας (κανονικοποιημένος) συντελεστής βαρύτητας για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους αιτιολογικούς παράγοντες εξήχθηκε.

Η κατασκευή του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας μέσω της «σταθμισμένης» άθροισης/υπέρθεσης των επανακλιμακοποιημένης μορφής παραγόντων (Εξίσωση 13), και ο επακόλουθος διαχωρισμός του σε πέντε κατηγορίες με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», αποτέλεσαν, και στην προκειμένη περίπτωση, τα τελευταία βήματα της εφαρμογής του μοντέλου.

Υβριδικό μοντέλο (TFNW/LSI)

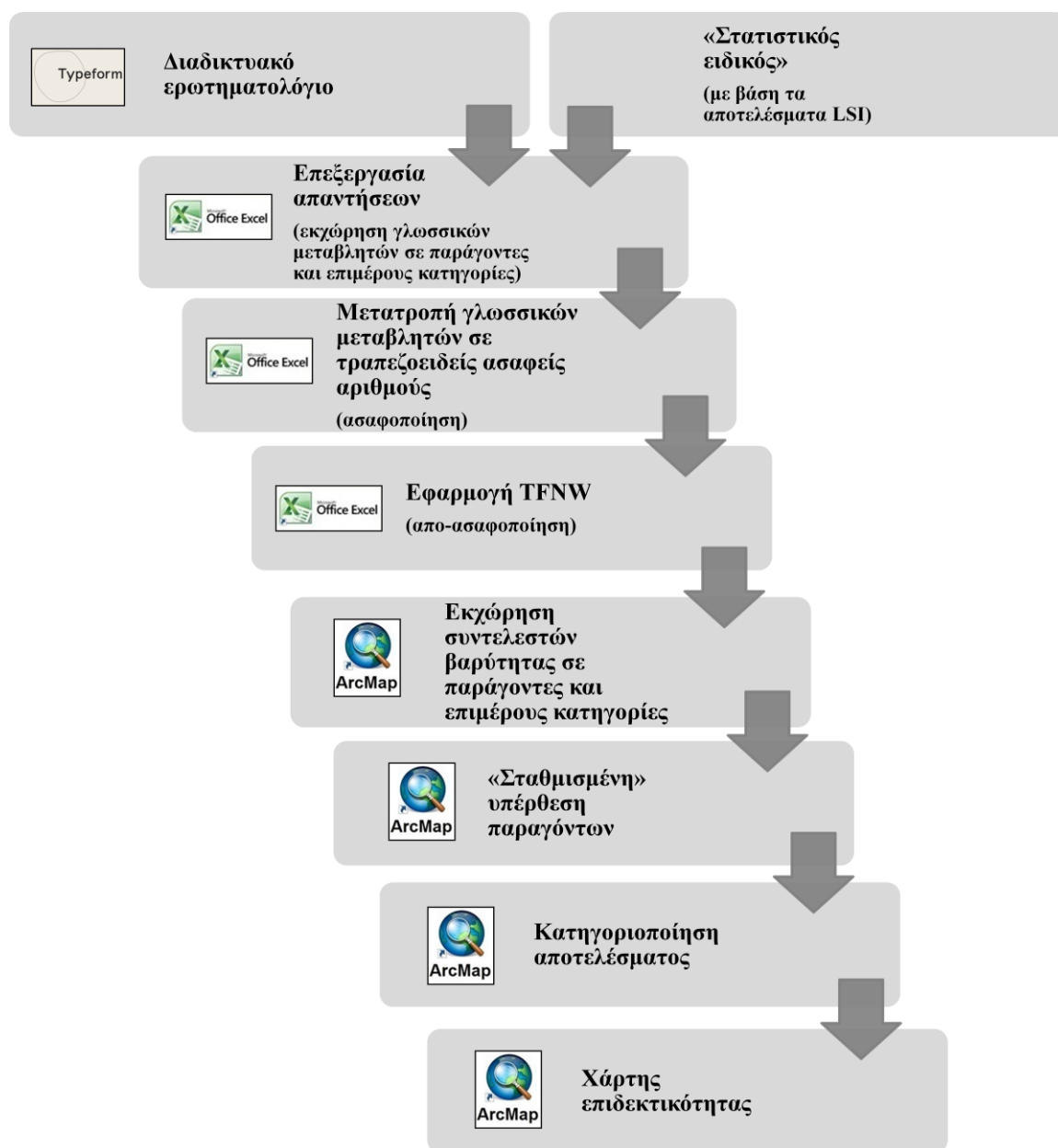
Το υβριδικό μοντέλο TFNW/LSI προήλθε από την ενοποίηση του ποιοτικού μοντέλου TFNW και του ποσοτικού μοντέλου LSI. Η εφαρμογή του προέβλεπε την επανεκτέλεση των βημάτων του μοντέλου TFNW λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη φορά τη «γνώμη» ενός επιπλέον «στατιστικού ειδικού» ο οποίος προστέθηκε στην υφιστάμενη ομάδα των «εμπειρογνομόνων» που ανταποκρίθηκαν στο διαδικτυακό ερωτηματολόγιο. Εκτός από την προσθήκη αυτού του

«στατιστικού ειδικού», μια ακόμη ιδιαιτέρως σημαντική διαφορά στην εφαρμογή του υβριδικού μοντέλου TFNW/LSI σε σχέση μ' αυτή του μεμονωμένου μοντέλου TFNW έγκειται στην διαφοροποίηση του βαθμού σημαντικότητας ο οποίος αποδόθηκε στη διαμορφωθείσα ομάδα «εμπειρογνομόνων». Πιο συγκεκριμένα, λόγω της αντικειμενικότητας που χαρακτήριζε τη «γνώμη» του «στατιστικού ειδικού» έναντι της υποκειμενικότητας των γνώμων των ανταποκριθέντων στο ερωτηματολόγιο «εμπειρογνομόνων», επιλέχθηκε ν' αποδοθεί το 50% της σημαντικότητας στη «γνώμη» του «στατιστικού ειδικού» και το υπόλοιπο 50% να διαμοιραστεί στις γνώμες των υπόλοιπων «εμπειρογνομόνων» (μετατροπή από ομοιογενή σε ετερογενή ομάδα).

Η «γνώμη» του «στατιστικού ειδικού» βασίστηκε στα εκτιμώμενα, από το προαναφερθέν μοντέλο LSI, αποτελέσματα και εκφράστηκε μέσω της εισαγωγής γλωσσικών μεταβλητών σε κάθε έναν παράγοντα και παραγοντική κατηγορία με βάση τους ακόλουθους κανόνες:

- Αναφορικά με τους παράγοντες:
 - Σε παράγοντες μ' εύρος τιμών LSI μεταξύ 1,00 και 1,50 αποδόθηκε η γλωσσική μεταβλητή «Μέτριας (M)» επιδεκτικότητας.
 - Σε παράγοντες μ' εύρος τιμών LSI μικρότερο από 1,00 αποδόθηκαν, με βάση μια φθίνουσα σειρά, οι γλωσσικές μεταβλητές «Χαμηλής (M)» και «Πολύ Χαμηλής (ΠΧ)», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας.
 - Σε παράγοντες μ' εύρος τιμών LSI μεγαλύτερο από 1,50 αποδόθηκαν, με βάση μια αύξουσα σειρά, οι γλωσσικές μεταβλητές «Υψηλής (Υ)» και «Πολύ Υψηλής (ΠΥ)», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας.
- Αναφορικά με τις κατηγορίες των παραγόντων:
 - Σε κατηγορίες παραγόντων με τιμές LSI μεταξύ -0,15 και 0,15 αποδόθηκε η γλωσσική μεταβλητή «Μέτριας (M)» επιδεκτικότητας.
 - Σε κατηγορίες παραγόντων με τιμές LSI μικρότερες από -0,15 αποδόθηκαν, με βάση μια φθίνουσα σειρά, οι γλωσσικές μεταβλητές «Χαμηλής (M)» και «Πολύ Χαμηλής (ΠΧ)», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας.

- Σε κατηγορίες παραγόντων με τιμές LSI μεγαλύτερες από 0,15 αποδόθηκαν, με βάση μια αύξουσα σειρά, οι γλωσσικές μεταβλητές «Υψηλής (Υ)» και «Πολύ Υψηλής (ΠΥ)», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα βημάτων εφαρμογής μοντέλου TFNW/LSI.

Ερμηνεύοντας τις γλωσσικές μεταβλητές που εκχωρήθηκαν από τη διαμορφωθείσα ομάδα «εμπειρογνομόνων» στους αντίστοιχους τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς, και εκτελώντας τις Εξισώσεις (15), (16) και (17) στο λογισμικό Microsoft Office Excel,

υπολογίστηκαν οι (κανονικοποιημένοι) συντελεστές βαρύτητας των επτά αιτιολογικών παραγόντων και των κατηγοριών τους. Η αξιοποίηση των παραγόμενων συντελεστών βαρύτητας στη «σταθμισμένη» άθροιση/υπέρθεση των «σταθμισμένων» κατηγοριών των παραγόντων (Εξίσωση 13) συνέβαλε στην εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος επιδεκτικότητας το οποίο και αυτό, στη συνέχεια, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες, με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων».

4.1.3.5 Αποτελέσματα

Η σημαντικότητα, ως προς την εκτίμηση της επιδεκτικότητας και γενικώς τη συμβολή στην εκδήλωση του φαινομένου στην περιοχή μελέτης, των εξεταζόμενων αιτιολογικών παραγόντων για το σύνολο των μοντέλων ανάλυσης, και των κατηγοριών τους για έξι απ' αυτά τα μοντέλα (AHP, TFNW, FR, LSI, WoE και TFNW/LSI) αποτυπώνονται στους Πίνακες 4.12 και 4.13.

Για το μοντέλο AHP, οι αιτιολογικοί παράγοντες με την ισχυρότερη επίδραση στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η γωνία κλίσης ($W_N=0,33$) και η γεωλογία ($W_N=0,33$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $>32^\circ$ » ($W_N=0,50$) και «φλύσχης» ($W_N=0,45$), αντιστοίχως, βρέθηκαν ν' ασκούν την ισχυρότερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<7^\circ$ » ($W_N=0,04$) και «μεταμορφωμένα πετρώματα» ($W_N=0,02$), αντιστοίχως, βρέθηκαν ν' ασκούν την πιο αδύναμη επίδραση. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες με την πιο αδύναμη επίδραση στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι το υψόμετρο ($W_N=0,03$) και η βλάστηση (NDVI) ($W_N=0,05$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $>1.332 \mu.$ » ($W_N=0,47$) και « $<0,07$ » ($W_N=0,44$), αντιστοίχως, βρέθηκαν ν' ασκούν την ισχυρότερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<276 \mu.$ » ($W_N=0,04$) και « $>0,28$ » ($W_N=0,05$), αντιστοίχως, βρέθηκαν ν' ασκούν την πιο αδύναμη επίδραση. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την ισχυρότερη επίδραση ασκούν οι κατηγορίες «κοίλη» καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($W_N=0,64$), « $<485 \mu.$ » απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,50$) και « $>3,39 \chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,43$), ενώ την πιο αδύναμη επίδραση οι κατηγορίες « $>3.166 \mu.$ » απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,04$), « $<1,28 \chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,06$) και «επίπεδη» καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($W_N=0,07$).

Πίνακας 4.12: Συντελεστές βαρύτητας των αιτιολογικών παραγόντων από το σύνολο των μοντέλων.

Παράγοντας	AHP	TFNW	FR		LSI		WoE		LR	ANN	ANFIS	TFNW/LSI
	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Εύρος τιμών FR (FR _R)	Τυπική απόκλιση τιμών FR (FR _{SD})	Εύρος τιμών LSI (LSI _R)	Τυπική απόκλιση τιμών LSI (LSI _{SD})	Εύρος τιμών C (C _R)	Τυπική απόκλιση τιμών C (C _{SD})	Συντελεστής βαρύτητας (B)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)
Υψόμετρο	0,03	0,10	1,19	0,55	1,72	0,79	1,98	0,91	2,62	0,14	0,23	0,13
Γωνία κλίσης	0,33	0,18	6,12	2,51	4,68	1,74	5,42	2,02	3,62	0,14	0,09	0,19
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	0,06	0,13	0,69	0,34	0,91	0,46	1,15	0,58	2,55	0,15	0,12	0,09
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,12	0,15	2,24	0,81	1,20	0,44	1,44	0,52	1,14	0,12	0,14	0,13
Πυκνότητα ρεμάτων	0,09	0,12	1,54	0,60	3,23	1,27	3,58	1,43	3,20	0,16	0,17	0,16
Βλάστηση (NDVI)	0,05	0,11	1,67	0,68	1,47	0,59	1,69	0,70	0,64	0,12	0,03	0,11
Γεολογία	0,33	0,19	1,79	0,66	3,67	1,36	4,16	1,49	1,47	0,18	0,22	0,19

Πίνακας 4.13: Συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα AHP, TFNW, FR, LSI, WoE και TFNW/LSI.

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	AHP Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	TFNW Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συνολικός πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης		FR Τιμή FR	LSI Τιμή LSI	WoE			TFNW/LSI Συντελεστής βαρύτητας (W _N)
				Συνολικό πλήθος ψηφίδων	Πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης			Τιμή W+	Τιμή W-	Τιμή C	
Υψόμετρο (μ.)	[1] <276	0,04	0,12	100.475	61	0,38	-0,96	-0,96	0,16	-1,12	0,09
	[2] 276-600	0,08	0,16	99.835	216	1,37	0,31	0,31	-0,11	0,42	0,24
	[3] 601-943	0,14	0,19	120.267	276	1,45	0,37	0,37	-0,18	0,55	0,26
	[4] 944-1.332	0,27	0,28	88.101	149	1,07	0,06	0,06	-0,02	0,08	0,26
	[5] >1.332	0,47	0,25	46.206	19	0,26	-1,35	-1,35	0,08	-1,43	0,15
Γωνία κλίσης (°)	[1] <7	0,04	0,06	110.016	10	0,06	-2,86	-2,86	0,26	-3,12	0,05
	[2] 7-15	0,06	0,14	120.316	64	0,34	-1,09	-1,09	0,21	-1,31	0,09
	[3] 16-22	0,13	0,19	112.864	162	0,91	-0,10	-0,10	0,03	-0,13	0,20
	[4] 23-32	0,26	0,28	81.168	186	1,45	0,37	0,37	-0,10	0,47	0,30
	[5] >32	0,50	0,33	30.520	299	6,18	1,82	1,82	-0,47	2,30	0,36
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	[1] Κοίλη	0,64	0,41	260.125	472	1,14	0,14	0,14	-0,21	0,35	0,48
	[2] Κυρτή	0,28	0,43	175.539	235	0,84	-0,17	-0,17	0,09	-0,26	0,39
	[3] Επίπεδη	0,50	0,16	19.220	14	0,46	-0,78	-0,78	0,02	-0,80	0,13
Απόσταση από οδικό δίκτυο (μ.)	[1] <485	0,50	0,27	203.226	319	0,99	-0,01	-0,01	0,01	-0,02	0,23
	[2] 485-1.153	0,26	0,25	128.017	137	0,68	-0,39	-0,39	0,12	-0,51	0,17
	[3] 1.154-1.998	0,14	0,19	74.634	131	1,11	0,10	0,10	-0,02	0,12	0,19
	[4] 1.999-3.165	0,07	0,15	37.825	134	2,24	0,80	0,81	-0,12	0,93	0,25
	[5] >3.165	0,04	0,14	11.182	0	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,02	0,16

Πίνακας 4.13: (Συνέχεια).

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	AHP Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	TFNW Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συνολικό πλήθος ψηφίδων	Πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης	FR Τιμή FR	LSI Τιμή LSI	WoE			TFNW/LSI
								Τιμή W+	Τιμή W-	Τιμή C	
Ποκνότητα ρεμάτων (g/μ ³ /g/μ ³)	[1] <1,28	0,06	0,12	59.972	6	0,06	-2,76	-2,76	0,14	-2,90	0,08
	[2] 1,28-2,02	0,10	0,12	117.136	111	0,60	-0,51	-0,52	0,13	-0,65	0,08
	[3] 2,03-2,63	0,16	0,19	142.808	284	1,25	0,23	0,23	-0,12	0,35	0,26
	[4] 2,64-3,39	0,26	0,28	109.978	279	1,60	0,47	0,47	-0,21	0,68	0,31
	[5] >3,39	0,43	0,29	24.990	41	1,04	0,03	0,04	0,00	0,04	0,27
Βλάστηση (NDVI)	[1] <0,07	0,44	0,29	45.605	157	2,17	0,78	0,78	-0,14	0,92	0,18
	[2] 0,07-0,15	0,26	0,28	84.988	193	1,43	0,36	0,37	-0,10	0,47	0,35
	[3] 0,16-0,21	0,15	0,20	125.483	174	0,87	-0,13	-0,13	0,05	-0,18	0,25
	[4] 0,22-0,28	0,09	0,12	135.628	147	0,68	-0,38	-0,38	0,13	-0,51	0,14
	[5] >0,28	0,05	0,10	63.152	50	0,50	-0,69	-0,69	0,08	-0,77	0,07
Γεωλογία	[1] Κορήματα	0,19	0,18	33.973	56	1,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,18
	[2] Σύνγχρονες αποθέσεις	0,11	0,13	70.449	6	0,05	-2,92	-2,93	0,16	-3,09	0,09
	[3] Μάργες	0,13	0,16	85.270	75	0,55	-0,59	-0,59	0,10	-0,69	0,11
	[4] Κροκαλοπαγή	0,04	0,11	98.685	129	0,82	-0,19	-0,19	0,05	-0,24	0,11
	[5] Ανθρακικά πετρώματα	0,06	0,11	138.588	405	1,84	0,61	0,61	-0,46	1,07	0,19
	[6] Φλύσχης	0,45	0,20	14.063	47	2,11	0,75	0,75	-0,03	0,78	0,25
	[7] Μεταμορφωμένα πετρώματα	0,02	0,10	13.494	3	0,14	-1,97	-1,96	0,03	-1,99	0,07

Για το μοντέλο TFNW, οι ίδιοι αιτιολογικοί παράγοντες μ' αυτούς του μοντέλου AHP αλλά με διαφορετική σειρά κατάταξης (γεωλογία με $W_N=0,19$ και γωνία κλίσης με $W_N=0,18$) φαίνονται να είναι οι παράγοντες που συμβάλλουν περισσότερο στην εκδήλωση κατολισθήσεων. Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «φλύσχης» ($W_N=0,20$) και « $>32^\circ$ » ($W_N=0,33$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συμβάλλουν περισσότερο στην εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «μεταμορφωμένα πετρώματα» ($W_N=0,10$) και « $<7^\circ$ » ($W_N=0,06$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συμβάλλουν λιγότερο. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες που φαίνονται να συμβάλλουν λιγότερο στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι οι ίδιοι παράγοντες μ' αυτούς του μοντέλου AHP και μάλιστα με την ίδια σειρά κατάταξης (υψόμετρο με $W_N=0,10$ και βλάστηση με $W_N=0,11$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «944-1.332 μ.» ($W_N=0,28$) και « $<0,07$ » ($W_N=0,29$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συμβάλλουν περισσότερο στην εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « <276 μ.» ($W_N=0,12$) και « $>0,28$ » ($W_N=0,10$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συμβάλλουν λιγότερο. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την περισσότερη συμβολή δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «κυρτή» καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($W_N=0,43$), « $>3,39$ χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,29$) και « <485 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,27$), ενώ τη λιγότερη συμβολή οι κατηγορίες « $<2,02$ χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,12$), « >3.165 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,14$) και «επίπεδη» καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($W_N=0,16$).

Για το μοντέλο FR, την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων παρουσιάζουν οι παράγοντες της γωνίας κλίσης ($FR_{SD}=2,51$) και της απόστασης από το οδικό δίκτυο ($FR_{SD}=0,81$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $>32^\circ$ » ($FR=6,18$) και «1.999-3.165 μ.» ($FR=2,24$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<7^\circ$ » ($FR=0,06$) και « >3.165 μ.» ($FR=0$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Από την άλλη πλευρά, τη χαμηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων παρουσιάζουν οι παράγοντες της καμπυλότητας παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($FR_{SD}=0,06$) και του υψομέτρου ($FR_{SD}=0,09$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «κοίλη» ($FR=1,14$) και «601-943 μ.» ($FR=1,45$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «επίπεδη» ($FR=0,46$) και « >1.332 μ.» ($FR=0,26$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση εμφανίζουν οι κατηγορίες « $<0,07$ » NDVI

($FR=2,17$), «φλύσχις» ($FR=2,11$) και «2,64-3,39 $\chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($FR=1,60$), ενώ τη χαμηλότερη συσχέτιση οι κατηγορίες «σύγχρονες αποθέσεις» ($FR=0,05$), «<1,28 $\chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($FR=0,06$) και «>0,28» NDVI ($FR=0,50$).

Για το μοντέλο LSI, οι παράγοντες που συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η γωνία κλίσης ($LSI_{SD}=1,74$) και η γεωλογία ($LSI_{SD}=1,36$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «>32°» ($LSI=1,82$) και «φλύσχις» ($LSI=0,75$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «<7°» ($LSI=-2,86$) και «σύγχρονες αποθέσεις» ($LSI=-2,92$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες που συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό με την εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η απόσταση από το οδικό δίκτυο ($LSI_{SD}=0,44$) και η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($LSI_{SD}=0,46$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «1.999-3.165 μ.» ($LSI=0,80$) και «κοίλη» ($LSI=0,14$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «485-1.153 μ.» ($LSI=-0,39$) και «επίπεδη» ($LSI=-0,78$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, στον υψηλότερο βαθμό συσχετίζονται οι κατηγορίες «<0,07» NDVI ($LSI=0,78$), «2,64-3,39 $\chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($LSI=0,47$) και «601-943 μ.» υψόμετρο ($LSI=0,37$), ενώ στο χαμηλότερο βαθμό οι κατηγορίες «<1,28 $\chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($LSI=-2,76$), «>1.332 μ.» υψόμετρο ($LSI=-1,35$) και «>0,28» NDVI ($LSI=-0,69$).

Για το μοντέλο WoE, οι ίδιοι παράγοντες μ' αυτούς του μοντέλου LSI (γωνία κλίσης και γεωλογία) φαίνονται να είναι οι παράγοντες που παρουσιάζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων ($C_{SD}=2,02$ και $C_{SD}=1,49$, αντιστοίχως). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «>32°» ($C=2,30$) και «ανθρακικά πετρώματα» ($C=1,07$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «<7°» ($C=-3,12$) και «σύγχρονες αποθέσεις» ($C=-3,09$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Από την άλλη πλευρά, οι ίδιοι επίσης παράγοντες μ' αυτούς του μοντέλου LSI (απόσταση από το οδικό δίκτυο και καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης) φαίνονται να παρουσιάζουν και τη χαμηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων ($C_{SD}=0,52$ και $C_{SD}=0,58$, αντιστοίχως). Γι' αυτούς του παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του

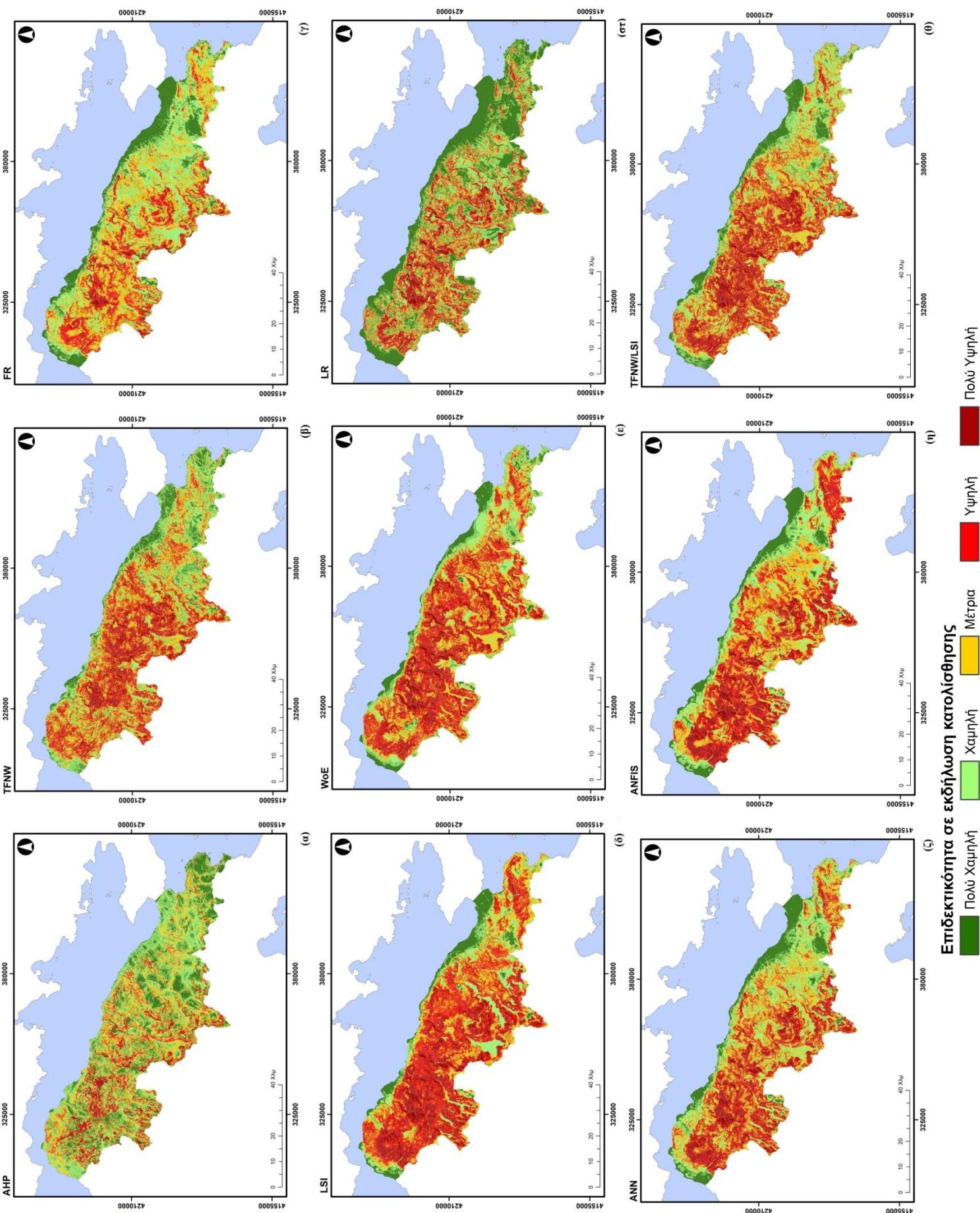
φαινομένου βρέθηκαν να εμφανίζουν οι κατηγορίες «1.999-3.165 μ.» ($C=0,93$) και «κοίλη» ($C=0,35$), αντιστοίχως. Αντιθέτως, τη χαμηλότερη συσχέτιση βρέθηκαν να εμφανίζουν οι κατηγορίες «485-1.153 μ.» ($C=-0,51$) και «επίπεδη» ($C=-0,80$), αντιστοίχως. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση εμφανίζουν οι κατηγορίες «<0,07» NDVI ($C=0,92$), «2,64-3,39 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($C=0,68$) και «601-943 μ.» υψόμετρο ($C=0,55$), ενώ τη χαμηλότερη συσχέτιση οι κατηγορίες «<1,28 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($C=-2,90$), «>1.332 μ.» υψόμετρο ($C=-1,43$) και «>0,28» NDVI ($C=-0,77$).

Για το μοντέλο TFNW/LSI, οι παράγοντες που συμβάλλουν περισσότερο στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η γεωλογία ($W_N=0,19$) και η γωνία κλίσης ($W_N=0,19$). Γι' αυτούς του παράγοντες, την περισσότερη συμβολή στην εκδήλωση του φαινομένου δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «φλύσσης» ($W_N=0,25$) και «>32°» ($W_N=0,36$), αντιστοίχως. Αντιθέτως, τη λιγότερη συμβολή δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «μεταμορφωμένα πετρώματα» ($W_N=0,07$) και «<7°» ($W_N=0,05$), αντιστοίχως. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες που συμβάλλουν λιγότερο στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης ($W_N=0,09$) και η βλάστηση ($W_N=0,11$). Γι' αυτούς του παράγοντες, την περισσότερη συμβολή στην εκδήλωση του φαινομένου δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «κοίλη» ($W_N=0,48$) και «0,07-0,15» ($W_N=0,35$), αντιστοίχως. Αντιθέτως, τη λιγότερη συμβολή δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «επίπεδη» ($W_N=0,13$) και «>0,28» ($W_N=0,07$), αντιστοίχως. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την περισσότερη συμβολή δείχνουν να έχουν οι κατηγορίες «2,64-3,39 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,31$), «944-1.332 μ.» υψόμετρο ($W_N=0,26$) και «1.999-3.165 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,25$), ενώ τη λιγότερη συμβολή οι κατηγορίες «1,28-2,02 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,08$), «<276 μ.» υψόμετρο ($W_N=0,09$) και «>3.165 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($W_N=0,16$).

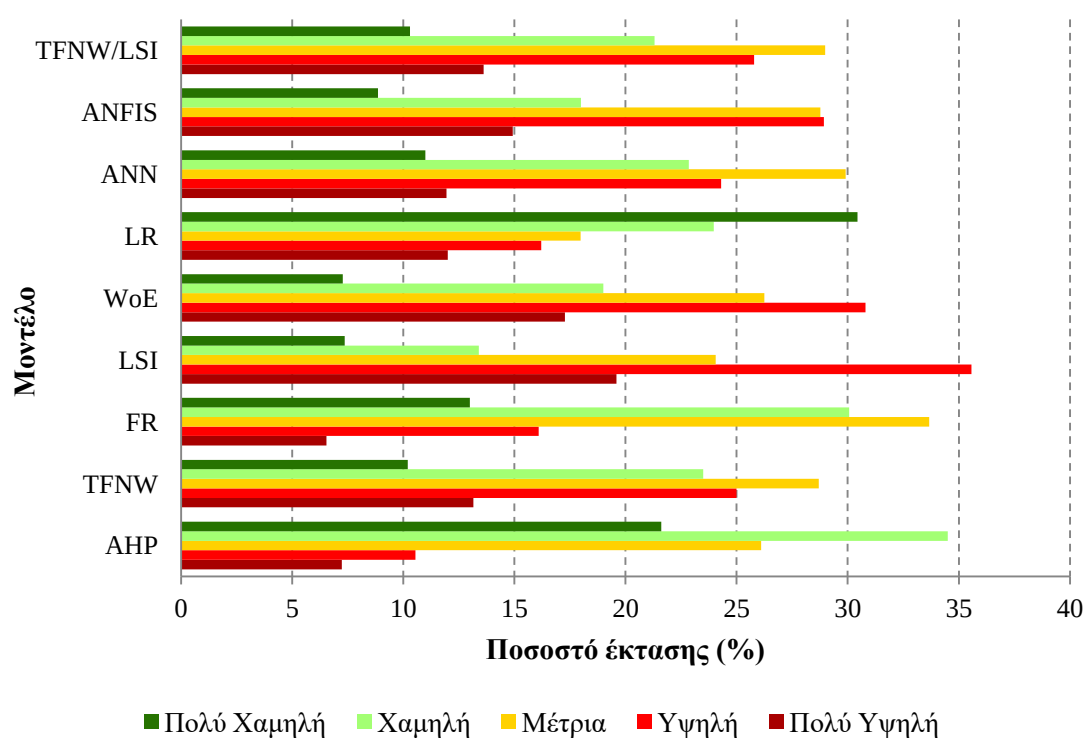
Για το μοντέλο LR, όλοι οι εξεταζόμενοι αιτιολογικοί παράγοντες συσχετίζονται θετικά με την εκδήλωση κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης. Οι παράγοντες με την ισχυρότερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου είναι η γωνία κλίσης ($B=3,62$) και η πυκνότητα ρεμάτων ($B=3,20$). Η γεωλογία ($W_N=0,18$) και η πυκνότητα ρεμάτων ($W_N=0,16$) είναι οι αντίστοιχοι παράγοντες για το μοντέλο ANN, και το υψόμετρο ($W_N=0,23$) και η γεωλογία ($W_N=0,22$) για το μοντέλο ANFIS. Από την άλλη πλευρά, για το μοντέλο LR, οι παράγοντες με την πιο αδύναμη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου είναι η βλάστηση ($B=0,64$) και η απόσταση από το οδικό δίκτυο ($B=1,14$). Οι παράγοντες αυτοί είναι οι ίδιοι αλλά με

διαφορετική σειρά κατάταξης για το μοντέλο ANN (απόσταση από το οδικό δίκτυο, και βλάστηση, με $W_N=0,12$), και διαφέρουν κατά το ήμισυ για το μοντέλο ANFIS (βλάστηση με $W_N=0,03$ και γωνία κλίσης με $W_N=0,09$).

Προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική κατανομή της εκτιμώμενης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης, ένας αντίστοιχος χάρτης διακριτών κατηγοριών κατασκευάστηκε για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μοντέλα ανάλυσης. Το Σχήμα 4.25 παραθέτει αυτούς τους χάρτες, με το Σχήμα 4.26 να παρουσιάζει ακολούθως τα ποσοστά χωρικής κάλυψης των κατηγοριών τους. Σύμφωνα και με τους εννέα παραγόμενους χάρτες, οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την έκταση του συστήματος λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου. Οι κατηγορίες αυτές καλύπτουν: (α) το 11% (περίπου 388 χλμ²) και 7% (περίπου 266 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο AHP, (β) το 25% (περίπου 899 χλμ²) και 13% (περίπου 484 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο TFNW, (γ) το 16% (περίπου 592 χλμ²) και 7% (περίπου 266 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο FR, (δ) το 36% (περίπου 1.308 χλμ²) και 20% (περίπου 721 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LSI, (ε) το 31% (περίπου 1.135 χλμ²) και 17% (περίπου 637 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο WoE, (στ) το 16% (περίπου 596 χλμ²) και 12% (περίπου 440 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LR, (ζ) το 24% (περίπου 894 χλμ²) και 12% (περίπου 440 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANN, (η) το 29% (περίπου 1.164 χλμ²) και 15% (περίπου 549 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANFIS, και (θ) το 26% (περίπου 949 χλμ²) και 14% (περίπου 501 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο TFNW/LSI.

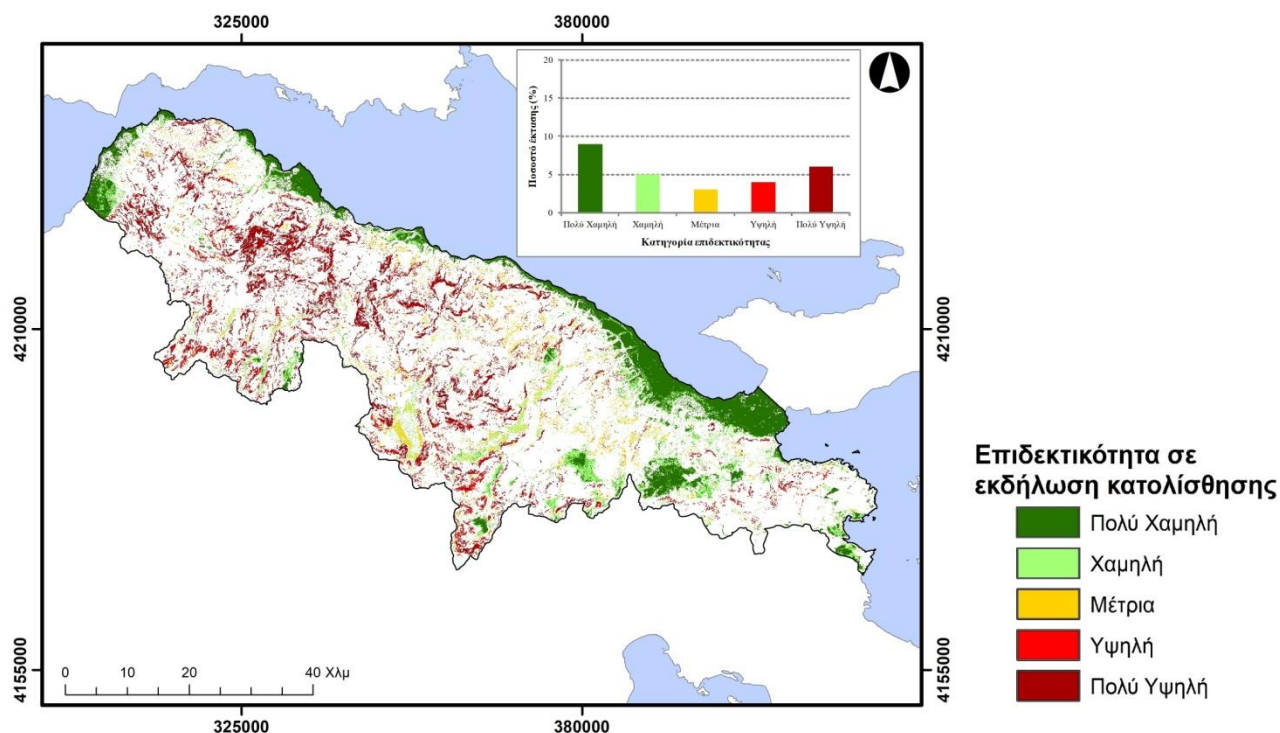


Σχήμα 4.25: Χάρτες επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από το σύνολο των μοντέλων. (α) AHP, (β) TFNW, (γ) FR, (δ) LSI, (ε) WoE, (στ) LR, (ζ) ANN, (η) ANFIS, και (θ) TFNW/LSI.



Σχήμα 4.26: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από το σύνολο των μοντέλων.

Για την κατάδειξη των κοινών αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας μεταξύ των εξεταζόμενων μοντέλων ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε ο συνδυασμός των παραγόμενων χαρτών τους. Ο συνδυασμός αυτός βασίστηκε σε μια τοπική (με επίκεντρο την ψηφίδα) λειτουργία του λογισμικού ArcGIS και είχε ως αποτέλεσμα το Σχήμα 4.27. Όπως προκύπτει από το συγκεκριμένο Σχήμα, το 9% (περίπου 327 χλμ²) και 5% (περίπου 127 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν ως εκτάσεις «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στους εννέα παραγόμενους χάρτες. Οι εκτάσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο (παράκτιο) και νότιο τμήμα της περιοχής. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 3% (περίπου 95 χλμ²) και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής. Τέλος, και στους εννέα παραγόμενους χάρτες, το 4% (περίπου 138 χλμ²) και 6% (περίπου 231 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν ως εκτάσεις «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Αν και μικρά τμήματα αυτών των εκτάσεων εντοπίζονται σ' όλη την περιοχή, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους μπορούν να τοποθετηθούν στο κεντρικό τμήμα της.



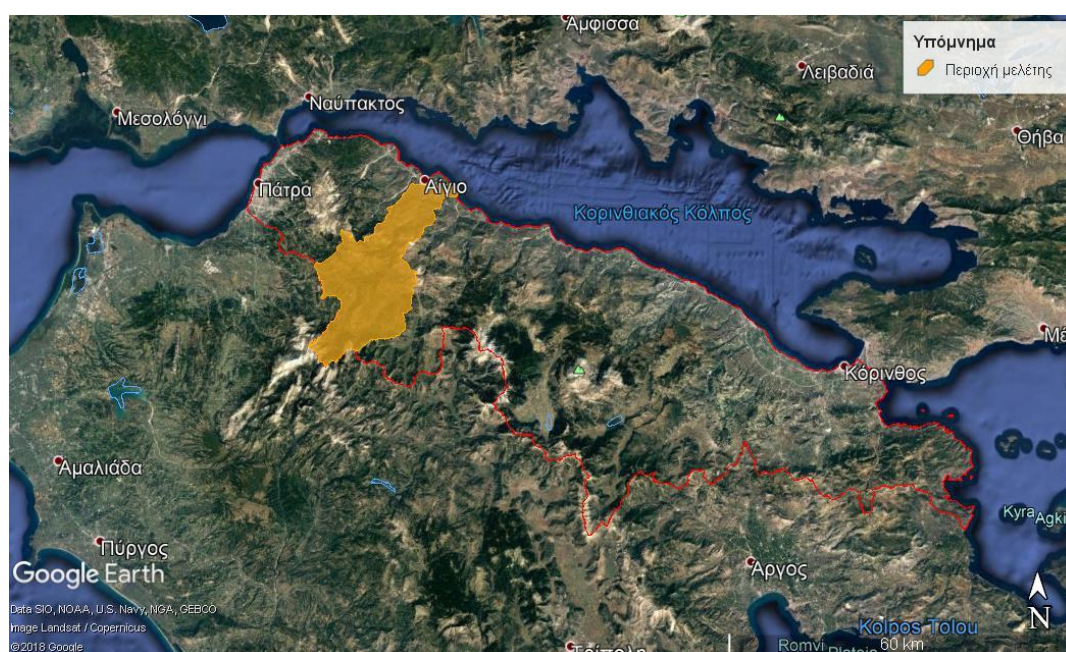
Σχήμα 4.27: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στους παραγόμενους χάρτες των μοντέλων. Συμπεριλαμβάνεται διάγραμμα με τα αντίστοιχα ποσοστά έκτασης.

4.2 Λεπτομερέστερη κλίμακα (1:50.000)

4.2.1 Περιοχή μελέτης

Προκειμένου να καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που θα προέκυπταν από τις δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, κρίθηκε αναγκαία η επιλογή μιας εκ των 42 λεκανών απορροής του προηγούμενως εξεταζόμενου συστήματος της βόρειας Πελοποννήσου ως περιοχή μελέτης για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης σε λεπτομερέστερη κλίμακα. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη, με βάση τα αποτελέσματα της περιφερειακής κλίμακας, την κατάδειξη ενός μεγάλου τμήματός της ως επιδεκτικό («Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας) στο φαινόμενο των κατολισθήσεων, καθώς επίσης και την εκδήλωση ενός σημαντικού αριθμού παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων σ' αυτήν, η λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα είναι αυτή που τελικώς επιλέχθηκε.

Η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής εντοπίζεται στο Νομό Αχαΐας και καλύπτει μια έκταση 366 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Πηγάζοντας από το όρος Ερύμανθος και εκβάλλοντας στον Κορινθιακό κόλπο, με συνολικό μήκος 49 χιλιομέτρων, ο Σελινούντας αποτελεί τον μεγαλύτερο ποταμό της Πελοποννήσου (Demoulin et al., 2015). Λόγω δύο μεταβολών στην κατεύθυνση της ροής του, με την τελευταία να επιφέρει την επιστροφή του στην αρχική κατεύθυνση (Zelilidis, 2000), ο ποταμός Σελινούντας εμφανίζει ιδιαίτερα υδρολογικά χαρακτηριστικά. Αυτές οι μεταβολές στην κατεύθυνση της ροής σε συνδυασμό με την ύπαρξη ενδο-λεκάνιων υπόγειων υψομέτρων, την μεταφορά ιζημάτων από τον ποταμό, την τεκτονική δραστηριότητα των ρηγμάτων, και τον ρυθμό τεκτονικής ανύψωσης (μέσος όρος 2,2 χιλ./έτος) επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της μορφολογίας της λεκάνης απορροής. Μεγάλα και απότομα (με γωνία κλίσης που φτάνει τις 75 μοίρες) φαράγγια με νοτιο-δυτικό προσανατολισμό και υψόμετρο που αγγίζει τα 2.145 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, χαρακτηρίζουν κυρίως την περιοχή.



Σχήμα 4.28: Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης.

Αν και ο ποταμός Σελινούντας διαρρέει σε διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς, στη λεκάνη απορροής κυριαρχούν οι ασβεστόλιθοι (48% της συνολικής έκτασης) και τα κροκαλοπαγή (29% της συνολικής έκτασης). Πιο συγκεκριμένα, τα ανώτερα τμήματα του ποταμού διασχίζουν Πλειο-Τεταρτογενείς αποθέσεις (μεταξύ 200 και 1.000 μέτρα υψόμετρο),

και Προ-Νεογενείς σχηματισμούς όπως ασβεστόλιθους (μέχρι 1.800 μέτρα υψόμετρο). Τα κατώτερα τμήματα διασχίζουν ως επί το πλείστον Πλειο-Τεταρτογενείς κροκαλοπαγείς αποθέσεις που εκτείνονται σε υψόμετρο μικρότερο των 1.000 μέτρων. Η ύπαρξη αλλουβιακών ριπιδίων στην παράκτια ζώνη της περιοχής αξίζει επίσης ν' αναφερθεί. Τα δελταϊκά αυτά ριπίδια ηλικίας Ανώτερου Ολόκαινου έχουν σχηματισθεί από ποτάμια μεγάλης μορφολογικής κλίσης που απέθεταν το αδρομερές φορτίο ιζημάτων τους κατά μήκος της ακτής (Perrou et al., 2013).

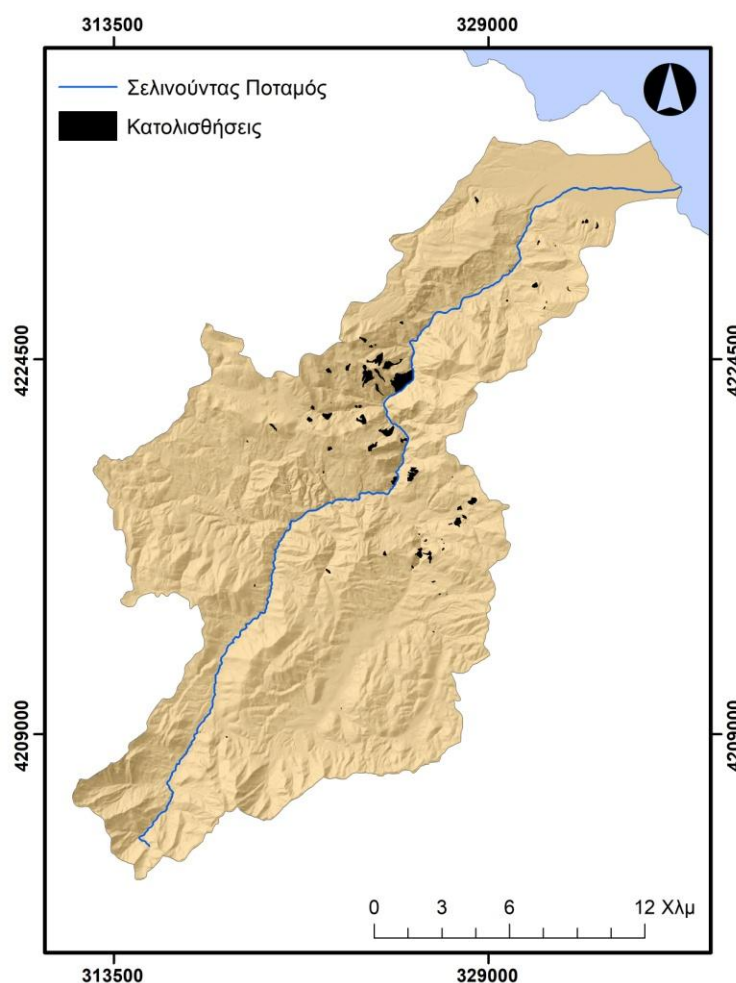
Η περιοχή καλύπτεται κυρίως από θαμνώδη/ποώδη βλάστηση και καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Μόνο το 1% της έκτασής της είναι αστικοποιημένο, με το συνολικό πληθυσμό της, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ν' ανέρχεται σε 7.068 κατοίκους (<http://www.statistics.gr/el/statistics/pop>, 23/05/2018). Ως τμήμα του προαναφερθέντος συστήματος λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου, το κλίμα της δεν παρουσιάζει καμία διαφοροποίηση σε σχέση μ' αυτό της ευρύτερης περιοχής. Με βάση τα υψηλά επίπεδα βροχόπτωσης και το γεγονός ότι το 52% της έκτασης της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής αποτελείται από εύκολα διαβρώσιμους λιθολογικούς σχηματισμούς (Karymbalis and Gaki-Papanastassiou, 2011), η αναμενόμενη ισχυρή σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί ως ο κύριος παράγοντας εκδήλωσης κατολισθητικών γεγονότων στην περιοχή. Γενικώς, οι μεγάλης έκτασης λεκάνες απορροής, όπως αυτή που διαρρέεται από τον ποταμό Σελινούντα, περιέχουν πολυετή ρέματα που «επεξεργάζονται» συνεχώς το υλικό από τις μετακινήσεις μαζών στα πρηνή των ανώτερων τμημάτων τους (Karymbalis et al., 2016). Μια αυξημένη συγκέντρωση ποταμοχερσαίων αποθέσεων στις θέσεις γύρω από τις εκβολές του ποταμού Σελινούντα είναι το αποτέλεσμα αυτής της συνεχής «επεξεργασίας» του υλικού. Ως εκ τούτου, ο υψηλός ρυθμός προέλασης (έως +2,32 μ./έτος για την περίοδο 1945-2008) μπορεί ν' αποδοθεί στις υψηλές εισροές ιζημάτων απ' αυτά τα πολυετή ρέματα, ειδικότερα κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου του έτους.

4.2.2 Σύνολα δεδομένων

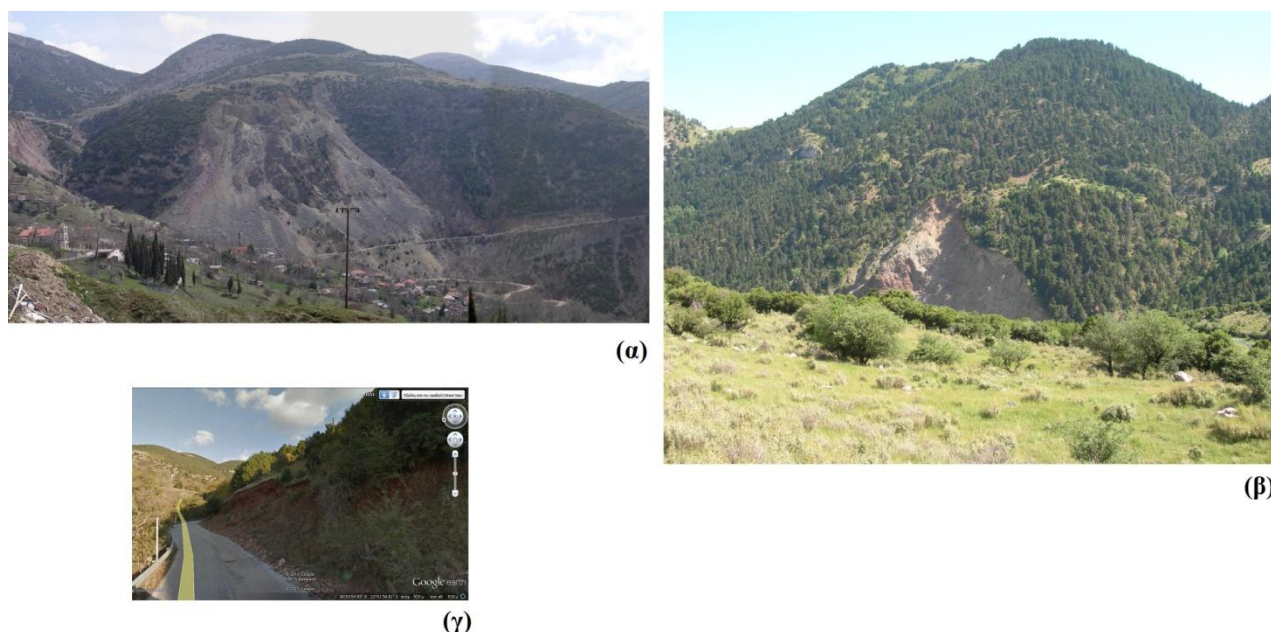
Παρομοίως με την περιφερειακή, έτσι και στην περίπτωση της λεπτομερέστερης κλίμακας, μια χωρική βάση δεδομένων με το σύνολο δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων, και τα σύνολα δεδομένων των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον ΣΓΠ. Αναλυτικότερα:

4.2.2.1 Δεδομένα καταγραφής κατολισθήσεων

Επιλέγοντας, από το ευρύτερο σύνολο δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων του συστήματος της βόρειας Πελοποννήσου, μόνο τα κατολισθητικά γεγονότα που εντοπίζονταν εντός των ορίων της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής, προέκυψε το επιθυμητό σύνολο δεδομένων για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Το σύνολο αυτό περιλάμβανε 76 κατολισθητικά γεγονότα τα οποία παρουσιάζονται ως πολυγωνικές οντότητες στον παρακάτω χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων (Σχήμα 4.29). Ως προς τα χαρακτηριστικά τους, τα γεγονότα αυτά συνιστούν από αργές (1,6 μ./έτος έως 13 μ./μήνα) έως γρήγορες (>1,8 μ./ώρα έως <3 μ./λεπτό) μετακινήσεις μαζών, με μήκος που κυμαίνεται από 10 έως 930 μέτρα και πλάτος από 24 έως 580 μέτρα.



Σχήμα 4.29: Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.2: Εκδηλωμένες κατολισθήσεις στην περιοχή μελέτης. (α) Μεταθετική ολίσθηση δυτικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 992 μ. (Τσαγκάς, 2011), (β) ροή βόρειας-βορειοανατολικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 970 μ. (Τσαγκάς, 2011), και (γ) ροή βορειοδυτικής διεύθυνσης σε υψόμετρο 920 μ. (από υπηρεσία Google Street View).

4.2.2.2 Δεδομένα παραγόντων

Με στόχο την εξέταση της επίδρασης στα παραγόμενα αποτελέσματα από τη μεταβολή της κλίμακας ανάλυσης, οι επιλογές που προτιμήθηκαν για κάποιες από τις παραμέτρους της στην περιφερειακή κλίμακα παρέμειναν οι ίδιες και στη λεπτομερέστερη. Μια απ' αυτές σχετιζόταν με τον αριθμό και τον τύπο των παραγόντων που επιδρούν στην εκδήλωση του φαινομένου. Ως εκ τούτου, συλλέχθηκαν αρχικώς οι ίδιοι δεκαπέντε αιτιολογικοί παράγοντες. Και σ' αυτήν την περίπτωση, οι παράγοντες οργανώθηκαν στα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα δεδομένων των οποίων τα πρωτογενή δεδομένα, η πηγή προέλευσης των δεδομένων, και η αρχική μορφή τους παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 4.14: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή αιτιολογικών παραγόντων.

Τύπος	Παράγοντας	Επιμέρους παράγοντας	Πρωτογενή δεδομένα	Πηγή δεδομένων	Αρχική μορφή
Τοπογραφία	Υψόμετρο		Διανυσματικά σύνολα δεδομένων ισοϋψών καμπυλών και υψομετρικών σημείων	ΟΚΧΕ	Ψηφιδωτή (ΨΜΥ)
	Γωνία κλίσης		—	Από ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
	Διεύθυνση κλίσης		—	Από ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
	Καμπυλότητα	Γενική	—	Από ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
		Κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	—	Από ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
		Παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	—	Από ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
Γεωλογία	Γεωλογία		Γεωλογικοί σχηματισμοί	Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, 1:50.000 (ΙΓΜΕ)	Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία		Ρήγματα, επιπλεύσεις, επωθήσεις	Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, 1:50.000 (ΙΓΜΕ)	Διανυσματική (γραμμές)
Υδρολογία	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		Υδρογραφικό δίκτυο	Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:50.000 (ΓΥΣ)	Διανυσματική (γραμμές)
	Πυκνότητα ρεμάτων		Υδρογραφικό δίκτυο	Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:50.000 (ΓΥΣ)	Διανυσματική (γραμμές)
	Τοπογραφική υγρασία (TWI)		Συσσώρευση ροής	Υδρολογική ανάλυση (SAGA GIS)	Ψηφιδωτή
	Χειμαρρική ισχύς (SPI)		Συσσώρευση ροής	Υδρολογική ανάλυση (SAGA GIS)	Ψηφιδωτή
Ανθρώπινη παρέμβαση	Κάλυψη γης		Κατηγορίες “ILOTS 2016 (LPIS)”	ΟΠΕΚΕΠΕ	Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από οδικό δίκτυο		Οδικό δίκτυο	OpenStreetMap	Διανυσματική (γραμμές)
Βλάστηση	Βλάστηση (NDVI)		Δορυφορικές εικόνες “Sentinel-2” (10 μ., Απρ. 2017)	COPERNICUS	Ψηφιδωτή

Το επίπεδο του υψομέτρου (ΨΜΥ) προέκυψε από την επεξεργασία δύο διανυσματικών συνόλων δεδομένων (διαθέσιμα από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδος – ΟΚΧΕ) με τις ανά 20 μέτρων ισοϋψείς καμπύλες και τα υψομετρικά σημεία της περιοχής μελέτης. Με βάση αυτό το ΨΜΥ δημιουργήθηκαν, ακολούθως, τα επίπεδα της γωνίας κλίσης, της διεύθυνσης κλίσης, της γενικής καμπυλότητας, της καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης, της καμπυλότητας παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, της τοπογραφικής υγρασίας (TWI), και της χειμαρρικής ισχύος (SPI).

Η δημιουργία του επιπέδου της κάλυψης γης βασίστηκε στα δεδομένα του «Συστήματος Αναγνώρισης Αγροτεμαχίων “LPIS”»² για το 2016 (διαθέσιμα από τον Οργανισμό Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων – ΟΠΕΚΕΠΕ). Το αρχικό σύνολο δεδομένων παρουσίαζε με μεγάλη λεπτομέρεια τις πολυγωνικές οντότητες για την κάλυψη γης της περιοχής μελέτης.

Λόγω της ομοιότητας μεταξύ της κλίμακας των χρησιμοποιούμενων φύλλων χάρτη στην περιφερειακή ανάλυση και της διενεργηθείσας λεπτομερέστερης ανάλυσης, η χρήση των αρχικών λεπτομερών γεωλογικών σχηματισμών του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας, κλίμακας 1:50.000, κρίθηκε ωφέλιμη και για τη συγκεκριμένη κλίμακα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για τη δημιουργία των επιπέδων απόστασης και πυκνότητας, ήταν πρωτίστως απαραίτητη η απόκτηση των κατάλληλων γραμμικών οντοτήτων. Αν και η πηγή για τα δεδομένα του οδικού δικτύου ήταν η ίδια σε σχέση με την περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης (διαδικτυακή χαρτογραφική υπηρεσία “OpenStreetMap”), η διαφοροποίηση τους εντοπιζόταν στο βαθμό λεπτομέρειας που τα χαρακτήριζε. Πιο συγκεκριμένα, για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, το οδικό δίκτυο περιλάμβανε τους κύριους οδικούς άξονες (εθνικές οδούς, αυτοκινητόδρομους, πρωτεύοντες και δευτερεύοντες δρόμους) μαζί με κάποιες επιπλέον κατηγορίες δρόμων (τριτεύοντες δρόμους και δρόμους υπό κατασκευή) της περιοχής μελέτης. Το υδρογραφικό δίκτυο προήλθε από τη ψηφιοποίηση των αντίστοιχων γραμμικών

² Το “LPIS” είναι ένα σύστημα καταγραφής των αγροτεμαχίων για τα οποία ζητείται οικονομική ενίσχυση στα πλαίσια των γεωργικών επιδοτήσεων (Σαλαχώρης, 2008). Τα αγροτεμάχια αναπαριστώνται πολυγωνικώς ως «ενότητες ελέγχου Plots» (γι’ αυτό και το σύστημα είναι γνωστό κι ως “Plots”) και αφορούν το σύνολο σχεδόν του Ελληνικού χώρου. Το σύστημα ενημερώνεται κάθε χρόνο από τη διαχειρίστρια αρχή του η οποία είναι η Διεύθυνση Τοπογραφικής του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.

οντοτήτων χρησιμοποιώντας, αυτή τη φορά, ως υπόβαθρα 18 (Ευηνοχώρι, Ναύπακτος, Αμυγδαλέα, Πάτρα, Χαλανδρίτσα, Αίγιο, Δερβέني, Ξυλόκαστρο, Περαχώρα, Κερτέζι, Δάφνη, Κανδήλα, Νεμέα, Κόρινθος, Σοφικό, Τρίπολη, Ναύπλιο, Λυγουριό) από τα συνολικά 391 φύλλα του Χάρτη Γενικής Χρήσεως της Ελλάδας, κλίμακας 1:50.000 (ΓΥΣ, 1989). Η περίπτωση των τεκτονικών στοιχείων ήταν παρόμοια μ' αυτή των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς η εκ νέου χρήση των αντίστοιχων αρχικών οντοτήτων του Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας, κλίμακας 1:50.000, κρίθηκε ωφέλιμη.

Το επίπεδο της βλάστησης (NDVI), τέλος, προήλθε από την επεξεργασία δεδομένων του δορυφορικού συστήματος "Sentinel-2" τα οποία παρέχονται στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος παρατήρησης της Γης "Copernicus" (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, 30/04/2017). Τα δεδομένα αυτά είχαν τη μορφή οπτικών εικόνων (με ημερομηνία λήψης 9 Απριλίου 2017), χωρικής ανάλυσης 10 μέτρων, και αφορούσαν τα απαιτούμενα για την κατασκευή του NDVI φασματικά κανάλια του συστήματος: κανάλι 4 για το ορατό κόκκινο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και κανάλι 8 για το κοντινό υπέρυθρο.

4.2.3 Μεθοδολογία

Τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης ήταν ακριβώς τα ίδια μ' εκείνα της περιφερειακής κλίμακας (Σχήμα 4.5). Αν και οι επιλογές για την πλειοψηφία των παραμέτρων ανάλυσης παρέμειναν οι ίδιες, για κάποιες απ' αυτές προτιμήθηκαν να διαφοροποιηθούν. Πιο αναλυτικά:

4.2.3.1 Δειγματοληψία δεδομένων

Από τις συνολικά 76 χαρτογραφημένες κατολισθητικές πολυγωνικές οντότητες, το 80% (61 οντότητες) επιλέχθηκε μ' έναν τυχαίο τρόπο ως σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% (15 οντότητες) διατηρήθηκε ως σύνολο επικύρωσης. Ακολούθως, λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα ανάλυσης, τόσο τα προκύπτοντα σύνολα κατολισθητικών δεδομένων, όσο και το «κατολισθητικώς ανεπηρέαστο» τμήμα της περιοχής μελέτης – αφαιρώντας από τη συνολική έκταση τις κατολισθητικές πολυγωνικές οντότητες και μια ζώνης επιρροής 50 μέτρων – μετατράπηκαν σε ψηφιδωτά επίπεδα με μέγεθος ψηφίδας 20 μέτρα. Η εξαγωγή των

κεντροειδών σημείων από τις ψηφίδες αυτών των επιπέδων είχε ως αποτέλεσμα τη λήψη 5.140 κατολισθητικών σημείων για το σύνολο εκπαίδευσης, 446 κατολισθητικών σημείων για το σύνολο επικύρωσης, και 913.521 σημείων για την μη-κατολισθητική περιοχή. Έπειτα, απ' αυτά τα μη-κατολισθητικά σημεία, επιλέχθηκε μέσω τυχαίας δειγματοληψίας ένας ίσος αριθμός σημείων για κάθε ένα από τα σύνολα κατολισθητικών δεδομένων. Από την πρόσθεση των δειγμάτων προέκυψε τελικώς ένα σύνολο εκπαίδευσης με συνολικά 10.280 σημεία, καθώς και ένα σύνολο επικύρωσης με συνολικά 892 σημεία. Για την ολοκλήρωση της δειγματοληπτικής διαδικασίας, οι τιμές 0 και 1 εκχωρήθηκαν στα μη-κατολισθητικά και κατολισθητικά, αντιστοίχως, σημεία των τελικώς διαμορφωμένων συνόλων δεδομένων.

4.2.3.2 Προετοιμασία δεδομένων

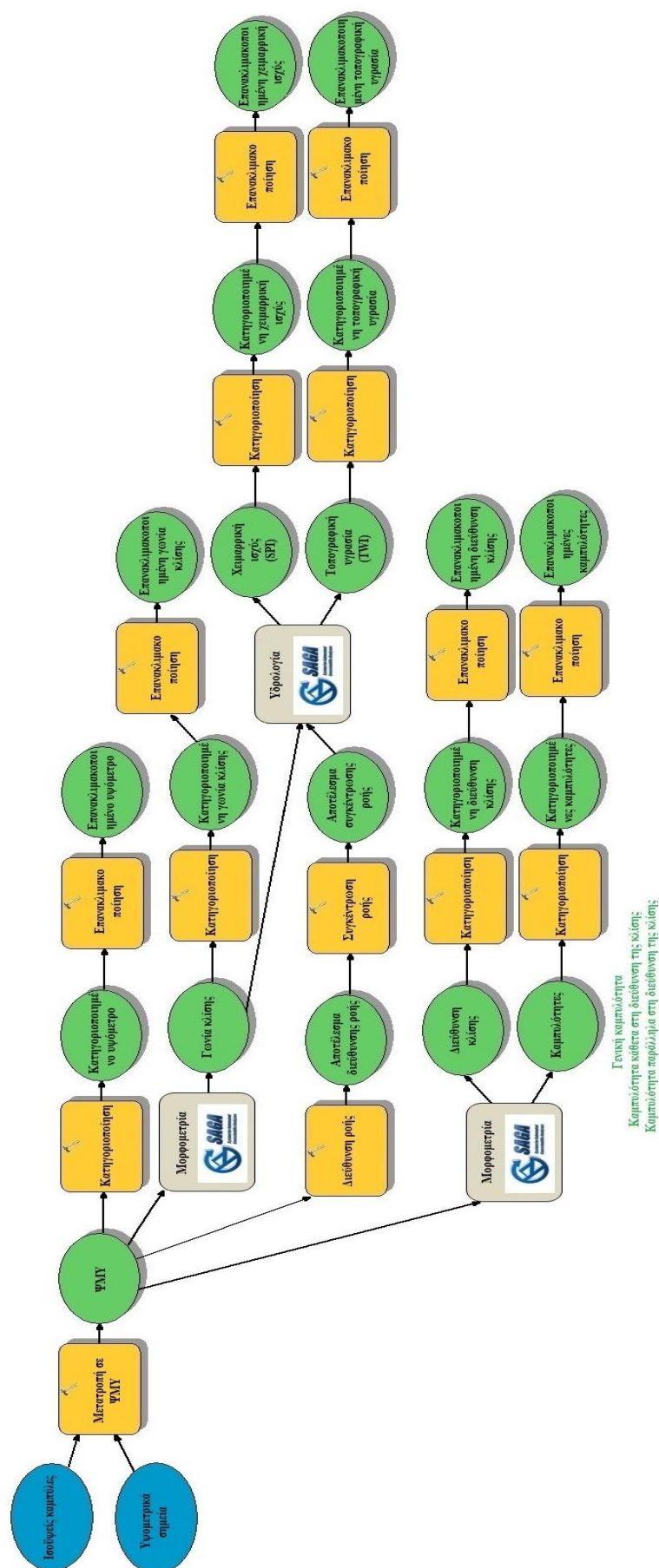
Αν και τα σύνολα δεδομένων των αιτιολογικών παραγόντων διέφεραν μεταξύ τους ως προς την αρχική μορφή, όλα τα παραγόμενα επίπεδά τους μεταφέρθηκαν σε ψηφιδωτή μορφή με μέγεθος ψηφίδας (χωρική ανάλυση) 20 μέτρα.

Για τους αντίστοιχους (με την περίπτωση της περιφερειακής κλίμακας ανάλυσης) τύπους συνεχών παραγοντικών επιπέδων, προτιμήθηκε εκ νέου η κατηγοριοποίηση τους τόσο σύμφωνα με τη διαθέσιμη από το λογισμικό ArcGIS μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», όσο και με το «χειροκίνητο τρόπο». Αντιθέτως, με δεδομένη την αντιστοιχία, αυτή τη φορά, μεταξύ της κλίμακας ανάλυσης και της υψηλής λεπτομέρειας που χαρακτήριζε την αρχική μορφή των διακριτών παραγοντικών επιπέδων, αποφασίστηκε η διατήρηση των αρχικών κατηγοριών τους.

Στη συνέχεια, οι δεκαπέντε αιτιολογικοί παράγοντες επανακλιμακοποιήθηκαν στο εύρος τιμών 0,1-0,9 με βάση τις τιμές που προέκυψαν από την εκτέλεση του μοντέλου FR (Σχήμα 4.30).

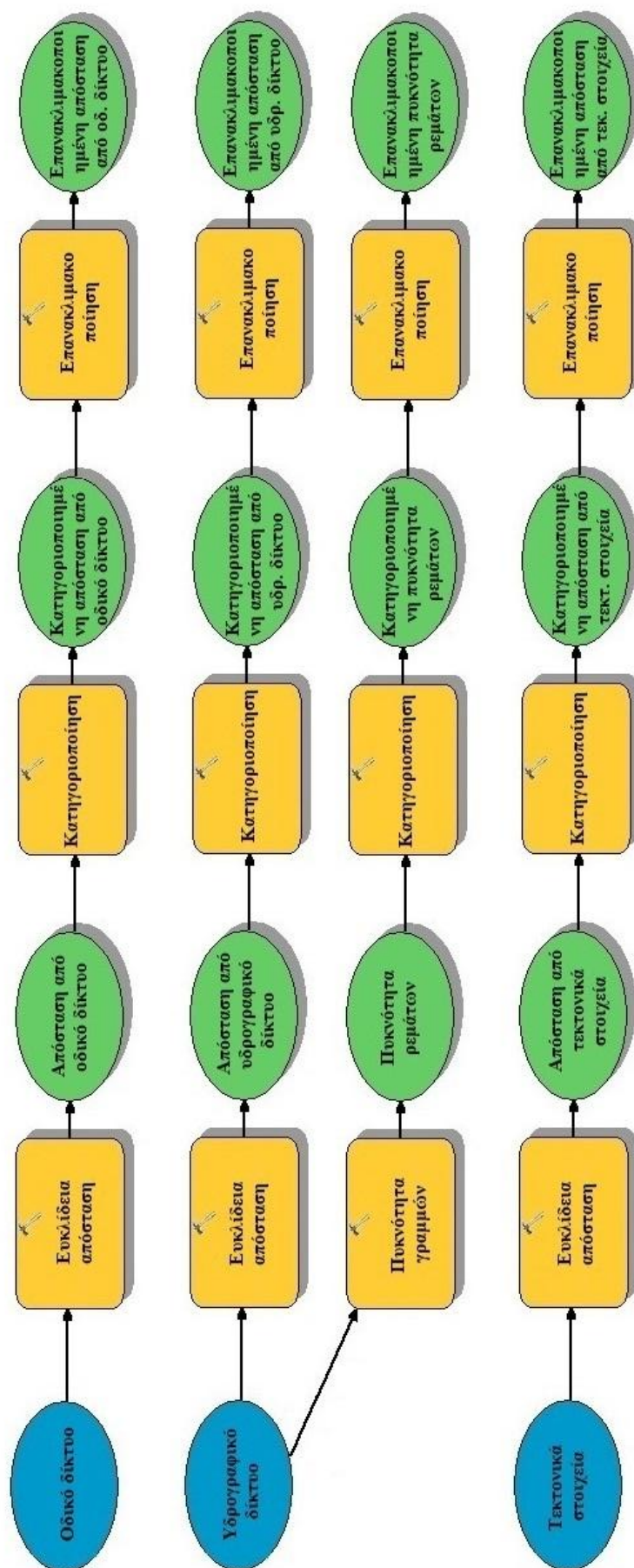
4.2.3.3 Επιλογή παραγόντων

Και για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, η επιλογή των σημαντικών προς εξέταση παραγόντων από τους συνολικά δεκαπέντε αιτιολογικούς παράγοντες που αρχικώς συλλέχθηκαν, επετεύχθη μέσω της βηματικής λογιστικής παλινδρόμησης (Σχήμα 4.10).

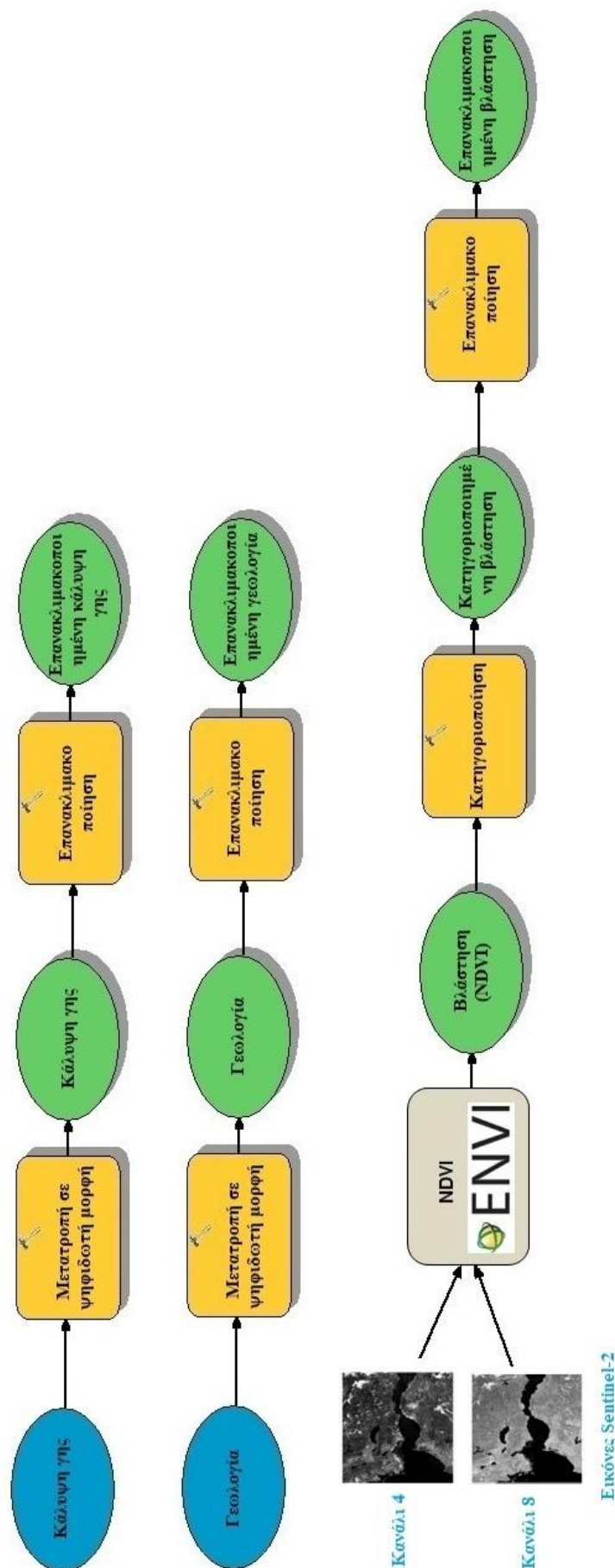


Σχήμα 4.30: Διάγραμμα βημάτων προετοιμασίας δεδομένων αιτιολογικών παραγόντων με τη μορφή

«τροποποιημένου» model builder.



Σχήμα 4.30: (Συνέχεια).



Σχήμα 4.30: (Συνέχεια).

Τα πρώτα βήματα της διαδικασίας επιλογής ήταν η αντιστοίχιση των 10.280 (κατολισθητικών και μη-κατολισθητικών) σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των επανακλιμακοποιημένων παραγόντων, και η εισαγωγή των παραγόμενων συγκεντρωτικών πινάκων στο λογισμικό στατιστικών αναλύσεων SPSS. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η πολυσυγγραμμικότητα των εισαχθέντων ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω του υπολογισμού των δεικτών TOL και VIF.

Πίνακας 4.15: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.

Παράγοντας	Δείκτης TOL	Δείκτης VIF
Υψόμετρο	0,9	1,1
Γωνία κλίσης	0,5	2,0
Διεύθυνση κλίσης	0,9	1,1
Γενική καμπυλότητα	0,3	3,1
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	0,6	1,8
Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	0,5	2,1
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,6	1,8
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,9	1,1
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0,9	1,1
Πυκνότητα ρεμάτων	0,9	1,1
Χειμαρρική ισχύς (SPI)	0,8	1,3
Τοπογραφική υγρασία (TWI)	0,7	1,4
Βλάστηση (NDVI)	0,9	1,1
Κάλυψη γης	0,6	1,8
Γεωλογία	0,7	1,5

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.14, οι αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερες από 0,2 για το δείκτη TOL και μικρότερες από 4 για το δείκτη VIF, καταδεικνύοντας ότι δεν υφίσταται θέμα πολυσυγγραμμικότητας για κανέναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες.

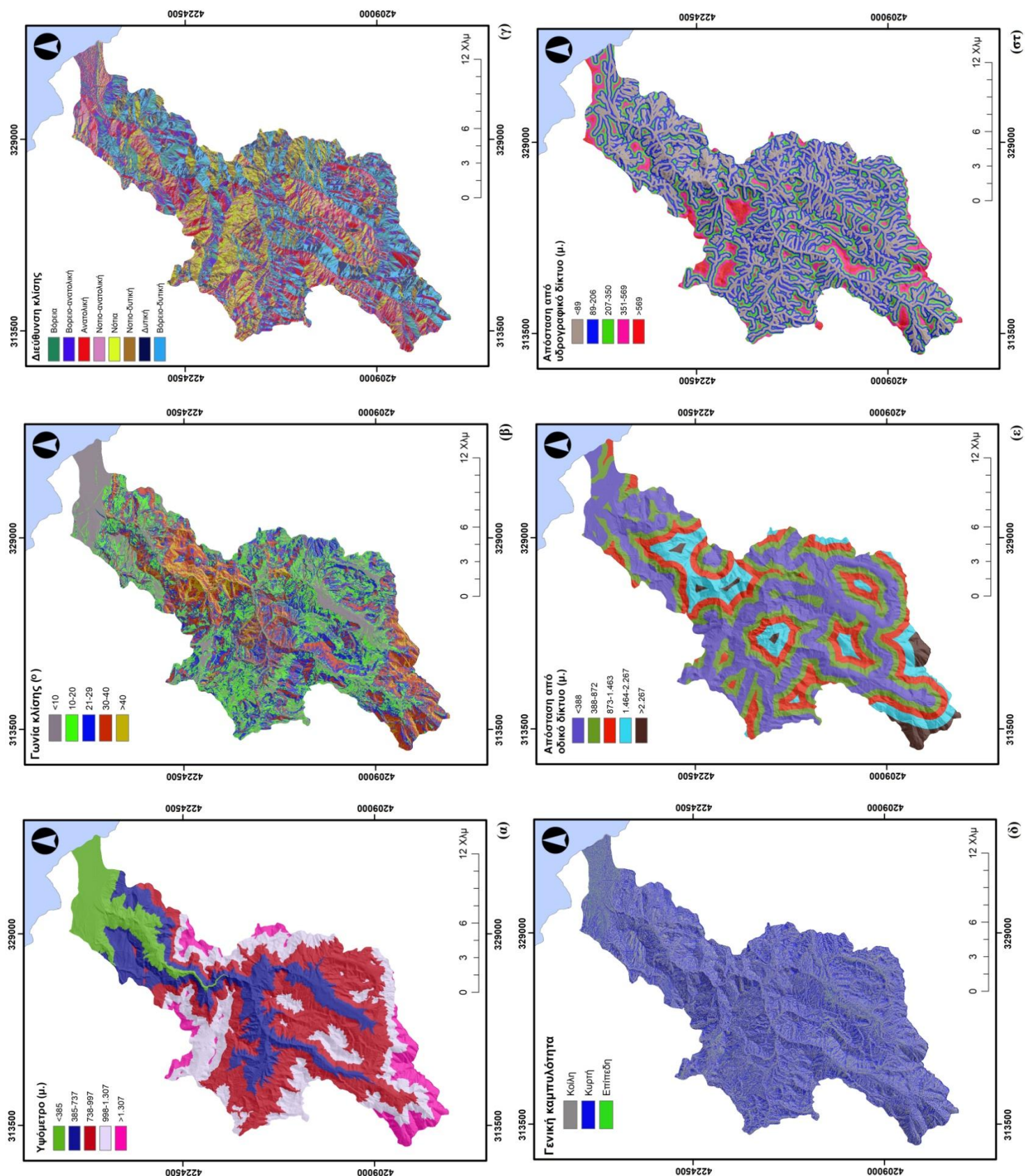
Σειρά είχε η διενέργεια της «προς τα εμπρός» βηματικής λογιστικής παλινδρόμησης με τιμή πιθανότητας ίση με 0,05. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.15, η παλινδρόμηση τερματίστηκε

στο 12^ο στάδιο δίνοντας ένα μοντέλο το οποίο είχε εισάγει την πλειοψηφία των παραγόντων. Πιο συγκεκριμένα, στο διάστημα εμπιστοσύνης 95%, δώδεκα παράγοντες όπως το υψόμετρο, η γωνία κλίσης, η διεύθυνση κλίσης, η γενική καμπυλότητα, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, η πυκνότητα ρεμάτων, η χειμαρρική ισχύς (SPI), η βλάστηση (NDVI), η γεωλογία και η κάλυψη γης παρουσίασαν μια στατιστικώς σημαντική συσχέτιση (τιμή σπουδαιότητας μικρότερη από 0,05) με την εκδήλωση κατολισθήσεων. Από την άλλη πλευρά, μόνο τρεις παράγοντες όπως η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, η καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης και η τοπογραφική υγρασία (TWI) δεν εμφάνισαν στατιστική συσχέτιση (τιμή σπουδαιότητας μεγαλύτερη από 0,05) με την εκδήλωση του φαινομένου.

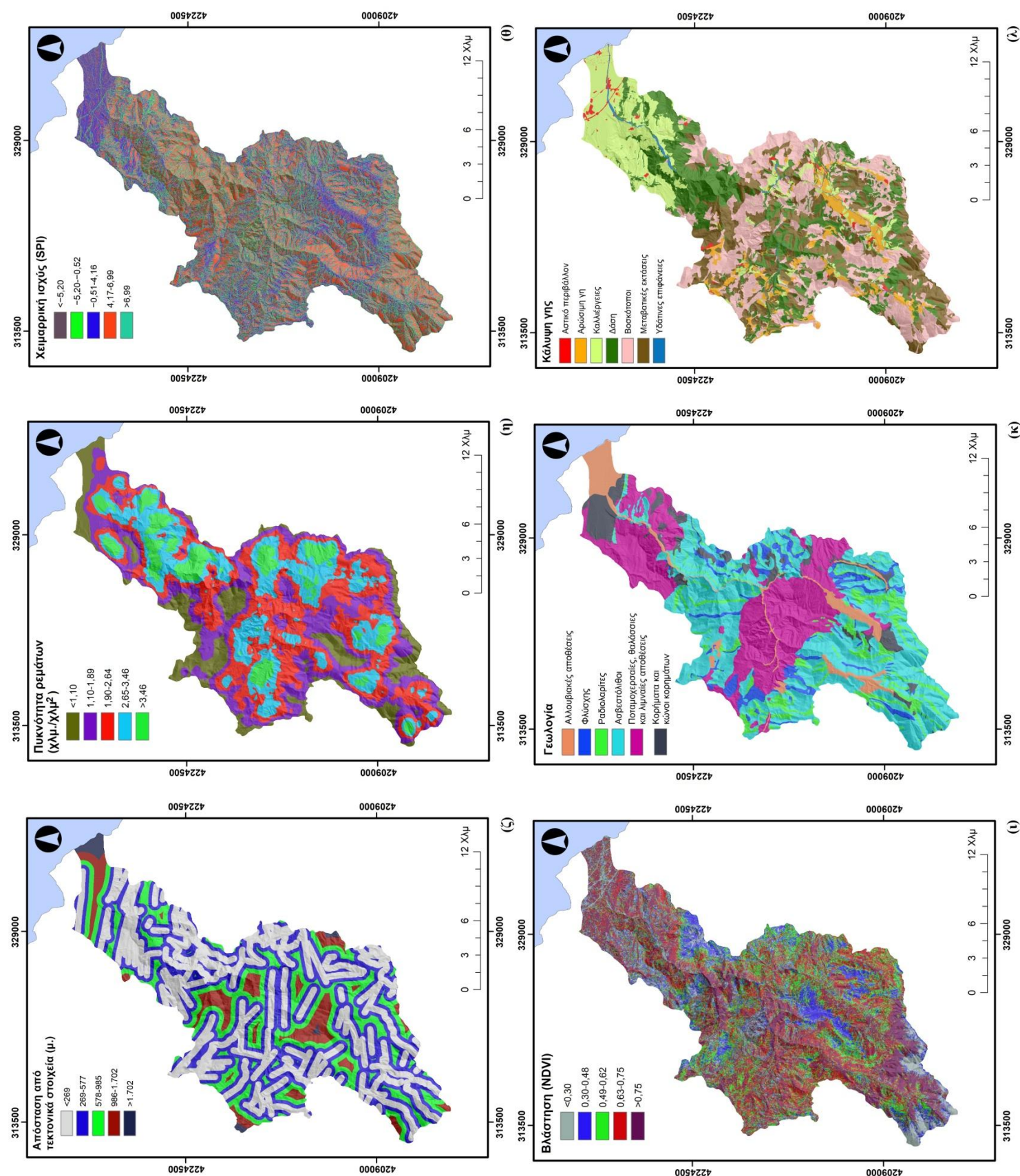
Πίνακας 4.16: Τιμή σπουδαιότητας αιτιολογικών παραγόντων.

Στάδιο	Παράγοντας	Τιμή σπουδαιότητας
12 ^ο	Υψόμετρο	0,00
	Γωνία κλίσης	0,00
	Διεύθυνση κλίσης	0,00
	Γενική καμπυλότητα	0,00
	Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	0,88
	Καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	0,22
	Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,00
	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,00
	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0,01
	Πυκνότητα ρεμάτων	0,00
	Χειμαρρική ισχύς (SPI)	0,00
	Τοπογραφική υγρασία (TWI)	0,68
	Βλάστηση (NDVI)	0,00
	Κάλυψη γης	0,00
	Γεωλογία	0,00

*Με πλάγια μορφή στις τιμές σπουδαιότητας οι εκτιμώμενοι ως σημαντικοί παράγοντες.



Σχήμα 4.31: Επιλεγμένοι προς ανάλυση αιτιολογικοί παράγοντες. (α) Γωνία κλίσης, (β) διεύθυνση κλίσης, (δ) γενική καμπυλότητα, (ε) απόσταση από οδικό δίκτυο, και (στ) απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο.



Σχήμα 4.31: (Συνέχεια). (ζ) Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, (η) πυκνότητα ρεμάτων, (θ) χειμαρρική ισχύς (SPL), (ι) βλάστηση (NDVI), (κ) γεωλογία, και (λ) κάλυψη γης.

Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των μοντέλων για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης βασίστηκε τελικώς στην εξέταση και ανάλυση των δώδεκα προαναφερθέντων αιτιολογικών παραγόντων.

4.2.3.4 Εφαρμογή μοντέλων ανάλυσης

Όπως ειπώθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η εφαρμογή των μοντέλων για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης αφορούσε αποκλειστικά τα «καθοδηγούμενα από τα δεδομένα» ποσοτικά μοντέλα. Συνεπώς, από τα συνολικά εννέα μοντέλα της περιφερειακής κλίμακας ανάλυσης, εφαρμόστηκαν μόνο τα έξι (FR, LSI, WoE, LR, ANN και ANFIS). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, στα πλαίσια της εφαρμογής των συγκεκριμένων μοντέλων, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η εξέταση της απόδοσης της επιλογής στην παράμετρο ανάλυσης που σχετίζεται με την κατηγοριοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας, ο διαχωρισμός τους σε κατηγορίες δε βασίστηκε μόνο στη μέθοδο των «φυσικών ορίων» αλλά και σε δύο ακόμη μεθόδους ταξινόμησης, αυτές της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων». Αναλυτικότερα:

Λόγος συχνοτήτων (FR)

Υλοποιώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περίπτωση της περιφερειακής κλίμακας (Σχήμα 4.14) και χρησιμοποιώντας ως βάση τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των 5.140 κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των δώδεκα (κατηγοριοποιημένων) αιτιολογικών παραγόντων, εφαρμόστηκε το μοντέλο FR για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Υπολογίστηκαν οι FR τιμές για τις κατηγορίες των παραγόντων, και οι βασισμένοι στη τυπική απόκλιση συντελεστές βαρύτητας για τους παράγοντες. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες («Πολύ χαμηλή», «Χαμηλή», «Μέτρια», «Υψηλή», και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα) με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων», διαμορφώνοντας έναν αντίστοιχο αριθμό χαρτών.

Δείκτης επιδεκτικότητας κατολίσθησεων (LSI)

Εκτελώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περιφερειακή κλίμακα (Σχήμα 4.15) και χρησιμοποιώντας ως βάση τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των κατολισθητικών

σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των δώδεκα παραγόντων, εφαρμόστηκε το μοντέλο LSI για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Υπολογίστηκαν οι LSI τιμές για τις κατηγορίες των παραγόντων, και οι βασισμένοι στη τυπική απόκλιση συντελεστές βαρύτητας για τους παράγοντες. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων».

Βάρος της ένδειξης (WoE)

Πραγματοποιώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περιφερειακή κλίμακα (Σχήμα 4.16) και χρησιμοποιώντας ως βάση τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των κατολισθητικών σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις κατηγορίες των δώδεκα παραγόντων, εφαρμόστηκε το μοντέλο WoE για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Υπολογίστηκαν οι W^+ , W^- και C τιμές για τις κατηγορίες των παραγόντων, και οι βασισμένοι στη τυπική απόκλιση συντελεστές βαρύτητας για τους παράγοντες.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου ανεξαρτησίας μέσω της εκτέλεσης βασισμένων στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεων μεταξύ των παραγόντων εμφανίζονται στον Πίνακα 4.16. Λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό ελευθερίας (1) και το επίπεδο εμπιστοσύνης (99%) του διενεργηθέντος ελέγχου, οι εκτιμώμενες τιμές του χ^2 υπέδειξαν δεκαέξι δυνατούς συνδυασμούς παραγόντων (Πίνακα 4.17). Δεδομένης της συμμετοχής σ' αυτόν του μέγιστου δυνατού αριθμού παραγόντων (τέσσερις) – δύο από τους οποίους (γωνία κλίσης, υψόμετρο) συγκαταλέγονται στους ιδιαίτερος σημαντικούς (με βάση την τυπική απόκλιση των C τιμών τους) – ο πρώτος συνδυασμός παραγόντων ήταν αυτός που τελικώς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για την εξεταζόμενη περιοχή.

Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων».

Λογιστική παλινδρόμηση (LR)

Υλοποιώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περιφερειακή κλίμακα (Σχήμα 4.17) και αξιοποιώντας, αυτή τη φορά, τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των 10.280 σημείων του συνόλου εκπαίδευσης (εξαρτημένη μεταβλητή, με τιμές 0 και 1) με τις τιμές των δώδεκα επανακλιμακοποιημένων αιτιολογικών παραγόντων (ανεξάρτητες μεταβλητές), εφαρμόστηκε

Πίνακας 4.17: Βασισμένες στο χ^2 ανά ζεύγη συγκρίσεις μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων για τον έλεγχο ανεξαρτησίας τους.

Παράγοντας	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
[1] Υψόμετρο		4,14	8,82	0,82	3,07	0,45	36,62	8,29	26,18	8,61	13,64	94,84
[2] Γωνία κλίσης			180,54	0,03	254,46	1,82	117,32	2,46	12,19	82,21	491,02	1.061,59
[3] Διεύθυνση κλίσης				16,52	295,14	1,50	103,74	3,82	27,20	136,01	212,38	179,01
[4] Γενική καμπυλότητα					0,89	2,86	0,76	6,42	139,39	0,28	2,90	1,23
[5] Απόσταση από οδικό δίκτυο						56,99	238,44	325,60	40,61	233,86	1.206,35	1.262,21
[6] Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο							172,19	221,11	2,16	88,20	7,66	33,81
[7] Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία								97,40	0,02	24,19	162,40	313,77
[8] Πυκνότητα ρεμάτων									4,53	27,34	31,80	129,58
[9] Χειμαρρική ισχύς (SPI)										15,22	53,08	33,90
[10] Βλάστηση (NDVI)											47,53	92,41
[11] Κάλυψη γης												797,98
[12] Γεωλογία												

Πίνακας 4.18: Δυνατοί συνδυασμοί αιτιολογικών παραγόντων.

Τύπος παράγοντα	Συνδυασμοί παραγόντων															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Τοπογραφία	Υψόμετρο															
	Γωνία κλίσης		Γωνία κλίσης	Γωνία κλίσης	Διεύθυνση κλίσης	Διεύθυνση κλίσης										
Υδρολογία	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα			Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα	Γενική καμπυλότητα			
	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο			Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο						Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		
				Πυκνότητα ρεμάτων		Πυκνότητα ρεμάτων				Πυκνότητα ρεμάτων						Πυκνότητα ρεμάτων
														Χειμαρρική ισχύς (SPI)	Χειμαρρική ισχύς (SPI)	Χειμαρρική ισχύς (SPI)
Ανθρώπινη παρέμβαση		Απόσταση από οδικό δίκτυο					Απόσταση από οδικό δίκτυο									
Γεωλογία												Κάλυψη γης	Γεωλογία			
									Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία						Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	
Βλάστηση											Βλάστηση (NDVI)					

το μοντέλο LR για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Τα αποτελέσματα του ελέγχου πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18. Σύμφωνα με τον συγκεκριμένο Πίνακα, οι εκτιμώμενες τιμές βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερες από 0,5 για το δείκτη TOL και μικρότερες από 2 για το δείκτη VIF, καταδεικνύοντας ότι δεν υφίσταται θέμα πολυσυγγραμμικότητας για κανέναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες.

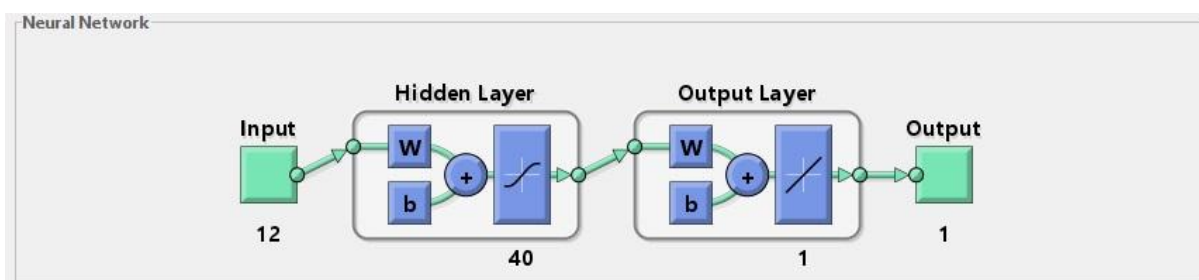
Πίνακας 4.19: Δείκτες TOL και VIF για τον έλεγχο πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των αιτιολογικών παραγόντων.

Παράγοντας	Δείκτης TOL	Δείκτης VIF
Υψόμετρο	0,9	1,1
Γωνία κλίσης	0,6	1,7
Διεύθυνση κλίσης	0,9	1,1
Γενική καμπυλότητα	0,9	1,1
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,6	1,8
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,9	1,1
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0,9	1,1
Πυκνότητα ρεμάτων	0,9	1,1
Χειμαρρική ισχύς (SPI)	0,9	1,2
Βλάστηση (NDVI)	0,9	1,1
Κάλυψη γης	0,6	1,8
Γεωλογία	0,7	1,5

Στη συνέχεια, μέσω της εκτέλεσης της απλής λογιστικής παλινδρόμησης, προέκυψαν οι συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας, τέλος, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσιων διαστημάτων».

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN)

Εκτελώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περιφερειακή κλίμακα (Σχήμα 4.18) και αξιοποιώντας τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις τιμές των δώδεκα επανακλιμακοποιημένων παραγόντων, εφαρμόστηκε το μοντέλο ANN για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Λόγω της σημαντικής αύξησης του μεγέθους των δεδομένων εισόδου με τα οποία θα «εκπαιδευόταν» το εμπροσθοτροφοδοτούμενο πολυεπίπεδο δίκτυο για τη συγκεκριμένη κλίμακα ανάλυσης, ήταν αναγκαία η διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής του σε σχέση με την αρχιτεκτονική του αντίστοιχου δικτύου στην περιφερειακή κλίμακα. Στην προκειμένη περίπτωση, το επίπεδο εισόδου περιείχε 12 κόμβους που αντιπροσώπευαν τους δώδεκα αιτιολογικούς παράγοντες. Το επίπεδο εξόδου συνέχισε να περιλαμβάνει έναν μόνο κόμβο ο οποίος παρήγαγε το τελικό αποτέλεσμα του δικτύου για την απουσία ή παρουσία κατολίσθησης. Για το κρυμμένο επίπεδο, ο βέλτιστος αριθμός κόμβων εντοπίστηκε μέσω της διαδικασίας «δοκιμής και σφάλματος». Ως εκ τούτου, ένας σημαντικός αριθμός αρχιτεκτονικών του δικτύου ελέγχθηκε μεταβάλλοντας κάθε φορά τον αριθμό των κόμβων στο αντίστοιχο επίπεδο. Αυτό είχε αποτέλεσμα την ανάδειξη τελικώς ενός αριθμού 40 κρυμμένων κόμβων ως τη βέλτιστη επιλογή.



Σχήμα 4.32: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος δικτύου.

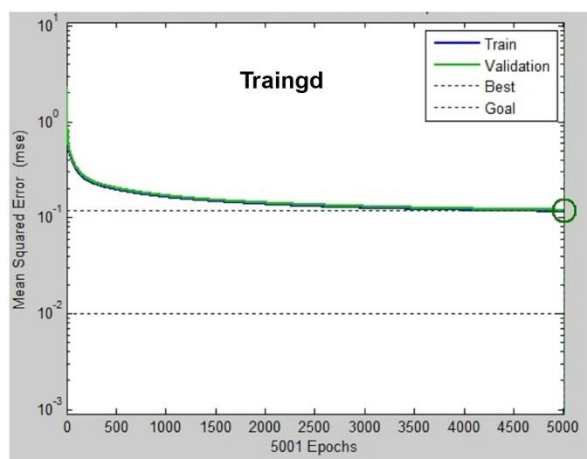
Για την εύρεση του «βέλτιστου», ανεπηρέαστου από το πρόβλημα της υπερ-εκπαίδευσης, δικτύου, το 80% (8.224 εγγραφές πίνακα) των «τροφοδοτημένων» σ' αυτό δεδομένων (αρχικό σύνολο εκπαίδευσης) επιλέχθηκε ν' αποτελέσει το (τελικό) σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% (2.056 εγγραφές πίνακα) το σύνολο ελέγχου. Και σ' αυτήν την περίπτωση, οι παράμετροι του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης, όπως ο ρυθμός εκμάθησης (0,01) και η ορμή (0,9), προσδιορίστηκαν μέσω της διαδικασίας «δοκιμής και σφάλματος». Οι αρχικοί συντελεστές βαρύτητας, επίσης, ανατέθηκαν μ' έναν τυχαίο τρόπο στους συνδέσμους του δικτύου, ενώ η τιμή σφάλματος (MSE) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ως κριτήρια διακοπής της εκπαιδευτικής διαδικασίας ορίστηκαν σε 0,01 και 5.000, αντιστοίχως. Η απόδοση

των διαθέσιμων, από το λογισμικό MATLAB, παραλλαγών του αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα. Σ' έναν αρκετά μικρό αριθμό επαναλήψεων, η παραλλαγή "Levenberg-Marquardt (Trainlm)" εμφανίζει τη χαμηλότερη MSE τιμή τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης, όσο και στο σύνολο ελέγχου. Συνεπώς, η συγκεκριμένη παραλλαγή κρίθηκε ως η πλέον βέλτιστη επιλογή.

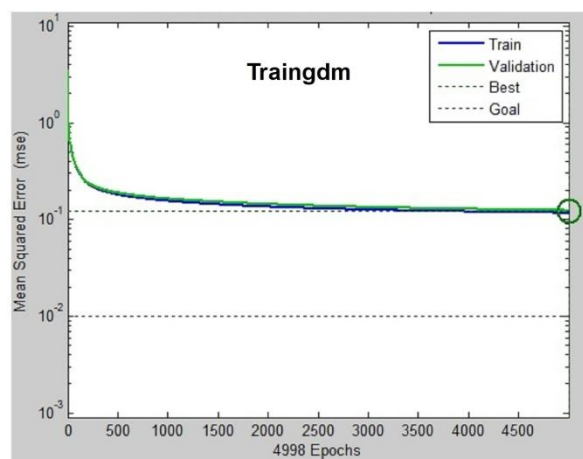
Πίνακας 4.20: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης της βέλτιστης παραλλαγής του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης.

Ονομασία	Παραλλαγή αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	Επανάληψη «βέλτιστου» μοντέλου (πριν την έναρξη υπερ-εκπαίδευσης)	Σφάλμα (MSE) στο σύνολο εκπαίδευσης	Σφάλμα (MSE) στο σύνολο ελέγχου
Traingd	Gradient descent back-propagation	5.000	—	0,116	0,120
Traingdm	Gradient descent with momentum back-propagation	5.000	4.998	0,117	0,124
Traingda	Gradient descent with adaptive learning rule back-propagation	5.000	139	0,128	0,125
Traingdx	Gradient descent with momentum and adaptive learning rule back-propagation	5.000	1.433	0,083	0,087
Trainbfg	BFGS Algorithm	5.000	143	0,069	0,078
Traincgb	Powell-Beale Restarts	5.000	360	0,059	0,064
Traincgp	Polak-Ribière Update	5.000	444	0,057	0,072
Trainlm	Levenberg-Marquardt	5.000	103	0,046	0,060
Trainrp	Resilient Backpropagation	5.000	991	0,056	0,067
Trainscg	Scaled Conjugate Gradient	5.000	418	0,059	0,070

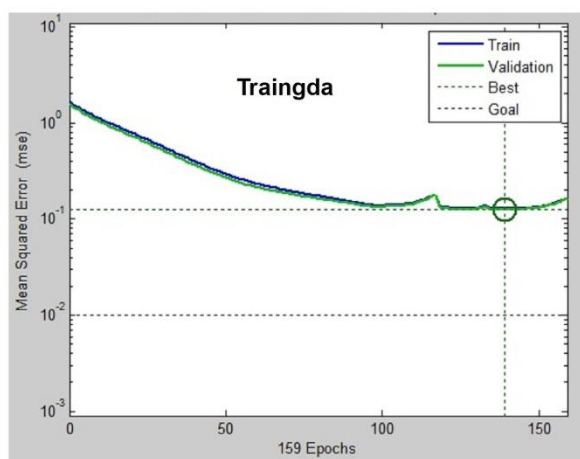
Στη συνέχεια, μέσω της εκτέλεσης της διενεργηθείσας, στα παραγόμενα αποτελέσματα του δικτύου, ανάλυση Garson, προέκυψαν οι (κανονικοποιημένοι) συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας, τέλος, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων».



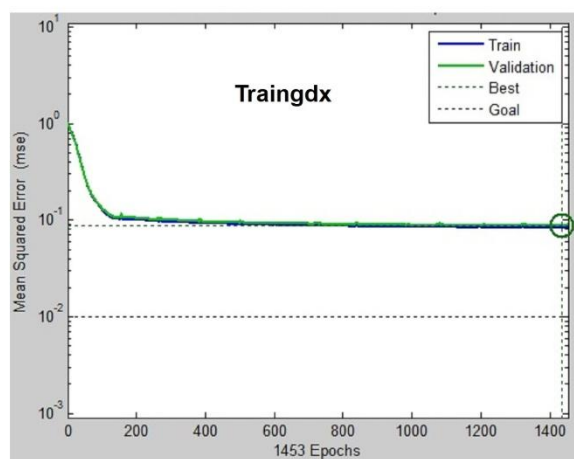
(α)



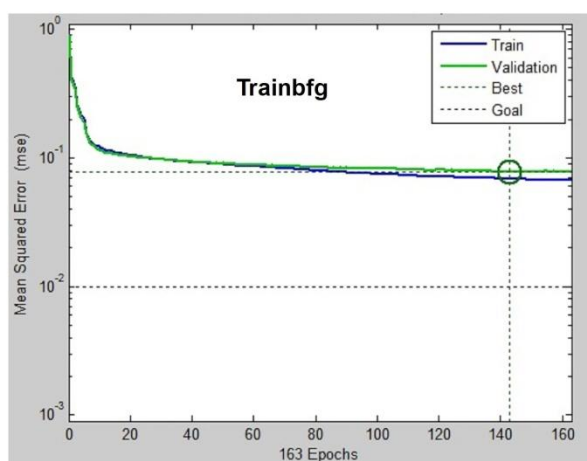
(β)



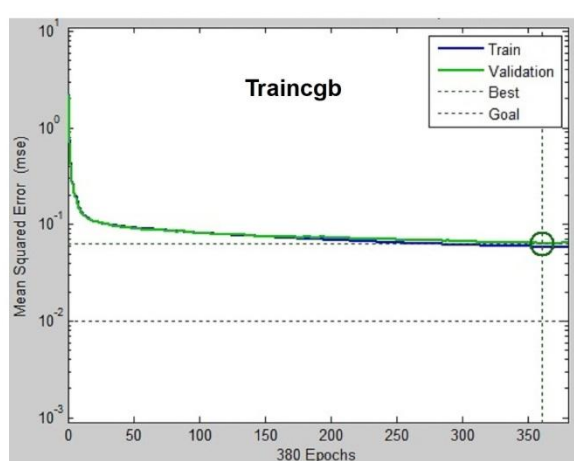
(γ)



(δ)

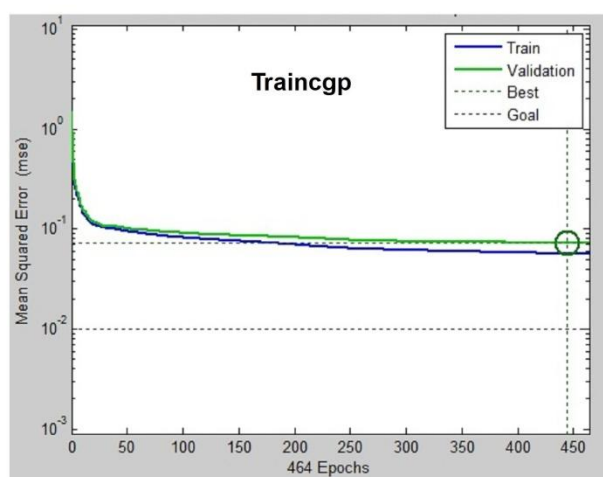


(ε)

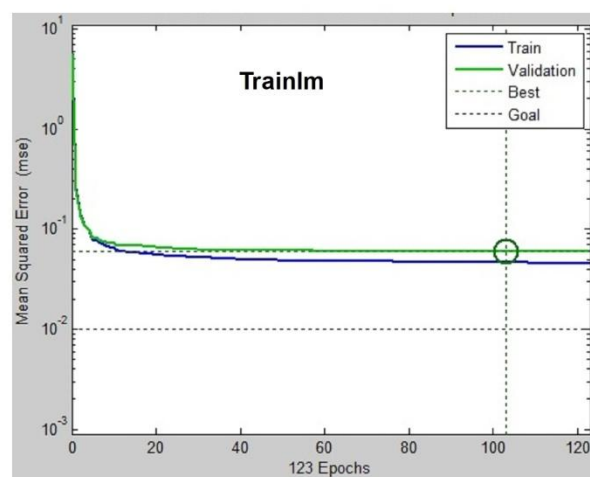


(στ)

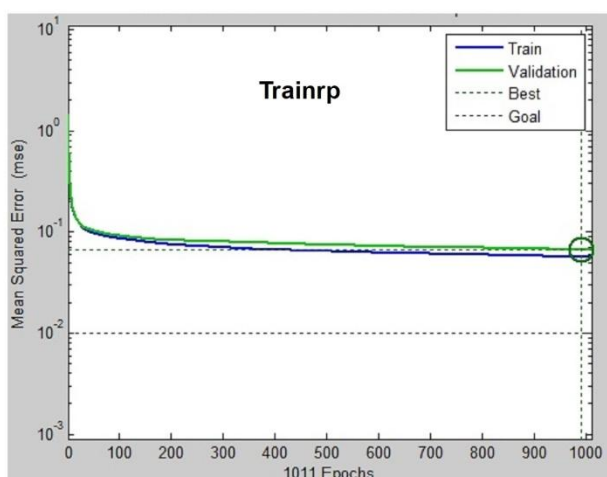
Σχήμα 4.33: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων (epochs) για τις διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου οπισθόδρομης διάδοσης. (α) Traingd, (β) Traingdm, (γ) Traingda, (δ) Traingdx, (ε) Trainbfg, και (στ) Traincgb.



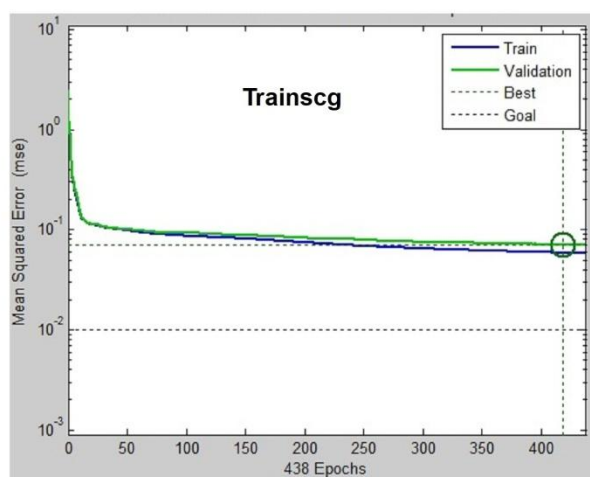
(ζ)



(η)



(θ)



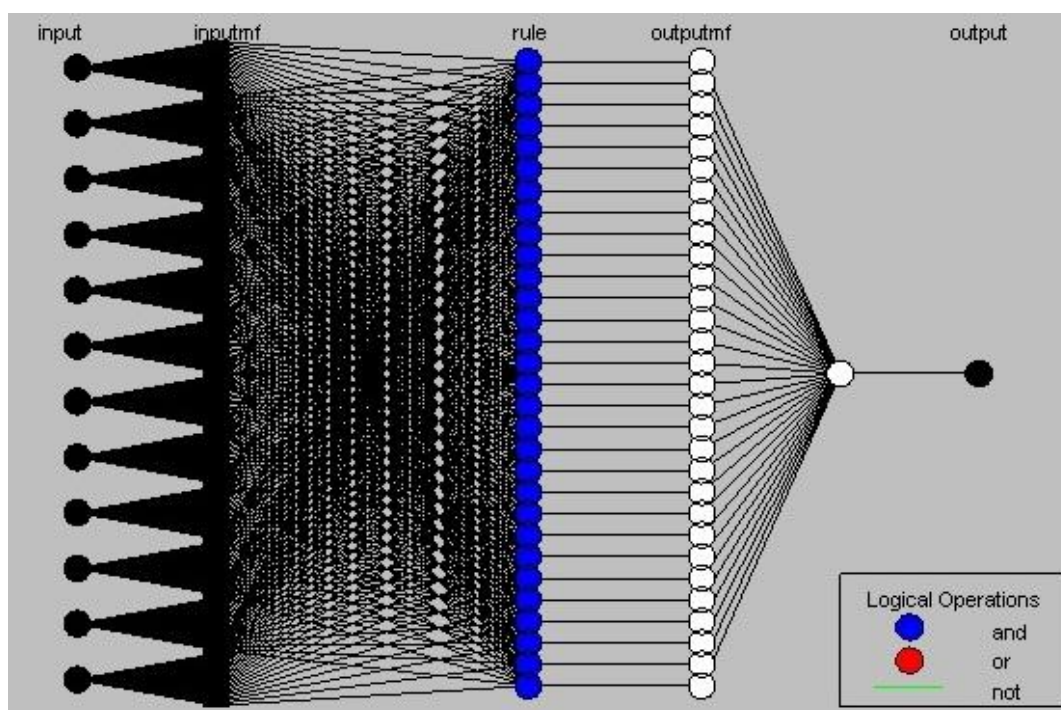
(ι)

Σχήμα 4.33: (Συνέχεια). (ζ) Traincgp, (η) Trainlm, (θ) Trainrp, και (ι) Trainscg.

Προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμού (ANFIS)

Πραγματοποιώντας τις ίδιες ενέργειες μ' αυτές στην περιφερειακή κλίμακα (Σχήμα 4.21) και αξιοποιώντας τον συγκεντρωτικό πίνακα αντιστοίχισης των σημείων του συνόλου εκπαίδευσης με τις τιμές των δώδεκα επανακλιμακοποιημένων παραγόντων, εφαρμόστηκε το μοντέλο ANFIS για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Ακολουθώντας την ίδια τακτική με προηγουμένως, για την εύρεση του «βέλτιστου», ανεπηρέαστου από το πρόβλημα της υπερ-εκπαίδευσης, δικτύου, το 80% των πινακοποιημένων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε τελικώς ως σύνολο εκπαίδευσης, και το υπόλοιπο 20% ως σύνολο ελέγχου. Και σ' αυτήν την περίπτωση, λόγω της σημαντικής αύξησης του μεγέθους των δεδομένων εισόδου με τα οποία θα

«εκπαιδευόταν» το μοντέλο, ήταν αναγκαία η διαφοροποίηση του βέλτιστου αριθμού MF για κάθε μια από τις εισόδους. Μια διαδικασία «δοκιμής και σφάλματος» εκτελέστηκε για την εξεύρεση του εν λόγω αριθμού, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις τιμές των παραμέτρων της τεχνικής της αφαιρετικής συσταδοποίησης. Ο προσδιορισμός αυτών των τιμών σε 0,85 , 1,25 , 0,5 και 0,15 , για το εύρος επιρροής, τον παράγοντα «στριμώγματος», το λόγο αποδοχής και το λόγο απόρριψης, αντιστοίχως, είχαν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό 30 MF για κάθε μια είσοδο, και επομένως 30 «εάν-τότε» ασαφών κανόνων για το μοντέλο.



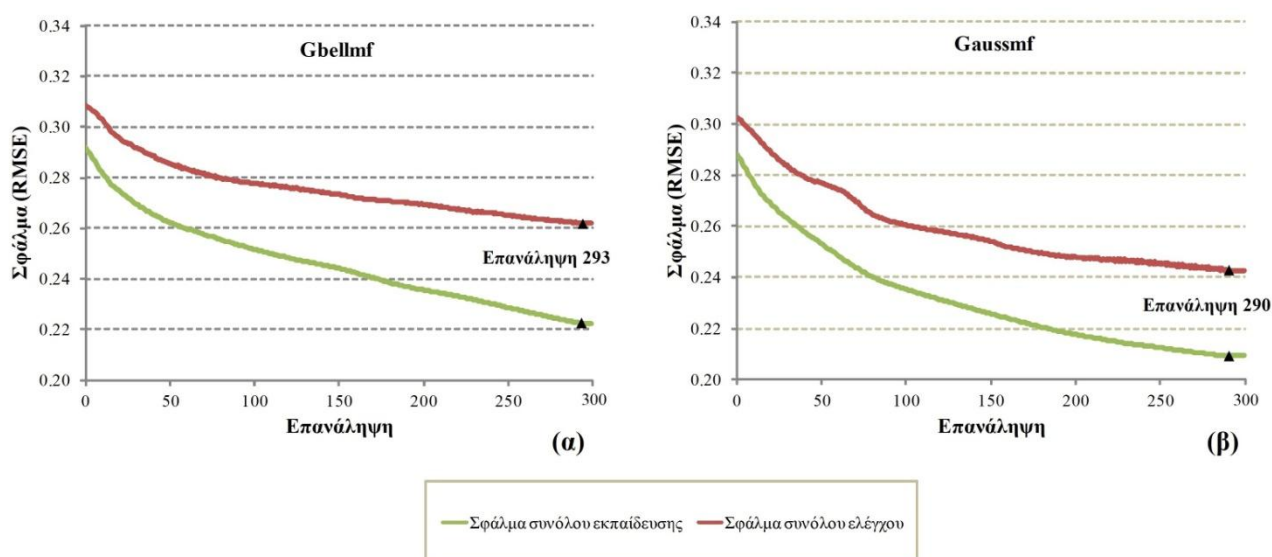
Σχήμα 4.34: Αρχιτεκτονική αναπτυχθέντος ANFIS.

Ως προς τις παραμέτρους του υβριδικού αλγορίθμου εκμάθησης, η τιμή σφάλματος (RMSE) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ως κριτήρια διακοπής της εκπαιδευτικής διαδικασίας ορίστηκαν σε 0,01 και 300, αντιστοίχως. Η απόδοση των διαφορετικών τύπων MF παρατίθεται στον ακόλουθο Πίνακα. Ο τύπος “Gaussian (Gaussmf)” εμφανίζει τη χαμηλότερη MSE τιμή τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης, όσο και στο σύνολο ελέγχου. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος τύπος MF κρίθηκε ως η πλέον βέλτιστη επιλογή.

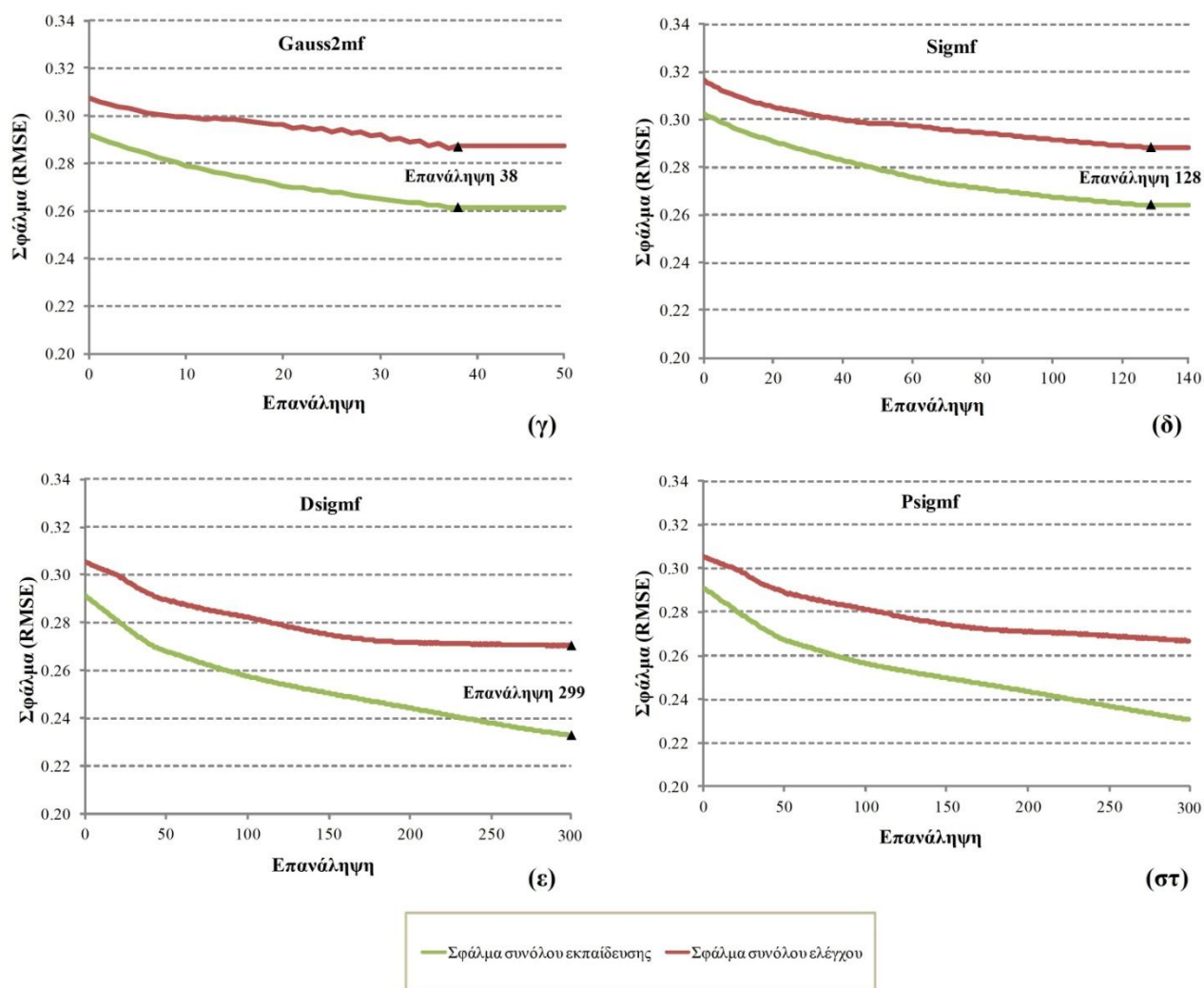
Πίνακας 4.21: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης του βέλτιστου τύπου MF.

Ονομασία	Τύπος MF	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	Επανάληψη «βέλτιστου» μοντέλου (πριν την έναρξη υπερ-εκπαίδευσης)	Σφάλμα (RMSE) στο σύνολο εκπαίδευσης	Σφάλμα (RMSE) στο σύνολο ελέγχου
Gbellmf	Generalized bell-shaped	300	293	0,222	0,262
Gaussmf	Gaussian	300	290	0,209	0,243
Gauss2mf	Two-sided Gaussian	300	38	0,262	0,287
Sigmf	Sigmoidally shaped	300	128	0,264	0,288
Dsigmf	Difference of two sigmoidally shaped	300	299	0,233	0,270
Psigmf	Product of two sigmoidally shaped	300	—	0,231	0,267

Ακολούθως, μέσω της εκτέλεσης της διενεργηθείσας, στα παραγόμενα αποτελέσματα του ANFIS, ανάλυση Garson, προέκυψαν οι (κανονικοποιημένοι) συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων. Το παραγόμενο αποτέλεσμα επιδεκτικότητας, τέλος, διαχωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες με βάση τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», της «τυπικής απόκλισης» και των «ίσων διαστημάτων».



Σχήμα 4.35: Πορεία σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων για τους διάφορους τύπους MF. (α) Gbellmf, και (β) Gaussmf.



Σχήμα 4.35: (Συνέχεια). (γ) Gauss2mf, (δ) Sigmf, (ε) Dsigmf, και (στ) Psigmf.

4.2.3.5 Αποτελέσματα

Η σημαντικότητα, ως προς την εκτίμηση της επιδεκτικότητας και γενικώς τη συμβολή στην εκδήλωση του φαινομένου στην περιοχή μελέτης, των εξεταζόμενων αιτιολογικών παραγόντων για το σύνολο των μοντέλων ανάλυσης, και των κατηγοριών τους για τρία απ' αυτά τα μοντέλα (FR, LSI και WoE) αποτυπώνονται στους Πίνακες 4.21 και 4.22.

Πίνακας 4.22: Συντελεστές βαρύτητας των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα FR, LSI, WoE, LR, ANN και ANFIS.

Παράγοντας	Μοντέλο								
	FR		LSI		WoE		LR	ANN	ANFIS
	Εύρος τιμών FR (FR _R)	Τυπική απόκλιση τιμών FR (FR _{SD})	Εύρος τιμών LSI (LSI _R)	Τυπική απόκλιση τιμών LSI (LSI _{SD})	Εύρος τιμών C (C _R)	Τυπική απόκλιση τιμών C (C _{SD})	Συντελεστής βαρύτητας (B)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)	Συντελεστής βαρύτητας (W _N)
Υψόμετρο	1,42	0,52	3,98	1,65	4,20	1,70	4,19	0,15	0,10
Γωνία κλίσης	7,16	3,05	4,91	1,99	5,57	2,33	2,86	0,06	0,03
Διεύθυνση κλίσης	1,06	0,31	1,12	0,33	1,27	0,37	1,08	0,08	0,06
Γενική καμπυλότητα	0,50	0,25	0,59	0,29	0,74	0,38	1,21	0,01	0,14
Απόσταση από οδικό δίκτυο	4,01	1,70	2,45	1,08	3,37	1,42	0,61	0,10	0,05
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	1,65	0,65	1,39	0,52	1,52	0,59	1,73	0,09	0,14
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	1,44	0,53	0,71	0,28	1,11	0,42	0,56	0,16	0,05
Πυκνότητα ρεμάτων	1,76	0,75	1,47	0,64	1,80	0,79	2,42	0,11	0,11
Χειμαρρική ισχύς (SPI)	1,60	0,68	4,60	1,90	4,95	1,99	0,76	0,03	0,05
Βλάστηση (NDVI)	1,36	0,55	1,10	0,44	1,32	0,53	1,03	0,02	0,04
Κάλυψη γης	2,66	1,00	3,60	1,31	4,42	1,56	1,54	0,12	0,12
Γεωλογία	1,85	0,74	3,22	1,24	4,31	1,60	1,68	0,09	0,10

Πίνακας 4.23: Συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους κατηγοριών των αιτιολογικών παραγόντων από τα μοντέλα FR, LSI και WoE.

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	Μοντέλο					
				FR	LSI	WoE	
		Συνολικό πλήθος ψηφίδων	Πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης	Τιμή FR	Τιμή LSI	Τιμή W+	Τιμή W- Τιμή C
Υψόμετρο (μ.)	[1] <385	110.002	498	0,82	-0,19	-0,19	0,02
	[2] 385-737	205.272	1.629	1,44	0,37	0,37	-0,13
	[3] 738-997	336.047	1.880	1,02	0,02	0,02	-0,01
	[4] 998-1.307	210.472	1.122	0,97	-0,03	-0,03	0,01
	[5] >1.307	74.003	11	0,03	-3,61	-3,61	0,08
Γωνία κλίσης (°)	[1] <10	163.546	48	0,05	-2,93	-2,93	0,18
	[2] 10-20	252.927	198	0,14	-1,95	-1,95	0,28
	[3] 21-29	259.924	483	0,34	-1,08	-1,09	0,23
	[4] 30-40	208.682	2.401	2,09	0,74	0,75	-0,38
	[5] >40	50.717	2.010	7,22	1,98	2,01	-0,44
Διεύθυνση κλίσης	[1] Βόρεια	133.122	723	0,99	-0,01	-0,01	0,00
	[2] Βορειο-ανατολική	115.552	509	0,80	-0,22	-0,22	0,03
	[3] Ανατολική	131.760	871	1,20	0,19	0,19	-0,03
	[4] Νοτιο-ανατολική	122.875	1.068	1,58	0,46	0,46	-0,09
	[5] Νότια	107.376	306	0,52	-0,66	-0,66	0,06
	[6] Νοτιο-δυτική	97.505	571	1,07	0,06	0,06	-0,01
	[7] Δυτική	103.748	537	0,94	-0,06	-0,06	0,01
	[8] Βόρειο-δυτική	123.630	555	0,82	-0,20	-0,20	0,03
Γενική καμπυλότητα	[1] Κοίλη	463.499	2.890	1,14	0,13	0,13	-0,14
	[2] Κυρτή	452.713	2.182	0,88	-0,13	-0,13	0,11
	[3] Επίπεδη	19.584	68	0,63	-0,46	-0,46	0,01

Πίνακας 4.22: (Συνέχεια).

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	Μοντέλο					
				FR	LSI	WoE	
		Συνολικός πλήθος ψηφίδων	Πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης	Τιμή FR	Τιμή LSI	Τιμή W+	Τιμή W- Τιμή C
Απόσταση από οδικό δίκτυο (μ.)	[1] <388	377.875	786	0,38	-0,97	-0,97	0,35 -1,33
	[2] 388-872	251.450	542	0,39	-0,94	-0,94	0,20 -1,14
	[3] 873-1.463	176.406	975	1,01	0,01	0,01	0,00 0,01
	[4] 1.464-2.267	103.185	2.489	4,39	1,48	1,50	-0,55 2,05
	[5] >2.267	26.888	348	2,36	0,86	0,86	-0,05 0,91
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο (μ.)	[1] <89	377.725	2.151	1,04	0,04	0,04	-0,02 0,06
	[2] 89-206	293.102	1.184	0,74	-0,31	-0,31	0,11 -0,42
	[3] 207-350	165.059	804	0,89	-0,12	-0,12	0,02 -0,14
	[4] 351-569	77.595	934	2,19	0,78	0,79	-0,12 0,91
	[5] >569	22.323	67	0,55	-0,60	-0,61	0,01 -0,62
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία (μ.)	[1] <269	389.199	1.519	0,71	-0,34	-0,34	0,19 -0,53
	[2] 269-577	282.734	2.235	1,44	0,36	0,37	-0,21 0,58
	[3] 578-985	177.597	1.064	1,09	0,09	0,09	-0,02 0,11
	[4] 986-1.702	75.464	322	0,78	-0,25	-0,25	0,02 -0,27
	[5] >1.702	10.810	0	0,00	0,00	0,00	0,01 -0,01
Πυκνότητα ρεμάτων (g/cm^3)	[1] <1,10	135.052	391	0,53	-0,64	-0,64	0,08 -0,72
	[2] 1,10-1,89	229.897	1.871	1,48	0,39	0,40	-0,17 0,57
	[3] 1,90-2,64	282.992	826	0,53	-0,63	-0,63	0,19 -0,82
	[4] 2,65-3,46	200.890	959	0,87	-0,14	-0,14	0,04 -0,18
	[5] >3,46	86.973	1.093	2,29	0,83	0,83	-0,14 0,98
Χαιμαρρική ισχύς (SPI)	[1] <-5,20	33.718	3	0,02	-4,12	-4,13	0,04 -4,17
	[2] -5,20-0,52	200.391	854	0,77	-0,26	-0,26	0,06 -0,32
	[3] -0,51-4,16	279.831	754	0,49	-0,71	-0,72	0,20 -0,92
	[4] 4,17-6,99	349.647	2.905	1,51	0,41	0,41	-0,37 0,78
	[5] >6,99	70.193	624	1,61	0,48	0,48	-0,05 0,53

Πίνακας 4.22: (Συνέχεια).

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	Μοντέλο					
		Συνολικό πλήθος ψηφίδων	Πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης	FR	LSI	WoE	
						Τιμή W+	Τιμή W- Τιμή C
Βλάστηση (NDVI)	[1] <0,30	60.272	676	2,04	0,71	0,72	-0,07 0,79
	[2] 0,30-0,48	160.761	1.270	1,44	0,36	0,36	-0,10 0,46
	[3] 0,49-0,62	241.759	1.139	0,86	-0,15	-0,15	0,05 -0,20
	[4] 0,63-0,75	282.101	1.051	0,68	-0,39	-0,39	0,13 -0,52
	[5] >0,75	190.911	1.004	0,96	-0,04	-0,04	0,01 -0,05
Γεωλογία	[1] Αλλουβιακές αποθέσεις	66.478	28	0,08	-2,57	-2,57	0,07 -2,64
	[2] Φλύσχης	58.530	172	0,53	-0,63	-0,63	0,03 -0,66
	[3] Ραδιολαρίτες	87.204	587	1,23	0,20	0,20	-0,03 0,23
	[4] Ασβεστόλιθοι	380.228	4.023	1,93	0,66	0,66	-1,01 1,67
	[5] Ποταμογενεσάες, θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις	274.497	241	0,16	-1,83	-1,84	0,30 -2,14
Κάλυψη γης	[6] Κορήματα και κώνοι κορημάτων	68.636	89	0,24	-1,44	-1,45	0,06 -1,51
	[1] Αστικό περιβάλλον	10.052	4	0,07	-2,63	-2,63	0,01 -2,64
	[2] Αρώσιμη γη	54.618	0	0,00	0,00	0,00	0,06 -0,06
	[3] Καλλιέργειες	153.468	123	0,15	-1,93	-1,93	0,16 -2,09
	[4] Δάση	231.525	3.388	2,66	0,98	0,99	-0,79 1,78
	[5] Βοσκότοποι	285.371	369	0,24	-1,45	-1,45	0,29 -1,74
	[6] Μεταβατικές εκτάσεις	191.675	1.256	1,19	0,18	0,18	-0,05 0,23
	[7] Υδάτινες επιφάνειες	8.722	0	0,00	0,00	0,00	0,01 -0,01

Για το μοντέλο FR, την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων παρουσιάζουν οι παράγοντες της γωνίας κλίσης ($FR_{SD}=3,05$) και της απόστασης από το οδικό δίκτυο ($FR_{SD}=1,70$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $>40^\circ$ » ($FR=7,22$) και « $1.464-2.267 \mu.$ » ($FR=4,39$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<10^\circ$ » ($FR=0,05$) και « $<388 \mu.$ » ($FR=0,38$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Από την άλλη πλευρά, τη χαμηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων παρουσιάζουν οι παράγοντες της γενικής καμπυλότητας ($FR_{SD}=0,25$) και της διεύθυνσης κλίσης ($FR_{SD}=0,31$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «κοίλη» ($FR=1,14$) και «νότιο-ανατολική» ($FR=1,58$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «επίπεδη» ($FR=0,63$) και «νότια» ($FR=0,52$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση εμφανίζουν οι κατηγορίες «δάση» ($FR=2,66$), « $>3,46 \chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($FR=2,29$), « $351-569 \mu$ » απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($FR=2,19$), « $<0,30$ » NDVI ($FR=2,04$), «ασβεστόλιθοι» ($FR=1,93$), « $>6,99$ » SPI ($FR=1,61$), « $385-737 \mu.$ » υψόμετρο ($FR=1,44$) και « $269-577 \mu.$ » απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($FR=1,44$), ενώ τη χαμηλότερη συσχέτιση οι κατηγορίες «αρόσιμη γη» ($FR=0$), « $>1.702 \mu.$ » απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($FR=0$), « $<-5,20$ » SPI ($FR=0,02$), « $>1.307 \mu.$ » υψόμετρο ($FR=0,03$), «αλλουβιακές αποθέσεις» ($FR=0,08$), « $<1,10 \chi\lambda\mu./\chi\lambda\mu^2$ » πυκνότητα ρεμάτων ($FR=0,53$), « $>569 \mu$ » απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($FR=0,55$) και « $0,63-0,75$ » NDVI ($FR=0,68$).

Για το μοντέλο LSI, οι παράγοντες που συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η γωνία κλίσης ($LSI_{SD}=1,99$) και η χειμαρρική ισχύς (SPI) ($LSI_{SD}=1,90$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $>40^\circ$ » ($LSI=1,98$) και « $>6,99$ » ($LSI=0,48$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<10^\circ$ » ($LSI=-2,93$) και « $<-5,20$ » ($LSI=-4,12$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες που συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό με την εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($LSI_{SD}=0,28$) και η γενική καμπυλότητα ($LSI_{SD}=0,29$). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες « $269-577 \mu.$ » ($LSI=0,36$) και «κοίλη» ($LSI=0,13$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στον υψηλότερο βαθμό με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες « $<269 \mu.$ » ($LSI=-0,34$) και «επίπεδη» ($LSI=-0,46$),

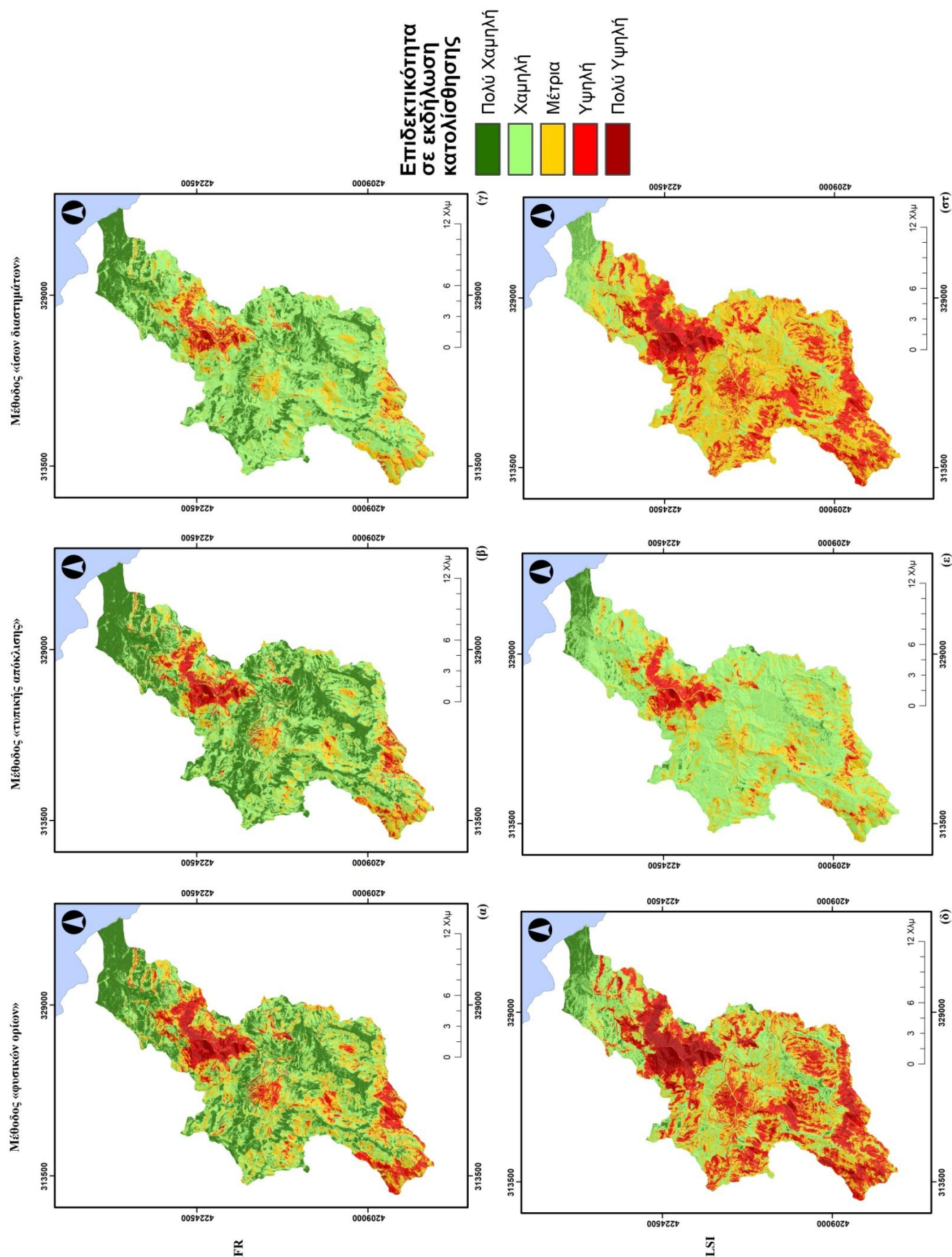
αντιστοίχως, βρέθηκαν να συσχετίζονται στο χαμηλότερο βαθμό. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, στον υψηλότερο βαθμό συσχετίζονται οι κατηγορίες «1.464-2.267 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($LSI=1,48$), «δάση» ($LSI=0,98$), «>3,46 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($LSI=0,83$), «351-569 μ.» απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($LSI=0,78$), «<0,30» NDVI ($LSI=0,71$), «ασβεστόλιθοι» ($LSI=0,66$), «νοτιο-ανατολική» διεύθυνση κλίσης ($LSI=0,46$) και «385-737 μ.» υψόμετρο ($LSI=0,37$), ενώ στο χαμηλότερο βαθμό οι κατηγορίες «>1.307 μ.» υψόμετρο ($LSI=-3,61$), «αλλουβιακές αποθέσεις» ($LSI=-2,63$), «αστικό περιβάλλον» ($LSI=-2,57$), «<388 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($LSI=-0,97$), «νότια» διεύθυνση κλίσης ($LSI=-0,66$), «<1,10 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($LSI=-0,64$), «>569 μ.» απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($LSI=-0,60$) και «0,63-0,75» NDVI ($LSI=-0,39$).

Για το μοντέλο WoE, οι ίδιοι παράγοντες μ' αυτούς του μοντέλου LSI (γωνία κλίσης και χειμαρρική ισχύς) προκύπτουν ως οι παράγοντες που παρουσιάζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων ($C_{SD}=2,33$ και $C_{SD}=1,99$, αντιστοίχως). Γι' αυτούς του παράγοντες, οι κατηγορίες «>40°» ($C=2,45$) και «4,17-6,99» ($C=0,78$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου. Αντιθέτως, οι κατηγορίες «<10°» ($C=-3,12$) και «<-5,20» ($C=-4,17$), αντιστοίχως, βρέθηκαν να εμφανίζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση. Από την άλλη πλευρά, οι παράγοντες που παρουσιάζουν τη χαμηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση κατολισθήσεων είναι η διεύθυνση κλίσης ($C_{SD}=0,37$) και η γενική καμπυλότητα ($C_{SD}=0,38$). Γι' αυτούς του παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση με την εκδήλωση του φαινομένου βρέθηκαν να εμφανίζουν οι κατηγορίες «νοτιο-ανατολική» ($C=0,55$) και «κοίλη» ($C=0,27$), αντιστοίχως. Αντιθέτως, τη χαμηλότερη συσχέτιση βρέθηκαν να εμφανίζουν οι κατηγορίες «νότια» ($C=-0,72$) και «επίπεδη» ($C=-0,47$), αντιστοίχως. Για τους υπόλοιπους παράγοντες, την υψηλότερη συσχέτιση εμφανίζουν οι κατηγορίες «1.464-2.267 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($C=2,05$), «δάση» ($C=1,78$), «ασβεστόλιθοι» ($C=1,67$), «>3,46 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($C=0,98$), «351-569 μ.» απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($C=0,91$), «<0,30» NDVI ($C=0,79$), «269-577 μ.» απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($C=0,58$) και «385-737 μ.» υψόμετρο ($C=0,50$), ενώ τη χαμηλότερη συσχέτιση οι κατηγορίες «>1.307 μ.» υψόμετρο ($C=-3,70$), «αλλουβιακές αποθέσεις» ($C=-2,64$), «αστικό περιβάλλον» ($C=-2,64$), «<388 μ.» απόσταση από το οδικό δίκτυο ($C=-1,33$), «1,90-2,64 χλμ./χλμ²» πυκνότητα ρεμάτων ($C=-0,82$), «>569 μ.» απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($C=-0,62$), «<269 μ.» απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($C=-0,53$) και «0,63-0,75» NDVI ($C=-0,52$).

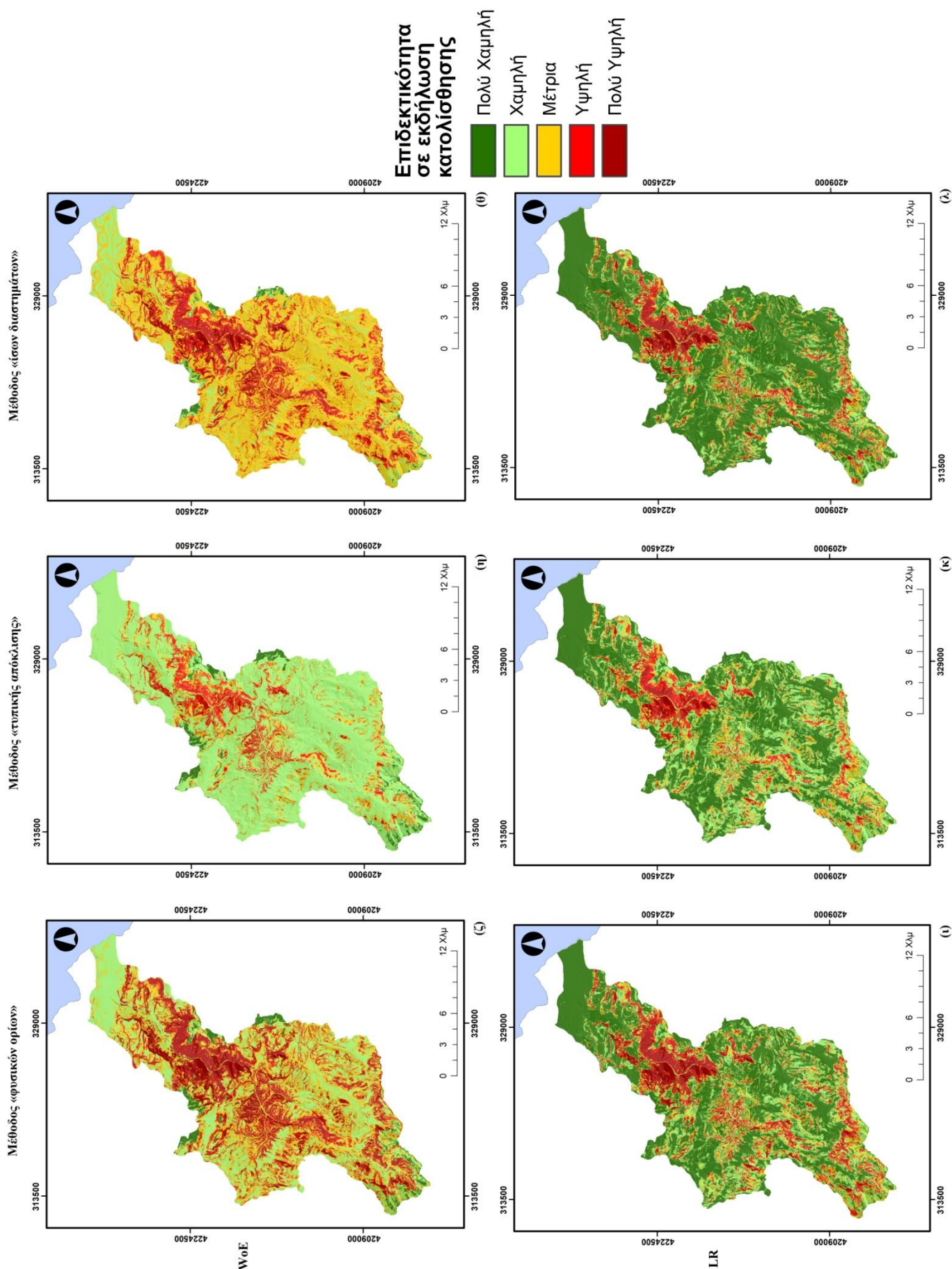
Για το μοντέλο LR, όλοι οι εξεταζόμενοι αιτιολογικοί παράγοντες συσχετίζονται θετικά με την εκδήλωση κατολίσθησεων στην περιοχή μελέτης. Οι παράγοντες με την ισχυρότερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου είναι το υψόμετρο ($B=4,19$) και η γωνία κλίσης ($B=2,86$). Η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($W_N=0,16$) και το υψόμετρο ($W_N=0,15$) είναι οι αντίστοιχοι παράγοντες για το μοντέλο ANN, και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο ($W_N=0,14$) και η γενική καμπυλότητα ($W_N=0,14$) για το μοντέλο ANFIS. Από την άλλη πλευρά, για το μοντέλο LR, οι παράγοντες με την πιο αδύναμη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου είναι η απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία ($B=0,56$) και η απόσταση από το οδικό δίκτυο ($B=0,61$). Η γενική καμπυλότητα ($W_N=0,01$) και η βλάστηση ($W_N=0,02$) είναι οι αντίστοιχοι παράγοντες για το μοντέλο ANN, και η γωνία κλίσης ($W_N=0,03$) και η βλάστηση ($W_N=0,04$) για το μοντέλο ANFIS.

Με στόχο την οπτικοποίηση της χωρικής κατανομής της εκτιμώμενης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης, ένας αντίστοιχος χάρτης διακριτών κατηγοριών δημιουργήθηκε για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μοντέλα ανάλυσης με βάση και τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης που ελέγχθησαν. Το Σχήμα 4.36 παραθέτει αυτούς τους χάρτες, με το Σχήμα 4.37 να παρουσιάζει ακολούθως τα ποσοστά χωρικής κάλυψης των κατηγοριών τους.

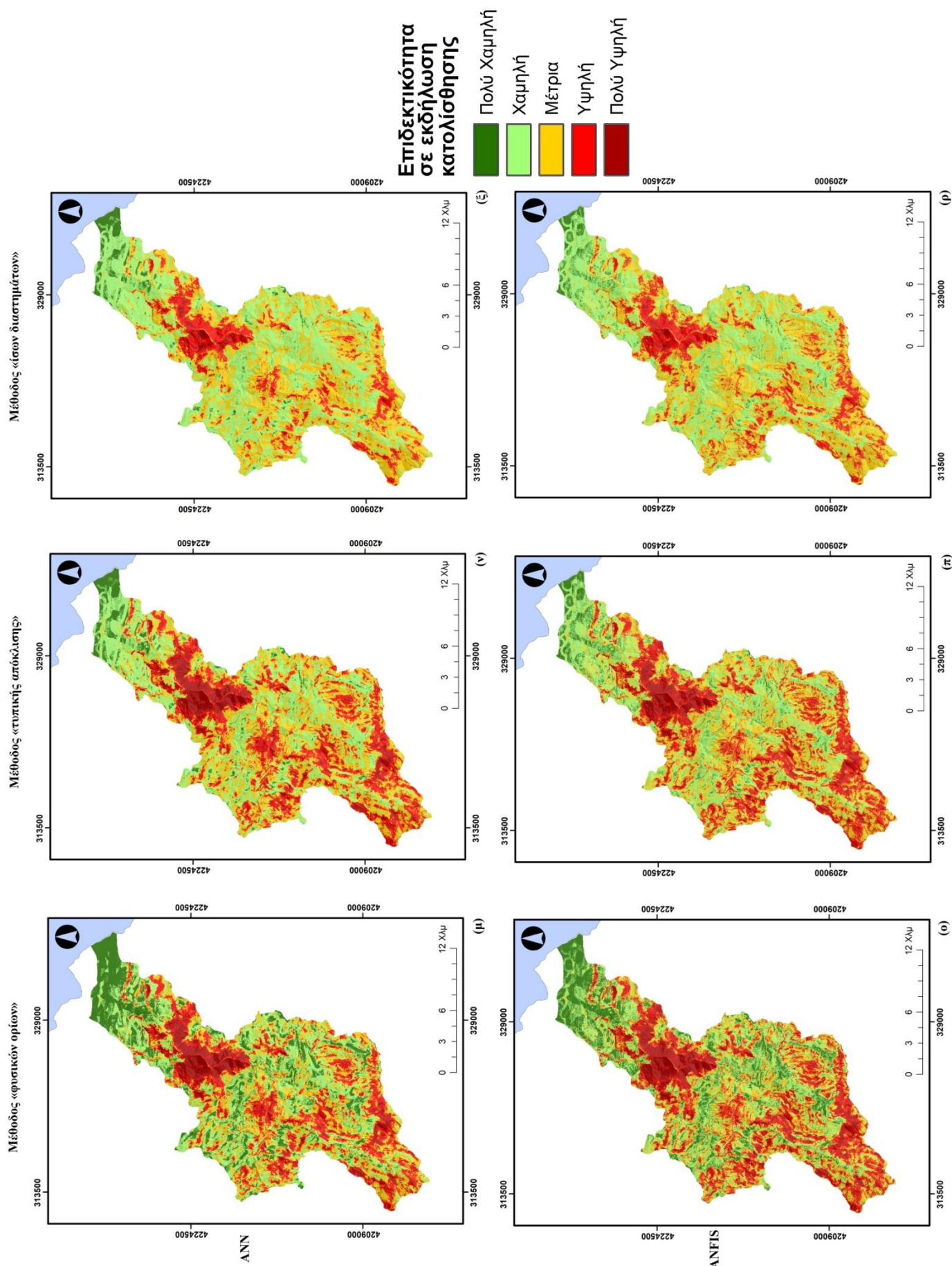
Από τους έξι παραγόμενους χάρτες με βάση τη μέθοδο των «φυσικών ορίων» (Σχήμα 4.36α, δ, ζ, ι, μ, ο) προκύπτει ότι οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σελινούντα για τα μοντέλα LSI, WoE, ANN και ANFIS, και στο κεντρικό κυρίως τμήμα της για τα μοντέλα FR και LR. Οι κατηγορίες αυτές καλύπτουν (Σχήμα 4.37α): (α) το 26% (περίπου 98 χλμ²) και 11% (περίπου 42 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LSI, (β) το 13% (περίπου 46 χλμ²) και 21% (περίπου 78 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο WoE, (γ) το 20% (περίπου 76 χλμ²) και 8% (περίπου 31 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANN, (δ) το 23% (περίπου 84 χλμ²) και 11% (περίπου 42 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANFIS, (ε) το 11% (περίπου 42 χλμ²) και 5% (περίπου 17 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο FR, και (στ) το 10% (περίπου 38 χλμ²) και 9% (περίπου 34 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LR.



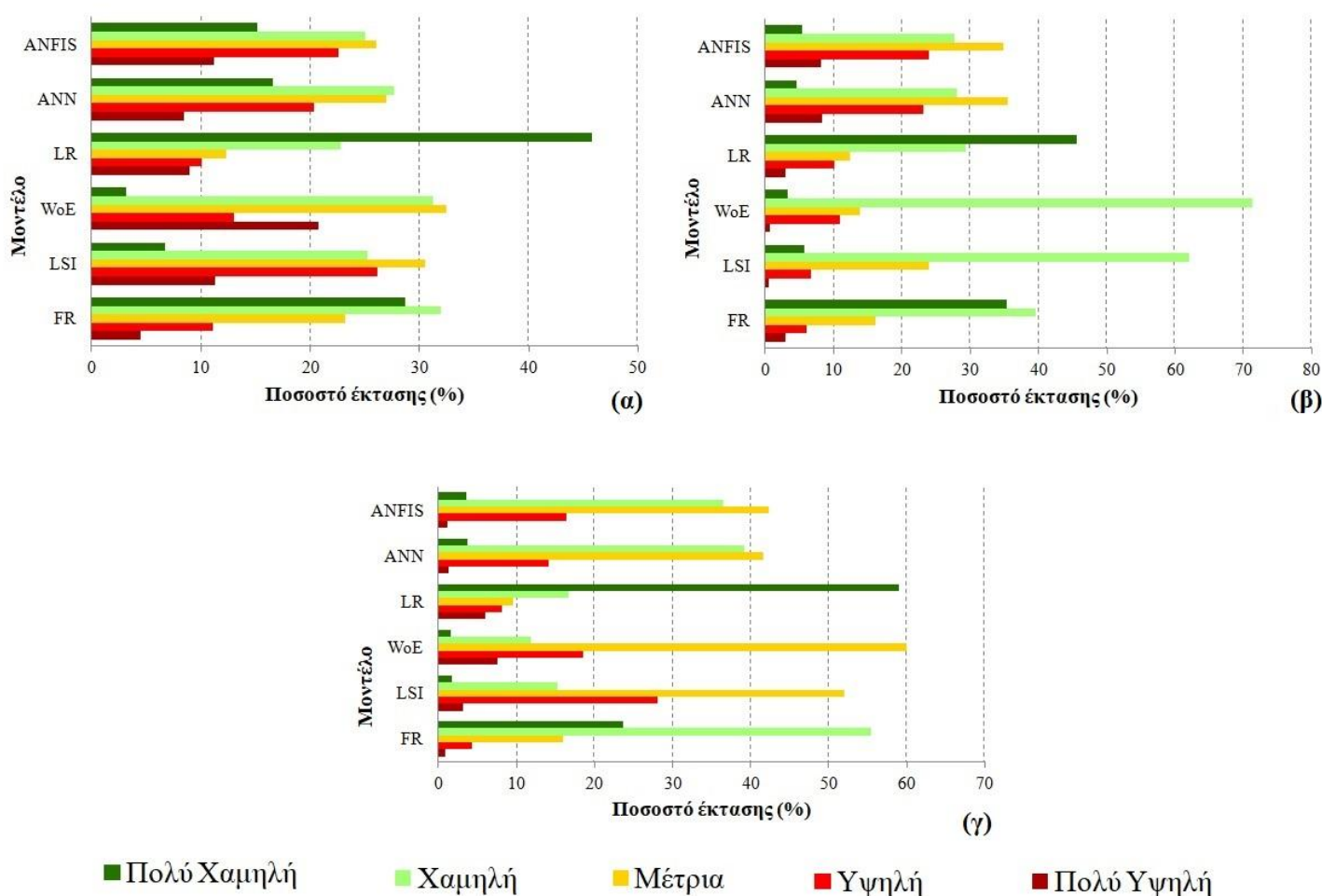
Σχήμα 4.36: Χάρτες επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης: (α) FR «φυσικών ορίων», (β) FR «τυπικής απόκλισης», (γ) FR «ίσων διαστημάτων», (δ) LSI «φυσικών ορίων», (ε) LSI «τυπικής απόκλισης», και (στ) LSI «ίσων διαστημάτων».



Σχήμα 4.36: (Συνέχεια). (ζ) WoE «φυσικών ορίων», (η) WoE «τυπικής απόκλισης», (θ) WoE «ισών διαστημάτων», (ι) LR «φυσικών ορίων», (κ) LR «τυπικής απόκλισης», και (λ) LR «ισών διαστημάτων».



Σχήμα 4.36: (Συνέχεια). (μ) ANN «φυσικών ορίων», (ν) ANN «τυπικής απόκλισης», (ξ) ANN «ίσων διαστημάτων», (ο) ANFIS «φυσικών ορίων», (π) ANFIS «τυπικής απόκλισης», και (ρ) ANFIS «ίσων διαστημάτων».



Σχήμα 4.37: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. (α) Για την μέθοδο των «φυσικών ορίων», (β) για την μέθοδο της «τυπικής απόκλισης», και (γ) για την μέθοδο των «ίσων διαστημάτων».

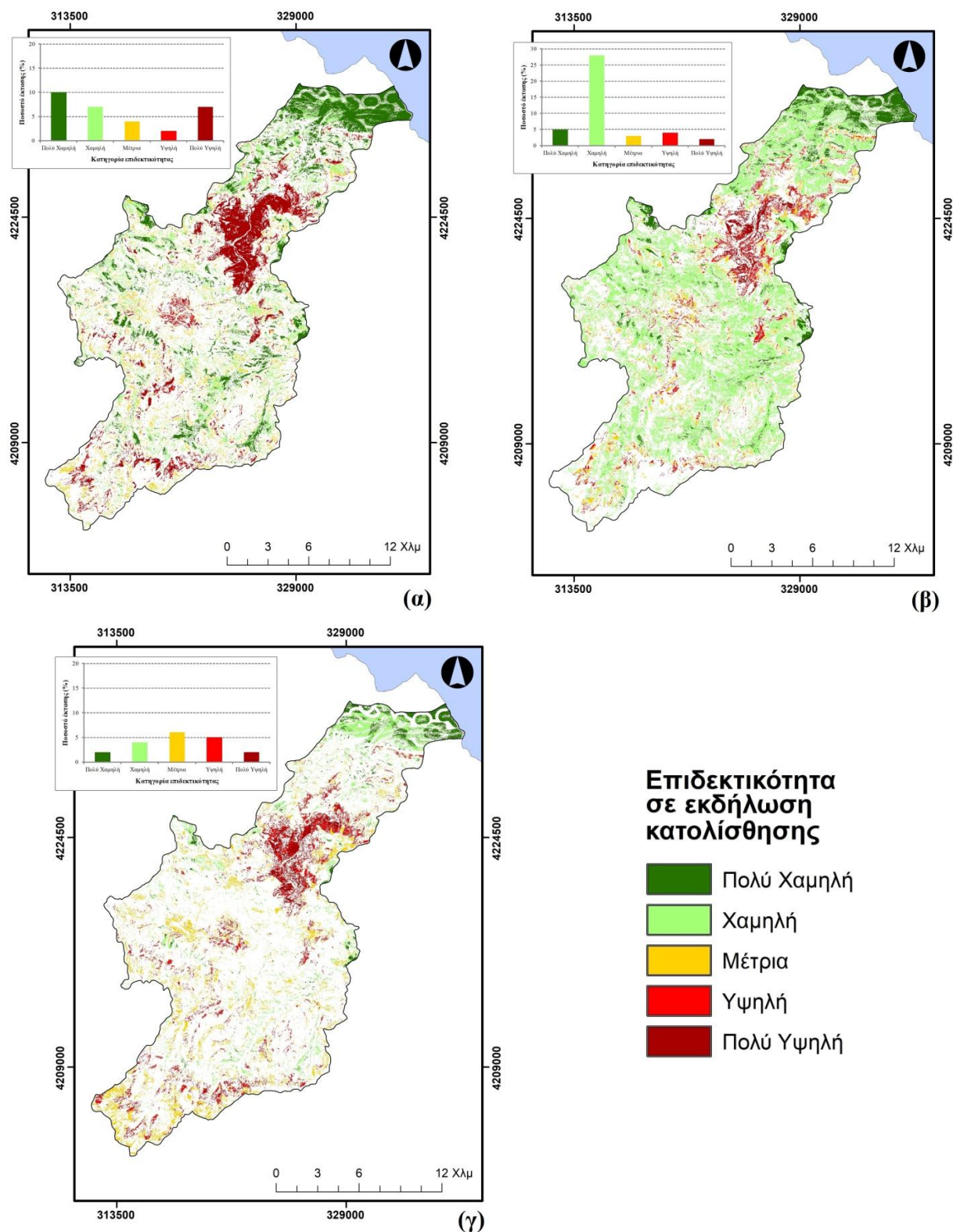
Από τους έξι παραγόμενους χάρτες με βάση τη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης» (Σχήμα 4.36β, ε, η, κ, ν, π) προκύπτει ότι οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την έκταση της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής για τα μοντέλα ANN και ANFIS, και στο κεντρικό κυρίως τμήμα της για τα μοντέλα FR, LSI, WoE, και LR. Από τις συγκεκριμένες κατηγορίες καλύπτεται (Σχήμα 4.37β): (α) το 23% (περίπου 86 χλμ²) και 8% (περίπου 31 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANN, (β) το 24% (περίπου 89 χλμ²) και 8% (περίπου 31 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANFIS, (γ) το 6% (περίπου 22 χλμ²) και 3% (περίπου 11 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο FR, (δ) το 7% (περίπου 25 χλμ²) και 1% (περίπου 3 χλμ²),

αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LSI, (ε) το 11% (περίπου 41 χλμ²) και 1% (περίπου 3 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο WoE, και (στ) το 10% (περίπου 38 χλμ²) και 3% (περίπου 9 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LR.

Από τους έξι παραγόμενους χάρτες με βάση τη μέθοδο των «ίσων διαστημάτων» (Σχήμα 4.36γ, στ, θ, λ, ξ, ρ) προκύπτει ότι οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την έκταση της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής για τα μοντέλα LSI και WoE, και στο κεντρικό κυρίως τμήμα της για τα μοντέλα FR, LR, ANN και ANFIS. Οι κατηγορίες αυτές καλύπτουν (Σχήμα 4.37γ): (α) το 28% (περίπου 104 χλμ²) και 3% (περίπου 12 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LSI, (β) το 19% (περίπου 70 χλμ²) και 7% (περίπου 28 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο WoE, (γ) το 4% (περίπου 16 χλμ²) και 1% (περίπου 3 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο FR, (δ) το 8% (περίπου 30 χλμ²) και 6% (περίπου 22 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο LR, (ε) το 14% (περίπου 53 χλμ²) και 1% (περίπου 3 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANN, και (στ) το 16% (περίπου 61 χλμ²) και 1% (περίπου 3 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης για το μοντέλο ANFIS.

Για την κατάδειξη των κοινών αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας μεταξύ των εξεταζόμενων μοντέλων ανάλυσης, διενεργήθηκε ο συνδυασμός των παραγόμενων χαρτών τους και για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. Τα αποτελέσματα αυτών των τριών συνδυασμών εμφανίζονται στο Σχήμα 4.38.

Ως προς τη μέθοδο των «φυσικών ορίων» (Σχήμα 4.38α), το 10% (περίπου 36 χλμ²) και 7% (περίπου 26 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν ως εκτάσεις «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στους έξι παραγόμενους χάρτες. Αν και μικρά τμήματα αυτών των εκτάσεων εντοπίζονται σ' όλη την περιοχή, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους μπορούν να τοποθετηθούν στο βόρειο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 4% (περίπου 16 χλμ²) και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής. Επίσης, και στους έξι παραγόμενους χάρτες, το 2% (περίπου 8 χλμ²) και 7% (περίπου 26 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν ως εκτάσεις «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Οι συγκεκριμένες εκτάσεις, και ειδικότερα η έκταση της «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας, εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της.



Σχήμα 4.38: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στους παραγόμενους χάρτες των μοντέλων για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. Συμπεριλαμβάνονται διαγράμματα με τα

αντίστοιχα ποσοστά έκτασης. (α) Για την μέθοδο των «φυσικών ορίων», (β) για την μέθοδο της «τυπικής απόκλισης», και (γ) για την μέθοδο των «ίσων διαστημάτων».

Ως προς τη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης» (Σχήμα 4.38β), το 5% (περίπου 19 χλμ²) και 28% (περίπου 106 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης βρέθηκαν ν' ανήκουν στις κατηγορίες «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στους έξι παραγόμενους χάρτες. Η κοινή έκταση για την κατηγορία «Πολύ Χαμηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζεται κυρίως στο βόρειο τμήμα της περιοχής, ενώ η ίδια έκταση για την κατηγορία «Χαμηλής» επιδεκτικότητας εξαπλώνεται σ' ένα ιδιαιτέρως μεγάλο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 3% (περίπου 12 χλμ²), με μικρά τμήματα της έκτασης της να εντοπίζονται σ' όλη σχεδόν την περιοχή. Επιπλέον, και στους έξι παραγόμενους χάρτες, το 4% (περίπου 16 χλμ²) και 2% (περίπου 8 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης βρέθηκαν ν' ανήκουν στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Οι κοινές εκτάσεις αυτών των κατηγοριών διακρίνονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της.

Ως προς τη μέθοδο των «ίσων διαστημάτων» (Σχήμα 4.38γ), το 2% (περίπου 8 χλμ²) και 4% (περίπου 16 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης χαρακτηρίστηκαν ως εκτάσεις «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στους έξι παραγόμενους χάρτες. Αυτές οι εκτάσεις εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 6% (περίπου 22 χλμ²) και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής. Τέλος, και στους έξι παραγόμενους χάρτες, το 5% (περίπου 28 χλμ²) και 2% (περίπου 8 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης χαρακτηρίστηκαν ως εκτάσεις «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Οι συγκεκριμένες εκτάσεις εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της.

Κεφάλαιο 5: Επικύρωση παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας

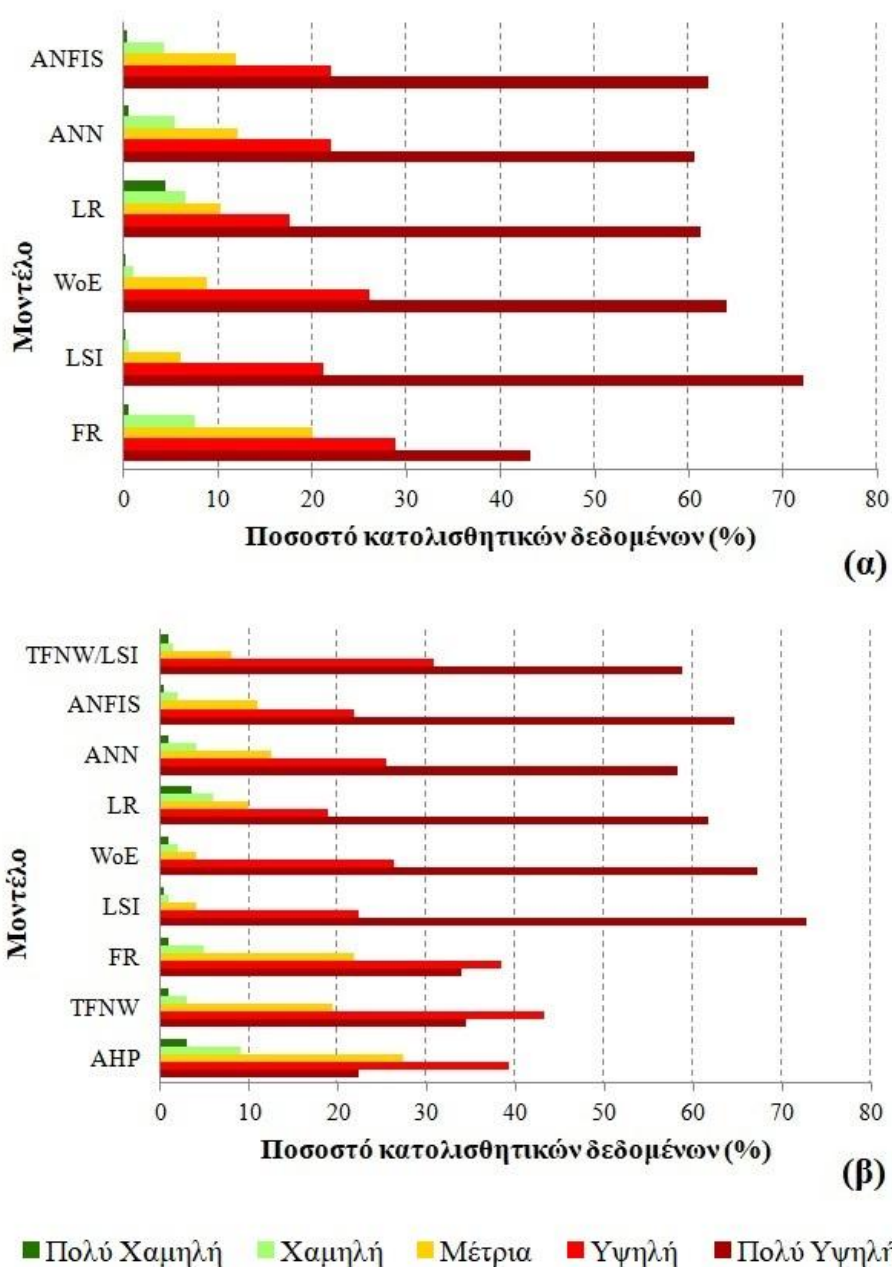
Για την επικύρωση των χαρτών επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης που προέκυψαν από την εφαρμογή των μοντέλων στις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης, τρεις διαφορετικές – μεταξύ των οποίων μια απλή (υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων) και δύο πιο εξειδικευμένες (ανάλυση ROC, αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης) – μέθοδοι υλοποιήθηκαν. Αναλυτικότερα:

5.1 Περιφερειακή κλίμακα

5.1.1 Υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων

Σε μια πρώτη φάση, εκτελέστηκε απλώς η υπέρθεση των κατολισθητικών δεδομένων των συνόλων εκπαίδευσης (721 σημεία) και επικύρωσης (201 σημεία) στους κατηγοριοποιημένους χάρτες επιδεκτικότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ποιοτικής ή ημι-ποιοτικής «φύσης» τους και της μη εφαρμογής τους με βάση τα κατολισθητικά δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης, η υπέρθεση των κατηγοριοποιημένων χαρτών επιδεκτικότητας με το αντίστοιχο σύνολο δεδομένων δεν πραγματοποιήθηκε για τα μοντέλα AHP, TFNW και TFNW/LSI. Αντιθέτως, δεδομένου ότι το σύνολο επικύρωσης αποτελούσε ένα ανεξάρτητο, απ' αυτό της εκπαίδευσης, σύνολο δεδομένων με χρησιμότητα την πρόβλεψη μελλοντικών κατολισθήσεων, καμία εξαίρεση μοντέλου δε λήφθηκε υπόψη. Τα αποτελέσματα της υπέρθεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.1α, ξεκινώντας από την κατηγορία «Πολύ Χαμηλής» και καταλήγοντας στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας, και οι έξι (εκτός οι χάρτες των προαναφερθέντων τριών μοντέλων) παραγόμενοι χάρτες εμφανίζουν γενικώς μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού κατολισθητικών δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης. Ειδικότερα, με βάση τον χάρτη του μοντέλου LSI, το 21% και 72% (σύνολο: 93%) των κατολισθητικών δεδομένων περιέχονται στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τους χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων είναι 29% και 43% (σύνολο: 72%) για το μοντέλο FR, 26% και 64% (σύνολο: 90%) για το μοντέλο WoE, 18% και 61% (σύνολο: 79%) για το μοντέλο LR, 22% και 61% (σύνολο: 83%) για το μοντέλο ANN, και 22% και 62% (σύνολο: 84%) για το μοντέλο ANFIS.



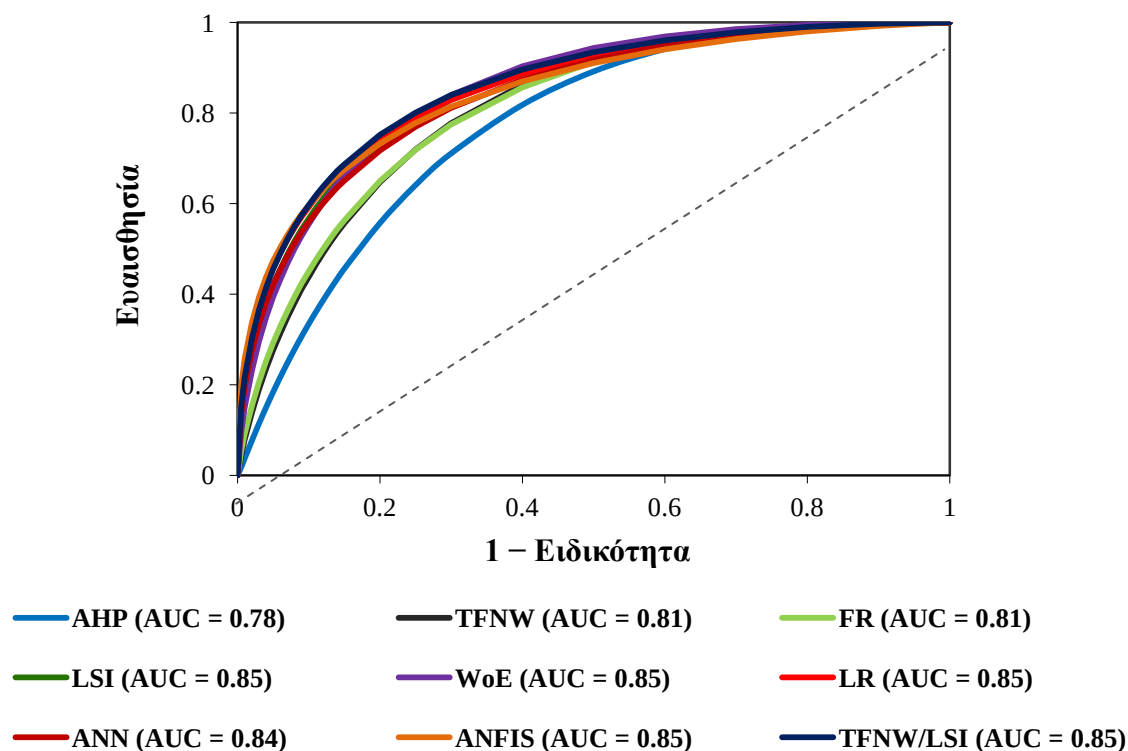
Σχήμα 5.1: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα. (α) Χρήση του συνόλου εκπαίδευσης, και (β) χρήση του συνόλου επικύρωσης.

Στην περίπτωση των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης, δεν παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση σ' όλους τους παραγόμενους χάρτες επιδεκτικότητας (Σχήμα 5.1β). Οι χάρτες των μοντέλων AHP, TFNW και FR εμφανίζουν το υψηλότερο ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (39%, 43% και 38%, αντιστοίχως) και όχι στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (22%, 34% και 34%, αντιστοίχως)

(σύνολο: 61%, 77% και 72%, αντιστοίχως). Αντιθέτως, οι χάρτες των μοντέλων LSI, WoE, LR, ANN, ANFIS και TFWN/LSI εμφανίζουν ένα σταδιακά υψηλό ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (22%, 26%, 19%, 25%, 22% και 31%, αντιστοίχως) και ένα υψηλότερο στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (73%, 67%, 62%, 58%, 65% και 59%, αντιστοίχως) (σύνολο: 95%, 93%, 81%, 83%, 87% και 90%, αντιστοίχως).

5.1.2 Ανάλυση ROC

Σε μια δεύτερη φάση, διενεργήθηκε ένας ίδιος, μ' αυτόν των μοντέλων, αριθμός αναλύσεων ROC μέσω: (α) της αντιστοίχισης του συνόλου επικύρωσης (402 σημεία με τιμές 0 και 1) με τις κατηγορίες των χαρτών επιδεκτικότητας, και (β) της εισαγωγής των παραγόμενων συγκεντρωτικών πινάκων σε μια, ειδικώς διαμορφωθείσα γι' αυτό το σκοπό, διαδικτυακή εφαρμογή (<http://www.rad.jhmi.edu/jeng/javarad/roc/JROCFITi.html>, 09/05/2018) του Τμήματος Ακτινολογίας και Ακτινολογικής Επιστήμης “Russell H. Morgan” της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου “Johns Hopkins”. Τόσο οι αντίστοιχες καμπύλες, όσο και τα στατιστικά αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 5.2: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα.

Αποτέλεσμα	Μοντέλο								
	AHP	TFNW	FR	LSI	WoE	LR	ANN	ANFIS	TFNW/LSI
Αριθμός παρατηρήσεων	402	402	402	402	402	402	402	402	402
Αριθμός σωστών παρατηρήσεων	280	293	292	271	281	306	284	277	291
Θετικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	15	22	25	5	7	20	15	18	9
Αρνητικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	107	87	85	126	114	76	103	107	102
Ακρίβεια (%)	69,7	72,9	72,6	67,4	69,9	76,1	70,6	68,9	72,4
Ευαισθησία (%)	92,5	89,1	87,6	97,5	96,5	90,0	92,5	91,0	95,5
Ειδικότητα (%)	46,8	56,7	57,7	37,3	43,3	62,2	48,8	46,8	49,3

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, με εξαίρεση το μοντέλο AHP (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8), τα υπόλοιπα μοντέλα υποδεικνύουν μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (τιμή AUC στο εύρος 0,8-0,9). Τα μοντέλα LSI, WoE, LR, TFNW/LSI και ANFIS (0,85) παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή AUC (0,85), ακολουθούμενα από τα μοντέλα ANN (0,84), TFNW και FR (0,81), και AHP (0,78). Επιπλέον, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.1 υψηλότερο ποσοστό ακρίβειας (76,1%) παρουσιάζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα TFNW (72,9%), FR (72,6%), TFNW/LSI (72,4%), ANN (70,6%) WoE (69,9%), AHP (69,7%), ANFIS (68,9%) και LSI (67,4%). Ως προς τον όρο της ευαισθησίας, το υψηλότερο ποσοστό (97,5%) παρουσιάζει το μοντέλο LSI, ακολουθούμενο από τα μοντέλα WoE (96,5%), TFNW/LSI (95,5%), ANN και AHP (92,5%), ANFIS (91%), LR (90%), TFNW (89,1%) και FR (87,6%). Ως προς τον όρο της ειδικότητας, το υψηλότερο ποσοστό (62,2%) παρουσιάζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (57,7%), TFNW (56,7%), TFNW/LSI (49,3%), ANN (48,8%), ANFIS και AHP (46,8%), WoE (43,3%) και LSI (37,3%).

5.1.3 Αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης

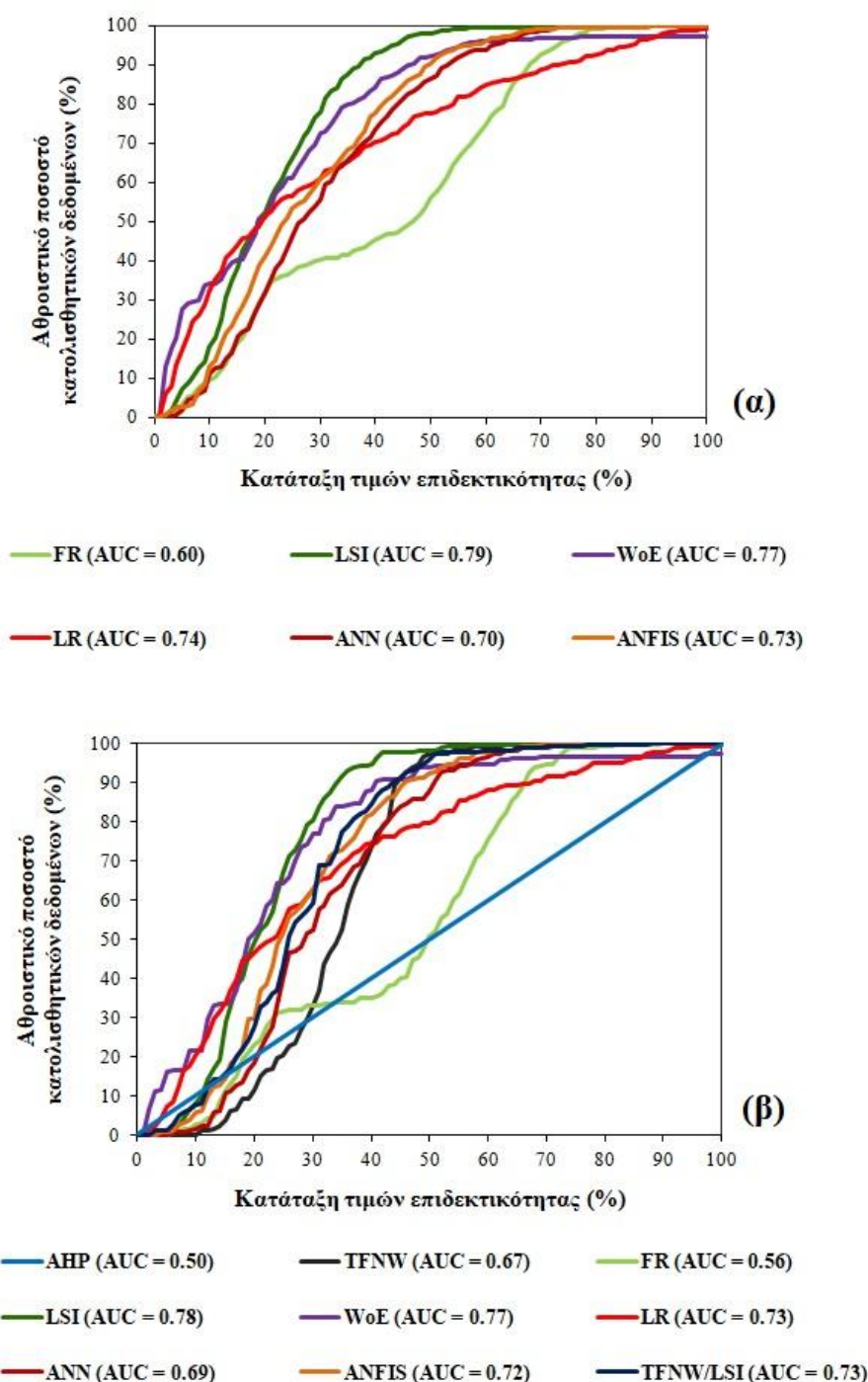
Σε μια τρίτη φάση, εφαρμόστηκε η μέθοδος υπολογισμού των αθροιστικών ποσοστών επιτυχίας και πρόβλεψης μέσω της εκτέλεσης των ακόλουθων βημάτων για κάθε ένα από τα μοντέλα ανάλυσης:

- (1) Την κατάταξη των παραγόμενων, σε συνεχή αριθμητική κλίμακα (δηλαδή πριν από τον διαχωρισμό τους σε πέντε διακριτές κατηγορίες), τιμών επιδεκτικότητας σε φθίνουσα σειρά.
- (2) Το διαχωρισμό των διατεταγμένων τιμών επιδεκτικότητας σε 100 κατηγορίες με αθροιστικό διάστημα 1%.
- (3) Τον υπολογισμό των αθροιστικών ποσοστών επιτυχίας (εκτός των μοντέλων AHP, TFNW και TFNW/LSI) και πρόβλεψης μέσω της αντιστοίχισης των κατολισθητικών δεδομένων των συνόλων εκπαίδευσης και επικύρωσης, αντιστοίχως, με τις προκύπτουσες από το βήμα (2) κατηγορίες.
- (4) Το σχηματισμό των αντίστοιχων καμπυλών και τον υπολογισμό των τιμών AUC (Σχήμα 5.3).

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.3α με τις καμπύλες του αθροιστικού ποσοστού επιτυχίας, η πλειοψηφία των μοντέλων (LSI, WoE, LR, ANN και ANFIS) υποδεικνύουν μια καλή προσαρμογή (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8) στα κατολισθητικά δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης. Μόνο το μοντέλο FR εμφανίζει μια φτωχή προσαρμογή (τιμή AUC στο εύρος 0,6-0,7). Το μοντέλο LSI παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή AUC (0,79), ακολουθούμενο από τα μοντέλα WoE (0,77), LR (0,74), ANFIS (0,73), ANN (0,70) και FR (0,60). Επιπλέον, το 30% των υψηλότερων τιμών επιδεκτικότητας του μοντέλου LSI συμπίπτει με το 78% των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου εκπαίδευσης. Τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 73%, 61%, 61%, 56% και 40%, αντιστοίχως, για τα μοντέλα WoE, LR, ANFIS, ANN και FR.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3β με τις καμπύλες του αθροιστικού ποσοστού πρόβλεψης, τα μοντέλα LSI, WoE, LR, ANFIS και TFNW/LSI εμφανίζουν μια καλή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8) με βάση τα κατολισθητικά δεδομένα του συνόλου επικύρωσης. Αντιθέτως, τα μοντέλα AHP, TFNW, FR και ANN εμφανίζουν μια κακή έως φτωχή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,5-0,7). Το μοντέλο LSI παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή AUC (0,78), ακολουθούμενο από τα μοντέλα WoE (0,77), LR και TFNW/LSI (0,73), ANFIS (0,72), ANN (0,69), TFNW (0,67), FR (0,56) και AHP (0,50). Επιπλέον, το 30% των υψηλότερων τιμών επιδεκτικότητας του μοντέλου LSI συμπίπτει με το 80% των

κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης. Τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 77%, 63%, 63%, 53%, 59%, 33%, 33% και 3%, αντιστοίχως, για τα μοντέλα WoE, LR, ANFIS, TFNW/LSI, ANN, TFNW, FR και AHP.

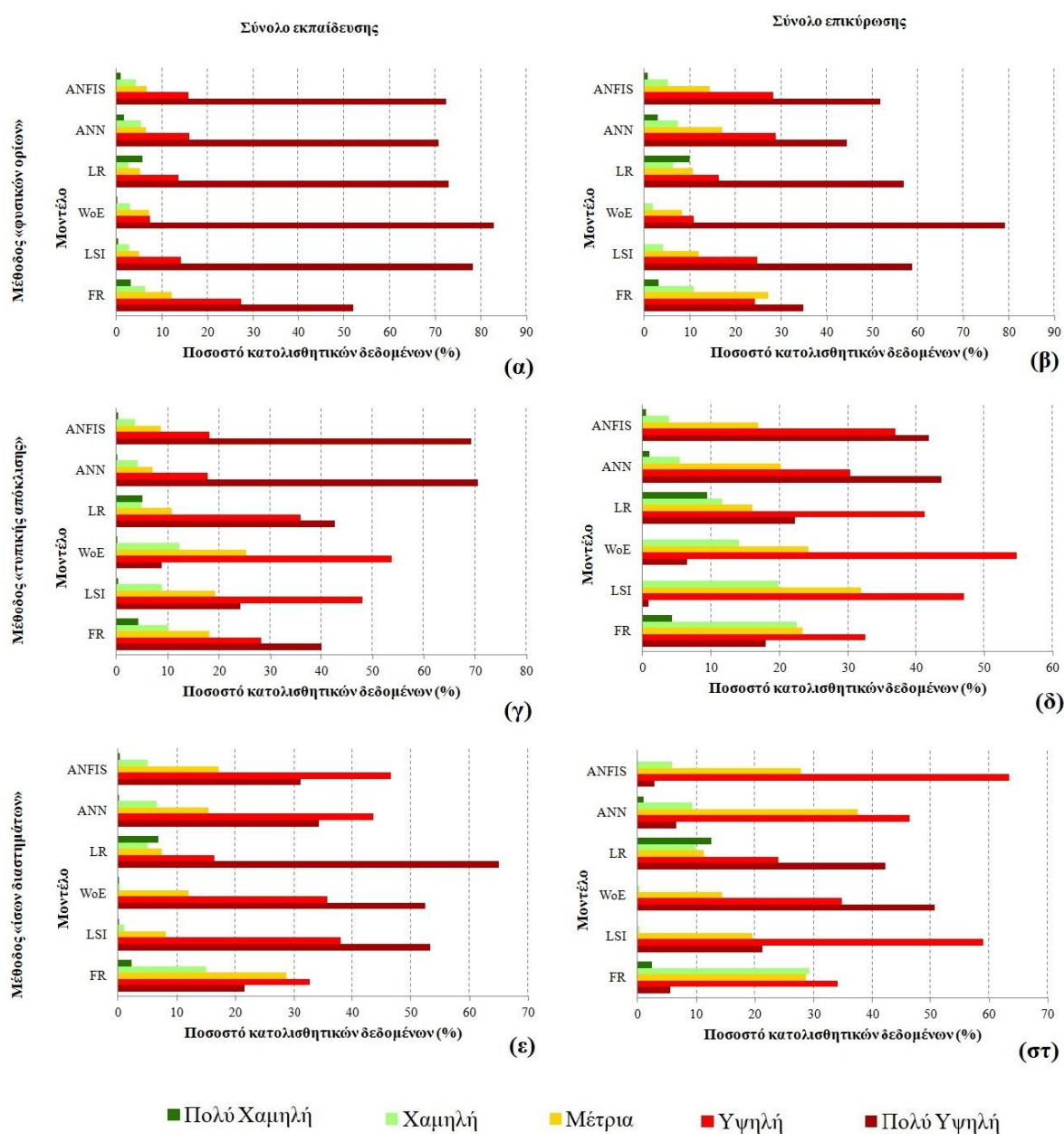


Σχήμα 5.3: Καμπύλες αθροιστικών ποσοστών για τα μοντέλα. (α) Αθροιστικό ποσοστό επιτυχίας, και (β) αθροιστικό ποσοστό πρόβλεψης.

5.2 Λεπτομερέστερη κλίμακα

5.2.1 Υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων

Και σ' αυτήν την περίπτωση, σε μια πρώτη φάση, διενεργήθηκε απλώς η υπέρθεση των κατολισθητικών δεδομένων των συνόλων εκπαίδευσης (5.140 σημεία) και επικύρωσης (446 σημεία) στους κατηγοριοποιημένους χάρτες επιδεκτικότητας. Τα αποτελέσματα αυτής της υπέρθεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.4: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα για τις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. (α) Σύνολο εκπαίδευσης για την μέθοδο «φυσικών ορίων», (β) σύνολο επικύρωσης για την μέθοδο «φυσικών ορίων», (γ) σύνολο εκπαίδευσης για την μέθοδο «τυπικής απόκλισης», (δ) σύνολο επικύρωσης για την μέθοδο «τυπικής απόκλισης», (ε) σύνολο εκπαίδευσης για την μέθοδο «ίσων διαστημάτων», και (στ) σύνολο επικύρωσης για την μέθοδο «ίσων διαστημάτων».

Όλοι οι χάρτες επιδεκτικότητας με βάση τη μέθοδο των «φυσικών ορίων», ξεκινώντας από την κατηγορία «Πολύ Χαμηλής» και καταλήγοντας στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας, παρουσιάζουν γενικώς μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού κατολισθητικών δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης (Σχήμα 5.4α). Ειδικότερα, με βάση τον χάρτη του μοντέλου LSI, το 14% και 78% (σύνολο: 92%) των κατολισθητικών δεδομένων ανήκουν στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τους χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων είναι 27% και 52% (σύνολο: 79%) για το μοντέλο FR, 7% και 83% (σύνολο: 90%) για το μοντέλο WoE, 13% και 73% (σύνολο: 86%) για το μοντέλο LR, 16% και 71% (σύνολο: 87%) για το μοντέλο ANN, και 16% και 72% (σύνολο: 88%) για το μοντέλο ANFIS. Με εξαίρεση τα μοντέλα FR και LSI, μια παρόμοια σταδιακή αύξηση εμφανίζεται στην περίπτωση των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης (Σχήμα 5.4β). Πιο συγκεκριμένα, με βάση τον χάρτη του μοντέλου WoE, το 11% και 79% (σύνολο: 90%) των κατολισθητικών δεδομένων ανήκει στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τους χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων είναι 24% και 35% (σύνολο: 59%) για το μοντέλο FR, το 25% και 59% (σύνολο: 84%) για το μοντέλο LSI, 16% και 57% (σύνολο: 73%) για το μοντέλο LR, 29% και 44% (σύνολο: 73%) για το μοντέλο ANN, και 28% και 52% (σύνολο: 80%) για το μοντέλο ANFIS.

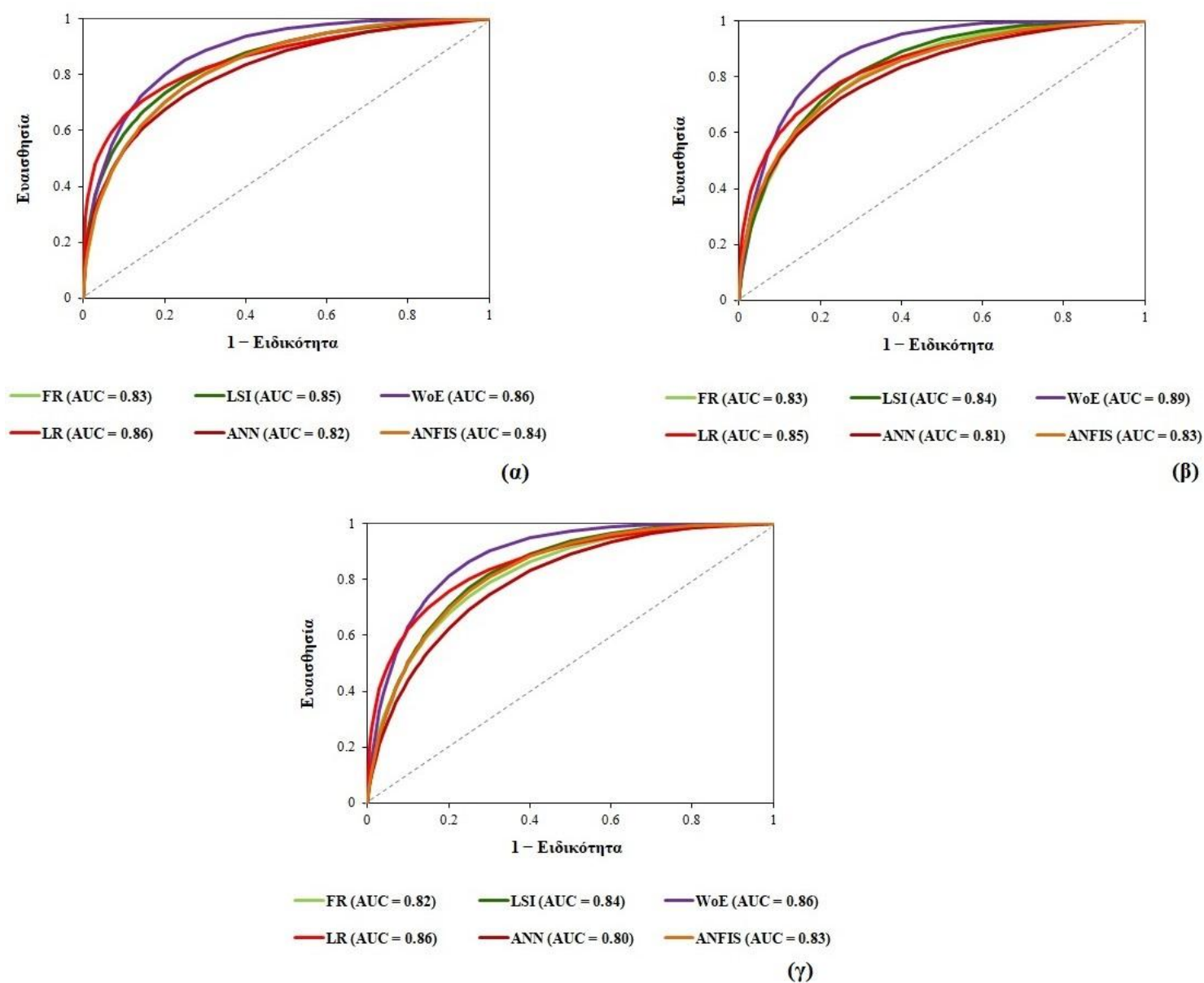
Ως προς τους χάρτες επιδεκτικότητας με βάση τη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης», δεν παρατηρείται σ' όλους μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού κατολισθητικών δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης (Σχήμα 5.4γ). Οι χάρτες των μοντέλων LSI και WoE εμφανίζουν το υψηλότερο ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (48% και 54%, αντιστοίχως) και όχι στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (24% και 9%, αντιστοίχως) (σύνολο: 72% και 63%, αντιστοίχως). Αντιθέτως, οι χάρτες των μοντέλων FR, LR, ANN και ANFIS εμφανίζουν ένα σταδιακά υψηλό ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (28%,

36%, 18% και 18%, αντιστοίχως) και ένα υψηλότερο στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (40%, 43%, 71% και 69%, αντιστοίχως) (σύνολο: 68%, 79%, 89% και 87%, αντιστοίχως). Στην περίπτωση των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης, μια σταδιακή αύξηση εντοπίζεται μόνο στους χάρτες των μοντέλων ANN και ANFIS (Σχήμα 5.4δ). Οι χάρτες αυτοί εμφανίζουν ένα σταδιακά υψηλό ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (30% και 37%, αντιστοίχως) και ένα υψηλότερο στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (44% και 42%, αντιστοίχως) (σύνολο: 74% και 79%, αντιστοίχως). Αντιθέτως, οι χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων (FR, LSI, WoE και LR) παρουσιάζουν το υψηλότερο ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (33%, 47%, 55% και 41%, αντιστοίχως) και όχι στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (18%, 1%, 7% και 22%, αντιστοίχως) (σύνολο: 51%, 48%, 62% και 63%, αντιστοίχως).

Ως προς τους χάρτες επιδεκτικότητας με βάση τη μέθοδο των «ίσων διαστημάτων», επίσης δεν παρατηρείται σ' όλους μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού κατολισθητικών δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης (Σχήμα 5.4ε). Οι χάρτες των μοντέλων FR, ANN και ANFIS εμφανίζουν το υψηλότερο ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (33%, 44% και 47%, αντιστοίχως) και όχι στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (21%, 34% και 31%, αντιστοίχως) (σύνολο: 54%, 78% και 78%, αντιστοίχως). Αντιθέτως, οι χάρτες των μοντέλων LSI, WoE και LR εμφανίζουν ένα σταδιακά υψηλό ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (38%, 36% και 16%, αντιστοίχως) και ένα υψηλότερο στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (53%, 52% και 65%, αντιστοίχως) (σύνολο: 91%, 88% και 81%, αντιστοίχως). Στην περίπτωση των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης, μια σταδιακή αύξηση εντοπίζεται μόνο στους χάρτες των μοντέλων WoE και LR (Σχήμα 5.4στ). Οι χάρτες αυτοί εμφανίζουν ένα σταδιακά υψηλό ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (35% και 24%, αντιστοίχως) και ένα υψηλότερο στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (51% και 42%, αντιστοίχως) (σύνολο: 86% και 66%, αντιστοίχως). Αντιθέτως, οι χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων (FR, LSI, ANN και ANFIS) παρουσιάζουν το υψηλότερο ποσοστό στην κατηγορία «Υψηλής» επιδεκτικότητας (34%, 59%, 46% και 63%, αντιστοίχως) και όχι στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (6%, 21%, 7% και 3%, αντιστοίχως) (σύνολο: 40%, 80%, 53% και 66%, αντιστοίχως).

5.2.2 Ανάλυση ROC

Σε μια δεύτερη φάση, υλοποιήθηκε ένας αριθμός αναλύσεων ROC ίσος με τον αριθμό των μοντέλων επί τρία (όσες και οι μέθοδοι ταξινόμησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας) μέσω της αντιστοίχισης του συνόλου επικύρωσης (892 σημεία με τιμές 0 και 1) με τις κατηγορίες των χαρτών επιδεκτικότητας, και της μετέπειτα εισαγωγής των παραγόμενων συγκεντρωτικών πινάκων στην ειδική διαδικτυακή εφαρμογή. Τόσο τα στατιστικά αποτελέσματα των αναλύσεων, όσο και οι αντίστοιχες καμπύλες παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 5.5: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα στις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. (α) Μέθοδος «φυσικών ορίων», (β) μέθοδος «τυπικής απόκλισης», και (γ) μέθοδος «ίσων διαστημάτων».

Πίνακας 5.2: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα στις τρεις μεθόδους ταξινόμησης. (α) Μέθοδος «φυσικών ορίων», και (β) μέθοδος «τυπικής απόκλισης».

(α)

Αποτέλεσμα	Μοντέλο					
	FR	LSI	WoE	LR	ANN	ANFIS
Αριθμός παρατηρήσεων	892	892	892	892	892	892
Αριθμός σωστών παρατηρήσεων	673	642	606	698	638	614
Θετικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	62	41	8	72	52	26
Αρνητικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	157	209	278	122	202	252
Ακρίβεια (%)	75,4	72,0	67,9	78,3	71,5	68,8
Ευσαιθησία (%)	86,1	90,8	98,2	83,9	88,3	94,2
Ειδικότητα (%)	64,8	53,1	37,7	72,6	54,7	43,5

(β)

Αποτέλεσμα	Μοντέλο					
	FR	LSI	WoE	LR	ANN	ANFIS
Αριθμός παρατηρήσεων	892	892	892	892	892	892
Αριθμός σωστών παρατηρήσεων	670	671	723	702	635	584
Θετικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	119	88	65	94	55	19
Αρνητικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	103	133	104	96	202	289
Ακρίβεια (%)	77,1	75,2	81,1	78,7	71,2	65,5
Ευσαιθησία (%)	73,3	80,3	85,4	78,9	87,7	95,7
Ειδικότητα (%)	76,9	70,2	76,7	78,5	54,7	35,2

Πίνακας 5.2: (Συνέχεια). (γ) Μέθοδος «ίσων διαστημάτων».

(γ)	Αποτέλεσμα	Μοντέλο					
		FR	LSI	WoE	LR	ANN	ANFIS
	Αριθμός παρατηρήσεων	892	892	892	892	892	892
	Αριθμός σωστών παρατηρήσεων	668	513	705	704	635	614
	Θετικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	141	1	31	100	55	26
	Αρνητικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	83	378	156	88	202	252
	Ακρίβεια (%)	74,9	57,5	75,0	77,9	71,2	68,8
	Ευαισθησία (%)	68,4	99,8	93,0	77,6	87,7	94,2
	Ειδικότητα (%)	81,4	15,2	65,0	77,3	54,7	43,5

Σχετικά με τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων» (Σχήμα 5.5α και Πίνακας 5.2α), όλα τα μοντέλα υποδεικνύουν μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (τιμή AUC στο εύρος 0,8-0,9). Τα μοντέλα WoE και LR παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή AUC (0,86), ακολουθούμενα από τα μοντέλα LSI (0,85), ANFIS (0,84), FR (0,83) και ANN (0,82). Επιπλέον, το υψηλότερο ποσοστό ακρίβειας (78,3%) παρουσιάζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (75,4%), LSI (72%), ANN (71,5%), ANFIS (68,8%) και WoE (67,9%). Το υψηλότερο ποσοστό ευαισθησίας (98,2%) παρουσιάζει το μοντέλο WoE, ακολουθούμενο από τα μοντέλα ANFIS (94,2%), LSI (90,8%), ANN (88,3%), FR (86,1%) και LR (83,9%). Το υψηλότερο ποσοστό ειδικότητας (72,6%) παρουσιάζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (64,8%), ANN (54,7%), LSI (53,1%), ANFIS (43,5%) και WoE (37,7%).

Αναφορικά με τη μέθοδο ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης» (Σχήμα 5.5β και Πίνακας 5.2β), όλα τα μοντέλα, για ακόμη μια φορά, υποδεικνύουν μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (τιμή AUC στο εύρος 0,8-0,9). Το μοντέλο WoE εμφανίζει την υψηλότερη τιμή AUC (0,89), ακολουθούμενο από τα μοντέλα LR (0,85), LSI (0,84), FR και ANFIS (0,83), και ANN (0,81). Επιπλέον, το υψηλότερο ποσοστό

ακρίβειας (81,1%) εμφανίζει το μοντέλο WoE, ακολουθούμενο από τα μοντέλα LR (78,7%), FR (77,1%), LSI (75,2%), ANN (71,2%) και ANFIS (65,5%). Το υψηλότερο ποσοστό ευαισθησίας (95,7%) εμφανίζει το μοντέλο ANFIS, ακολουθούμενο από τα μοντέλα ANN (87,7%), WoE (85,4%), LSI (80,3%), LR (78,9%) και FR (73,3%). Το υψηλότερο ποσοστό ειδικότητας (78,5%) εμφανίζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (76,9%), WoE (76,7%), LSI (70,2%), ANN (54,7%) και ANFIS (35,2%).

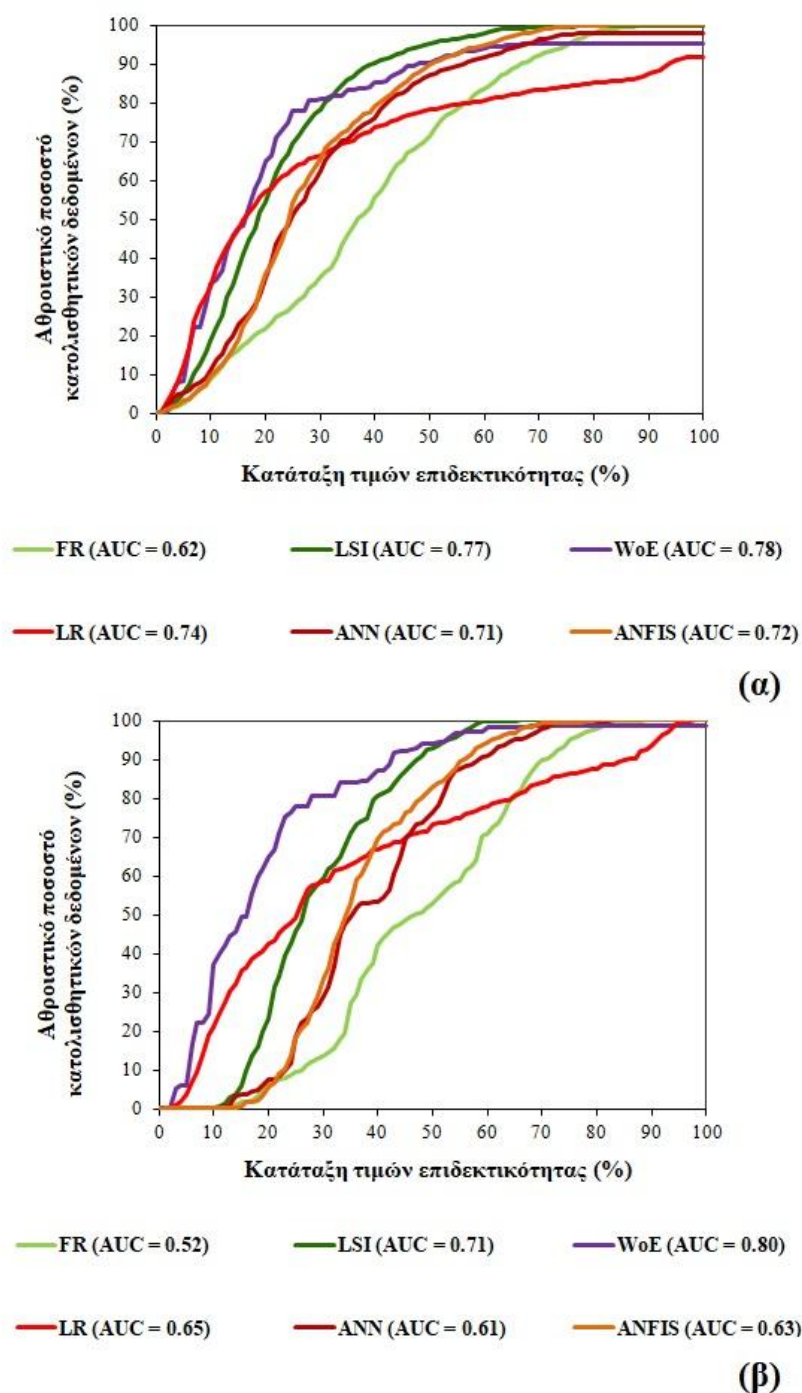
Σχετικά με τη μέθοδο ταξινόμησης των «ίσων διαστημάτων» (Σχήμα 5.5γ και Πίνακας 5.2γ), επίσης όλα τα μοντέλα υποδεικνύουν μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (τιμή AUC στο εύρος 0,8-0,9). Τα μοντέλα WoE και LR διαθέτουν την υψηλότερη τιμή AUC (0,86), ακολουθούμενα από τα μοντέλα LSI (0,84), ANFIS (0,83), FR (0,82) και ANN (0,80). Επιπλέον, το μοντέλο LR διαθέτει το υψηλότερο ποσοστό ακρίβειας (77,9%), ακολουθούμενο από τα μοντέλα WoE (75%), FR (74,9%), ANN (71,2%), ANFIS (68,6%) και LSI (57,5%). Το μοντέλο LSI διαθέτει το υψηλότερο ποσοστό ευαισθησίας (99,8%), ακολουθούμενο από τα μοντέλα ANFIS (94,2%), WoE (93%), ANN (87,7%), LR (77,6%) και FR (68,4%). Το μοντέλο FR διαθέτει το υψηλότερο ποσοστό ειδικότητας (81,4%), ακολουθούμενο από τα μοντέλα LR (77,3%), WoE (65%), ANN (54,7%), ANFIS (43,5%) και LSI (15,2%).

5.2.3 Αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης

Σε μια τρίτη φάση, εκτελέστηκε η μέθοδος υπολογισμού των αθροιστικών ποσοστών επιτυχίας και πρόβλεψης ακολουθώντας τα ίδια με προηγουμένως (για την περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης) βήματα και αξιοποιώντας τα κατολισθητικά δεδομένα των αντίστοιχων συνόλων (εκπαίδευσης και επικύρωσης). Οι προκύπτουσες καμπύλες, μαζί με τις εκτιμώμενες τιμές AUC, εμφανίζονται στο Σχήμα 5.6.

Με βάση τις καμπύλες του αθροιστικού ποσοστού επιτυχίας (Σχήμα 5.6α), η πλειοψηφία των μοντέλων (LSI, WoE, ANN και ANFIS) υποδεικνύουν μια καλή προσαρμογή (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8) στα κατολισθητικά δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης. Αντιθέτως, τα μοντέλα FR και LR υποδεικνύουν μια φτωχή προσαρμογή (τιμή AUC στο εύρος 0,6-0,7). Το μοντέλο WoE παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή AUC (0,78), ακολουθούμενο από τα μοντέλα LSI (0,77), LR (0,74), ANFIS (0,72), ANN (0,71), και FR (0,62). Επιπλέον, το 30% των

υψηλότερων τιμών επιδεκτικότητας του μοντέλου WoE συμπίπτει με το 81% των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου εκπαίδευσης. Τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 78%, 66%, 66%, 63% και 35%, αντιστοίχως, για τα μοντέλα LSI, LR, ANFIS, ANN και FR.



Σχήμα 5.6: Καμπύλες αθροιστικών ποσοστών για τα μοντέλα. (α) Αθροιστικό ποσοστό επιτυχίας, και (β) αθροιστικό ποσοστό πρόβλεψης.

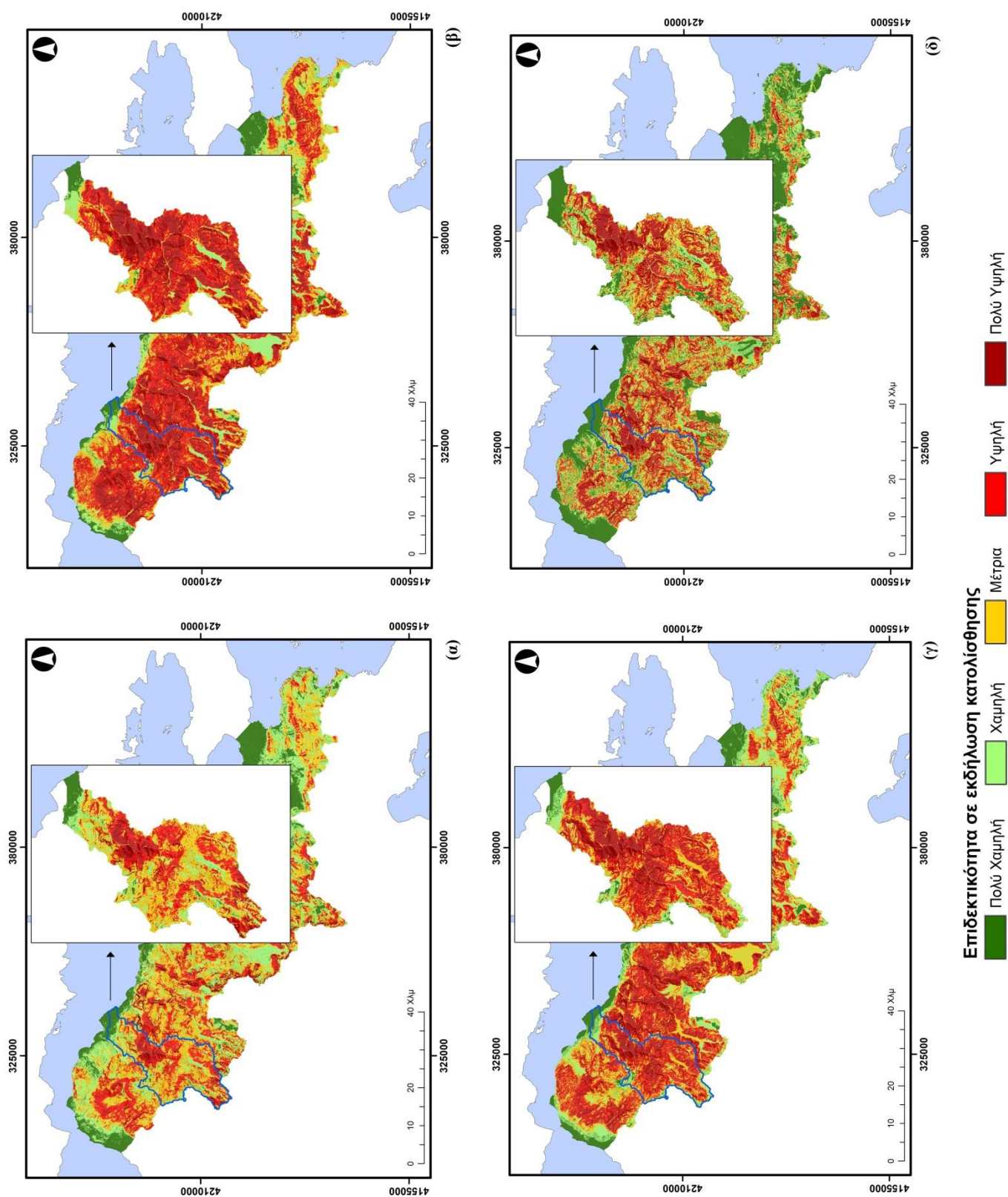
Σύμφωνα με τις καμπύλες του αθροιστικού ποσοστού πρόβλεψης (Σχήμα 5.6β), μόνο τα μοντέλα LSI και WoE εμφανίζουν μια καλή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8) με βάση τα κατολισθητικά δεδομένα του συνόλου επικύρωσης. Αντιθέτως, τα μοντέλα LR, ANN και ANFIS εμφανίζουν μια φτωχή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,6-0,7), και το μοντέλο FR μια κακή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,5-0,6). Το μοντέλο WoE διαθέτει την υψηλότερη τιμή AUC (0,80), ακολουθούμενο από τα μοντέλα LSI (0,71), LR (0,65), ANFIS (0,63), ANN (0,61) και FR (0,52). Επιπλέον, το 30% των υψηλότερων τιμών επιδεκτικότητας του μοντέλου WoE συμπίπτει με το 81% των κατολισθητικών δεδομένων του συνόλου επικύρωσης. Τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 59%, 59%, 34%, 29%, και 14%, αντιστοίχως, για τα μοντέλα LSI, LR, ANFIS, ANN και FR.

Κεφάλαιο 6: Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης

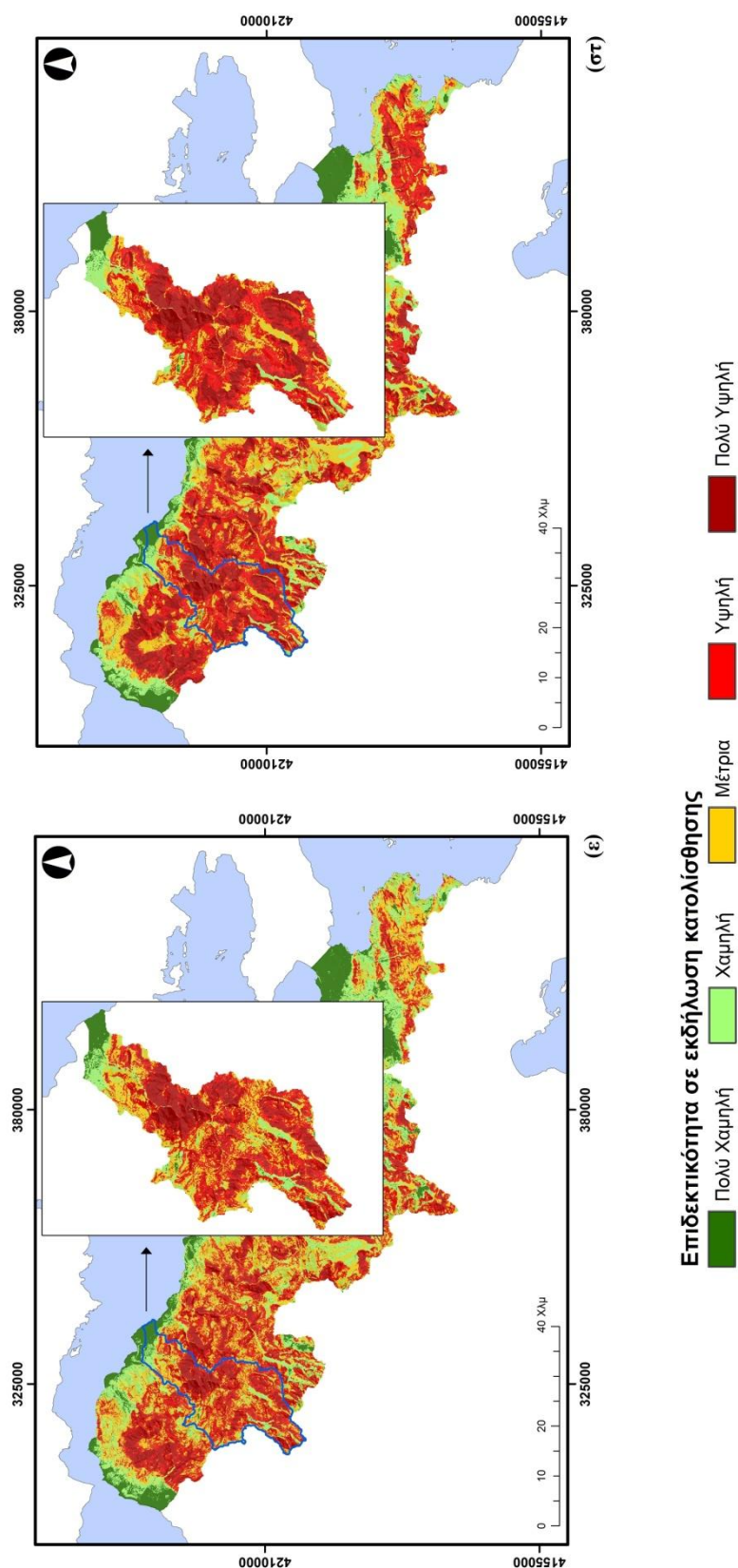
Η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης περιλάμβανε την αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας, τόσο ως προς τη χωρική κάλυψη των κατηγοριών τους, όσο και ως προς την επικύρωσή τους, σ' ένα κοινό χωρικό πλαίσιο. Αυτό το κοινό χωρικό πλαίσιο ήταν δυνατό να προσδιοριστεί και να οριοθετηθεί από την περιοχή μελέτης της λεπτομερέστερης κλίμακας η οποία ουσιαστικά αποτελούσε τμήμα της περιοχής που μελετήθηκε στην περιφερειακή κλίμακα. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της περιφερειακής κλίμακας που αφορούσαν το σύστημα λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου έπρεπε να επανεξεταστούν εστιάζοντας αποκλειστικά στην έκταση της (περιεχόμενης στο σύστημα) λεκάνης απορροής του ποταμού Σελινούνα.

Για το σκοπό αυτό, αρχικώς, από τα, βασισμένα στη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», αποτελέσματα επιδεκτικότητας των έξι ποσοτικών μοντέλων ανάλυσης (FR, LSI, WoE, LR, ANN και ANFIS) στην περιφερειακή κλίμακα εξήχθη μόνο το τμήμα της περιοχής το οποίο βρισκόταν εντός των ορίων της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής. Τα εξαγόμενα, γι' αυτό το τμήμα, αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.

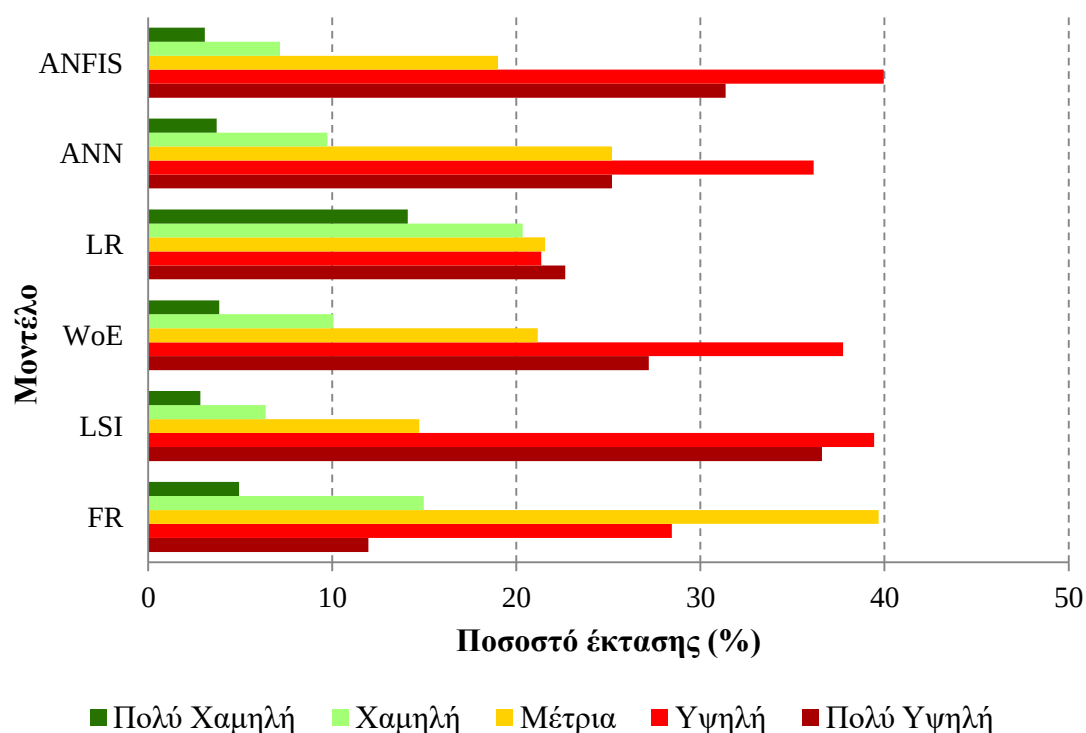
Οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας φαίνονται να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής για τα μοντέλα LSI, WoE, ANN και ANFIS. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 6.2 με τα ποσοστά χωρικής κάλυψης των κατηγοριών επιδεκτικότητας διαπιστώνεται ότι οι κατηγορίες αυτές καλύπτουν: (α) το 39% (περίπου 147 χλμ²) και 37% (περίπου 137 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο LSI, (β) το 38% (περίπου 141 χλμ²) και 27% (περίπου 102 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο WoE, (γ) το 36% (περίπου 135 χλμ²) και 25% (περίπου 94 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο ANN, και (δ) το 40% (περίπου 149 χλμ²) και 31% (περίπου 117 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο ANFIS. Οι ίδιες κατηγορίες εμφανίζονται να καταλαμβάνουν μικρότερες εκτάσεις για τα μοντέλα FR και LR, με μεγάλες, ωστόσο, συγκεντρώσεις τους στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Ειδικότερα, οι κατηγορίες αυτές διαπιστώνεται ότι καλύπτουν: (α) το 28% (περίπου 106 χλμ²) και 12% (περίπου 45 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο FR, και (β) το 21% (περίπου 80 χλμ²) και 23% (περίπου 85 χλμ²), αντιστοίχως, της περιοχής για το μοντέλο LR.



Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης από τα μοντέλα στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούνα. (α) FR, (β) LSI, (γ) WoE, και (δ) LR.



Σχήμα 6.1: (Συνέχεια). (ε) ANN, και (β) ANFIS.



Σχήμα 6.2: Ποσοστά έκτασης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τα αποτελέσματα από τα μοντέλα.

Στη συνέχεια, αντιπαραβάλλοντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα επιδεκτικότητας με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μοντέλων ανάλυσης για τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων» στη λεπτομερέστερη κλίμακα, διενεργήθηκε μια «ανά μοντέλο» διασταυρούμενη σύγκριση χωρικών καλύψεων. Τα αποτελέσματα των διενεργηθέντων συγκρίσεων παρατίθενται στον Πίνακα 6.1 και στο Σχήμα 6.3. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου FR για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1α και Σχήμα 6.3α) προκύπτει ότι το 4,3% και 5,1% της λεκάνης απορροής ταξινομήθηκαν ως εκτάσεις «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στις δύο κλίμακες. Οι εκτάσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο και δυτικό τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 8,7% και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής. Και στις δύο κλίμακες, ως εκτάσεις «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας ταξινομήθηκαν το 4,2% και 3,2%, αντιστοίχως, της περιοχής. Μεγάλες συγκεντρώσεις αυτών των εκτάσεων μπορούν να τοποθετηθούν στο κεντρικό και νότιο τμήμα της. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι σημαντικά τμήματα της περιοχής (9,6%

Πίνακας 6.1: «Ανά μοντέλο» διασταυρούμενη σύγκριση των εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας. (α) FR, και (β) LSI.

(α)

FR	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης	Πολύ Χαμηλή	4,3	7,8	11,9	4,6	0,1
	Χαμηλή	0,5	5,1	16,6	9,6	0,8
	Μέτρια	0,1	1,7	8,7	9,3	3,3
	Υψηλή	—	0,3	2,3	4,2	4,3
	Πολύ Υψηλή	—	—	0,2	0,8	3,5

(β)

LSI	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης	Πολύ Χαμηλή	2,2	2,0	1,4	1,1	0,1
	Χαμηλή	0,5	3,2	5,6	12,0	3,7
	Μέτρια	—	0,9	4,7	15,3	13,9
	Υψηλή	—	0,2	2,5	9,4	13,9
	Πολύ Υψηλή	—	—	0,4	1,6	9,2

Πίνακας 6.1: (Συνέχεια). (γ) WoE, και (δ) LR.

(γ)

WoE	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης	Πολύ Χαμηλή	0,3	1,1	1,3	0,4	0,1
	Χαμηλή	3,0	5,7	9,7	10,7	2,2
	Μέτρια	0,5	2,4	7,3	15,2	7,1
	Υψηλή	–	0,5	1,8	5,4	4,5
	Πολύ Υψηλή	–	0,3	1,2	6,1	13,4

(δ)

LR	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης	Πολύ Χαμηλή	11,1	12,3	10,8	7,7	3,8
	Χαμηλή	2,0	5,2	5,9	5,6	4,1
	Μέτρια	0,6	1,7	2,6	3,6	3,6
	Υψηλή	0,2	0,8	1,6	2,8	4,9
	Πολύ Υψηλή	0,1	0,3	0,7	1,7	6,3

Πίνακας 6.1: (Συνέχεια). (ε) ANN, και (στ) ANFIS.

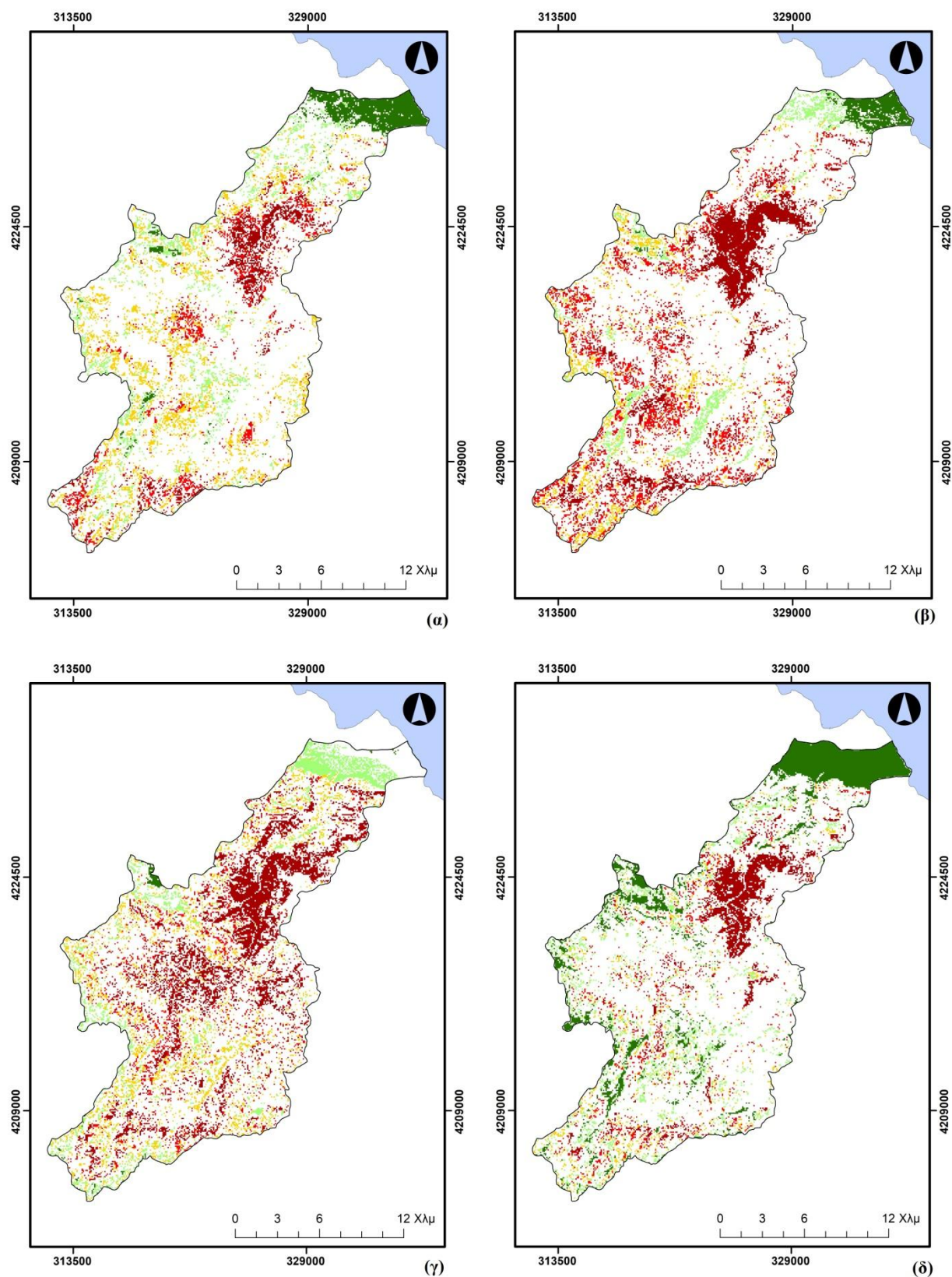
(ε)

ANN	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
	Πολύ Χαμηλή	3,1	3,7	5,0	3,8	1,1
	Χαμηλή	0,4	3,8	9,4	10,0	3,9
	Μέτρια	0,1	1,6	7,0	11,8	6,5
	Υψηλή	–	0,6	3,2	8,6	7,9
	Πολύ Υψηλή	–	0,1	0,6	2,0	5,8

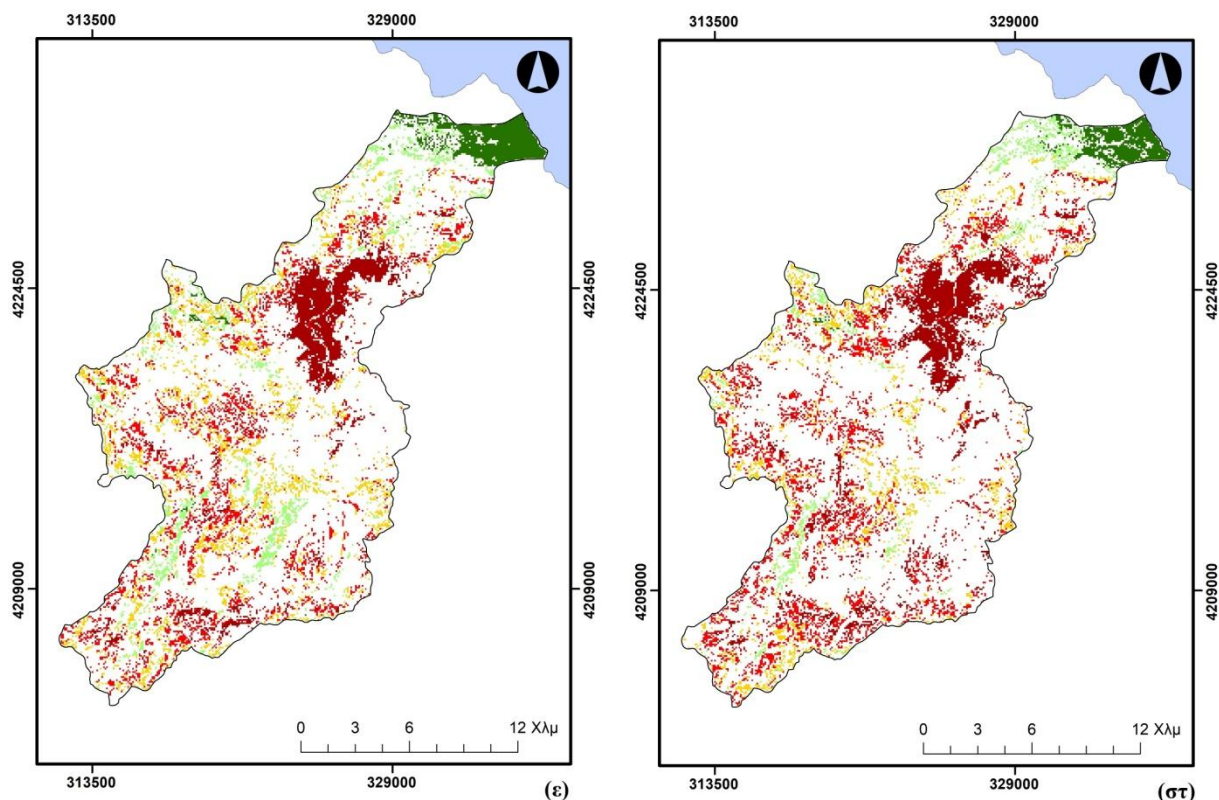
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης

(στ)

ANFIS	Περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης					
	Κατηγορία επιδεκτικότητας	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης	Πολύ Χαμηλή	2,2	2,8	4,1	4,6	1,4
	Χαμηλή	0,7	2,2	6,1	10,2	5,7
	Μέτρια	0,1	1,2	4,7	12,1	8,1
	Υψηλή	–	0,7	2,7	10,0	9,0
	Πολύ Υψηλή	–	0,2	0,7	3,1	7,3



Σχήμα 6.3: Κατανομή των κοινών εκτάσεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας στα εξαγόμενα αποτελέσματα των μοντέλων. (α) FR, (β) LSI, (γ) WoE, και (δ) LR.



Σχήμα 6.3: (Συνέχεια). (ε) ANN, και (στ) ANFIS.

και 9,3%, αντιστοίχως) που έχουν ταξινομηθεί ως εκτάσεις «Υψηλής» επιδεκτικότητας στην περιφερειακή κλίμακα, έχουν συγχρόνως ταξινομηθεί ως εκτάσεις «Χαμηλής» και «Μέτριας» επιδεκτικότητας στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, δεν παρατηρείται το αντίστροφο.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου LSI για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1β και Σχήμα 6.3β) προκύπτει ότι το 2,2% και 3,2% της λεκάνης απορροής ανήκουν στις κατηγορίες «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας και στις δύο κλίμακες. Οι εκτάσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 4,7% και εντοπίζεται κυρίως στο νότιο και δυτικό τμήμα της περιοχής. Και στις δύο κλίμακες, στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας ανήκουν το 9,4% και 9,2%, αντιστοίχως, της περιοχής. Κοινές εκτάσεις «Υψηλής» επιδεκτικότητας συναντώνται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας διακρίνεται στο κεντρικό τμήμα της. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι σημαντικά τμήματα της περιοχής (15,3% και 13,9%, αντιστοίχως) τα οποία ανήκουν στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής»

επιδεκτικότητας στην περιφερειακή κλίμακα, ανήκουν συγχρόνως στην κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, κανένα ή ένα ελάχιστο τμήμα (0,2%) της περιοχής που ανήκει στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας στη λεπτομερέστερη κλίμακα, ανήκει συγχρόνως στις κατηγορίες «Πολύ Χαμηλής» και «Χαμηλής» επιδεκτικότητας στην περιφερειακή κλίμακα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου WoE για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1γ και Σχήμα 6.3γ) προκύπτει ότι το 5,7% της λεκάνης απορροής έχει χαρακτηριστεί με «Χαμηλή» επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Η κοινή αυτή έκταση εντοπίζεται κυρίως στο βόρειο και λιγότερο στο δυτικό τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 7,3% και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής. Το 5,4% και 13,4% της περιοχής έχουν χαρακτηριστεί με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Κοινές εκτάσεις συναντώνται σ' όλη την έκταση της περιοχής και κυρίως στο κεντρικό τμήμα της. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι σημαντικά τμήματα της περιοχής (10,7% και 15,2%, αντιστοίχως) που έχουν χαρακτηριστεί με «Υψηλή» επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα, έχουν συγχρόνως χαρακτηριστεί με «Χαμηλή» και «Μέτρια», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, κανένα ή ένα ελάχιστο τμήμα (από 0,3% έως 1,8%) της περιοχής που έχει χαρακτηριστεί με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα, έχει συγχρόνως χαρακτηριστεί με «Πολύ Χαμηλή», «Χαμηλή» και «Μέτρια», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου LR για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1δ και Σχήμα 6.3δ) προκύπτει ότι το 11,1% και 5,2% της λεκάνης απορροής εμφανίζουν «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Κοινές εκτάσεις «Χαμηλής» επιδεκτικότητας συναντώνται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Χαμηλής» επιδεκτικότητας διακρίνεται στο βόρειο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 2,6%. Το 2,8% και 6,3% της περιοχής εμφανίζουν «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Κοινές εκτάσεις «Υψηλής» επιδεκτικότητας διακρίνονται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας τοποθετείται στο κεντρικό τμήμα της. Οι

βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι αξιοσημείωτα τμήματα της περιοχής (7,7% και 5,6%, αντιστοίχως) που εμφανίζουν «Υψηλή» επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα, εμφανίζουν συγχρόνως «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, ελάχιστα τμήματα (από 0,1% έως 0,8%) της περιοχής που εμφανίζουν «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα, εμφανίζουν συγχρόνως «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα.

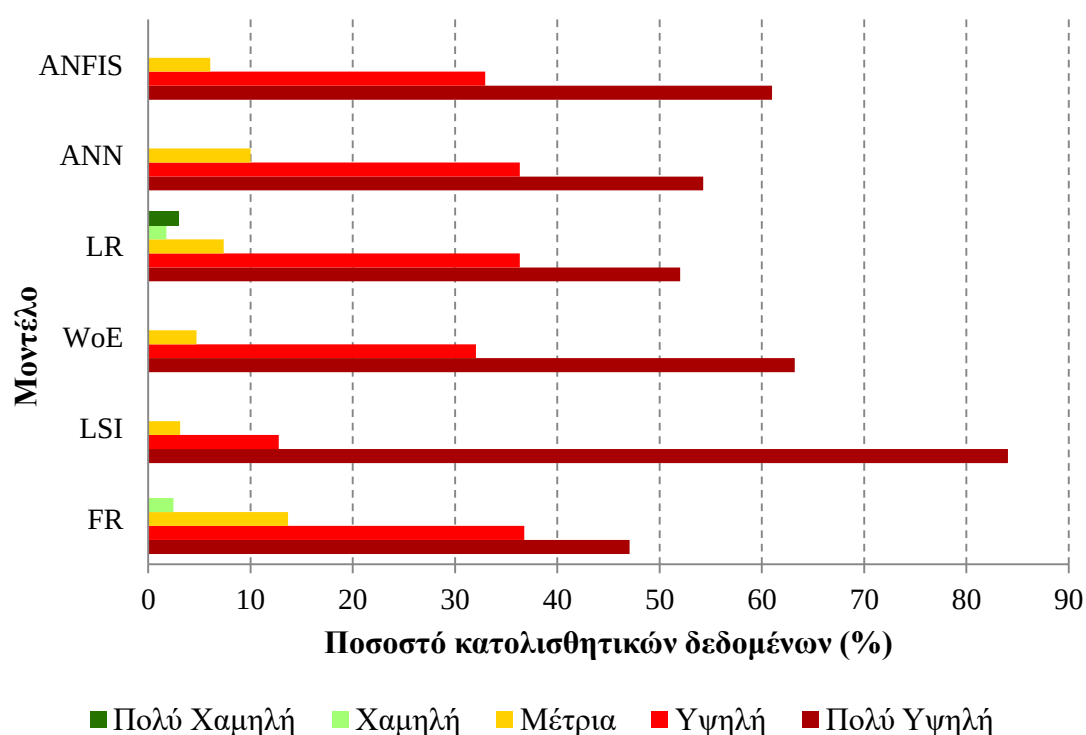
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου ANN για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1ε και Σχήμα 6.3ε) προκύπτει ότι το 3,1% και 3,8% της λεκάνης απορροής παρουσιάζουν «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Κοινές εκτάσεις «Χαμηλής» επιδεκτικότητας συναντώνται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Χαμηλής» επιδεκτικότητας διακρίνεται στο βόρειο τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 7% και βρίσκεται επίσης διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής.. Και στις δύο κλίμακες, το 8,6% και 5,8% της περιοχής παρουσιάζουν «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα. Κοινές εκτάσεις «Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα της. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι σημαντικά τμήματα της περιοχής (10% και 15,2%, αντιστοίχως) που παρουσιάζουν «Υψηλή» επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα, παρουσιάζουν συγχρόνως «Χαμηλή» και «Μέτρια», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, κανένα ή ένα ελάχιστο τμήμα (από 0,1% έως 0,6%) της περιοχής που παρουσιάζει «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα, παρουσιάζει συγχρόνως «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας του μοντέλου ANFIS για τις δύο εξεταζόμενες κλίμακες ανάλυσης (Πίνακας 6.1στ και Σχήμα 6.3στ) προκύπτει ότι το 2,2% και 2,2% της λεκάνης απορροής έχουν χαρακτηριστεί με «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα και στις δύο κλίμακες. Κοινές εκτάσεις συναντώνται κυρίως στο βόρειο και δυτικό τμήμα της. Το αντίστοιχο ποσοστό για την κατηγορία «Μέτριας» επιδεκτικότητας είναι 4,7% και βρίσκεται διασκορπισμένο σ' όλη την έκταση της περιοχής..

Και στις δύο κλίμακες, το 10% και 7,3% της περιοχής έχουν χαρακτηριστεί με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα. Κοινές εκτάσεις «Υψηλής» επιδεκτικότητας επίσης εντοπίζονται σ' όλη την έκταση της περιοχής, ενώ μια μεγάλη έκταση «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας συναντάται στο κεντρικό τμήμα της. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των δύο κλιμάκων μπορούν να εντοπιστούν στο γεγονός ότι σημαντικά τμήματα της περιοχής (10,2%, 12,1% και 8,1%, αντιστοίχως) που έχουν χαρακτηριστεί με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα, έχουν συγχρόνως χαρακτηριστεί με «Χαμηλή» και «Μέτρια», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα. Αντιθέτως, κανένα ή ένα ελάχιστο τμήμα (από 0,2% έως 0,7%) της περιοχής που έχει χαρακτηριστεί με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα στη λεπτομερέστερη κλίμακα, έχει συγχρόνως χαρακτηριστεί με «Πολύ Χαμηλή» και «Χαμηλή», αντιστοίχως, επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα.

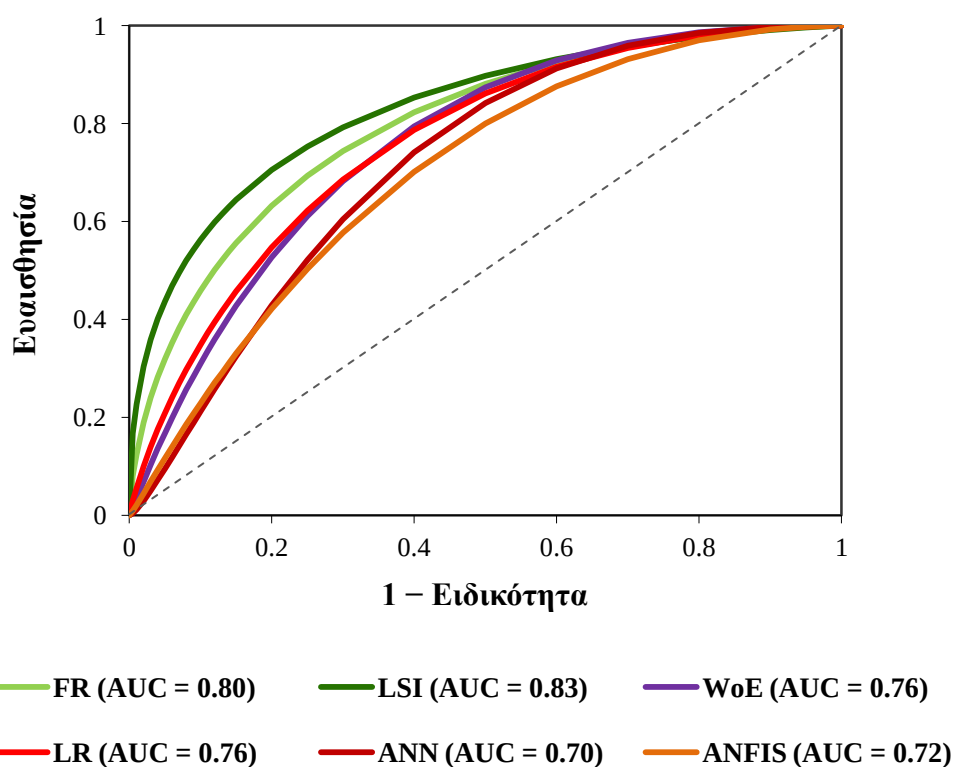
Τέλος, σειρά είχε η παράθεση των επακόλουθων αποτελεσμάτων επικύρωσης. Για την επίτευξη της συγκεκριμένης επικύρωσης, χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο σύνολο δεδομένων της λεκάνης απορροής του ποταμού Σελινούντα τόσο για την υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων, όσο και για την υλοποίηση αναλύσεων ROC στα προαναφερθέντα εξαγόμενα αποτελέσματα επιδεκτικότητας της περιφερειακής κλίμακας. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα επικύρωσης για τα εξεταζόμενα μοντέλα ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.4 και 6.5 και στον Πίνακα 6.2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.4, ξεκινώντας από την κατηγορία «Πολύ Χαμηλής» και καταλήγοντας στην κατηγορία «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας, και οι έξι (εκτός οι χάρτες των προαναφερθέντων τριών μοντέλων) εξαγόμενοι χάρτες εμφανίζουν γενικώς μια σταδιακή αύξηση του ποσοστού κατολισθητικών δεδομένων στο σύνολο επικύρωσης. Ειδικότερα, με βάση τον χάρτη του μοντέλου LSI, το 13% και 84% (σύνολο: 97%) των κατολισθητικών δεδομένων περιέχονται στις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τους χάρτες των υπόλοιπων μοντέλων είναι 37% και 47% (σύνολο: 84%) για το μοντέλο FR, 32% και 63% (σύνολο: 95%) για το μοντέλο WoE, 36% και 52% (σύνολο: 88%) για το μοντέλο LR, 36% και 54% (σύνολο: 90%) για το μοντέλο ANN, και 33% και 61% (σύνολο: 94%) για το μοντέλο ANFIS.



Σχήμα 6.4: Ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων επικύρωσης των κατηγοριών επιδεκτικότητας με βάση τους χάρτες από τα μοντέλα.

Από το Σχήμα 6.5 προκύπτει ότι η πλειοψηφία των μοντέλων (FR, WoE, LR, ANN και ANFIS) υποδεικνύουν μια καλή ικανότητα πρόβλεψης μελλοντικών κατολισθητικών γεγονότων (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8). Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο LSI το οποίο παρουσιάζει μια πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,8-0,9). Το συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζει την υψηλότερη τιμή AUC (0,83), ακολουθούμενα από τα μοντέλα FR (0,80), LR και WoE (0,76), ANFIS (0,72) και ANN (0,70). Επιπλέον, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.2, το υψηλότερο ποσοστό ακρίβειας (63,5%) εμφανίζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (57,5%), ANFIS (56,5%), WoE (55,9%), ANN (54,5%) και LSI (53,3%). Ως προς τον όρο της ευαισθησίας, το υψηλότερο ποσοστό (100%) εμφανίζουν τα μοντέλα LSI, WoE, ANN και ANFIS ακολουθούμενα από τα μοντέλα FR (97,5%) και LR (95,7%). Ενώ ως προς τον όρο της ειδικότητας, το υψηλότερο ποσοστό (31,2%) εμφανίζει το μοντέλο LR, ακολουθούμενο από τα μοντέλα FR (17,5%), ANFIS (13%), WoE (11,9%), ANN (9%) και LSI (7%).



Σχήμα 6.5: Καμπύλες ROC για τα μοντέλα.

Πίνακας 6.2: Στατιστικά αποτελέσματα αναλύσεων ROC για τα μοντέλα.

Αποτέλεσμα	Μοντέλο					
	FR	LSI	WoE	LR	ANN	ANFIS
Αριθμός παρατηρήσεων	892	892	892	892	892	892
Αριθμός σωστών παρατηρήσεων	513	477	499	566	486	504
Θετικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	11	0	0	19	0	0
Αρνητικές παρατηρήσεις που χάθηκαν	368	415	393	307	406	388
Ακρίβεια (%)	57,5	53,5	55,9	63,5	54,5	56,5
Ευαισθησία (%)	97,5	100,0	100,0	95,7	100,0	100,0
Ειδικότητα (%)	17,5	7,0	11,9	31,2	9,0	13,0

Κεφάλαιο 7: Εξέταση χωρικής μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης του φαινομένου

Στην παρούσα διατριβή, για την εξέταση της χωρικής μη-στασιμότητας (ή ετερογένειας) στις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου των κατολισθήσεων και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν, εφαρμόστηκε το τοπικό μοντέλο της γεωγραφικά σταθμισμένης παλινδρόμησης (GWR). Πιο αναλυτικά:

7.1 Περιφερειακή κλίμακα

7.1.1 Εφαρμογή μοντέλου

Αρχικώς, η απουσία και παρουσία κατολίσθησης (τιμές 0 και 1 από τα 1.442 σημεία του συνόλου εκπαίδευσης) ως εξαρτημένη μεταβλητή και οι επτά επανακλιμακοποιημένοι παράγοντες ως ανεξάρτητες μεταβλητές εισήχθησαν με τη μορφή συγκεντρωτικών πινάκων αντιστοίχισης στο εξειδικευμένο λογισμικό GWR (version 4.0), έτσι ώστε να εκτιμηθεί σε μια τοπική κλίμακα η συμβολή αυτών των παραγόντων στην εκδήλωση του φαινομένου. Η δυαδική μορφή (τιμές 0 και 1) της εξαρτημένης μεταβλητής επέφερε τη διαμόρφωση μιας λογιστικής GWR μοντελοποίησης.

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά αυτής της μοντελοποίησης, την τελευταία δεκαετία, η συνάρτηση σταθερού Gaussian πυρήνα είναι αυτή που κυρίως προτιμάται (Su et al., 2011; Chalkias et al., 2013; Du et al., 2014). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση από το συγκεκριμένο τύπο συνάρτησης ενός χωρικός σταθερού/αμετάβλητου εύρους ζώνης, και σε συνδυασμό με την ανομοιόμορφη κατανομή των σημείων του συνόλου εκπαίδευσης στην περιοχή μελέτης, μια διαφορετικού τύπου συνάρτηση πυρήνα επιλέχθηκε ν' εφαρμοστεί. Αυτή είναι η συνάρτηση προσαρμοστικού Gaussian πυρήνα (Εξίσωση 39). Για τη συγκεκριμένη συνάρτηση πυρήνα, το βέλτιστο εύρος ζώνης (εκφρασμένο σε αριθμό εγγύτερων γειτόνων) προσδιορίστηκε μέσω της διενέργειας δοκιμαστικών ελέγχων που στόχο είχαν την εύρεση μιας όσο το δυνατόν μικρότερης AICc τιμής. Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1, το βέλτιστο εύρος ζώνης, στην προκειμένη περίπτωση, βρέθηκε να ισούται με 103 εγγύτερους γείτονες.

Πίνακας 7.1: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης βέλτιστου εύρους ζώνης.

Α/Α	Εύρος ζώνης			AICc
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	
1	66	1.442	118	1.054
2	60	1.442	112	1.051
3	50	1.442	103	1.045
4	40	1.442	141	1.065
5	30	1.442	132	1.061
6	20	1.442	123	1.057
7	10	1.442	113	1.052
8	5	1.442	109	1.049
9	1	1.422	105	1.047

Η εκτέλεση του διαμορφωθέντος μοντέλου GWR είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό διάφορων τοπικών στατιστικών μέτρων για κάθε ένα σημείο του συνόλου εκπαίδευσης. Τα μέτρα αυτά ήταν οι τοπικές παράμετροι, καθώς και οι τιμές pseudo t-test και pseudo R^2 . Ανάλογα με το πρόσημό της, κάθε τοπική παράμετρος υποδεικνύει για κάθε σημείο την ύπαρξη μιας αρνητικής ή θετικής σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και της αντίστοιχης ανεξάρτητης μεταβλητής. Για την εξέταση των χωρικών μεταβολών της σημαντικότητας αυτών των σχέσεων, οι τιμές pseudo t-test χρησιμοποιούνται. Κατά κανόνα, μια τιμή pseudo t-test μεγαλύτερη από 1,96 ή μικρότερη από -1,96 θεωρείται σημαντική στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή pseudo R^2 , τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του μοντέλου στα εξεταζόμενα δεδομένα. Μέσω της υλοποίησης βασισμένων στο λογισμικό ArcGIS παρεμβολών (interpolations), οι τοπικές παράμετροι και οι τιμές R^2 χαρτογραφήθηκαν, ενώ οι τιμές pseudo t-test απεικονίστηκαν ως ισοϋψείς καμπύλες με (ισο)διάστημα 2.

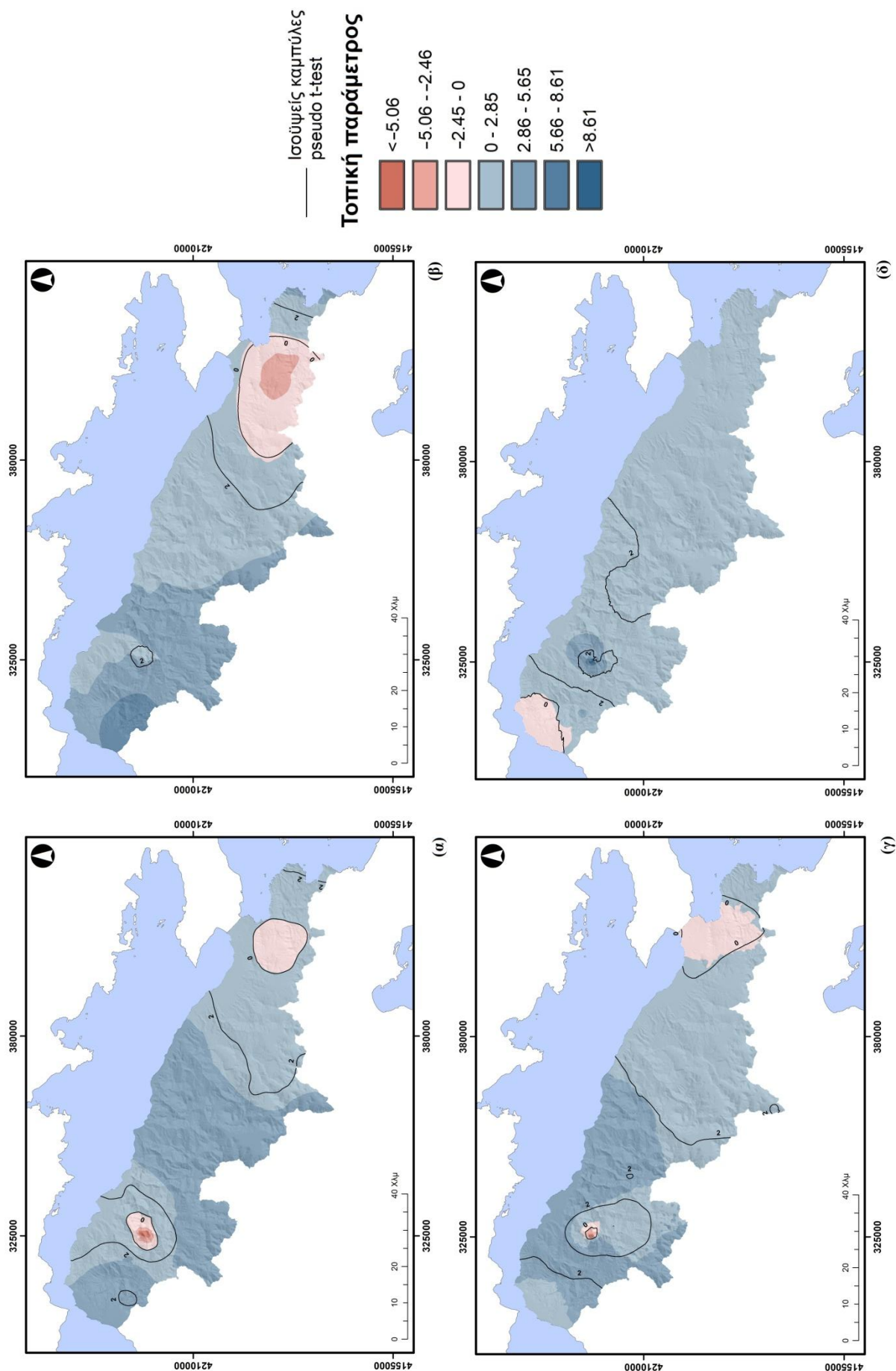
7.1.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του τοπικού μοντέλου GWR παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.2 και 7.3, καθώς και στα Σχήματα 7.1 και 7.2.

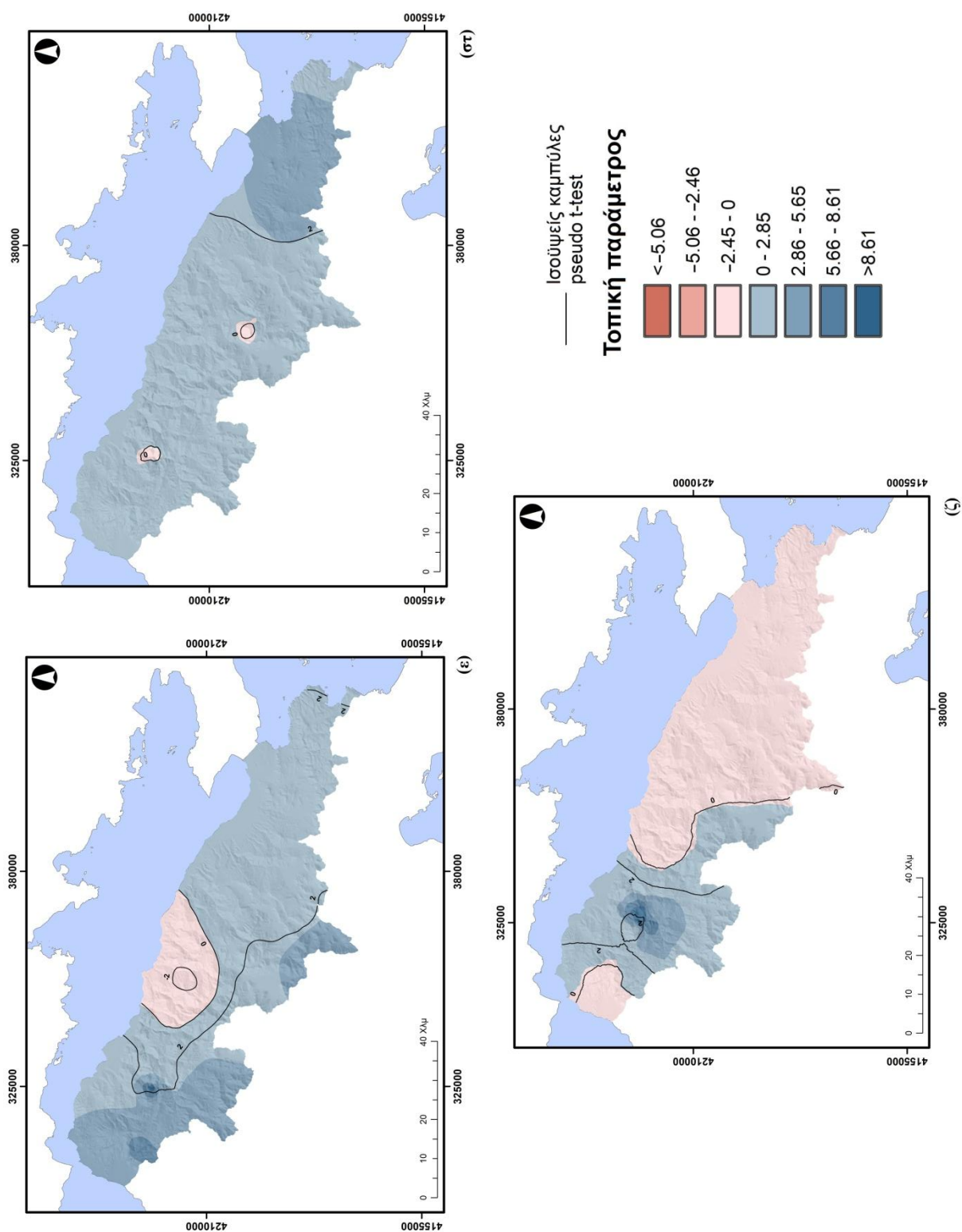
Πίνακας 7.2: Τοπικές παράμετροι των αιτιολογικών παραγόντων.

Μεταβλητές	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Υψόμετρο	-7,69	5,39	1,97	2,70
Γωνία κλίσης	-3,21	8,62	3,02	2,19
Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης	-8,89	5,32	1,94	2,01
Απόσταση από οδικό δίκτυο	-0,58	12,13	1,99	1,84
Πυκνότητα ρεμάτων	-2,54	13,51	2,44	2,52
Βλάστηση (NDVI)	-2,37	4,98	1,09	1,21
Γεωλογία	-2,87	10,68	1,00	2,75

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.2 και το Σχήμα 7.1, οι έξι (υψόμετρο, γωνία κλίσης, καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, απόσταση από το οδικό δίκτυο, πυκνότητα ρεμάτων, και βλάστηση) από τους συνολικά επτά αιτιολογικούς παράγοντες παρουσιάζουν μια θετική σχέση με την εκδήλωση κατολισθήσεων στο μεγαλύτερο τμήμα του συστήματος λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί ο παράγοντας της γεωλογίας ο οποίος εμφανίζει μια αρνητική σχέση στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής. Την ισχυρότερη θετική σχέση (τις υψηλότερες τιμές της τοπικής παραμέτρου) με την εκδήλωση του φαινομένου εμφανίζουν οι παράγοντες της απόστασης από το οδικό δίκτυο, της πυκνότητας ρεμάτων και της γεωλογίας σε πολύ μικρές εκτάσεις στο κεντρικο-δυτικό τμήμα της περιοχής. Αντιθέτως, την πιο ανίσχυρη αρνητική σχέση (τις χαμηλότερες τιμές της τοπικής παραμέτρου) εμφανίζουν οι παράγοντες του υψόμετρου και της καμπυλότητας παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης σε πολύ μικρές εκτάσεις στο ίδιο τμήμα της περιοχής. Πιο αναλυτικά για κάθε παράγοντα, η αρνητική σχέση εντοπίζεται σε μικρές έως πολύ μικρές εκτάσεις: (α) στο κεντρικο-δυτικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής για το υψόμετρο και την καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, (β) στο ανατολικό τμήμα της περιοχής για τη γωνία κλίσης, (γ) στο βορειο-δυτικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από το οδικό δίκτυο, (δ) στο βόρειο τμήμα της περιοχής για την πυκνότητα ρεμάτων, και (ε) στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για τη βλάστηση. Η θετική σχέση για τον παράγοντα της γεωλογίας εντοπίζεται σε μια σημαντικού μεγέθους έκταση η οποία συνδέει το βορειο-δυτικό και νοτιο-δυτικό τμήμα της περιοχής.



Σχήμα 7.1: Χωρική μεταβολή τοπικών παραμέτρων αιτιολογικών παραγόντων. (α) Υψόμετρο, (β) γωνία κλίσης, (γ) καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, και (δ) απόσταση από οδικό δίκτυο.



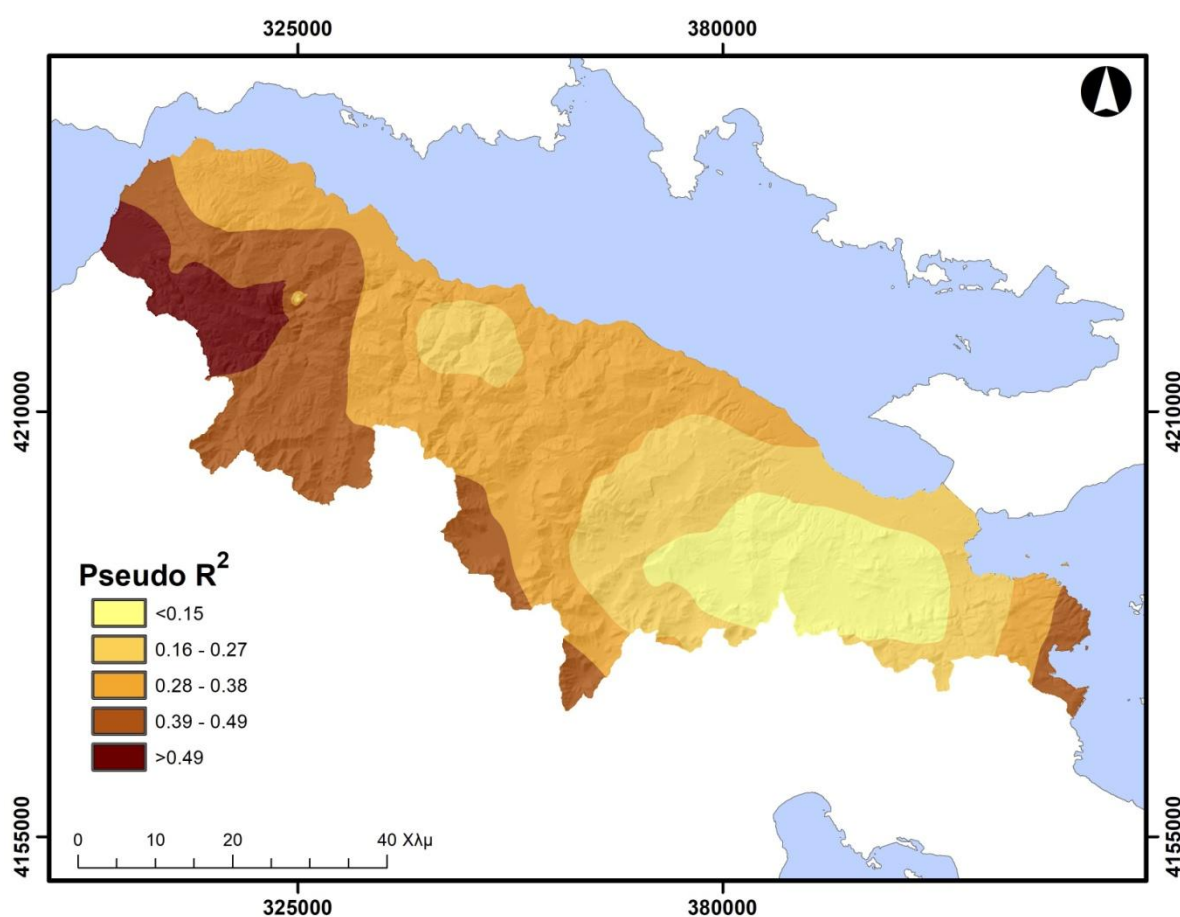
Σχήμα 7.1: (α) Πυκνότητα ρεμάτων, (β) βλάστηση (NDVI), και (γ) γεωλογία.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική μεταβολή των τιμών pseudo t-test, στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, όλοι οι αιτιολογικοί παράγοντες παρουσιάζουν μια σημαντική σχέση με την εκδήλωση κατολισθήσεων σε ορισμένα τμήματα της εξεταζόμενης περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η σημαντικότητα στη σχέση εμφανίζεται: (α) σε μια μεγάλη έκταση στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής για το υψόμετρο, (β) στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής με εξαίρεση μια σημαντική έκταση στο ανατολικό τμήμα και μια πολύ πιο μικρότερη έκταση στο κεντρικο-δυτικό τμήμα της περιοχής, για τη γωνία κλίσης, (γ) σε μια μεγάλη έκταση στο κεντρικο-δυτικό και μια πολύ μικρή έκταση στο νότιο τμήμα της περιοχής για την καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης, (δ) σε μια σημαντική έκταση στο βόρειο και νοτιο-δυτικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από το οδικό δίκτυο, (ε) σε μια αρκετά μεγάλη έκταση στο δυτικό και νότιο τμήμα, και πολύ μικρότερες εκτάσεις στο βορειο-κεντρικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής για την πυκνότητα ρεμάτων, (στ) σε μια σχετικά σημαντική έκταση στο ανατολικό τμήμα της περιοχής για τη βλάστηση, και (ζ) στο βορειο-δυτικό και νοτιο-δυτικό τμήμα της περιοχής για τη γεωλογία.

Για την κατάδειξη της χρησιμότητας του τοπικού μοντέλου GWR έναντι των καθολικών μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί στατιστικοί δείκτες «καλής προσαρμογής» στα δεδομένα οι οποίοι εκτιμήθηκαν τόσο για το ίδιο, όσο και για το καθολικό μοντέλο παλινδρόμησης, αυτό της LR (Πίνακας 7.3). Αυτοί οι δείκτες είναι το AICc, η απόκλιση (deviance) και η συνολική τιμή pseudo R^2 . Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του AICc και της απόκλισης, τόσο πιο αποδοτικό είναι το μοντέλο. Αντιθέτως, ένα μοντέλο είναι τόσο πιο αποδοτικό, όσο υψηλότερη είναι η συνολική τιμή pseudo R^2 που παρουσιάζει. Οι τιμές του AICc και της απόκλισης βρέθηκαν να είναι ίσες με 1.045 και 916, αντιστοίχως, για το μοντέλο GWR, και ίσες με 1.390 και 1.373, αντιστοίχως, για το μοντέλο LR. Για το μοντέλο GWR, η συνολική τιμή pseudo R^2 ισούται με 0,54 υποδεικνύοντας ότι σχεδόν το 54% της μεταβολής στην εκδήλωση κατολισθήσεων «ερμηνεύεται» από το μοντέλο. Σε τοπικό επίπεδο, η απόδοση αυτή ισχυροποιείται κυρίως στο δυτικό τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής, όπως φαίνεται στη χωρική μεταβολή της τιμής (Σχήμα 7.2). Για το μοντέλο LR, η συνολική τιμή pseudo R^2 ισούται με 0,31.

Πίνακας 7.3: Σύγκριση στατιστικών δεικτών απόδοσης μεταξύ του καθολικού μοντέλου LR και του τοπικού μοντέλου GWR.

Δείκτες	Μοντέλο LR	Μοντέλο GWR	Διαφορά
AICc	1.390	1.045	345
Απόκλιση	1.373	916	457
Συνολική τιμή pseudo R^2	0,31	0,54	0,23



Σχήμα 7.2: Χωρική μεταβολή τιμής pseudo R^2 .

7.2 Λεπτομερέστερη κλίμακα

7.2.1 Εφαρμογή μοντέλου

Αρχικώς, η απουσία και παρουσία κατολίσθησης (τιμές 0 και 1 από τα 10.280 σημεία του συνόλου εκπαίδευσης) ως εξαρτημένη μεταβλητή και οι δώδεκα επανακλιμακοποιημένοι παράγοντες ως ανεξάρτητες μεταβλητές εισήχθησαν με τη μορφή συγκεντρωτικών πινάκων αντιστοίχισης στο εξειδικευμένο λογισμικό GWR. Στη συνέχεια, το βέλτιστο εύρος ζώνης της συνάρτησης προσαρμοστικού Gaussian πυρήνα προσδιορίστηκε μέσω της διενέργειας δοκιμαστικών ελέγχων για την εύρεση της μικρότερης AICc τιμής.

Πίνακας 7.4: Δοκιμαστικοί έλεγχοι εύρεσης βέλτιστου εύρους ζώνης.

Α/Α	Εύρος ζώνης			AICc
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	
1	1.000	10.000	2.000	6.191
2	1.500	10.000	1.500	5.799
3	500	10.000	2.500	–
4	1.000	5.000	1.000	–
5	100	1.000	300	–

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.4, η μικρότερη AICc τιμή προήλθε από ένα εύρος ζώνης 1.500 εγγύτερων γειτόνων. Η αξιοποίηση αυτού του βέλτιστου εύρους ζώνης στην εκτέλεση του μοντέλου GWR είχε ως αποτέλεσμα, τελικώς, τον υπολογισμό των απαιτούμενων τοπικών στατιστικών μέτρων για κάθε ένα σημείο του συνόλου εκπαίδευσης. Όπως στην περίπτωση της περιφερειακής κλίμακας ανάλυσης, έτσι και στη λεπτομερέστερη, οι τοπικές παράμετροι και οι τιμές R^2 χαρτογραφήθηκαν, ενώ οι τιμές pseudo t-test απεικονίστηκαν ως ισοϋψείς καμπύλες με (ισο)διάστημα 2.

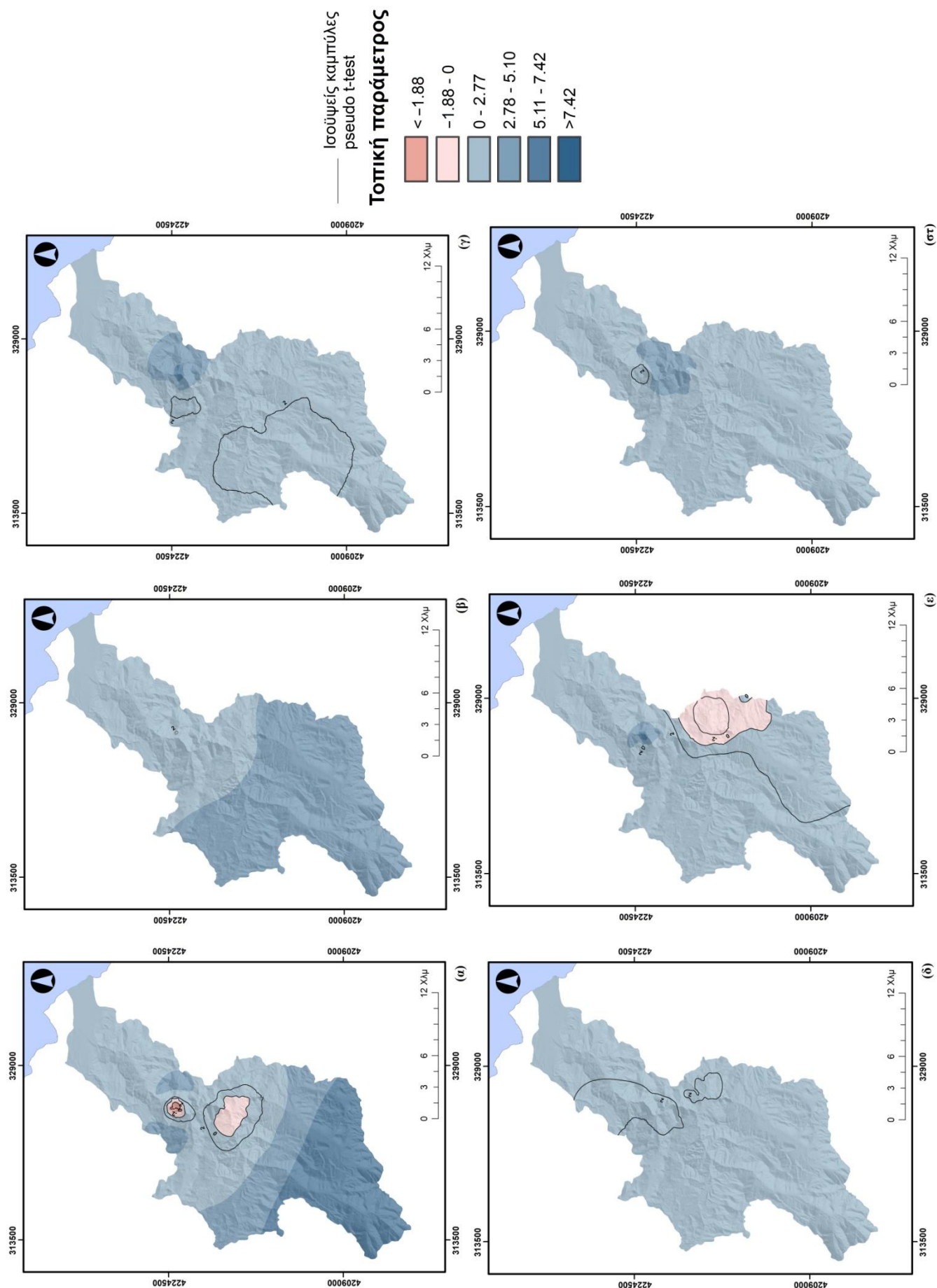
7.2.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του τοπικού μοντέλου GWR παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.5 και 7.6, καθώς και στα Σχήματα 7.3 και 7.4.

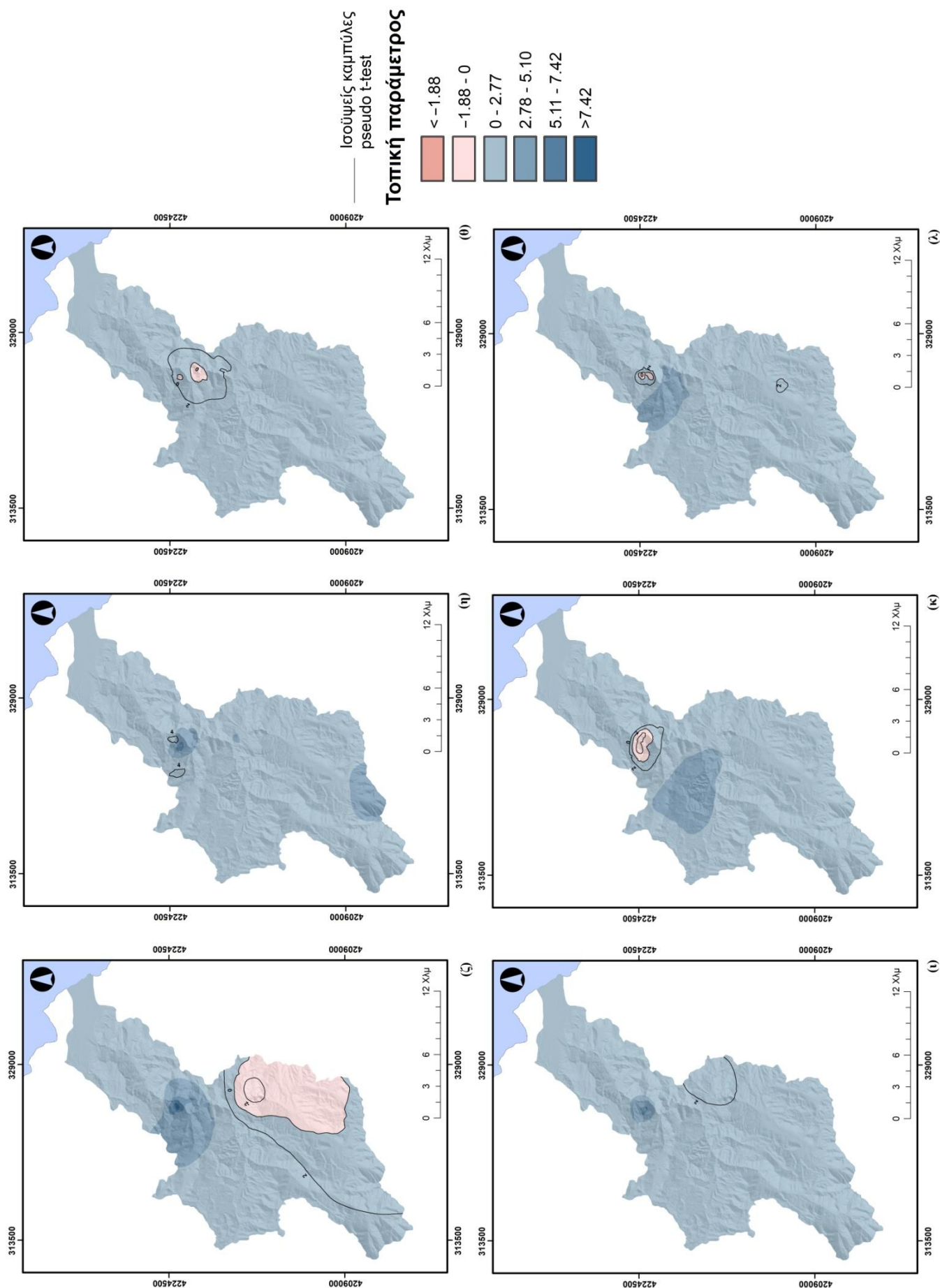
Πίνακας 7.5: Τοπικές παράμετροι των αιτιολογικών παραγόντων.

Μεταβλητές	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Υψόμετρο	-4,20	7,47	1,85	2,59
Γωνία κλίσης	0,57	3,67	2,34	0,78
Διεύθυνση κλίσης	0,51	5,94	1,91	1,40
Γενική καμπυλότητα	0,67	2,50	1,35	0,40
Απόσταση από οδικό δίκτυο	-0,83	6,02	1,33	1,65
Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο	0,30	4,49	1,98	0,65
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	-1,11	9,28	2,36	2,41
Πυκνότητα ρεμάτων	1,10	5,87	2,66	0,84
Χειμαρρική ισχύς (SPI)	-0,23	1,51	0,66	0,33
Βλάστηση (NDVI)	0,20	5,57	1,75	0,31
Κάλυψη γης	-1,03	4,04	1,48	1,04
Γεωλογία	-1,90	3,25	1,30	1,32

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.5 και το Σχήμα 7.3, οι δώδεκα αιτιολογικοί παράγοντες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες ομάδες ως προς τη σχέση τους με την εκδήλωση κατολισθήσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα: (α) στους παράγοντες (γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης, γενική καμπυλότητα, απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, πυκνότητα ρεμάτων και βλάστηση) που εμφανίζουν αποκλειστικά θετική σχέση σ' όλη την έκταση της περιοχής, και (β) στους παράγοντες (υψόμετρο, απόσταση από το οδικό δίκτυο, απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, χειμαρρική ισχύς, γεωλογία, κάλυψη γης) που εμφανίζουν μια θετική σχέση στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και συγχρόνως μια αρνητική σχέση σε ορισμένα τμήματα της. Η ισχυρότερη θετική σχέση με την εκδήλωση του φαινομένου διακρίνεται στον παράγοντα της απόστασης από τα τεκτονικά στοιχεία σε μια πολύ μικρή έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Αντιθέτως, η πιο ανίσχυρη αρνητική σχέση διακρίνεται στον παράγοντα του υψομέτρου σε μια περίπου ίδιου μεγέθους και τοποθεσίας έκταση. Πιο αναλυτικά για τους παράγοντες της δεύτερης ομάδας, η αρνητική σχέση εντοπίζεται σε μικρές έως πολύ μικρές εκτάσεις στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για το υψόμετρο, τη χειμαρρική ισχύ, τη γεωλογία και την κάλυψη γης, και σε σχετικά μεγάλες εκτάσεις στο ανατολικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από το οδικό δίκτυο και την απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία.



Σχήμα 7.3: Χωρική μεταβολή τοπικών παραμέτρων αιτιολογικών παραγόντων. (α) Υψόμετρο, (β) γωνία κλίσης, (γ) διεύθυνση κλίσης, (δ) γενική καμπυλότητα, (ε) απόσταση από οδικό δίκτυο, και (στ) απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο.



Σχήμα 7.3: (Συνέχεια). (ζ) Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία, (η) πυκνότητα ρεμάτων, (θ) χειμαρρική ισχύς (SPI), (ι) βλάστηση (NDVI),

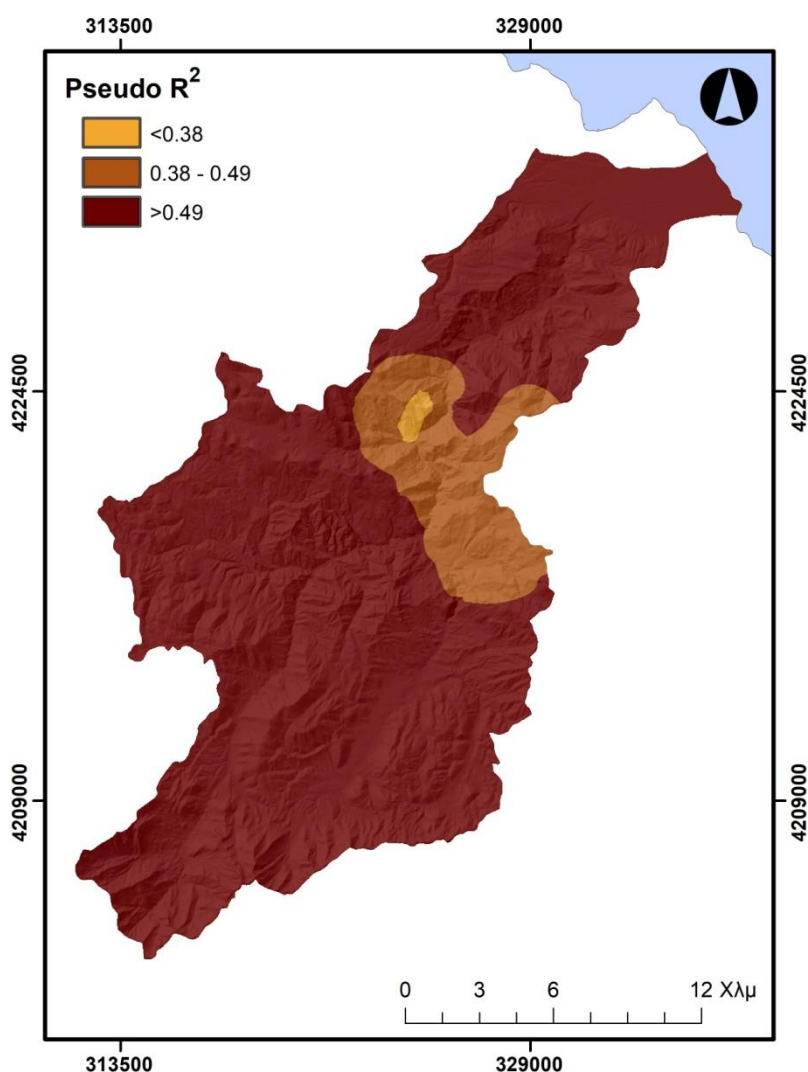
(κ) γεωλογία, και (λ) κάλυψη γης.

Λαμβάνοντας υπόψη, επίσης, τη χωρική μεταβολή των τιμών pseudo t-test προκύπτει ότι στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, σχεδόν όλοι οι αιτιολογικοί παράγοντες παρουσιάζουν μια σημαντική σχέση με την εκδήλωση κατολισθήσεων στο μεγαλύτερο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής. Μοναδική εξαίρεση συνιστά ο παράγοντας της πυκνότητας ρεμάτων ο οποίος εμφανίζει μια σημαντική σχέση σ' όλη την έκταση της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, η σημαντικότητα στη σχέση μεταξύ του κάθε παράγοντα και της εκδήλωσης του φαινομένου δεν εντοπίζεται (τιμές στο εύρος από -1,96 έως 1,96): (α) σε διαφορετικού μεγέθους εκτάσεις στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για το υψόμετρο, (β) σε μια πολύ μικρή έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για τη γωνία κλίσης, (γ) σε μια μεγάλη και μια μικρότερη έκταση στο δυτικό τμήμα της περιοχής για τη διεύθυνση κλίσης, (δ) σε μια μεγάλη έκταση στο βορειο-δυτικό τμήμα και μικρότερες εκτάσεις στο ανατολικό τμήμα της περιοχής για τη γενική καμπυλότητα, (ε) σε μια αρκετά μεγάλη έκταση στο ανατολικό και νοτιο-ανατολικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από το οδικό δίκτυο, (στ) σε μια πολύ μικρή έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, (ζ) σε μια αρκετά μεγάλη έκταση στο ανατολικό και νοτιο-ανατολικό τμήμα της περιοχής για την απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, (η) σε μια μικρή έκταση στο κεντρικο-ανατολικό τμήμα της περιοχής για τη χειμαρρική ισχύ, (θ) σε μια μικρή έκταση στο ανατολικό τμήμα της περιοχής για τη βλάστηση, (ι) σε πολύ μικρές εκτάσεις στο κεντρικό και νοτιο-ανατολικό τμήμα της περιοχής για την κάλυψη γης, και (κ) μια μικρή έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής για τη γεωλογία.

Και σ' αυτήν την περίπτωση, για την κατάδειξη της χρησιμότητας του τοπικού μοντέλου GWR έναντι των καθολικών μοντέλων, εκτιμήθηκαν το AICc, η απόκλιση και η συνολική τιμή pseudo R^2 τόσο για το ίδιο, όσο και για το μοντέλο της LR (Πίνακας 7.6). Οι τιμές του AICc και της απόκλισης είναι ίσες με 5.799 και 5.700, αντιστοίχως, για το μοντέλο GWR, και ίσες με 8.054 και 8.028, αντιστοίχως, για το μοντέλο LR. Για το μοντέλο GWR, η συνολική τιμή pseudo R^2 βρέθηκε να ισούται με 0,60 υποδεικνύοντας ότι σχεδόν το 60% της μεταβολής στην εκδήλωση κατολισθήσεων «ερμηνεύεται» από το μοντέλο. Σε τοπικό επίπεδο, η απόδοση αυτή ισχυροποιείται στο μεγαλύτερο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής, όπως φαίνεται στη χωρική μεταβολή της τιμής (Σχήμα 7.4). Για το μοντέλο LR, η συνολική τιμή pseudo R^2 βρέθηκε να ισούται με 0,44.

Πίνακας 7.6: Σύγκριση στατιστικών δεικτών απόδοσης μεταξύ του καθολικού μοντέλου LR και του τοπικού μοντέλου GWR.

Δείκτες	Μοντέλο LR	Μοντέλο GWR	Διαφορά
AICc	8.054	5.799	2.255
Απόκλιση	8.028	5.700	2.328
Συνολική τιμή pseudo R ²	0,44	0,60	0,16



Σχήμα 7.4: Χωρική μεταβολή τιμής pseudo R².

Κεφάλαιο 8: Εκτίμηση της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης

Μετά από την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, έλαβε χώρα η προσπάθεια εκτίμησης μιας άλλης, θεωρητικώς επακόλουθης, πτυχής του φαινομένου, αυτή της τρωτότητας. Όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 3.1.2.2), η εκτίμηση της τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια είτε ποσοτική, είτε ποιοτική προσέγγιση, χρησιμοποιώντας διάφορα κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα ως αντιπροσωπευτικές μεταβλητές των στοιχείων που ενδέχεται να επηρεαστούν από την εκδήλωση του φαινομένου («στοιχεία σε επικινδυνότητα»). Λόγω της παρατηρούμενης, σε εθνικό επίπεδο, έλλειψης αξιόπιστων αριθμητικών στοιχείων σχετικά με τις επιπτώσεις (κυρίως για τη χρηματική αξία των προκληθέντων ζημιών σε κτίρια και οδικούς άξονες) των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων που έχουν καταγραφεί στις υφιστάμενες βάσεις δεδομένων καταγραφής κατολισθήσεων, μια προσπάθεια ποσοτικής εκτίμησης της τρωτότητας θεωρείται αρκετά δύσκολη. Γι' αυτό το λόγο, στην παρούσα διατριβή, προτιμήθηκε να εκτελεστεί μια ποιοτική προσέγγιση προκειμένου να εκτιμηθεί η αναμενόμενη τρωτότητα των «στοιχείων σε επικινδυνότητα» απέναντι σε μια δυνητική εκδήλωση του φαινομένου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούνα.

8.1 Μεταβλητές τρωτότητας – «στοιχεία σε επικινδυνότητα»

Αρχικώς, μια χωρική βάση δεδομένων σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σε περιβάλλον ΣΓΠ η οποία αφορούσε τις επιλεγμένες μεταβλητές των «στοιχείων σε επικινδυνότητα» για την περιοχή μελέτης. Λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα της ανάλυσης (Σχήμα 8.1), τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς επίσης και σχετικά βιβλιογραφικά παραδείγματα (Mejía-Navarro et al., 1994; Castellanos Abella and Van Westen, 2007; Eidsvig et al., 2014; Bianchini et al., 2017), επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις μεταβλητές κοινωνικο-οικονομικών δεδομένων. Αυτές είναι οι εξής:

Type of elements at risk	Scale of analysis			
	Small	Medium	Large	Detailed
Buildings	By Municipality •Nr. buildings	Mapping units •Predominant land use •Nr. Buildings	Building footprints •Generalized use •Height •Building types	Building footprints •Detailed use •Height •Building types •Construction type •Quality/age •Foundation
Transportation networks	General location of transportation networks	Road & railway networks, with general traffic density information	All transportation networks with detailed classification, including viaducts etc. & traffic data	All transportation networks with detailed engineering works & detailed dynamic traffic data
Lifelines	Main powerlines	Only main networks •Water supply •Electricity	Detailed networks: •Water supply •Waste water •Electricity •Communication •Gas	Detailed networks and related facilities: •Water supply •Waste water •Electricity •Communication •Gas
Essential facilities	By Municipality •Number of essential facilities	As points •General characterization •Buildings as groups	Individual building footprints •Normal characterization •Buildings as groups	Individual building footprints •Detailed characterization •Each building separately
Population data	By Municipality •Population density •Gender •Age	By ward •Population density •Gender •Age	By Mapping unit •Population density •Daytime/nighttime •Gender •Age	People per building •Daytime/nighttime •Gender •Age •Education
Agriculture data	By Municipality •Crop types •Yield information	By homogeneous unit, •Crop types •Yield information	By cadastral parcel •Crop types •Crop rotation •Yield information •Agricultural buildings	By cadastral parcel, for a given period of the year •Crop types •Crop rotation & time •Yield information
Economic data	By region •Economic production •Import/export •Type of economic activities	By Municipality •Economic production •Import/export •Type of economic activities	By Mapping unit •Employment rate •Socio-economic level •Main income types Plus larger scale data	By building •Employment •Income •Type of business Plus larger scale data
Ecological data	Natural protected areas with international approval	Natural protected area with national relevance	General flora and fauna data per cadastral parcel.	Detailed flora and fauna data per cadastral parcel

Σχήμα 8.1: Χωρική αναπαράσταση των «στοιχείων σε επικινδυνότητα» ανάλογα με την κλίμακα ανάλυσης (Van Westen et al., 2008).

- Πληθυσμιακή πυκνότητα
- Πυκνότητα οδικού δικτύου
- Αστικές/οικοδομικές εκτάσεις
- Καλλιέργειες

Η πληθυσμιακή πυκνότητα θεωρείται η κυριότερη μεταβλητή κοινωνικής τρωτότητας (Castellanos Abella and Van Westen, 2007). Η τρωτότητα που σχετίζεται με τον πληθυσμό εκφράζεται μέσω της πιθανότητας απώλειας ανθρώπινων ζώων με δεδομένο ότι ο πληθυσμός επηρεάζεται από την εκδήλωση του φαινομένου. Η πυκνότητα του οδικού δικτύου και οι αστικές/οικοδομικές εκτάσεις αντιπροσωπεύουν τη φυσική τρωτότητα. Το οδικό δίκτυο και το κτιριακό απόθεμα επηρεάζουν τη συνοχή των οικισμών καθώς παρέχουν πρόσβαση στην εκμετάλλευση των πόρων και οικιστική ανάπτυξη. Η μεταβλητή των καλλιεργειών συμβάλλει

στην κατάδειξη της οικονομικής τρωτότητας. Για μια ως επί το πλείστον αγροτική περιοχή, όπως η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, της οποίας η οικονομία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον πρωτογενή τομέα παραγωγής, η πρόκληση ζημιών στις καλλιέργειες λόγω της εκδήλωσης κατολισθήσεων μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια ιδιαίτερος αρνητική επίπτωση.

Οι προαναφερθείσες τέσσερις μεταβλητές οργανώθηκαν στα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα δεδομένων των οποίων τα πρωτογενή δεδομένα, η πηγή προέλευσης των δεδομένων, και η αρχική μορφή τους παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 8.1: Πρωτογενή δεδομένα, πηγή προέλευσης δεδομένων και αρχική μορφή μεταβλητών τρωτότητας.

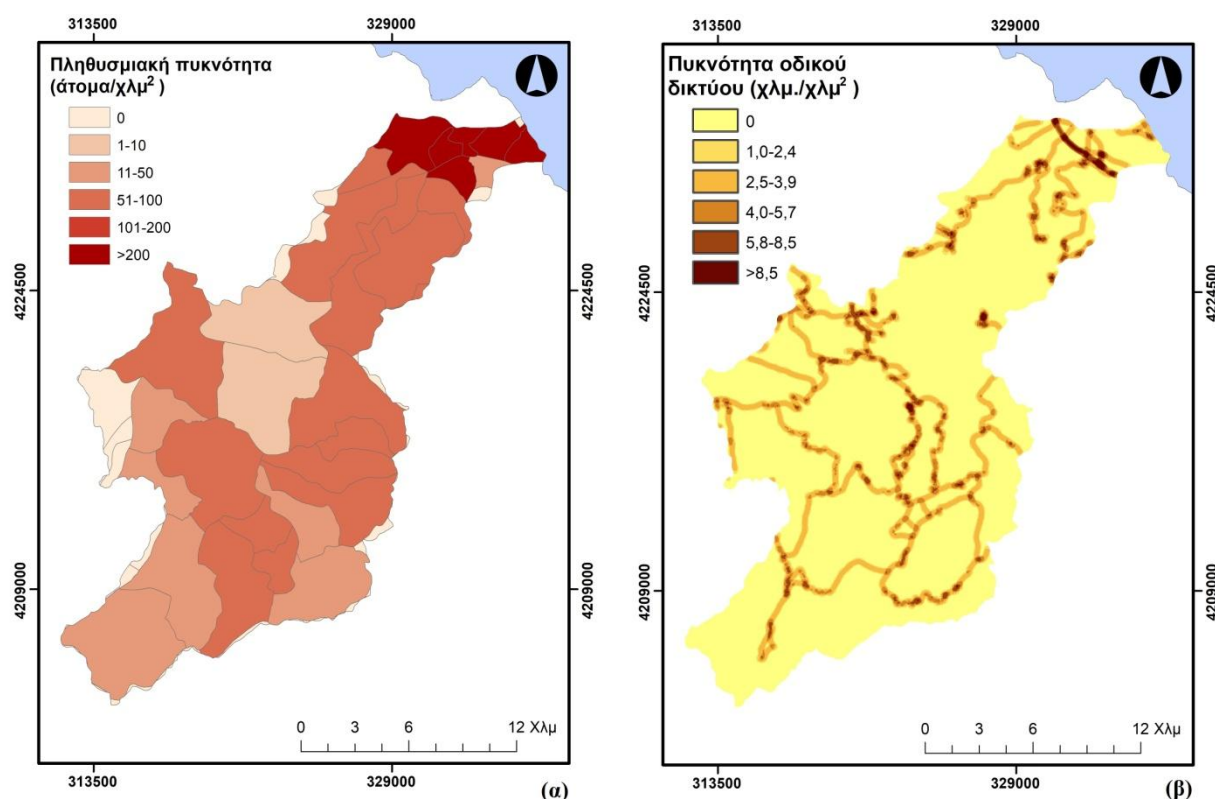
Τύπος τρωτότητας	Μεταβλητή	Πρωτογενή δεδομένα	Πηγή δεδομένων	Αρχική μορφή
Κοινωνική τρωτότητα	Πληθυσμιακή πυκνότητα	Σύνολο δεδομένων δημοτικών-τοπικών κοινοτήτων και στοιχεία απογραφής πληθυσμού 2011	ΕΛΣΤΑΤ	Διανυσματική (πολύγωνα) και εγγαφές πίνακα
Φυσική τρωτότητα	Πυκνότητα οδικού δικτύου	Οδικό δίκτυο	OpenStreetMap	Διανυσματική (γραμμές)
	Αστικές/οικοδομικές εκτάσεις	Κατηγορίες “ILOTS 2016 (LPIS)”	ΟΠΕΚΕΠΕ	Διανυσματική (πολύγωνα)
Οικονομική τρωτότητα	Καλλιέργειες	Κατηγορίες “ILOTS 2016 (LPIS)”	ΟΠΕΚΕΠΕ	Διανυσματική (πολύγωνα)

Η δημιουργία του επιπέδου της πληθυσμιακής πυκνότητας βασίστηκε στη συνδυαστική χρήση δύο διαφορετικών τύπων δεδομένων τα οποία διατίθενταν από την ΕΛΣΤΑΤ: (α) ενός διανυσματικού συνόλου δεδομένων με τις δημοτικές-τοπικές κοινότητες (σύμφωνα με το σχέδιο «Καλλικράτης») της χώρας (<http://www.statistics.gr/digital-cartographical-data>, 01/07/2018), και (β) μιας βάσης δεδομένων με τα στοιχεία της απογραφής του πληθυσμού το 2011 (<http://www.statistics.gr/el/statistics/pop>, 23/05/2018). Για την εξεταζόμενη περιοχή, τη υψηλότερη πληθυσμιακή πυκνότητα παρουσιάζουν οι τοπικές κοινότητες Τέμενης και Κουλούρας (με περίπου 319 και 308, αντιστοίχως, κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο), και το περιεχόμενο τμήμα της δημοτικής κοινότητας Αιγίου (με περίπου 312 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο), ενώ τη χαμηλότερη πληθυσμιακή πυκνότητα οι τοπικές κοινότητες

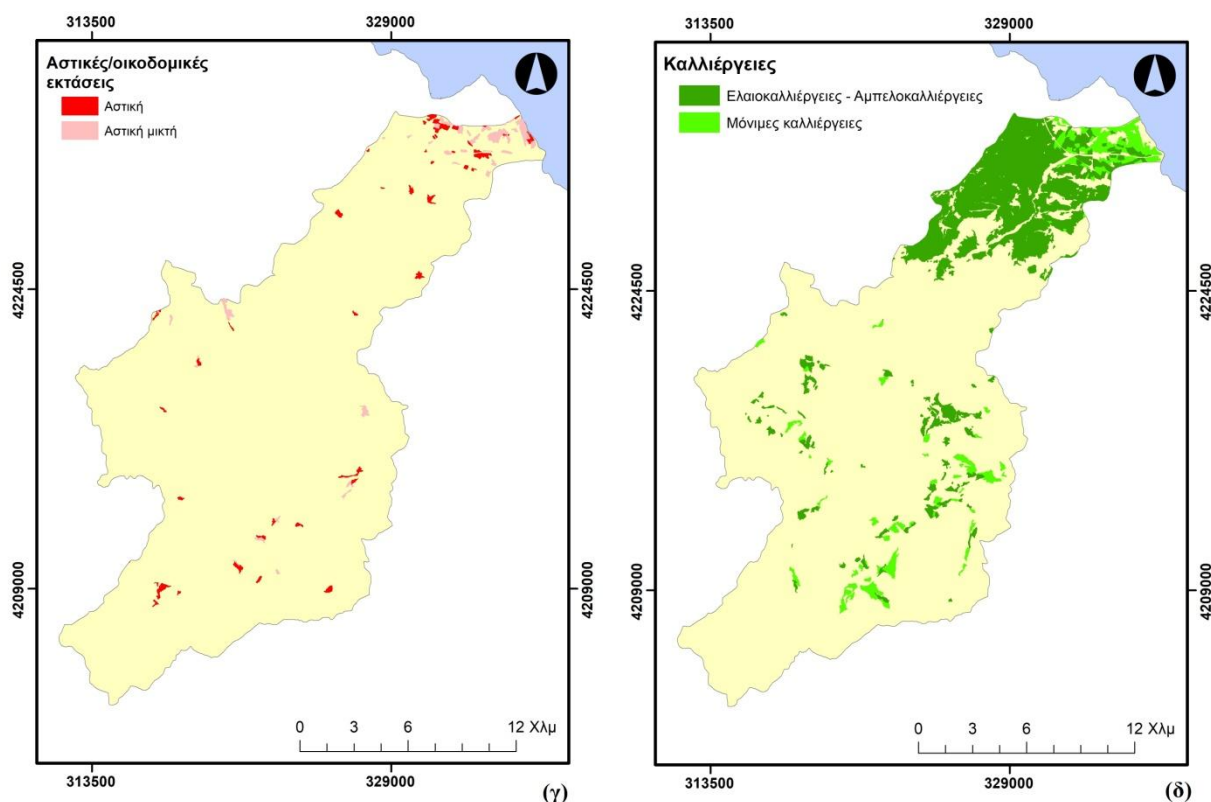
Άνω Μαζαρακίου και Λαπαναγών (με 0,60 και 0,85 , αντιστοίχως, κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο) (Σχήμα 8.2α).

Για το επίπεδο της πυκνότητας οδικού δικτύου, και το επίπεδο των αστικών/οικοδομικών εκτάσεων, αξιοποιήθηκαν εκ νέου τα διαθέσιμα (από την περίπτωση εκτίμησης της επιδεκτικότητας) σύνολα δεδομένων με το οδικό δίκτυο και τις κατηγορίες κάλυψης γης, αντιστοίχως, της περιοχής μελέτης. Οι τιμές στο επίπεδο της πυκνότητας οδικού δικτύου βρέθηκαν να κυμαίνονται από 0 έως 16,6 χιλιόμετρα ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, με τις υψηλότερες απ' αυτές να εντοπίζονται εντός των αστικών/οικοδομικών εκτάσεων (Σχήμα 8.2β και 8.2γ).

Το επίπεδο των καλλιεργειών προήλθε επίσης από το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων με τις κατηγορίες κάλυψης γης της περιοχής μελέτης. Οι τύποι καλλιεργειών που συναντώνται κυρίως στην εξεταζόμενη περιοχή είναι αμπελοκαλλιέργειες, ελαιοκαλλιέργειες και μόνιμες καλλιέργειες (Σχήμα 8.2δ).



Σχήμα 8.2: Μεταβλητές τρωτότητας. (α) Πληθυσμιακή πυκνότητα, και (β) πυκνότητα οδικού δικτύου.



Σχήμα 8.2: (Συνέχεια). (γ) Αστικές/οικοδομικές εκτάσεις, και (δ) καλλιέργειες.

8.2 Μεθοδολογία – Αποτελέσματα

Και σ' αυτή την περίπτωση, αν και τα πρωτογενή σύνολα δεδομένων διέφεραν μεταξύ τους ως προς την αρχική μορφή, όλα τα παραγόμενα επίπεδά τους μεταφέρθηκαν σε ψηφιδωτή μορφή με μέγεθος ψηφίδας 20 μέτρα. Σειρά, ακολούθως, είχε η εκχώρηση τιμών (στο εύρος 0-1) γενικής αναμενόμενης τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στις κατηγορίες των τεσσάρων εξεταζόμενων μεταβλητών. Οι τιμές αυτές οι οποίες βασίστηκαν κυρίως στις «κατευθυντήριες γραμμές» της σχετικής βιβλιογραφίας (Mejía-Navarro et al., 1994; Tiburan et al., 2009; Eidsvig et al., 2014; Bianchini et al., 2017), παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα.

Στη συνέχεια, προκειμένου να εκτιμηθεί η συνολική γενική τρωτότητα (εκφρασμένη σε μια κλίμακα 0-1), GV, ήταν απαραίτητη η άθροιση/υπέρθεση των «σταθμισμένων» κατηγοριών των μεταβλητών. Ωστόσο, για λόγους κατάδειξης της σημαντικότητας και συγχρόνως του διαφορετικού βαθμού συμβολής στην εξαγωγή της συνολικής γενικής τρωτότητας, συνηθίζεται η συγκεκριμένη άθροιση να λαμβάνει μια «σταθμισμένη» μορφή

Πίνακας 8.2: Τιμές γενικής τρωτότητας για τις επιμέρους κατηγορίες των μεταβλητών.

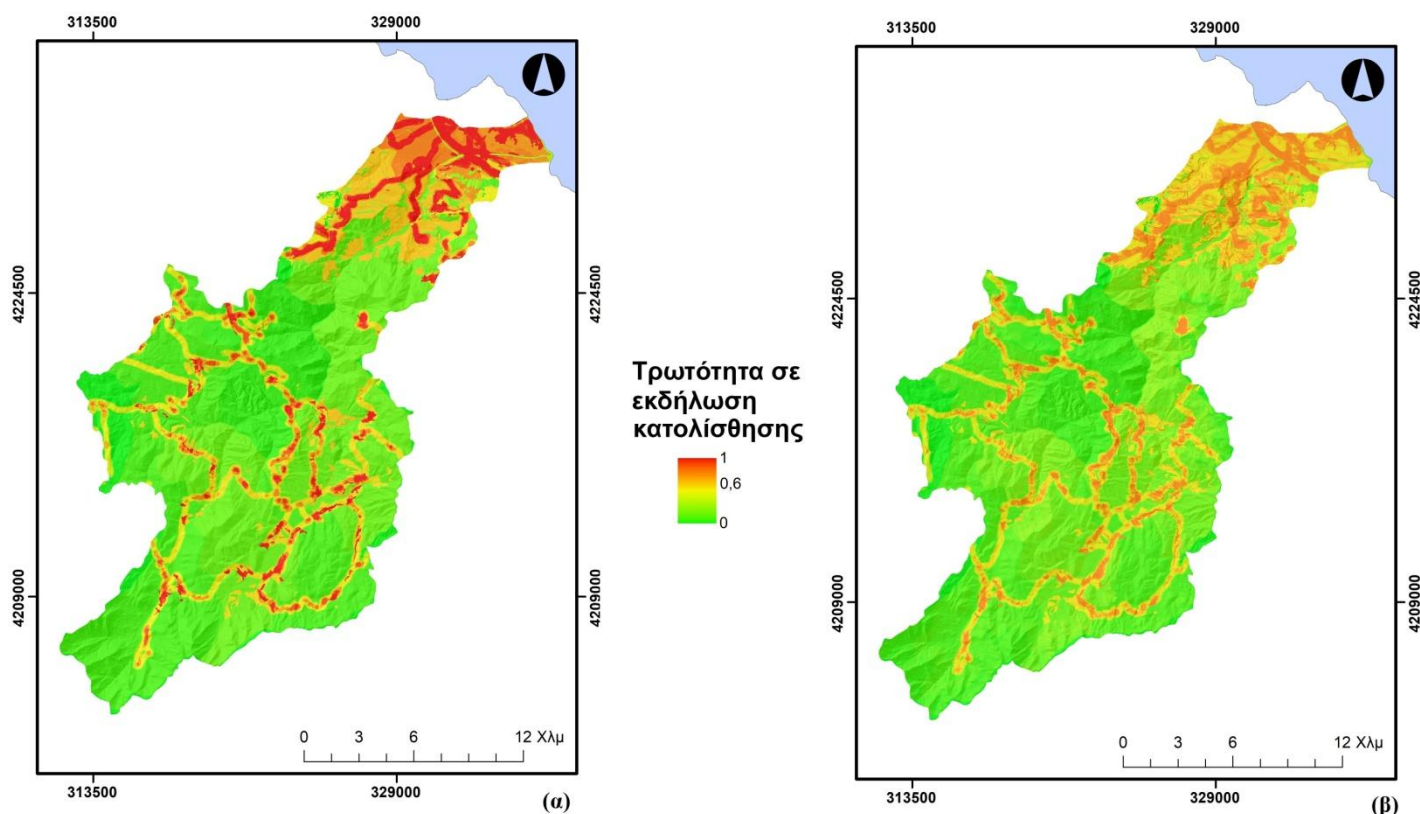
Μεταβλητή	Κατηγορία μεταβλητής	Τιμή γενικής τρωτότητας
Πληθυσμιακή πυκνότητα (άτομα/χλμ ²)	[1] 0	0
	[2] 1-10	0,2
	[3] 11-50	0,4
	[4] 51-100	0,6
	[5] 101-200	0,8
	[6] >200	1
Πυκνότητα οδικού δικτύου (χλμ./χλμ ²)	[1] 0	0
	[2] 1,0-2,4	0,2
	[3] 2,5-3,9	0,4
	[4] 4,0-5,7	0,6
	[5] 5,8-8,5	0,8
	[6] >8,5	1
Αστικές/οικοδομικές εκτάσεις	[1] Αστική	1
	[2] Αστική μικτή	0,8
Καλλιέργειες	[1] Ελαιοκαλλιέργειες – Αμπελοκαλλιέργειες	0,8
	[2] Μόνιμες καλλιέργειες	0,7

μέσω της εκχώρησης άνισων συντελεστών βαρύτητας στις εξεταζόμενες μεταβλητές (Eidsvig et al., 2014). Σ' αυτήν την περίπτωση, παίρνει την μορφή:

$$GV = \sum_{i=1}^n fw_i \times v_{i,j} / \sum_{i=1}^n fw_i \quad (65)$$

όπου fw_i είναι ο συντελεστής βαρύτητας της μεταβλητής i , $v_{i,j}$ η τιμή γενικής τρωτότητας για την κατηγορία j της μεταβλητής i , και n ο αριθμός των μεταβλητών. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι επιπτώσεις των παρελθοντικών κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο αφορούν περισσότερο τη φυσική τρωτότητα (σημαντικές ζημιές σε κτίρια και οδικούς άξονες)

και λιγότερο την κοινωνική τρωτότητα (ελάχιστες απώλειες ανθρώπινων ζώων), εκχωρήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας στην συγκεκριμένη Εξίσωση, με τους υψηλότερους (0,35) απ' αυτούς να εκχωρούνται στις μεταβλητές της φυσικής τρωτότητας (πυκνότητα οδικού δικτύου και αστικές/οικοδομικές εκτάσεις) και τον χαμηλότερο (0,1) στην μεταβλητή κοινωνικής τρωτότητας (πληθυσμιακή πυκνότητα). Ένας ενδιάμεσος συντελεστής τρωτότητας (0,2) εκχωρήθηκε στην μεταβλητή οικονομικής τρωτότητας (καλλιέργειες). Το αποτέλεσμα αυτής της «σταθμισμένης» άρθρωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3α.



Σχήμα 8.3: Χάρτης τρωτότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. (α) Γενική αναμενόμενη τρωτότητα, και (β) ειδική (λαμβάνοντας υπόψη την επιδεκτικότητα) αναμενόμενη τρωτότητα.

Τέλος, για την μετατροπή της αναμενόμενης τρωτότητας από γενική σε ειδική έπρεπε να συνυπολογιστεί ένα συγκεκριμένο «σενάριο» δυνητικής εκδήλωσης του φαινομένου των κατολισθήσεων στην εξεταζόμενη περιοχή. Στην προκειμένη περίπτωση, το ρόλο αυτού του «σεναρίου» διαδραμάτισε το βέλτιστο (σύμφωνα με τα αποτελέσματα χωρικής κάλυψης και επικύρωσης) αποτέλεσμα επιδεκτικότητας που εκτιμήθηκε για τη λεπτομερέστερη κλίμακα

ανάλυσης. Το αποτέλεσμα αυτό προερχόταν από το μοντέλο WoE το οποίο εκφρασμένο επίσης σε μια κλίμακα 0-1, συνυπολογίστηκε για την εκτίμηση της ειδικής τρωτότητας, SV :

$$SV = GV \times LS \quad (66)$$

όπου GV είναι η τιμή γενικής τρωτότητας, και LS η τιμή επιδεκτικότητας. Το παραγόμενο αποτέλεσμα εκτίμησης της τρωτότητας (εκφρασμένο σε μια κλίμακα 0-1) σε εκδήλωση κατολίσθησης για την περιοχή μελέτης παρουσιάζεται χαρτογραφικώς στο Σχήμα 8.3β. Ο χάρτης αυτός απεικονίζει τη χωρική κατανομή των τιμών αναμενόμενης τρωτότητας σε δυνητική εκδήλωση του φαινομένου για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα. Οι τιμές αυτές βρέθηκαν να κυμαίνονται από 0 έως 0,6, με τις υψηλότερες να εντοπίζονται σε μεγάλα τμήματα κατά μήκος του οδικού δικτύου, καθώς επίσης και εντός των ορίων των αστικών/οικοδομικών εκτάσεων.

Κεφάλαιο 9: Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

9.1 Ανακεφαλαίωση

Οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα πολύπλοκο και πολυσύνθετο φαινόμενο το οποίο χρήζει συνεχόμενης και συστηματικής μελέτης προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης κατανόηση του. Διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στα οποία έχει στηριχτεί η ταξινόμηση του σε διάφορους τύπους, όπως πτώσεις, ολισθήσεις, ροές, κ.ά. Όπως στους περισσότερους φυσικούς κινδύνους, έτσι και στην περίπτωση των κατολισθήσεων, η εκδήλωση τους συνιστά αποτέλεσμα της (αλληλ)επίδρασης τόσο περιβαλλοντικών, όσο και ανθρωπογενών παραγόντων. Λαμβάνοντας υπόψη το έμμεσο ή άμεσο αποτέλεσμα της επίδρασης τους στην εκδήλωση του φαινομένου, οι παράγοντες αυτοί κατηγοριοποιούνται σε αιτιολογικούς παράγοντες και παράγοντες ενεργοποίησης. Οι επιπτώσεις που προκαλούνται από την εκδήλωση του φαινομένου χαρακτηρίζονται από σοβαρές έως καταστροφικές καθώς επηρεάζουν τόσο το φυσικό, όσο και το δομημένο περιβάλλον. Η σημαντικότερη απ' αυτές δε θα μπορούσε να είναι άλλη από την απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Με βασικό γνώμονα το χρόνο λήψης των αντίστοιχων μέτρων, η αντιμετώπιση του φαινομένου μπορεί ν' αφορά είτε την πρόληψη (πριν την εκδήλωση του με στόχο την αποφυγή δυνητικής εκδήλωσης), είτε την αναχαίτιση του (μετά από την εκδήλωση του).

Λόγω της ανεξέλεγκτης και χωρίς πρότερο σχεδιασμό επέκτασης του οικιστικού ιστού, και κυρίως λόγω της επίδρασης, τα τελευταία χρόνια, των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής, η συχνότητα εκδήλωσης του φαινομένου των κατολισθήσεων σημειώνει ανοδική τάση τόσο παγκοσμίως, όσο και στον Ελληνικό χώρο. Παγκοσμίως, έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση κατολισθήσεων, ως επί το πλείστον, μεγάλου μεγέθους και όγκου οι οποίες έχουν προκαλέσει ανυπολόγιστες υλικές ζημιές, καθώς επίσης και την απώλεια εκατοντάδων και, σε ορισμένες περιπτώσεις χιλιάδων, ανθρωπίνων ζωών. Στον Ελληνικό χώρο, οι κατολισθήσεις έχουν τη μορφή μετακινήσεων μαζών μικρότερου (σε σχέση μ' αυτές παγκοσμίως) μεγέθους και όγκου οι οποίες ευθύνονται για την πρόκληση σοβαρών υλικών ζημιών, καθώς και για την απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Δε θα πρέπει, επίσης, να μην μνημονευθεί η παρατηρούμενη, τις τελευταίες δεκαετίες, και επιβεβαιωμένη πλέον παρουσία του φαινομένου και σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος εκτός της Γης.

Η προαναφερθείσα ανοδική τάση στη συχνότητα εκδήλωσης των κατολισθήσεων και η σφοδρότητα των επιπτώσεων που αυτές προκαλούν έχουν συμβάλει στη διαμόρφωση, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ενός ανάλογου ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη μελέτη και ανάλυση του φαινομένου. Η ανάλυση του φαινομένου έχει κυρίως τη μορφή της εκτίμησης και χαρτογράφησης των διαφόρων πτυχών του (επιδεκτικότητας, κινδύνου, επικινδυνότητας και τρωτότητας) και αποτελείται από τρία κύρια στάδια. Τα στάδια αυτά βασίζονται στη συνδυαστική χρήση εξειδικευμένων μεθόδων και μοντέλων με τις τεχνολογίες αιχμής του επιστημονικού πεδίου της Γεωπληροφορικής (Τηλεπισκόπηση, ΣΓΠ, κ.ά.). Εστιάζοντας στα συγκεκριμένα στάδια ανάλυσης, η παρούσα διδακτορική διατριβή ανέπτυξε μια μεθοδολογία η οποία αποσκοπούσε στην εκτίμηση της πτυχής του φαινομένου που αφορά την εξαγωγή χωρικών προβλέψεων (δυναμικής) εκδήλωσης του. Η πτυχή αυτή είναι η επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίσθησης η οποία θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αποτέλεσε τον κεντρικό «πυλώνα» της συγκεκριμένης ερευνητικής προσπάθειας.

Σημαντική θέση στο στάδιο της αναγνώρισης κατολισθήσεων, κατέχουν οι βασισμένες στη Τηλεπισκόπηση τεχνικές, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα αναγνώρισης παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων μέσω της ερμηνείας δορυφορικών εικόνων υψηλής ευκρίνειας. Τέτοιου είδους εικόνες χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα διατριβή για την αναγνώριση και οριοθέτηση των υπό μελέτη κατολισθητικών γεγονότων. Το τελικό αποτέλεσμα αυτού του σταδίου αξιοποιείται στο επόμενο (δεύτερο) στάδιο ανάλυσης ως μέσο για την κατασκευή μιας θεμελιώδους, γι' αυτό, συνιστώσας όπως είναι ο χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων.

Το δεύτερο στάδιο ανάλυσης, αυτό της χαρτογράφησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης, βασίζεται κυρίως στη συνδυαστική χρήση της τεχνολογίας των ΣΓΠ με μια πληθώρα εξειδικευμένων μοντέλων τα οποία εξετάζουν τις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των παραγόντων που σχετίζονται έμμεσα ή άμεσα μ' αυτήν, αναλύοντας τους αντίστοιχους τύπους δεδομένων. Με βασική διαφορά τους το βαθμό αντικειμενικότητας (ή υποκειμενικότητας) που τα χαρακτηρίζει, τα μοντέλα αυτά χωρίζονται στα βασισμένα στην εμπειρία «εμπειρογνομόνων» ποιοτικά μοντέλα και στα «καθοδηγούμενα από τα δεδομένα» ποσοτικά μοντέλα. Εκπροσωπώντας και τις δύο ομάδες, στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν μοντέλα λογικής ανάλυσης, ασαφούς λογικής, (διμεταβλητής και πολυμεταβλητής) στατιστικής ανάλυσης, εξόρυξης δεδομένων, καθώς και ενοποίησης μεταξύ αυτών. Ωστόσο, στο πλαίσιο ανάδειξης της ερευνητικής συμβολής της

διατριβής, η μεμονωμένη εφαρμογή των επιλεγμένων μοντέλων δεν κρίθηκε αρκετή με αποτέλεσμα να αποφασιστεί επιπροσθέτως η εξέταση της επίδρασης που θα είχε στην εφαρμογή και κυρίως στην απόδοση των ποσοτικών μοντέλων η μεταβολή μιας εκ των παραμέτρων της ανάλυσης, όπως είναι αυτή της κλίμακας. Συνεπώς, τα συγκεκριμένα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης (περιφερειακή και λεπτομερέστερη κλίμακα), και κατ' επέκταση σε δύο διαφορετικού μεγέθους περιοχές του Ελληνικού χώρου.

Με δεδομένη την απόκτηση, από τον χάρτη καταγραφής κατολισθήσεων, των απαιτούμενων κατολισθητικών δεδομένων, για τις δύο αυτές κλίμακες (ή περιοχές) συλλέχθηκαν επίσης δεδομένα αιτιολογικών παραγόντων αξιοποιώντας πηγές διαφορετικής λεπτομέρειας (κλίμακας για τα προερχόμενα από χαρτογραφικά υπόβαθρα διανυσματικά δεδομένα, και μεγέθους ψηφίδας για τα ψηφιδωτά δεδομένα) για κάθε μια απ' αυτές. Προκειμένου να συνδυαστούν, και σε μια συνδυασμένη πλέον μορφή να τεθούν υπό ανάλυση από τα επιλεγμένα μοντέλα, τόσο τα κατολισθητικά, όσο και τα παραγοντικά δεδομένα υποβλήθηκαν προηγουμένως σε μια (προ)επεξεργασία βασισμένη σ' ένα διαφορετικό μέγεθος ψηφίδας για κάθε μια από τις δύο κλίμακες (90 και 20 μέτρα, αντιστοίχως). Ξεχωρίζοντας για τελική χρήση στα μοντέλα, από τον αρχικό συνολικό αριθμό παραγόντων μόνο τους στατιστικώς σημαντικούς, και εισάγοντας σ' αυτά τα αντίστοιχα παραγοντικά και κατολισθητικά δεδομένα, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων χάρη στους οποίους μπορούσε να υποδειχθεί ο βαθμός επίδρασης του καθενός στην εκδήλωση του φαινομένου. Ο «σταθμισμένος» συνδυασμός των παραγοντικών δεδομένων είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό των τιμών επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης των οποίων η χωρική κατανομή αποδόθηκε μ' ένα χαρτογραφικό τρόπο δημιουργώντας τους αντίστοιχους χάρτες επιδεκτικότητας. Στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, ο αριθμός αυτών των χάρτων ήταν μεγαλύτερος του αριθμού των εξεταζόμενων μοντέλων λόγω της εξέτασης της επίδρασης μιας ακόμη παραμέτρου της ανάλυσης, αυτής της μεθόδου ταξινόμησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας.

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο ανάλυσης του φαινομένου περιλαμβάνει την αξιολόγηση των μοντέλων. Στην παρούσα διατριβή, τα εξεταζόμενα μοντέλα αξιολογήθηκαν μέσω της επικύρωσης των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας που εξήγαγαν. Για την υλοποίηση της, εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι επικύρωσης. Αξιοποιώντας σ' αυτές τα κατολισθητικά δεδομένα τόσο του συνόλου εκπαίδευσης, όσο και του (ανεξάρτητου) συνόλου

επικύρωσης, εκτιμήθηκαν η προσαρμογή στα δεδομένα εκπαίδευσης και η ικανότητα πρόβλεψης, αντιστοίχως, των μοντέλων.

Η απόκτηση των επιθυμητών αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας καθιστούσε, επίσης, δυνατή τη διενέργεια μερικών περαιτέρω αναλύσεων. Οι αναλύσεις αυτές περιλάμβαναν αρχικώς τη σύγκριση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων κλιμάκων ανάλυσης αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματά τους ως προς τα όρια μιας χωρικής κοινής γι' αυτές περιοχής. Επιπλέον, με στόχο την επιβεβαίωση, ή μη, των γενικευμένων χωρικών αποτελεσμάτων των καθολικών μοντέλων αναφορικά με τις σχέσεις μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των εξεταζόμενων παραγόντων, εφαρμόστηκε ένα τοπικό μοντέλο για τη διερεύνηση ύπαρξης τοπικώς μιας χωρικής μη-στασιμότητας στις συγκεκριμένες σχέσεις. Τέλος, συλλέγοντας και, εν συνεχεία, αξιοποιώντας σε μια επιπρόσθετη μεθοδολογία τα απαιτούμενα κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα, εκτιμήθηκε και χαρτογραφήθηκε μια άλλη πτυχή του φαινομένου των κατολισθήσεων, αυτή της τρωτότητας. Λόγω της σημαντικότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων της σε σχέση με την κλίμακα ανάλυσης, η προσπάθεια αυτή αφορούσε αποκλειστικά την περιοχή μελέτης της λεπτομερέστερης κλίμακας ανάλυσης.

9.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στις δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, καθώς και των επιπρόσθετων διενεργηθέντων αναλύσεων, διαπιστώθηκαν τα εξής:

9.2.1 Ειδικά συμπεράσματα για την περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης

Οι συντελεστές βαρύτητας που εκχωρήθηκαν στους εξεταζόμενους αιτιολογικούς παράγοντες από τα εννέα μοντέλα φανερώνουν την ανάδειξη της γωνίας κλίσης και της γεωλογίας ως τους παράγοντες με την μεγαλύτερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου. Είναι χαρακτηριστικό ότι, με εξαίρεση τα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων (ANN και ANFIS), η πλειοψηφία των υπόλοιπων μοντέλων (AHP, FR, LSI, WoE, LR) έχουν κατατάξει τη γωνία κλίσης στην πρώτη θέση σημαντικότητας. Ωστόσο, ακόμα και τα μοντέλα (TFWN και TFWN/LSI) που δεν την κατάταξαν στην πρώτη θέση, δεν την απέκλεισαν από την πρώτη

δυάδα σημαντικότητας (κατάταξη στη δεύτερη θέση). Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και για τον παράγοντα της γεωλογίας. Εξαιρώντας το ένα από τα τρία μοντέλα διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (FR), καθώς και το μοντέλο πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (LR), τα υπόλοιπα μοντέλα έχουν κατατάξει τον συγκεκριμένο παράγοντα είτε στην πρώτη (TFNW, TFNW/LSI και ANN), είτε στη δεύτερη θέση σημαντικότητας (AHP, LSI, WoE και ANFIS). Στο επίπεδο των κατηγοριών των παραγόντων, διαπιστώνεται ότι τα τμήματα της περιοχής μελέτης με μεγάλη γωνία κλίσης, σχηματισμούς του «φλύσχη», υψηλή πυκνότητα ρεμάτων, και μεγάλο υψόμετρο φαίνονται να σχετίζονται περισσότερο με την εκδήλωση κατολισθήσεων.

Τα παράγωγα των μοντέλων αξιοποιήθηκαν προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική κατανομή της εκτιμώμενης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης. Αυτό που διαπιστώνει κανείς παρατηρώντας τους σχετικούς χάρτες είναι πως παρότι θύλακες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας εντοπίζονται σ' όλη την περιοχή μελέτης, ένα μεγάλο τμήμα στ' ανατολικά καθώς και ολόκληρο σχεδόν το παράκτιο τμήμα της στα βόρεια δεν εμφανίζονται να είναι επιδεκτικά ως προς την εκδήλωση του φαινομένου. Αυτό που αξίζει, επίσης, ν' αναφερθεί είναι η σχετικά μεγάλη έκταση (περίπου 50% της συνολικής έκτασης) που καταλαμβάνουν οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας για την πλειοψηφία των μοντέλων (LSI, WoE, ANFIS, TFNW/LSI, TFNW και ANN). Αντιθέτως, τρία από τα μοντέλα (AHP, FR και LR) φαίνεται να παρουσιάζουν πιο ισορροπημένα αποτελέσματα (κάλυψη των ίδιων κατηγοριών μικρότερη του 30% της συνολικής έκτασης).

Από τον συνδυασμό των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας διαπιστώνεται η κατάδειξη, και στα εννέα μοντέλα, του παράκτιου (βόρειου) τμήματος της περιοχής μελέτης ως έκταση «Πολύ Χαμηλής» επιδεκτικότητας. Επιπλέον, είναι ευδιάκριτη η κοινή παρουσία, στο σύνολο των μοντέλων, σημαντικών εκτάσεων «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας στο κεντρικό τμήμα της περιοχής.

Και στις δύο πιο εξειδικευμένες μεθόδους επικύρωσης (ανάλυση ROC, και αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης) διαπιστώνεται μια παρόμοια καλή έως πολύ καλή απόδοση μεταξύ της πλειοψηφίας των μοντέλων. Όπως φαίνεται στα στατιστικά αποτελέσματα της ανάλυσης ROC, τα μοντέλα LSI και WoE εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές ευαισθησίας, (δηλαδή το υψηλότερο ποσοστό σωστών προβλέψεων) και συγχρόνως τις χαμηλότερες τιμές

ειδικότητας (δηλαδή το υψηλότερο ποσοστό λανθασμένων προβλέψεων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα μοντέλα να συνοδεύονται από μια καλύτερη ικανότητα πρόβλεψης της επιδεκτικότητας (τιμή AUC), αλλά και από μια χειρότερη ακρίβεια έναντι των υπολοίπων μοντέλων. Δηλαδή, τα μοντέλα αυτά τείνουν να χαρακτηρίζουν ως επιδεκτικά ακόμα και τμήματα της περιοχής μελέτης τα οποία, στα υπόλοιπα μοντέλα, έχουν χαρακτηριστεί ως λιγότερο ή καθόλου επιδεκτικά.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα LSI και WoE, το μοντέλο LR εμφανίζει μια υψηλή τιμή ευαισθησίας (δηλαδή ένα υψηλό ποσοστό σωστών προβλέψεων) και συγχρόνως την υψηλότερη τιμή ειδικότητας (δηλαδή το χαμηλότερο ποσοστό λανθασμένων προβλέψεων). Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο μοντέλο συνοδεύεται από μια εξίσου καλή, με τα μοντέλα LSI και WoE, ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC), αλλά και από την καλύτερη ακρίβεια έναντι των υπολοίπων μοντέλων. Συνδυάζοντας μαζί με τα βέλτιστα αποτελέσματα στην ανάλυση ROC, τα θετικά αποτελέσματα στα αθροιστικά ποσοστά επιτυχίας και πρόβλεψης (τιμή AUC στο εύρος 0,7-0,8) και στην υπέρθεση κατολισθητικών δεδομένων (υψηλά ποσοστά από τις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας), και κυρίως λαμβάνοντας υπόψη την εξαγωγή ενός «μη υπερεκτιμημένου» αποτελέσματος επιδεκτικότητας, το μοντέλο LR μπορεί να θεωρηθεί ως μια πιο ενδεδειγμένη επιλογή όσο αναφορά την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην υπό μελέτη περιοχή για τη συγκεκριμένη κλίμακα ανάλυσης.

Όπως έχει αναφερθεί, η πλειοψηφία των καθολικών μοντέλων κατέδειξε την απουσία ισχυρής σχέσης μεταξύ του παράγοντα της βλάστησης και της εκδήλωσης του φαινομένου. Επομένως, με βάση το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, ο παράγοντας αυτός θα μπορούσε να μη συμπεριληφθεί στη διενεργηθείσα ανάλυση. Ωστόσο, στα πλαίσια της εξέτασης της μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης, το μοντέλο GWR υπέδειξε ότι ο παράγοντας της βλάστησης έχει μια ελαφρώς θετική επίδραση σ' όλη σχεδόν την έκταση της περιοχής μελέτης, και ειδικότερα στο ανατολικό τμήμα της στο οποίο αγγίζει τη μέγιστη τιμή και θεωρείται σημαντική στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ως εκ τούτου, ορθώς έχει συμπεριληφθεί στην ανάλυση. Η χρησιμότητα του τοπικού μοντέλου GWR αποδεικνύεται επίσης από την αξιοσημείωτη βελτίωση που παρατηρείται, έναντι του καθολικού μοντέλου LR, στους εκτιμώμενους στατιστικούς δείκτες (AICc, απόκλιση, και συνολική τιμή pseudo R^2).

9.2.2 Ειδικά συμπεράσματα για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης

Σύμφωνα με τους συντελεστές βαρύτητας που εκχωρήθηκαν στους εξεταζόμενους αιτιολογικούς παράγοντες από τα έξι (ποσοτικά) μοντέλα, η γωνία κλίσης αναδεικνύεται ως ο παράγοντας με την μεγαλύτερη επίδραση στην εκδήλωση του φαινομένου για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούνα. Είναι χαρακτηριστικό ότι, με εξαίρεση τα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων (ANN και ANFIS), τα υπόλοιπα μοντέλα έχουν κατατάξει τη γωνία κλίσης εντός της πρώτης δυνάδας σημαντικότητας. Πιο αναλυτικά, τα μοντέλα διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (FR, LSI και WoE) την έχουν κατατάξει στην πρώτη θέση, ενώ το μοντέλο πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (LR) στη δεύτερη θέση σημαντικότητας. Στο επίπεδο των κατηγοριών των παραγόντων, διαπιστώνεται ότι τα τμήματα της περιοχής μελέτης με μεγάλη γωνία κλίσης, μικρή απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία, υψηλή πυκνότητα ρεμάτων, και υψηλή χειμαρρική ισχύ εμφανίζονται να σχετίζονται περισσότερο με την εκδήλωση κατολισθήσεων.

Τα παράγωγα των μοντέλων αξιοποιήθηκαν προκειμένου να οπτικοποιηθεί η χωρική κατανομή της εκτιμώμενης επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης για τρεις διαφορετικές μεθόδους ταξινόμησης. Αυτό που συμπεραίνεται παρατηρώντας τους σχετικούς χάρτες είναι ότι με εξαίρεση τα μοντέλα FR και LR τα οποία παρουσιάζουν μια παρόμοια τάση και στις τρεις μεθόδους ταξινόμησης ως προς τη χωρική κάλυψη των κατηγοριών «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας (συνολικά ποσοστά που ξεπερνούν το 19%), οι ομάδες των υπόλοιπων μοντέλων «συμπεριφέρονται» διαφορετικά σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες μεθόδους ταξινόμησης (ή αλλιώς, κάθε μέθοδος ταξινόμησης έχει επηρεάσει με διαφορετικό τρόπο κάθε μία από τις ομάδες των υπόλοιπων μοντέλων). Πιο συγκεκριμένα, στα μοντέλα διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης, LSI και WoE, οι ίδιες κατηγορίες επιδεκτικότητας καταλαμβάνουν μια μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης στις μεθόδους των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων» (συνολικά ποσοστά που κυμαίνονται από 26% έως 37%), και μια μικρότερη έκταση στη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης» (συνολικά ποσοστά 8% και 12%, αντιστοίχως). Στα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων, ANN και ANFIS, οι ίδιες κατηγορίες επιδεκτικότητας καταλαμβάνουν μια μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης στις μεθόδους των «φυσικών ορίων» και της «τυπικής απόκλισης»

(συνολικά ποσοστά που κυμαίνονται από 28% έως 34%), και μια μικρότερη έκταση στη μέθοδο των «ίσων διαστημάτων» (συνολικά ποσοστά 15% και 17%, αντιστοίχως). Θα μπορούσε, συνεπώς, να ειπωθεί ότι τα μοντέλα LSI και WoE παρουσιάζουν μια «υπερεκτίμηση» της επιδεκτικότητας για την περιοχή μελέτης στις μεθόδους των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων», και ένα πιο ισορροπημένο αποτέλεσμα στη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης». Κάτι αντίστοιχο μπορεί να ειπωθεί και για τα μοντέλα ANN και ANFIS, διατηρώντας τη μέθοδο των «φυσικών ορίων» και αντιστρέφοντας τη μέθοδο των «ίσων διαστημάτων» μ' αυτήν της «τυπικής απόκλισης».

Από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας για κάθε μια από τις μεθόδους ταξινόμησης διαπιστώνονται τα εξής: (α) μια σημαντική έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται με «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα για τη μέθοδο ταξινόμησης των «φυσικών ορίων», (β) ένα εκτεταμένο τμήμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται με «Χαμηλή» επιδεκτικότητα για τη μέθοδο ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης», και (γ) μια σημαντική έκταση, κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης, χαρακτηρίζεται με «Υψηλή» επιδεκτικότητα για τη μέθοδο ταξινόμησης των «ίσων διαστημάτων».

Αν και στα αποτελέσματα της ανάλυσης ROC διαπιστώνεται μια παρόμοια πολύ καλή απόδοση μεταξύ των μοντέλων, την καλύτερη ικανότητα πρόβλεψης (τιμή AUC) και ακρίβεια, υιοθετώντας τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων», παρουσιάζει το μοντέλο LR. Για την μέθοδο της «τυπικής απόκλισης», τη βέλτιστη ικανότητα πρόβλεψης και ακρίβεια παρουσιάζει το μοντέλο WoE.

Από την πλευρά των μεθόδων ταξινόμησης, τις καλύτερες ικανότητες πρόβλεψης για την πλειοψηφία των μοντέλων παρουσιάζει η μέθοδος ταξινόμησης των «φυσικών ορίων». Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει, για την πλειοψηφία των μοντέλων, πολύ υψηλές τιμές ευαισθησίας, (δηλαδή πολύ υψηλά ποσοστά σωστών προβλέψεων) και συγχρόνως χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές ειδικότητας (δηλαδή υψηλά έως πολύ υψηλά ποσοστά λανθασμένων προβλέψεων). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συνοδεύεται από πολύ καλές ικανότητες πρόβλεψης, αλλά και από πολύ κακές ακρίβειες (δηλαδή, μικρότερη ικανότητα πρόβλεψης των λιγότερο ή καθόλου επιδεκτικών τμημάτων). Αντιθέτως, η μέθοδος ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης» εμφανίζει, για την πλειοψηφία των μοντέλων, υψηλές τιμές ευαισθησίας (δηλαδή υψηλά ποσοστά σωστών προβλέψεων) και συγχρόνως υψηλές τιμές ειδικότητας (δηλαδή

χαμηλά ποσοστά λανθασμένων προβλέψεων). Ως εκ τούτου, έναντι της μεθόδου των «φυσικών ορίων», η συγκεκριμένη μέθοδος ταξινόμησης συνοδεύεται από τη βέλτιστη για το μοντέλο WoE και σχεδόν εξίσου καλές για τα υπόλοιπα μοντέλα ικανότητες πρόβλεψης, αλλά και από καλύτερες ακρίβειες για την πλειοψηφία των μοντέλων.

Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αθροιστικών ποσοστών επιτυχίας και πρόβλεψης, το μοντέλο με τη βέλτιστη προσαρμογή στα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης και τη βέλτιστη ικανότητα πρόβλεψης φαίνεται να είναι το WoE.

Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η συνδυαστική χρήση του μοντέλου WoE με τη μέθοδο ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης» μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον ενδεδειγμένη επιλογή όσο αναφορά την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης στην υπό μελέτη περιοχή για τη συγκεκριμένη κλίμακα ανάλυσης.

Όπως στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης, έτσι και στη λεπτομερέστερη, η πλειοψηφία των καθολικών μοντέλων κατέδειξαν την απουσία ισχυρής σχέσης μεταξύ ενός παράγοντα και της εκδήλωσης του φαινομένου. Στην προκειμένη περίπτωση, ο παράγοντας αυτός είναι η γενική καμπυλότητα. Επομένως, με βάση το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, ο παράγοντας αυτός θα μπορούσε να μη συμπεριληφθεί στη διενεργηθείσα ανάλυση. Ωστόσο, στα πλαίσια της εξέτασης της μη-στασιμότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης, το μοντέλο GWR υπέδειξε ότι ο παράγοντας της γενικής καμπυλότητας έχει μια ελαφρώς θετική επίδραση σ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, στο μεγαλύτερο τμήμα της οποίας η επίδραση αυτή φαίνεται να είναι σημαντική στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ως εκ τούτου, ορθώς έχει συμπεριληφθεί στην ανάλυση. Η χρησιμότητα του τοπικού μοντέλου GWR στη συγκεκριμένη κλίμακα ανάλυσης φαίνεται επίσης από την αξιοσημείωτη βελτίωση που παρατηρείται, έναντι του καθολικού μοντέλου LR, στους εκτιμώμενους στατιστικούς δείκτες.

Όσο αναφορά το αποτέλεσμα της εκτίμησης της (αναμενόμενης) τρωτότητας σε (δυναμική) εκδήλωση του φαινομένου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα, διαπιστώνεται η απουσία της μέγιστης τρωτότητας (τιμή 1) στην περιοχή μελέτης και η παρουσία μιας ελαφρώς υψηλής τρωτότητας (τιμή 0,6) για τα τμήματά της με τις μέγιστες τιμές. Λαμβάνοντας υπόψη την αξιοποίηση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων γενικής τρωτότητας και επιδεκτικότητας για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος, αυτό σημαίνει πως κανένα τμήμα της περιοχής μελέτης (ή αλλιώς, «στοιχείο σε επικινδυνότητα») δεν

παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή γενικής τρωτότητας και συγχρόνως την υψηλότερη τιμή επιδεκτικότητας. Είναι ευδιάκριτο, επίσης, το γεγονός πως λόγω των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων πρωτογενών δεδομένων, δεν ήταν δυνατό ν' αποφευχθεί η οπτικοποίηση των ορίων τους στο τελικό αποτέλεσμα, ειδικότερα αυτών που σχετίζονται με τις μεταβλητές της πυκνότητας οδικού δικτύου και των αστικών/οικοδομικών εκτάσεων.

9.2.3 Ειδικά συμπεράσματα για τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης

Εστιάζοντας τα αντίστοιχα (από τα ίδια μοντέλα και για την ίδια μέθοδο ταξινόμησης) αποτελέσματα των δύο διαφορετικών κλιμάκων ανάλυσης στην έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σελινούντα, οι κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας στα αποτελέσματα της περιφερειακής κλίμακας εμφανίζονται να καταλαμβάνουν ένα πολύ μεγαλύτερο (με διαφορές στα ποσοστά χωρικής κάλυψης που κυμαίνονται από 25% έως 39%) τμήμα της περιοχής απ' ότι στα αποτελέσματα της λεπτομερέστερης κλίμακας. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των ποσοτικών μοντέλων στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης δείχνουν ότι η εκτιμώμενη επιδεκτικότητα σε εκδήλωση κατολίσθησης χαρακτηρίζεται από μια «υπερεκτίμηση» σε σχέση με τα αποτελέσματα στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης.

Στην «ανά μοντέλο» διασταυρούμενη σύγκριση χωρικών καλύψεων των κατηγοριών επιδεκτικότητας διακρίνονται δύο κύριες τάσεις. Η πρώτη τάση αφορά την (κοινή) κατάδειξη και για τις δύο κλίμακες ανάλυσης, του βόρειου τμήματος της περιοχής ως έκταση «Πολύ Χαμηλής» («Χαμηλής» για το μοντέλο WoE) επιδεκτικότητας, και του κεντρικού κυρίως τμήματος της ως έκταση «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας. Η δεύτερη τάση αφορά την «υποβάθμιση», ως προς την εκτιμώμενη επιδεκτικότητα, εκτάσεων της περιοχής στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, εκτάσεις της περιοχής με «Υψηλή» επιδεκτικότητα στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης, έχουν μετατραπεί σε εκτάσεις «Μέτριας» και «Χαμηλής» επιδεκτικότητας στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης.

Με βάση τα εκτιμώμενα, μέσω της ανάλυσης ROC, αποτελέσματα επικύρωσης, η λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης παρουσιάζει καλύτερη ικανότητα πρόβλεψης και μεγαλύτερη ακρίβεια για όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα έναντι της περιφερειακής κλίμακας ανάλυσης.

9.2.4 Γενικά συμπεράσματα

Με βάση τα συνολικά αποτελέσματα της μεθοδολογίας διαπιστώνονται τα εξής:

- Μεταξύ των ομάδων των μοντέλων, παρατηρείται μια σχετική υπεροχή των «καθοδηγούμενων από τα δεδομένα» ποσοτικών μοντέλων έναντι των βασισμένων στις γνώμες των «εμπειρογνομόνων» ποιοτικών μοντέλων.
- Μεταξύ των δύο ποιοτικών μοντέλων, διακρίνεται μια σημαντική υπεροχή του μοντέλου το οποίο αξιοποιεί τις γνώμες των «εμπειρογνομόνων» σε συνδυασμό με την ασαφή λογική (TFNW) έναντι του μοντέλου το οποίο αξιοποιεί αποκλειστικά τις γνώμες των «εμπειρογνομόνων» (AHP).
- Σχετικά με τα ποσοτικά μοντέλα, τα μοντέλα διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης, όπως τα FR, LSI και WoE, βασίζονται στις παρατηρούμενες πυκνότητες κατολισθητικών δεδομένων προκειμένου να εκθέσουν τη χωρική συσχέτιση μεταξύ της εκδήλωσης του φαινομένου και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτήν. Τα μοντέλα πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης, όπως το LR, λόγω της ευέλικτης και μη γραμμικής φύσης τους, είναι σε θέση ν' αναλύουν δεδομένα τα οποία παρουσιάζουν ασύμμετρες κατανομές και πολύπλοκες σχέσεις, χαρακτηριστικά που συναντώνται σε μεγάλο βαθμό στο φυσικό περιβάλλον και ειδικότερα στις φυσικές διεργασίες. Τα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων, όπως τα ANN και ANFIS, αποτελούν προηγμένα μοντέλα για την ανάλυση μεγάλων σύνολων δεδομένων που εμφανίζουν ανομοιογένεια και ελλείψεις. Μεταξύ των ποσοτικών μοντέλων, διαφαίνεται μια υπεροχή της πλειοψηφίας των στατιστικών μοντέλων (εκτός του FR) έναντι των μοντέλων εξόρυξης δεδομένων. Συνεπώς, τα στατιστικά μοντέλα δείχνουν ν' αποδίδουν καλύτερα για τις δεδομένες συνθήκες ανάλυσης όσο αναφορά την κλίμακα και τις εκφρασμένες, μέσω της δειγματοληψίας των δεδομένων, σχέσεις των εξεταζόμενων παραγόντων με την εκδήλωση κατολισθήσεων. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η υπεροχή στατιστικών μοντέλων έναντι μοντέλων εξόρυξης δεδομένων έχει διαπιστωθεί βιβλιογραφικώς και σε άλλες σχετικές μελέτες (Oh et al., 2010; Choi et al., 2012; Wang et al., 2016b; Samodra et al., 2017).

- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ROC, το μοντέλο πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης παρουσιάζει μια παρόμοια ικανότητα πρόβλεψης σε σχέση με την πλειοψηφία των μοντέλων διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (εκτός του FR). Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης δείχνει να υπερτερεί έναντι και των τριών μοντέλων διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης ως προς την εκτιμώμενη, από την ανάλυση ROC, ακρίβεια.
- Μεταξύ των μοντέλων εξόρυξης δεδομένων, η εμπλουτισμένη με τα πλεονεκτήματα της ασαφούς λογικής μορφή ANN, το μοντέλο ANFIS, εμφανίζει μια υπεροχή έναντι του μεμονωμένου μοντέλου ANN.
- Η ενίσχυση του ποιοτικού μοντέλου TFNW, μέσω της προσθήκης του βασισμένου στο μοντέλο LSI «στατιστικού εμπειρογνώμονα» και τη δημιουργία του υβριδικού μοντέλου TFNW/LSI, συνέβαλε στη σημαντική βελτίωση της απόδοσης του μεμονωμένου μοντέλου TFNW.

Η κατάδειξη των παραγόντων με την μεγαλύτερη επίδραση στην εκδήλωση κατολισθήσεων, με βάση τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας από τα μοντέλα, φαίνεται να είναι σύμφωνη σε μεγάλο βαθμό με τη γενική γνώση και εμπειρία όπως αυτές διατυπώνονται στις γνώμες των «εμπειρογνομόνων» αλλά και στη σχετική βιβλιογραφία.

Ωστόσο, η συμβολή του κάθε παράγοντα στην εκδήλωση του φαινομένου φαίνεται να μην είναι η ίδια σ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Αυτή η μη-στασιμότητα δεν προσδιορίζεται αποτελεσματικώς από τα καθολικά μοντέλα τα οποία, βασιζόμενα στην παραδοχή πως η σχέση μεταξύ του κάθε παράγοντα και της εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι στατική σ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, εξάγουν ένα συντελεστή βαρύτητας που ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί ως μια μέση τιμή αυτής της σχέσης. Αντιθέτως, το τοπικό μοντέλο GWR παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη χωρική μεταβολή της συγκεκριμένης σχέσης. Στην παρούσα διατριβή, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του τοπικού μοντέλου δείχνουν ότι αυτό μπορεί ν' αποτελέσει μια σημαντική προσθήκη για τα καθολικά μοντέλα.

Η εμπειρική ανάλυση έδειξε μια «υπερεκτίμηση» της επιδεκτικότητας από τα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων και την πλειοψηφία των μοντέλων διμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης

(εκτός του FR). Η «υπερεκτίμηση» αυτή μπορεί ν' αποδοθεί στις επιλογές που λήφθηκαν για σημαντικούς παραμέτρους της ανάλυσης όπως είναι το μέγεθος των συνόλων εκπαίδευσης και επικύρωσης, το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων παραγόντων, καθώς και η μέθοδος ταξινόμησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας.

Παρατηρώντας μεμονωμένα τα αποτελέσματα επικύρωσης των ποσοτικών μοντέλων στις δύο διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης, συμπεραίνεται ότι η απόδοση ενός μοντέλου εξαρτάται από την κλίμακα ανάλυσης. Η μεταβολή από την περιφερειακή στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης διατήρησε σε θετικά έως πολύ θετικά επίπεδα την απόδοση των εξεταζόμενων ποσοτικών μοντέλων προκαλώντας συγχρόνως μια μικρή βελτίωση της στην πλειοψηφία τους.

Λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά τα αποτελέσματα επικύρωσης στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, διαπιστώνεται ότι η απόδοση ενός μοντέλου εξαρτάται από τη μέθοδο ταξινόμησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας. Η ανάδειξη ως βέλτιστη επιλογή του μοντέλου LR για τις μεθόδους των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων», και ενός διαφορετικού μοντέλου, του WoE, για τη μέθοδο της «τυπικής απόκλισης» αποτελεί τη βάση της συγκεκριμένης διαπίστωσης.

Εστιάζοντας στα αποτελέσματα επικύρωσης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούνα, η μεταβολή της κλίμακας ανάλυσης από περιφερειακή σε λεπτομερέστερη και η επακόλουθη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης (μείωση του μεγέθους της ψηφίδας, από 90 σε 20 μέτρα) των χρησιμοποιούμενων δεδομένων προκάλεσαν αισθητή βελτίωση στην απόδοση των ποσοτικών μοντέλων. Τα συγκεκριμένα μοντέλα φαίνεται να παρέχουν πολύ καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα στη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης απ' ότι στην περιφερειακή. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει την άποψη σύμφωνα με την οποία η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης εξαρτάται από τη χωρική ανάλυση/μέγεθος ψηφίδας των δεδομένων (Tian et al., 2008).

Εκτός του προαναφερθέντος πλεονεκτήματος, η μεταβολή της κλίμακας ανάλυσης, ή αλλιώς η βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων, είχε ως αποτέλεσμα την αισθητή αύξηση του μεγέθους του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης η οποία, με τη σειρά της, προκάλεσε μια ιδιαιτέρως μεγάλη αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας εκπαίδευσης των μοντέλων εξόρυξης δεδομένων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης συνοδευόταν από την αποδοχή ορισμένων παραδοχών. Οι χάρτες καταγραφής κατολισθήσεων περιλάμβαναν το σύνολο μόνο των καταγεγραμμένων, στις δύο χρησιμοποιούμενες «υποστηρικτικής χρήσεως» βάσεις δεδομένων, παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων των υπό μελέτη περιοχών. Κατολισθητικά γεγονότα που δεν περιέχονταν στις συγκεκριμένες βάσεις δεδομένων δε λήφθηκαν υπόψη. Αν και σε μερικές μελέτες (Van Den Eeckhaut et al., 2006; Othman et al., 2015) έχει αναπαρασταθεί ως πολύγωνο μόνο η ζώνη βύθισης των κατολισθήσεων, η μη δυνατότητα διαφοροποίησης μεταξύ αυτής της ζώνης και της ζώνης διόγκωσης, καθώς και το γεγονός ότι η πλειοψηφία των χαρτογραφημένων κατολισθήσεων αποτελούσαν μετακινήσεις μαζών με περιορισμένο μήκος μεταφοράς, είχαν ως αποτέλεσμα την παραδοχή της ύπαρξης παρόμοιων συνθηκών ως προς τους αιτιολογικούς παράγοντες για τις δύο αυτές ζώνες, και κατά συνέπεια την οριοθέτηση ως πολυγώνου της συνολικής έκτασης κάθε κατολίσθησης. Κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας, ήταν απαραίτητη η διενέργεια μιας «απλούστευσης» των κατολισθητικών δεδομένων, προσδιορίζοντας ένα κεντροειδές σημείο για κάθε ψηφίδα κατολίσθησης. Μ' αυτόν τον τρόπο, σε μερικές περιπτώσεις, οι ψηφίδες που προσδιορίστηκαν ως σημεία κατολίσθησης υποτιμήθηκαν (δηλαδή ο αριθμός των ψηφίδων δεν ήταν ανάλογος του αριθμού των εξαγόμενων σημείων). Όταν χρησιμοποιείται ένα μεγάλο μέγεθος ψηφίδας, όπως στην περίπτωση της περιφερειακής κλίμακας ανάλυσης, τότε οι ψηφίδες γίνονται λιγότερο ομοιογενείς, και κατά συνέπεια καθίσταται δύσκολη η αντιστοίχιση τους τόσο με μια συγκεκριμένη κατηγορία αιτιολογικού παράγοντα, όσο και με την παρουσία ή απουσία κατολίσθησης, δεδομένου ότι η κάθε ψηφίδα μπορεί να συμπίπτει μ' ένα μικρό τμήμα κατολίσθησης. Ο προσδιορισμός σημαντικών παραμέτρων της ανάλυσης, όπως ο αριθμός και ο τύπος των αρχικώς συλλεχθέντων αιτιολογικών παραγόντων, η κατηγοριοποίηση και η επανακλιμακοποίηση των τελικώς χρησιμοποιούμενων παραγόντων, το μέγεθος των συνόλων εκπαίδευσης και επικύρωσης, καθώς και η κατηγοριοποίηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας στην περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης βασίστηκε σε κατευθυνόμενες, από τη σχετική βιβλιογραφία, επιλογές. Είναι δεδομένο ότι διαφορετικές επιλογές γι' αυτές τις παραμέτρους θα ευθύνονταν για την εξαγωγή διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Σχετικά με τη χρησιμότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα μπορούσε να ειπωθεί ότι σε μια ενδεχόμενη περίπτωση

έλλειψης ή μη διαθεσιμότητας δεδομένων καλής ποιότητας (χωρικής ανάλυσης), το συνοδευόμενο από την υψηλότερη ακρίβεια και αξιοπιστία αποτέλεσμα του μοντέλου LR για την περιφερειακή κλίμακα ανάλυσης, και πιο συγκεκριμένα για το σύστημα λεκανών απορροής της βόρειας Πελοποννήσου, θα μπορούσε ν' αξιοποιηθεί και για τις ανάγκες περιοχών λεπτομερέστερης κλίμακας, όπως η λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα. Σε αντίθετες περιπτώσεις διαθεσιμότητας δεδομένων καλής ποιότητας, το συγκεκριμένο αποτέλεσμα θα μπορούσε να χρησιμεύσει μόνο για την κατάδειξη των «επικινδύνων» (με «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» επιδεκτικότητα) τμημάτων αυτών των περιοχών τα οποία θα πρέπει να μελετηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε μια μεταγενέστερη φάση.

Από την άλλη πλευρά, λόγω της επιβεβαιωμένης υψηλότερης ακρίβειας και αξιοπιστίας, το αποτέλεσμα της συνδυαστικής χρήσης του μοντέλου WoE με τη μέθοδο ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης» για τη λεπτομερέστερη κλίμακα ανάλυσης, και πιο συγκεκριμένα για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σελινούντα, μπορεί ν' αποτελέσει μια σημαντική βάση στην οποία θα στηριχτούν οι αρμόδιες αρχές και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων για την κατάρτιση ενός γενικού πλαισίου με κεντρικό άξονα του τον «σχεδιασμό του χώρου». Επιπλέον, οι υπεύθυνοι σχεδιασμού μπορούν ν' αξιοποιήσουν το αποτέλεσμα εκτίμησης της τρωτότητας προκειμένου να προσδιορίσουν τα κοινωνικο-οικονομικά στοιχεία της περιοχής τα οποία αναμένεται να επηρεαστούν από μια πιθανή εκδήλωση του φαινομένου στο μέλλον, και ακολούθως να προχωρήσουν στις κατάλληλες ενέργειες και λήψεις μέτρων για την αποφυγή ή τον μετριασμό των επιπτώσεων της. Τέλος, τα παραγόμενα αποτελέσματα επιδεκτικότητας και τρωτότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά σε μια μεταγενέστερη φάση για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (risk) σε εκδήλωση κατολίσθησης στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Τέλος, η συμβολή της Γεωπληροφορικής είναι ιδιαιτέρως σημαντική για κάθε τέτοιου τύπου μελέτη εκτίμησης και χαρτογράφησης της επιδεκτικότητας σε εκδήλωση κατολίσθησης. Η Τηλεπισκόπηση, μέσω των βασισμένων σ' αυτήν τεχνικών, διαδραματίζει ένα καθοριστικό ρόλο στην αναγνώριση και οριοθέτηση των παρελθοντικών κατολισθητικών γεγονότων μιας περιοχής. Επιπλέον, τα ΣΓΠ παρέχουν αφενός τη δυνατότητα (προ)επεξεργασίας των χρησιμοποιούμενων συνόλων (κατολισθητικών και παραγοντικών) δεδομένων, και αφετέρου αποτελούν ένα απαραίτητο εργαλείο για την υποδοχή των εξαγόμενων, από τα μοντέλα

ανάλυσης, δεδομένων/αποτελεσμάτων και την κατασκευή των επιθυμητών χαρτών επιδεκτικότητας (ή τρωτότητας) σε εκδήλωση κατολίσθησης για την ίδια περιοχή.

Πίνακας 9.1: Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων ανά κλίμακα ανάλυσης.

Κλίμακα ανάλυσης / περιοχή μελέτης	Θεματική	Συμπέρασμα
Περιφερειακή κλίμακα / σύστημα λεκανών απορροής βόρειας Πελοποννήσου	Αιτιολογικοί παράγοντες	• Παράγοντες με σημαντική επίδραση στο φαινόμενο: - Γωνία κλίσης - Γεωλογία
		• Κατηγορίες παραγόντων με σημαντική επίδραση στο φαινόμενο: - Μεγάλη γωνία κλίσης - Φλύσχης - Υψηλή πυκνότητα ρεμάτων - Μεγάλο υψόμετρο
	Αποτελέσματα επιδεκτικότητας	• Επιδεκτικές εκτάσεις («Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας) κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης.
		• Μη επιδεκτικές εκτάσεις («Πολύ Χαμηλής» επιδεκτικότητας) στο ανατολικό και βόρειο (παράκτιο) τμήμα.
	Αποτελέσματα επικύρωσης	• Υψηλότερα ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων για τις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας από τα μοντέλα LSI και WoE (λόγω υπερεκτίμησης).
		• Καλή (από αθροιστικά ποσοστά) έως πολύ καλή (από ανάλυση ROC) απόδοση για την πλειοψηφία των μοντέλων.
		• Καλύτερη απόδοση του υβριδικού μοντέλου TFNW/LSI έναντι του μεμονωμένου ποιοτικού μοντέλου TFNW.
		• Βέλτιστη επιλογή το μοντέλο LR: - Καλή ικανότητα πρόβλεψης (υψηλές τιμές AUC). - Πολύ καλή ακρίβεια. - Καλή προσαρμογή στα δεδομένα.
	Αποτελέσματα χωρικής μη-στασιμότητας	• Εμφάνιση χωρικής μη-στασιμότητας και σπουδαιότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης του φαινομένου.
		• Επιβεβαίωση της εξέτασης των επιλεγμένων παραγόντων, ακόμα και για τους παράγοντες με τους μικρότερους συντελεστές βαρύτητας.
		• Καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα του τοπικού μοντέλου (GWR) έναντι του καθολικού (LR).

Πίνακας 9.1: (Συνέχεια).

Κλίμακα ανάλυσης / περιοχή μελέτης	Θεματική	Συμπέρασμα
	Χρησιμότητα αποτελεσμάτων	Κατάδειξη «επικίνδυνων» («Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας) τμημάτων που χρήζουν λεπτομερέστερης μελέτης.
Λεπτομερέστερη κλίμακα / λεκάνη απορροής ποταμού Σελινούντα	Αιτιολογικοί παράγοντες	- Παράγοντας με σημαντική επίδραση στο φαινόμενο: - Γωνία κλίσης
		- Κατηγορίες παραγόντων με σημαντική επίδραση στο φαινόμενο: - Μεγάλη γωνία κλίσης - Μικρή απόσταση από τα τεκτονικά στοιχεία - Υψηλή πυκνότητα ρεμάτων - Υψηλή χειμαρρική ισχύ
	Αποτελέσματα επιδεκτικότητας	Επίδραση της μεθόδου ταξινόμησης στα τελικά αποτελέσματα των μοντέλων.
		Επιδεκτικές εκτάσεις («Πολύ Υψηλής» και «Υψηλής», αντιστοίχως, επιδεκτικότητας) κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης για τις μεθόδους των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων», αντιστοίχως.
		Μεγάλη μη επιδεκτική έκταση («Χαμηλής» επιδεκτικότητας) για την μέθοδο της «τυπικής απόκλισης».
	Αποτελέσματα επικύρωσης	- Υψηλότερα ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων για τις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας από τα μοντέλα: - LSI και WoE για τις μεθόδους ταξινόμησης των «φυσικών ορίων» και των «ίσων διαστημάτων» (λόγω υπερεκτίμησης). - ANN και ANFIS για την μέθοδο ταξινόμησης της «τυπικής απόκλισης» (λόγω υπερεκτίμησης).
		Καλή (από αθροιστικά ποσοστά) έως πολύ καλή (από ανάλυση ROC) απόδοση για την πλειοψηφία των μοντέλων.
		- Βέλτιστη επιλογή ο συνδυασμός μοντέλου WoE και μεθόδου ταξινόμησης «τυπικής απόκλισης»: - Πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης (τις υψηλότερες τιμές AUC). - Πολύ καλή ακρίβεια. - Πολύ καλή προσαρμογή στα δεδομένα.

Πίνακας 9.1: (Συνέχεια).

Κλίμακα ανάλυσης / περιοχή μελέτης	Θεματική	Συμπέρασμα
	Αποτελέσματα χωρικής μη-στασιμότητας	Εμφάνιση χωρικής μη-στασιμότητας και σπουδαιότητας στις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων και της εκδήλωσης του φαινομένου.
		Επιβεβαίωση της εξέτασης των επιλεγμένων παραγόντων, ακόμα και για τους παράγοντες με τους μικρότερους συντελεστές βαρύτητας.
		Καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα του τοπικού μοντέλου έναντι του καθολικού.
	Αποτέλεσμα τρωτότητας	Μέγιστη τιμή: 0,6 (ελαφρώς υψηλή τρωτότητα)
		Τμήματα περιοχής μελέτης / «στοιχεία σε επικινδυνότητα» με υψηλή γενική τρωτότητα και χαμηλή επιδεκτικότητα, ή το αντίστροφο.
	Χρησιμότητα αποτελεσμάτων	- Βοήθημα για τις αρμόδιες αρχές, και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και σχεδιασμού: - Στο «σχεδιασμό του χώρου». - Στον προσδιορισμό των κοινωνικο-οικονομικών στοιχείων που βρίσκονται σε κίνδυνο. - Στην μετέπειτα εκτίμηση της επικινδυνότητας (risk) σε εκδήλωση κατολίσθησης.
Σύγκριση κλιμάκων / λεκάνη απορροής ποταμού Σελινούντα (κοινή περιοχή)	Αποτελέσματα επιδεκτικότητας	- Και στις δύο κλίμακες: - Μη επιδεκτικό τμήμα: βόρεια παράκτια ζώνη. - Επιδεκτικό τμήμα: κεντρική ορεινή ζώνη, με θύλακες στην υπόλοιπη περιοχή.
		«Υποβάθμιση» των αποτελεσμάτων της περιφερειακής (υπερεκτιμημένα) στη λεπτομερέστερη κλίμακα.
	Αποτελέσματα επικύρωσης	Υψηλότερα ποσοστά κατολισθητικών δεδομένων για τις κατηγορίες «Υψηλής» και «Πολύ Υψηλής» επιδεκτικότητας στην περιφερειακή κλίμακα (λόγω υπερεκτίμησης).
		- Αισθητή βελτίωση στην απόδοση των ποσοτικών μοντέλων λόγω της μεταβολής της κλίμακας ανάλυσης (ή βελτίωσης της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων). - Μοντέλα στη λεπτομερέστερη κλίμακα: - Πολύ καλή ικανότητα πρόβλεψης. - Πολύ καλή ακρίβεια.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού – ΓΥΣ (1978) *“Χάρτης Γενικής Χρήσεως της Ελλάδας 1:250.000 – φύλλα Πάτραι, Χαλκίς, Αθήναι και Καλαμάτα”*
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού – ΓΥΣ (1989) *“Χάρτης Γενικής Χρήσεως της Ελλάδας 1:50.000 – φύλλα Ευηνοχώρι, Ναύπακτος, Αμυγδαλέα, Πάτρα, Χαλανδρίτσα, Αίγιο, Δερβένι, Ξυλόκαστρο, Περαχώρα, Κερτέζι, Δάφνη, Κανδήλα, Νεμέα, Κόρινθος, Σοφικό, Τρίπολη, Ναύπλιο και Αυγουριό”*
- Γεωργόπουλος, Ι.Ο., Βαρδουλάκης, Ι. (2001) “Μελέτη της κατολίσθησης της Μαλακάσας της 18-02-1995 μέσω Μηχανισμών Αστοχίας Κινηματικής Αλυσίδας εκ Στερεών Σωμάτων”, *4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα
- Γκαζέτας, Γ., Καβουνίδης, Σ., Ρόζος, Δ., Τσιαμπάος, Γ. (2010) *“Πόρισμα επιτροπής εμπειρογνομόνων για τις καταπτώσεις στα Τέμπη”*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων/Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (2012) *“Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Βόρειας Πελοποννήσου”*, Αθήνα
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών – ΙΓΜΕ (1993) *“Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας 1:50.000 – φύλλα Ευηνοχώρι, Ναύπακτος, Αμυγδαλέα, Πάτρα, Χαλανδρίτσα, Αίγιο, Δερβένι, Ξυλόκαστρο, Περαχώρα, Κερτέζι, Δάφνη, Κανδήλα, Νεμέα, Κόρινθος, Σοφικό, Τρίπολη, Ναύπλιο και Αυγουριό”*
- Καβουνίδης Σ., Ντουνιάς Γ., Μπαρδάνης Μ. (2005) “Χαράσσοντας οδούς μέσα από κατολισθήσεις”, *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005
- Καραμπερίδου, Χ., Βαφειάδης, Μ., Κατσιφάρακης, Κ. (2008) “Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων”, *Τεχνικά Χρονικά – Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ*, 2, 25–32
- Κοτοπούλη, Μ., Ψιλοβίκος, Α., Γκισάκης, Ν., Σαπουντζής, Μ., Δήμος, Γ. (2009) “Προσομοίωση χρονοσειράς μηνιαίου ύψους βροχής του βροχομετρικού σταθμού

- Νεστορίου Καστοριάς με τη χρήση ανατροφοδοτούμενου (recurrent) μοντέλου νευρωνικών δικτύων”, *Υδροτεχνικά*, 18, 49–64
- Λαλιώτη, Β., Σπανού, Ν. (2001) “Καταγραφή, ανάλυση και αξιολόγηση των κατολισθητικών φαινομένων στον ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 1991-1998”, διδακτορική διατριβή, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- Μάκρας, Κ., Ροβίθης, Ε. (2015) “Αστοχίες τεχνητών πρανών-επιχωμάτων και τοίχων αντιστήριξης από σεισμούς στα Ιόνια νησιά. Επιπτώσεις στο οδικό δίκτυο”, *Ημερίδα “Κατολισθητικά φαινόμενα: Εκδήλωση - Παρακολούθηση - Αντιμετώπιση”*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας/Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, 7 Δεκεμβρίου 2015, Θεσσαλονίκη
- Μοντεσάντου, Β. (1999) “Σημειώσεις λιμνολογίας: ποτάμια υδροσυστήματα”, Τμήμα Βιολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Ντουνιάς Γ., Φίκιρης Ι., Κολλιός Α., Καββαδάς Μ., Μαρίνος Π. (2006α) “Η Κατολίσθηση της Νεμέας. Μηχανισμός Αστοχίας – Μέτρα Σταθεροποίησης”, *5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη
- Ντουνιάς, Γ., Μπελόκας, Γ., Μαρίνος, Π., Καββαδάς, Μ., (2006β) “Η μεγάλη κατολίσθηση της Τσακώνας στην Ε.Ο. Τρίπολης – Καλαμάτας”, *5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη
- Ρόζος, Δ., Αποστολίδης, Ε. (2004) “Τεχνικογεωλογική διερεύνηση των αστοχιών πρανών στο Παλαιό Μικρό Χωριό Νομού Ευρυτανίας για την ασφαλή οικιστική ανάπτυξη του”, *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, XXXVI, 1806–1815
- Σαλαχώρης, Μ. (2008) “Εφαρμογές Καταγραφής και Διαχείρισης Γης (Κτηματολόγιο, Σύστημα Αναγνώρισης Αγροτεμαχίων LPIS)”, *GIS Forum 2008*, Αθήνα
- Σωτηρόπουλος, Λ., Λυμπέρης, Ε., Σιγάλας, Α., Ντουρούπη, Α., Προβιά, Κ., Ντουνιάς, Γ., (2004) “Κατολίσθηση στην περιοχή Τσακώνας Ν. Αρκαδίας. Γεωλογικές συνθήκες και μηχανισμός ενεργοποίησης”, *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, XXXVI, 1862–1871

- Τσαγκάς, Δ. (2011) “Γεωμορφολογικές παρατηρήσεις και κινήσεις βαρύτητας στη Βόρεια Πελοπόννησο”, διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Φερεντίνου, Μ., Χαλκιάς, Χ. (2012) “Προκαταρκτική ανάλυση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθήσεων με βάση τη χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας – Εφαρμογή σε περιφερειακή κλίμακα”, *Γεωγραφίες*, 19, 41–58
- Χαλκιάς, Χ. (2007) “Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών I (Συμπληρωματικές Σημειώσεις)”, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα
- Χαραλάμπους, Σ., Σακελλαρίου, Μ., (2005) “Εκτίμηση της ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρανών σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Έμφαση σε έργα Οδοποιίας”, *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*, Βόλος

Διεθνής βιβλιογραφία

- Abraham, A. (2005) “Artificial Neural Networks”, pp. 901–908, In: Sydenham, P.H., Thorn, R. (eds.) “*Handbook of Measuring System Design*”, John Wiley and Sons, Chichester, UK
- Abuzied, S.M., Alrefaee, H.A. (2018) “Spatial prediction of landslide-susceptible zones in El-Qaá area, Egypt, using an integrated approach based on GIS statistical analysis”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (in press)
- Ada, M., San, B.T. (2018) “Comparison of machine-learning techniques for landslide susceptibility mapping using two-level random sampling (2LRS) in Alakir catchment area, Antalya, Turkey”, *Natural Hazards*, 90, 237–263
- Aditian, A., Kubota, T., Shinohara, Y. (2018) “Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia”, *Geomorphology*, 318, 101–111
- Akgun, A. (2012) “A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: A case study at İzmir, Turkey”, *Landslides*, 9(1), 93–106

- Akgun, A., Sezer, E.A., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Pradhan, B. (2012) “An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm”, *Computers and Geosciences*, 38, 23–34
- Alkeveli, T., Ercanoglu, M. (2011) “Assessment of ASTER satellite images in landslide inventory mapping: Yenice-Gökçe-bey (Western Black Sea Region, Turkey)”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 607–617
- Althuwaynee, O.F., Pradhan, B., Park, H.-J., Lee, J.H. (2014) “A novel ensemble decision tree-based CHi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping”, *Landslides*, 11(6), 1063–1078
- AON Benfield Inc. (2017) “*Global Catastrophe Recap*”
- Atkinson, P.M., Massari, R. (1998) “Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy”, *Computers and Geosciences*, 24, 373–385
- Avtar, R., Singh, C.K., Singh, G., Verma, R.L., Mukherjee, S., Sawada, H. (2011) “Landslide susceptibility zonation study using remote sensing and GIS technology in the Ken-Betwa River Link area, India”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 595–606
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005) “The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains Central Japan”, *Geomorphology*, 65, 15–31
- Baeza, C., Corominas, J. (2001) “Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251–1263
- Baeza, C., Lantada, N., Moya, J. (2010) “Validation and evaluation of two multivariate statistical models for predictive shallow landslide susceptibility mapping of the Eastern Pyrenees (Spain)”, *Environmental Earth Sciences*, 61, 507–523
- Bakpo, F.S., Kabari, L.G. (2011) “Diagnosing Skin Diseases Using an Artificial Neural Network”, pp. 253–270, In: Suzuki, K. (ed.) “*Artificial Neural Networks – Methodological Advances and Biomedical Applications*”, InTech, Rijeka, Croatia

- Barella, C.F., Sobreira, F.G., Zêzere, J.L. (2018) “A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (in press)
- Basheer, I.A., Hajmeer, M. (2000) “Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application”, *Journal of Microbiological Methods*, 43, 3–31
- Basu, T., Pal, S. (2018) “Identification of landslide susceptibility zones in Gish River basin, West Bengal, India”, *Georisk*, 12, 14–28
- Bathrellos, G.D., Kalivas, D.P., Skilodimou, H.D. (2009) “GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece”, *Estudios Geológicos*, 65(1), 49–65
- Behling, R. (2017) “*Landslide and Debris Flow Detection - Mocoa, Colombia*”, GFZ Potsdam
- Bell, J.M. (1968) “General slope stability analysis”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 94, 1253–1270
- Bhandary, N.P., Dahal, R.K., Timilsina, M., Yatabe, R. (2013) “Rainfall event-based landslide susceptibility zonation mapping”, *Natural Hazards*, 69, 365–388
- Bianchini, S., Solari, L., Casagli, N. (2017) “A GIS-Based Procedure for Landslide Intensity Evaluation and Specific Risk Analysis Supported by Persistent Scatterers Interferometry (PSI)”, *Remote Sensing*, 9(11):1093
- Bianconi, A., Von Zuben, C.J., Serapião, A.B.S., Govone, J.S. (2010) “Artificial neural networks: A novel approach to analyzing the nutritional ecology of a blowfly species, *Chrysomya megacephala*”, *Journal of Insect Science*, 10:58
- Bijukchhen, S.M., Kayastha, P., Dhital, M.R. (2013) “A comparative evaluation of heuristic and bivariate statistical modelling for landslide susceptibility mappings in Ghurmi–Dhad Khola, east Nepal”, *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 2727–2743
- Bonham-Carter, G.F. (1994) “*Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*”, Pergamon Press, Canada
- Booth, A.M., Roering, J.J., Perron, J.T. (2009) “Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon”, *Geomorphology*, 109, 132–147

- Borghuis, A.M., Chang, K., Lee, H.Y. (2007) “Comparison between automated and manual mapping of typhoon-triggered landslides from SPOT-5 imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 28, 1843–1856
- Bortoloti, F.D., Castro Junior, R.M., Araújo, L.C., de Moraes, M.G.B. (2015) “Preliminary landslide susceptibility zonation using GIS-based fuzzy logic in Vitória, Brazil”, *Environmental Earth Sciences*, 74, 2125–2141
- Brabb, E.E. (1984) “Innovative approaches to landslide hazard mapping”, In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, Canada, 1, 307–324
- Brunsden, D. (1993) “Mass movements; the research frontier and beyond: a geomorphological approach”, *Geomorphology*, 7, 85–128
- Brunsdon, C., Fotheringham, A.S., Charlton, M. (1996) “Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity”, *Geographical Analysis*, 28(4), 281–298
- Buragohain, M., Mahanta, C. (2008) “A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design”, *Applied Soft Computing*, 8, 609–625
- Burrough, P.A. (1983) “Multi-scale Sources of Spatial Variation in Soil”, *Journal of Soil Science*, 34, 577–620
- Burrough, P.A., Mc Donnell, R.A. (1998) *“Principles of Geographical Information Systems”*, University Press, Oxford
- Caliusco, M.L., Stegmayer, G. (2010) “Semantic Web Technologies and Artificial Neural Networks for Intelligent Web Knowledge Source Discovery”, *Emergent Web Intelligence: Advanced Semantic Technologies, Part of the series Advanced Information and Knowledge Processing*, 17–36
- Calvella, M., Peduto, D., Arena, L. (2017) “Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides”, *Landslides*, 14, 473–489
- Cama, M., Conoscenti, C., Lombardo, L., Rotigliano, E. (2016) “Exploring relationships between grid cell size and accuracy for debris-flow susceptibility models: A test in the Giampileri catchment (Sicily, Italy)”, *Environmental Earth Sciences*, 75:238

- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., Salvati, P. (2002) “A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, central Italy”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 57–72
- 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, 427–445
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, R., Reichenbach, P. (1999) “Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard”, *Natural Hazards*, 20, 117–135
- Cascini, L. (2008) “Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales”, *Engineering Geology*, 102, 164–177
- Cascini, L., Peduto, D., Pisciotta, G., Arena, L., Ferlisi, S., Fornaro, G. (2013) “The combination of DInSAR and facility damage data for the updating of slow-moving landslide inventory maps at medium scale”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1527–1549
- Castellanos Abella, E.A., Van Westen, C.J. (2007) “Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation”, *Landslides*, 4, 311–325
- Castellanos Abella, E.A., Van Westen, C.J. (2008) “Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba”, *Geomorphology*, 94, 453–466
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2015) “*The human cost of weather related disasters 1995-2015*”, Université Catholique de Louvain, Brussels, p. 30
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2016) “*Poverty and Death: Disaster mortality 1996-2015*”, Université Catholique de Louvain, Brussels, p. 20
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2016b) “*CRED CRUNCH 45 – 2016 preliminary data: Human impact of natural disasters*”, Université Catholique de Louvain, Brussels, p. 2

- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2017) “*CRED CRUNCH 48 – Disaster Data: A Balanced Perspective*”, Université Catholique de Louvain, Brussels, p. 2
- Chacon, J., Irigaray, J., Fernandez, T., El Hamdouni, R. (2006) “Engineering geology maps: landslides and geographical information systems”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341–411
- Chalkias, C., Papadopoulos, A.G., Kalogeropoulos, K., Tambalis, K., Psarra, G., Sidossis, L. (2013) “Geographical heterogeneity of the relationship between childhood obesity and socio-environmental status: Empirical evidence from Athens, Greece”, *Applied Geography*, 37, 34–43
- Chalkias, C., Ferentinou, M., Polykretis, C. (2014a) “GIS supported landslide susceptibility modeling at regional scale: An expert-based fuzzy weighting method”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3, 523–539
- Chalkias, C., Ferentinou, M., Polykretis, C. (2014b) “GIS-based landslide susceptibility mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece”, *Geosciences*, 4, 176–190
- Chalkias, C., Kalogirou, S., Ferentinou, M. (2014c) “Landslide susceptibility, Peloponnese Peninsula in South Greece”, *Journal of Maps*, 10(2), 211–222
- Chalkias, C., Polykretis, c., Ferentinou, M., Karymbalis, E. (2016) “Integrating Expert Knowledge with Statistical Analysis for Landslide Susceptibility Assessment at Regional Scale”, *Geosciences*, 6(1):14
- Champati ray, P.K., Chatteraj, S.L. (2014) “Sunkoshi landslide in Nepal and its possible impact in India: A remote sensing based appraisal”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-8, 1345–1351
- Che, V.B., Kervyn, M., Suh, C.E., Fontijn, K., Ernst, G.G.J., del Marmol, M.-A., Trefois, P., Jacobs, P. (2012) “Landslide susceptibility assessment in Limbe (SW Cameroon): A field calibrated seed cell and information value method”, *Catena*, 92, 83–98
- Chen, C.-H., Ke, C.-C., Wang, C.-L. (2009) “A back-propagation network for the assessment of susceptibility to rock slope failure in the eastern portion of the Southern Cross-Island Highway in Taiwan”, *Environmental Geology*, 57, 723–733

- Chen, Y., Yu, J., Khan, S. (2010) “Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation”, *Environmental Modelling and Software*, 25(12), 1582–1591
- Chen, X., Chen, H., You, Y., Liu, J. (2015a) “Susceptibility assessment of debris flows using the analytic hierarchy process method – A case study in Subao river valley, China”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 404–410
- Chen, T., Niu, R., Du, B., Wang, Y. (2015b) “Landslide spatial susceptibility mapping by using GIS and remote sensing techniques: a case study in Zigui County, the Three Georges reservoir, China”, *Environmental Earth Sciences*, 73, 5571–5583
- Chen, W., Pourghasemi, H.R., Naghibi, S.A. (2018a) “A comparative study of landslide susceptibility maps produced using support vector machine with different kernel functions and entropy data mining models in China”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 647–664
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., Shahabi, H. (2018b) “Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling”, *Science of the Total Environment*, 644, 1006–1018
- Chen, W., Xie, X., Peng, J., Shahabi, H., Hongd, H., Tien Bui, D., Duan, Z., Li, S., Zhud, A-X. (2018c) “GIS-based landslide susceptibility evaluation using a novel hybrid integration approach of bivariate statistical based random forest method”, *Catena*, 164, 135–149
- Chiu, S.L. (1994) “Fuzzy model identification based on cluster estimation”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2, 267–278
- Choi, J., Oh, H.-J., Lee, H.-J., Lee, C., Lee, S. (2012) “Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS”, *Engineering Geology*, 124, 12–23
- Chowdhury, R., Flentje, P. (2003) “Role of slope reliability analysis in landslide risk management”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 41–46
- Chuan, T., Jing, Z., Jingtao, L. (2009) “Emergency assessment of seismic landslide susceptibility: a case study of the 2008 Wenchuan earthquake affected area”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8, 207–217

- Chung, C.F., Fabbri, A.G. (1999) “Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(12), 1389–1399
- Coates, D.R. (1977) “Landslide prospective”, pp. 3–38, In: Coates, D.R. (ed.) “*Landslides*”, Geological Society of America, Boulder, Colorado
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., Sdao, F. (2014) “Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy)”, *Catena*, 113, 236–250
- Cooper, R.G. (2007) “*Mass Movements in Great Britain*”, Geological Conservation Review Series, No. 33, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, 1–30
- Costanzo, D., Cappadonia, C., Conoscenti, C., Rotigliano, E. (2012) “Exporting a Google EarthTM aided earth-flow susceptibility model: a test in central Sicily”, *Natural Hazards*, 61, 103–114
- Crozier, M.J. (1973) “Techniques for the morphometric analysis of landslips”, *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 17(1), 78–101
- Cruden, D.M. (1991) “A simple definition of a landslide”, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology (IAEG)*, 43(1), 27–29
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996) “Landslide types and processes”, pp. 36–75, In: Turner, A.K., Shuster, R.L. (eds.) “*Landslides: Investigation and Mitigation*”, Transportation Research Board Special Report 247, Washington
- Dagdelenler, G., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C. (2016) “Modification of seed cell sampling strategy for landslide susceptibility mapping: an application from the Eastern part of the Gallipoli Peninsula (Canakkale, Turkey)”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 575–590
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., Nishino, K. (2008) “GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping”, *Environmental Geology*, 54, 311–324
- Dahal, R.K., Bhandary, N.P., Hasegawa, S., Yatabe, R. (2014) “Topo-stress based probabilistic model for shallow landslide susceptibility zonation in the Nepal Himalaya”, *Environmental Earth Sciences*, 71, 3879–3892

- Dai, F.C., Lee, C.F. (2002) “Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong”, *Geomorphology*, 42, 213–228
- Das, H.O., Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. (2013) “Influence of seismic acceleration on landslide susceptibility maps: a case study from NE Turkey (the Kelkit Valley)”, *Landslides*, 10, 433–454
- De Guidi, G., Scudero, S. (2013) “Landslide susceptibility assessment in the Peloritani Mts. (Sicily, Italy) and clues for tectonic control of relief processes”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 949–963
- Deketh, H.J.R., Rengers, N. (1997) “The Role of Engineering Geology in Natural Hazard Reduction for Sustainable Development”, *International Symposium of the IAEG*, Balkema, Rotterdam
- Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., Casagli, N. (2014) “Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238–246
- Demir, G., Aytekin, M., Akgün, A., Ikizler, S.B., Tatar, O. (2013) “A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood frequency ratio and analytic hierarchy process methods”, *Natural Hazards*, 65(3), 1481–1506
- Demir, G., (2018) “Landslide susceptibility mapping by using statistical analysis in the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) on the northern part of Suşehri Town, Turkey”, *Natural Hazards*, 92, 133–154
- Demoulin, A., Beckers, A., Hubert-Ferrari, A. (2015) “Patterns of Quaternary uplift of the Corinth rift southern border (N. Peloponnese, Greece) revealed by fluvial landscape morphometry”, *Geomorphology*, 246, 188–204
- Deng, Y.C., Tsai, F., Hwang, J.H. (2016) “Landslide characteristics in the area of Xiaolin Village during Morakot typhoon”, *Arabian Journal of Geosciences*, 9:332
- Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R., Althuwaynee, O.F. (2013) “Landslide susceptibility mapping using certainty

- factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya”, *Natural Hazards*, 65, 135–165
- Doo, W.-B., Hsu, S.-K., Chen, C.-C., Hsieh, H.-H., Yen, H.-Y., Chen, Y.-G., Chang, W.-Y. (2011) “Magnetic signature of Siaolin Village, southern Taiwan, after burial by a catastrophic landslide due to Typhoon Morakot”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 759–764
- Du, S., Wang, Q., Guo, L. (2014) “Spatially varying relationships between land-cover change and driving factors at multiple sampling scales”, *Journal of Environmental Management*, 137, 101–110
- Eidsvig, U.M.K., McLean, A., Vangelsten, B.V., Kalsnes, B., Ciurean, R.L., Argyroudis, S., Winter, M.G., Mavrouli, O.C., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Baills, A., Malet, J.-P., Kaiser, G. (2014) “Assessment of socioeconomic vulnerability to landslides using an indicator-based approach: methodology and case studies”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 307–324
- Einstein, H.H. (1998) “Special lecture: Landslide risk assessment procedure”, pp. 1075–1090, In: Bonnard, C. (ed.) “*Landslides*”, Balkema Publisher, Rotterdam
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C. (2002) “Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach”, *Environmental Geology*, 41, 720–730
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C. (2004) “Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)”, *Engineering Geology*, 75, 229–250
- Erener, A., Düzgün, H.S.B. (2010) “Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway)”, *Landslides*, 7(1), 55–68
- Ering, P., Kulkarni, R., Kolekar, Y., Dasaka, S.M., Babu, G.L.S. (2015) “Forensic Analysis of Malin Landslide in India”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 26: 012040, International Symposium on Geohazards and Geomechanics

- European Environmental Agency – EEA (1995) “*CORINE land cover*”, Copenhagen, Denmark
- Evans, S.G., Guthrie, R.H., Roberts, N.J., Bishop, N.F. (2007) “The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 89–101
- Fatemi Aghda, S.M., Bagheri, V., Razifard, M. (2018) “Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic System and Its Influences on Mainlines in Lashgarak Region, Tehran, Iran”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 915–937
- Fawcett, T. (2006) “An introduction to ROC analysis”, *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874
- Feizizadeh, B., Blaschke, T. (2014) “An uncertainty and sensitivity analysis approach for GIS-based multicriteria landslide susceptibility mapping”, *International Journal of Geographical Information Science*, 28(3), 610–638
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008) “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning”, *Engineering Geology*, 102, 85–98
- Feuillet, T., Coquin, J., Mercier, D., Cossart, E., Decaulne, A., Páll Jónsson, H., Sæmundsson, Þ. (2014) “Focusing on the spatial non-stationarity of landslide predisposing factors in northern Iceland: Do paraglacial factors vary over space?”, *Progress in Physical Geography*, 1–24
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A.C., Santurri, L., Ardizzone, F., Guzzetti, F. (2011) “Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images”, *Geomorphology*, 129, 59–70
- Fotheringham, A.S., Charlton, M.E., Brunson, C., (2001) “Spatial variations in school performance: a local analysis using geographically weighted regression”, *Geographical and Environmental Modelling*, 5, 43–66
- Fotheringham, A.S., Brunson, C., Charlton, M. (2002) “*Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*”, John Wiley and Sons, Chichester, UK

- Gao, J., Maroa, J. (2010) “Topographic controls on evolution of shallow landslides in pastoral Wairarapa, New Zealand, 1979–2003”, *Geomorphology*, 114 (3), 373–381
- García-Rodríguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Díaz, M. (2008) “Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression”, *Geomorphology*, 95, 172–191
- Garson, G.D. (1991) “Interpreting neural network connection weights”, *AI expert*, 6, 47–51
- Gemitzi, A., Falalakis, G., Eskioglou, P., Petalas, C., (2011) “Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS”, *Global Nest Journal*, 13(1), 28–40
- Glade, T. (2003) “Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand”, *Catena*, 51(3–4), 297–314
- Goodman, R.E., Bray, J.W. (1976) “Toppling of Rock Slopes”, In: *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, American Society of Civil Engineers, Boulder, Colorado, 2, 201–234
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B. (2000) “Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS”, *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop*, Denver, Colorado, USA
- Gorsevski, P.V., Brown, M.K., Panter, K., Onasch, C.M., Simic, A., Snyder, J. (2016) “Landslide detection and susceptibility mapping using LiDAR and an artificial neural network approach: a case study in the Cuyahoga Valley National Park, Ohio”, *Landslides*, 13(3), 467–484
- Grodecki, J., Dial, G. (2001) “IKONOS geometric accuracy”, In: *Proceedings of Joint Workshop of ISPRS Working Group I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001*, University of Hannover, Hannover, Germany
- Guo, C., Montgomery, D.R., Zhang, Y., Wang, K., Yang, Z. (2015) “Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China”, *Geomorphology*, 248, 93–110

- Guri, P.K., Champati ray, P.K., Patel, R.C. (2015) “Spatial prediction of landslide susceptibility in parts of Garhwal Himalaya, India, using the weight of evidence modelling”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187:324
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.-T. (2012) “Landslide inventory maps: New tools for an old problem”, *Earth-Science Reviews*, 112, 42–66
- Hapudeniya, M.M. (2010) “Artificial Neural Networks in Bioinformatics”, *Sri Lanka Journal of Bio-Medical Informatics*, 1(2), 104–111
- He, Y., Beighley, R.E. (2008) “GIS-based regional landslide susceptibility mapping: A case study in southern California”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 380–393
- He, S., Pan, P., Dai, L., Wang, H., Liu, J. (2012) “Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China”, *Geomorphology*, 171–172, 30–41
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008) “*The landslide handbook—A guide to understanding landslides*”, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Circular 1325, p. 129
- Hong, H., Liu, J., Tien Bui, D., Pradhan, B., Acharya, T.D., Pham, B.T., Zhu, A.-X., Chen, W., Ahmad, B.B. (2018) “Landslide susceptibility mapping using J48 Decision Tree with AdaBoost, Bagging and Rotation Forest ensembles in the Guangchang area (China)”, *Catena*, 163, 399–413
- Huang, Y.-P., Hsu, C.-C., Wang, S.-H. (2007) “Pattern recognition in time series database: A case study on financial database”, *Expert Systems with Applications*, 33, 199–205
- Huang, J., Huang, Y., Pontius Jr., R.G., Zhang, Z. (2015) “Geographically weighted regression to measure spatial variations in correlations between water pollution versus land use in a coastal watershed”, *Ocean and Coastal Management*, 103, 14–24
- Hutchinson, J.N. (1968) “Mass movement”, pp. 688–695, In: Fairbridge, R.W. (ed.) “*Encyclopedia of Geomorphology*”, Reinhold, New York
- Hutchinson, J.N. (1988) “General Report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology”, pp. 3–36, In: Bonnard, C. (ed.) “*Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides*”, Balkema, Rotterdam

- Ilia, I., Tsangaratos, P. (2016) “Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map”, *Landslides*, 13(2), 379–397
- Intarawichian, N., Dasananda, S. (2011) “Frequency ratio model based landslide susceptibility mapping in lower Mae Chaem watershed, Northern Thailand”, *Environmental Earth Sciences*, 64, 2271–2285
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2014) “*Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”, Cambridge University Press, Cambridge and New York, United Kingdom and USA
- International Association for Engineering Geology and the Environment – IAEG (1990) “Suggested Nomenclature for Landslides”, *Bulletin IAEG*, 41, 13–16
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies – IFRC (2015) “*Emergency Plan of Action (EPoA) Guatemala: Landslide*”
- Jang, J.S.R. (1993) “ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, 665–685
- Jebur, M.N., Pradhan, B., Tehrany, M.S. (2015) “Using ALOS PALSAR derived high-resolution DInSAR to detect slow-moving landslides in tropical forest: Cameron Highlands, Malaysia”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6, 741–759
- Jenks, G.F. (1967) “The data model concept in statistical mapping”, *International Yearbook of Cartography*, 7, 186–190
- Jimenez-Peralvarez, J.D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., and Chacon, J. (2009) “Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS”, *Natural Hazards*, 50, 571–590
- Kanwal, S., Atif, S., Shafiq, M. (2017) “GIS based landslide susceptibility mapping of northern areas of Pakistan, a case study of Shigar and Shyok Basins”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 348–366
- Kapageridis, I. (2002) “Artificial Neural Network Technology in Mining and Environmental Applications”, In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Mine Planning*

- and Equipment Selection (MPES)*, VŠB – Technical University of Ostrava, Prague, 172–179
- Karim, Z., Hadji, R., Hamed, Y. (2018) “GIS-Based Approaches for the Landslide Susceptibility Prediction in Setif Region (NE Algeria)”, *Geotechnical and Geological Engineering* (in press)
- Karlik, B., Olgac, A. V. (2010) “Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks”, *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 1(4), 111–122
- Karymbalis, E., Gaki-Papanastassiou, K. (2011) “Investigation of relationships between fan delta and drainage basin morphometric variables along the southwestern coast of Gulf of Corinth, Northern Peloponnesus, Greece”, pp. 87–106, In: Efe, R., Cravins, G., Ozturk, M., Atalay, I. (eds.) “*Natural environment and culture in the Mediterranean region II*”, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne
- Karymbalis, E., Ferentinou, M., Giles, P.T. (2016) “Use of morphometric variables and self-organizing maps to identify clusters of alluvial fans and catchments in the north Peloponnese, Greece”, In: Ventra, D., Clarke, L.E. (eds.) “*Geology and geomorphology of alluvial and fluvial fans: terrestrial and planetary perspectives*”, Geological Society of London, Special Publications 440
- Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., Fujisawa, K. (2009) “LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan”, *Geomorphology*, 113, 57–69
- Kavzoglu, T., Sahin, E.K., Colkesen, I. (2014) “Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression”, *Landslides*, 11, 425–439
- Kavzoglu, T., Sahin, E.K., Colkesen, I. (2015) “An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district”, *Natural Hazards*, 76, 471–496
- Kayastha, P. (2015) “Landslide susceptibility mapping and factor effect analysis using frequency ratio in a catchment scale: a case study from Garuwa sub-basin, East Nepal”, *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 8601–8613

- Kayastha, P., Bijukchhen, S.M., Dhital, M.R., De Smedt, F. (2013a) “GIS based landslide susceptibility mapping using a fuzzy logic approach: A case study from Ghurmi-Dhad Khola area, eastern Nepal”, *Journal of the Geological Society of India*, 82, 249–261
- Kayastha, P., Dhital, M.R., De Smedt, F. (2013b) “Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal”, *Computers and Geosciences*, 52, 398–408
- Korup, O., Stolle, A., (2014) “Landslide prediction from machine learning”, *Geology Today*, 30(1), 26–33
- Koukis, G., Sabatakakis, N., Nikolaou, N., Loupasakis, C. (2005) “Landslide hazard zonation in Greece”, pp. 291–296. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G. (eds.) “*Landslides: Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*”, Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides, Springer-Verlag, Berlin
- Koukis, G., Sabatakakis, N., Ferentinou, M., Lainas, S., Alexiadou, X., Panagopoulos, A. (2009) “Landslide phenomena related to major fault tectonics: rift zone of Corinth Gulf, Greece”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 215–229
- Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., Rozos, D., Vallianatos, F. (2014) “Landslide susceptibility mapping by comparing the WLC and WofE multi-criteria methods in the West Crete Island, Greece”, *Environmental Earth Sciences*, 72(12), 5197–5219
- Krenker A., Bešter, J., Kos, A. (2011) “Introduction to the Artificial Neural Networks”, pp. 3–18, In: Suzuki, K. (ed.) “*Artificial Neural Networks – Methodological Advances and Biomedical Applications*”, InTech, Rijeka, Croatia
- Kundu, S., Saha, A.K., Sharma, D.C., Pant, C.C. (2013) “Remote Sensing and GIS Based Landslide Susceptibility Assessment using Binary Logistic Regression Model: A Case Study in the Ganeshganga Watershed, Himalayas”, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(3), 697–709
- Lacroix, P., Zavala, B., Berthier, E., Audin, L. (2013) “Supervised method of landslide inventory using panchromatic SPOT5 images and application to the earthquake-triggered landslides of Pisco (Peru, 2007, Mw8.0)”, *Remote Sensing*, 5, 2590–2616

- Lee, E.M., Jones, D.K.C. (2004) “*Landslide Risk Assessment*”, Thomas Telford, London, UK
- Lee, S., Lee, M.J. (2006) “Detecting landslide location using KOMPSAT 1 and its application to landslide-susceptibility mapping at the Gangneung area, Korea”, *Advances in Space Research*, 38, 2261–2271
- Lekkas, D.F., Onof, C., Lee, M.J., and Baltas, E.A. (2004) “Application of artificial neural networks for flood forecasting”, *Global Nest: the International Journal*, 6, 205–211
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., Lacasse, S. (2010) “Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards”, *Landslides*, 7, 125–134
- Listo, F.D.L.R., Carvalho Vieira, B. (2012) “Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of Sao Paulo, Brazil”, *Geomorphology*, 169–170, 30–44
- Lucas, A., Mangeney, A., Ampuero, J.P. (2014) “Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies”, *Nature Communications*, 5:3417
- Magliulo, P., Lisio, A., Russo, F., Zelano, A. (2008) “Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: A case study in southern Italy”, *Natural Hazards*, 47, 411–435
- Mahdadi, F., Boumezbeur, A., Hadji, R., Kanungo, D.P., Zahri, F. (2018) “GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, N-E Algeria”, *Arabian Journal of Geosciences*, 11:476
- Malczewski, J. (1999) “*GIS and Multicriteria Decision Analysis*”, John Wiley and Sons, New York, USA
- Mallick, J., Singh, R.K., AlAwadh, M.A., Islam, S., Khan, R.A., Qureshi, M.N. (2018) “GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia”, *Environmental Earth Sciences*, 77:276
- Mandal, B., Mandal, S. (2018) “Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India”, *Advances in Space Research* (in press)
- Mantovani, F., Soeters, R., Van Westen, C.J. (1996) “Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe”, *Geomorphology*, 15, 213–225

- McCulloch, W.S., Pitts, W. (1943) “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115–133
- Mejía-Navarro, M., Wohl, E.E., Oaks, S.D. (1994) “Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado”, *Geomorphology*, 10, 331–354
- Menard, S.W. (2001) “*Applied logistic regression analysis: second edition*”, SAGE University Papers Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, no. 07-106, SAGE Publications, Thousand Oaks, USA
- Meng, Q., Miao, F., Zhen, J., Wang, X., Wang, A., Peng, Y., Fan, Q. (2016) “GIS-based landslide susceptibility mapping with logistic regression, analytical hierarchy process, and combined fuzzy and support vector machine methods: a case study from Wolong Giant Panda Natural Reserve, China”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(3), 923–944
- Meten, M., Bhandary, N.P., Yatabe, R. (2015) “Application of GIS-based fuzzy logic and rock engineering system (RES) approaches for landslide susceptibility mapping in Selelkula area of the Lower Jema River Gorge, Central Ethiopia”, *Environmental Earth Sciences*, 74, 3395–3416
- Mihalic, S. (1998) “Recommendations for Landslide Hazard and Risk Mapping in Croatia”, *Geologia Croatica*, 51(2), 195–204
- Moayed, H., Mehrabi, M., Mosallanezhad, M., Rashid, A.S.A., Pradhan, B. (2018) “Modification of landslide susceptibility mapping using optimized PSO-ANN technique”, *Engineering with Computers* (in press)
- Mondal, S., Mandal, S. (2018) “RS & GIS-based landslide susceptibility mapping of the Balason River basin, Darjeeling Himalaya, using logistic regression (LR) model”, *Georisk*, 12, 29–44
- Mondini, A.C., Chang, K.T., Yin, H.Y. (2011a) “Combining multiple change detection indices for mapping landslides triggered by typhoons”, *Geomorphology*, 134(3–4), 440–451

- Mondini, A.C., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Rossi, M., Cardinali, M., Ardizzone, F. (2011b) “Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using satellite optical images”, *Remote Sensing of Environment*, 115, 1743–1757
- Montrasio, L., Valentino, R., Losi, G.L. (2011) “Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1927–1947
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. (1991) “Digital terrain modeling — a review of hydrological, geomorphological, and biological applications”, *Hydrological Processes*, 5, 3–30
- Moosavi, V., Niazi, Y. (2016) “Development of hybrid wavelet packet-statistical models (WP-SM) for landslide susceptibility mapping”, *Landslides*, 13(1), 97–114
- Mousavi, S.Z., Kavian, A., Soleimani, K., Mousavi, S.R., Shirzadi, A. (2011) “GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2(1), 33–50
- Nakaya, T., Charlton, M., Lewis, P., Brundson, C., Yao, J., Fotheringham, S. (2014) “GWR4. *Windows Application for Geographically Weighted Regression Modelling*”, Department of Geography – Ritsumeikan University, NCG – National University of Ireland, School of Geography and Geosciences – University of St. Andrews
- National Environment Management Authority – NEMA (2010) “*Landslides in Bududa District, their causes and consequences*”, Kampala, Uganda
- Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. (2008) “An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps”, *Engineering Geology*, 97, 171–191
- Neuhäuser, B., Terhorst, B. (2007) “Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany)”, *Geomorphology*, 86, 12–24
- Nichol, E.J., Shaker, A., Wong, M.-S. (2006) “Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment”, *Geomorphology*, 76, 68–75

- Oh, H.-J., Lee, S., Soedradjat, G.M. (2010) “Quantitative landslide susceptibility mapping at Pemalang area, Indonesia”, *Environmental Earth Sciences*, 60, 1317–1328
- Oh, H.-J., Lee, S. (2011a) “Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea”, *Environmental Earth Sciences*, 64, 395–409
- Oh, H.-J., Lee, S. (2011b) “Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system”, *Environmental Earth Sciences*, 62, 935–951
- Oh, H.-J., Pradhan, B. (2011) “Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area”, *Computers and Geosciences*, 37, 1264–1276
- Ohlmacher, G.C., Davis, J.C. (2003) “Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA”, *Engineering Geology*, 69(3–4), 331–343
- Osna, T., Sezer, E.A., Akgun, A. (2014) “GeoFIS: an integrated tool for the assessment of landslide susceptibility”, *Computers and Geosciences*, 66, 20–30
- Othman, A.A., Gloaguen, R., Andreani, L., Rahnema, M. (2015) “Landslide susceptibility mapping in Mawat area, Kurdistan Region, NE Iraq: a comparison of different statistical models”, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3, 1789–1833
- Ozdemir, A. (2009) “Landslide susceptibility mapping of vicinity of Yaka Landslide (Gelendost, Turkey) using conditional probability approach in GIS”, *Environmental Geology*, 57, 1675–1686
- Palamakumbure, D., Flentje, P., Stirling, D. (2015) “Consideration of optimal pixel resolution in deriving landslide susceptibility zoning within the Sydney Basin, New South Wales, Australia”, *Computers and Geosciences*, 82, 13–22
- Pandey, V.K., Sharma, M.C. (2017) “Probabilistic landslide susceptibility mapping along Tipri to Ghuttu highway corridor, Garhwal Himalaya (India)”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 1–11
- Papa, F., Ferrando, M. (2012) “Landslides Monitoring Along Distributed Transportation Infrastructures”, *15th Edition of the Euro Working Group on Transportation, International Scientific Conference*, Paris

- Papathanassiou, G., Valkaniotis, S., Ganas, A., Pavlides, S. (2013) “GIS-based statistical analysis of the spatial distribution of earthquake-induced landslides in the island of Lefkada, Ionian Islands, Greece”, *Landslides*, 10(6), 771–783
- Papathanassiou, G., Vakaniotis, S., Ganas, A., Grendas, N., Kollia, E. (2016) “The November 17th, 2015 Lefkada (Greece) strike-slip earthquake: Field mapping of generated failures and assessment of macroseismic intensity ESI-07”, *Engineering Geology*, 220, 13–30
- Parcharidis, I., Lekkas, E., Foumelis, M., Segou, M., (2005) “Implication of secondary geodynamic phenomena on co-seismic interferometric coherence”, *Proceedings of FRINGE '05*, European Space Agency, Special Publication SP-610, p. 6
- Pareek, N., Sharma, M.L., Arora, M.K., Pal, S. (2013) “Inclusion of earthquake strong ground motion in a geographic information system-based landslide susceptibility zonation in Garhwal Himalayas”, *Natural Hazards*, 65, 739–765
- Park, H.J., Lee, J.H., Woo, I. (2013) “Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach”, *Engineering Geology*, 161, 1–15
- Pérez, F.L. (2001) “Matrix granulometry of catastrophic debris flows (December 1999) in central coastal Venezuela”, *Catena*, 45, 163–183
- Perrou, T., Kaza, I., Efthymiadis, V., Karymbalis, E., Chalkias, C. (2013) “Recent coastline changes of fan-deltas in the western Gulf of Corinth, Central Greece”, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XLVII, 315–324
- Piacentini, D., Devoto, S., Mantovani, M., Pasuto, A., Prampolini, M., Soldati, M. (2015) “Landslide susceptibility modeling assisted by Persistent Scatterers Interferometry (PSI): an example from the northwestern coast of Malta”, *Natural Hazards*, 78, 681–697
- Poiraud, A. (2014) “Landslide susceptibility–certainty mapping by a multi-method approach: A case study in the Tertiary basin of Puy-en-Velay (Massif central, France)”, *Geomorphology*, 216, 208–224
- Polykretis, C., Ferentinou, M., Chalkias, C. (2015) “A comparative study of landslide susceptibility mapping using landslide susceptibility index and artificial neural networks

- in the Krios River and Krathis River catchments (northern Peloponnesus, Greece)”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 27–45
- Popescu, M.E. (2002) “Landslide causal factors and landslide remedial options”, In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infrastructures*, Singapore, 61–81
- Posner, A.J., Georgakakos, K.P. (2015) “Normalized Landslide Index Method for susceptibility map development in El Salvador”, *Natural Hazards*, 79(3), 1825–1845
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., Moradi, H.R. (2013) “Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran”, *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 2351–2365
- Powell, G. (2000) “Landslide risk management concepts and guidelines”, *Australian Geomechanics Society*, 35, 49–52
- Pradhan, B., Lee, S., Buchroithner, M.F. (2010) “A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 216–235
- Pradhan, A.M.S., Kim, Y.-T. (2014) “Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: a case study in Deokjeok-ri Creek, South Korea”, *Natural Hazards*, 72, 1189–1217
- Pradhan, A.M.S., Kim, Y.-T. (2015) “Application and comparison of shallow landslide susceptibility models in weathered granite soil under extreme rainfall events”, *Environmental Earth Sciences*, 73, 5761–5771
- Pradhan, A.M.S., Kim, Y.-T. (2018) “GIS-based landslide susceptibility model considering effective contributing area for drainage time”, *Geocarto International*, 33(8), 810–829
- Rabonza, M.L., Felix, R.P., Lagmay, A.M.F.A., Eco, R.N.C., Ortiz, I.J.G., Aquino, D.T. (2015) “Shallow landslide susceptibility mapping using high-resolution topography for areas devastated by super typhoon Haiyan”, *Landslides*, 13(1), 201–210
- Ramesh, V., Phaomei, T., Baskar, M., Anbazhagan, S. (2016) “Application of fuzzy gamma operator in landslide susceptibility mapping along Yercaud Ghat Road section, Tamil

- Nadu, India”, pp. 545–553, In: Janardhana Raju, N. (ed.) “*Geostatistical and geospatial approaches for the characterization of natural resources in the environment*”, Capital Publishing Company, Springer International Publishing, Switzerland
- Razak, K.A., Straatsma, M.W., van Westen, C.J., Malet, J.-P., de Jong, S.M. (2011) “Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization”, *Geomorphology*, 126, 186–200
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., Vitek, J.D. (2010a) “Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes”, *Geomorphology*, 122, 25–38
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., Vitek, J.D. (2010b) “Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA”, *Geomorphology*, 115, 172–187
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A.C., Rossi, M. (2014) “The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy)”, *Environmental Management*, 54(6), 1372–1384
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. (2003) “Landslide susceptibility models utilizing spatial data analysis techniques. A case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain)”, *Natural Hazards*, 30, 267–279
- Remondo, J., Bonachea, J., Cendrero, A. (2008) “Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences”, *Geomorphology*, 94, 496–507
- Ren, D. (2014) “The devastating Zhouqu storm-triggered debris flow of August 2010: Likely causes and possible trends in a future warming climate”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 3643–3662
- Romer, C., Ferentinou, M. (2016) “Shallow landslide susceptibility assessment in a semiarid environment — A Quaternary catchment of KwaZulu-Natal, South Africa”, *Engineering Geology*, 201, 29–44
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani, F., Casagli, N. (2018) “The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution”, *Landslides*, 15, 5–19

- Rozos, D., Bathrellos, D.G., Skilodimou, D.H. (2010) “Landslide susceptibility mapping of the northeastern part of Achaia prefecture using analytical hierarchical process and GIS techniques”, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 48(3), 1637–1646
- Rozos, D., Bathrellos, G.D., Skilodimou, H.D. (2011) “Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: A case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece”, *Environmental Earth Sciences*, 63(1), 49–63
- Saaty, T.L. (1980) “*The Analytic Hierarchy Process*”, McGraw-Hill, New York, USA
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Mourtas, D. (2005) “Composite landslides induced by heavy rainfalls in suburban areas: City of Patras and surrounding area, western Greece”, *Landslides*, 2, 202–211
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E., Lainas, S. (2013) “Landslide susceptibility zonation in Greece”, *Natural Hazards*, 65(1), 523–543
- Sakkas, G., Misailidis, I., Sakellariou, N., Kouskouna, V., Kaviris, G. (2016) “Modeling landslide susceptibility in Greece: a weighted linear combination approach using analytic hierarchical process, validated with spatial and statistical analysis”, *Natural Hazards*, 84, 1873–1904
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Kasama, K. (2017) “Comparing data-driven landslide susceptibility models based on participatory landslide inventory mapping in Purwosari area, Yogyakarta, Java”, *Environmental Earth Sciences*, 76:184
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., de Paz, A., Marturia, J. (2003) “A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees Spain)”, *Natural Hazards*, 30(3), 281–295
- Santangelo, M., Cardinali, M., Rossi, M., Mondini, A.C., Guzzetti, F. (2010) “Remote landslide mapping using a laser rangefinder binocular and GPS”, *Natural Hazards and Earth System Science*, 10, 2539–2546
- Sarkar, S., Roy, A.K., Martha, T.R. (2013) “Landslide Susceptibility Assessment using Information Value Method in Parts of the Darjeeling Himalayas”, *Journal Geological Society of India*, 82, 351–362

- Sassa, K., Tsuchiya, S., Fukuoka, H., Mikos, M., Doan, L. (2015) “Landslides: review of achievements in the second 5-year period (2009–2013)”, *Landslides*, 12, 213–223
- Sato, H.P., Harp, E.L. (2009) “Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7.9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China, using satellite imagery and Google Earth”, *Landslides*, 6, 153–159
- Savvaidis, P.D. (2003) “*Existing Landslide Monitoring Systems and Techniques*”, School of Rural and Surveying Engineering, The Aristotle University of Thessaloniki, 242–258
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., Papini, M. (2014) “Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives”, *Remote Sensing*, 6(10), 9600–9652
- Schicker, R., Moon, V. (2012) “Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale”, *Geomorphology*, 161–162, 40–57
- Schneider, G., Wrede, P. (1998) “Artificial neural networks for computer-based molecular design”, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 70, 175–222
- Schulz, W.H. (2007) “Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington”, *Engineering Geology*, 89, 67–87
- Sdao, F., Lioi, D.S., Pascale, S., Caniani, D., Mancini, I.M. (2013) “Landslide susceptibility assessment by using a neuro-fuzzy model: a case study in the Rupestrian heritage rich area of Matera”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 395–407
- Sezer, E.A., Pradhan, B., Gokceoglu, C. (2011) “Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia”, *Expert Systems with Applications*, 38, 8208–8219
- Shachmurove, Y., Witkowska, D., (2000) “*Utilizing Artificial Neural Network Model to Predict Stock Markets*”, University of Pennsylvania, Center for Analytic Research in Economics and the Social Sciences, 1–25
- Sharpe, C.F.S. (1938) “*Landslides and Related Phenomena*”, Columbia University Press, New York

- Shou, K.-J., Yang, C.-M. (2015) “Predictive analysis of landslide susceptibility under climate change conditions — A study on the Chingshui River Watershed of Taiwan”, *Engineering Geology*, 192, 46–62
- Singhroy, V., Mattar, K.E., Gray, A.L. (1998) “Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images”, *Advances in Space Research*, 21, 465–476
- Sinha, A.K., Havanagi, V.G., Kumar, K. (2015) “Causes and remedial measures of Malin landslide, Maharastra”, *50th Indian Geotechnical Conference*, 17th – 19th December 2015, Pune, Maharashtra, India
- Stanley, T., Kirschbaum, D.B. (2017) A “heuristic approach to global landslide susceptibility mapping”, *Natural Hazards*, 87, 145–164
- Stournaras, G., Tsimpidis, G., Tsoumanis, P., Yannatos, G., Guillande, R. (1998) “Instability phenomena in the Neogene deposits of northern Peloponnese”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, 65–68
- Su, S., Xiao, R., Zhang, Y. (2011) “Multi-scale analysis of spatially varying relationships between agricultural landscape patterns and urbanization using geographically weighted regression”, *Applied Geography*, 32, 360–375
- Su, C., Wang, L., Wang, X., Huang, Z., Zhang, X. (2015) “Mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in Wencheng, China, using support vector machine”, *Natural Hazards*, 76, 1759–1779
- Sugiarti, K., Sukristiyanti, S. (2018) “TRIGRS Application for landslide susceptibility mapping”, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012040
- Sun, Q., Zhang, L., Ding, X., Hu, J., Liang, H. (2015) “Investigation of Slow-Moving Landslides from ALOS/PALSAR Images with TCPInSAR: A Case Study of Oso, USA”, *Remote Sensing*, 7, 72–88
- Sujatha, E.R., Rajamanickam, V., Kumaravel, P., Saranathan, E. (2013) “Landslide susceptibility analysis using probabilistic likelihood ratio model—a geospatial-based study”, *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 429–440

- Sujatha, E.R., Kumaravel, P., Rajamanickam, G.V. (2014) “Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 147–161
- Süzen, M.L., Doyuran, V. (2004) “Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey”, *Engineering Geology*, 71, 303–321
- Takagi, T., Sugeno, M. (1983) “Derivation of fuzzy control rules from human operator’s control actions”, In: *Proceedings of the IFAC symposium on fuzzy information, knowledge representation and decision analysis*, Marseille, France, 55–60
- Tanyaş, H., van Westen, C. J., Allstadt, K. E., Nowicki Jessee, M.A., Görüm, T., Jibson, R. W., Godt, J.W., Sato, H.P., Schmitt, R.G., Marc, O., Hovius, N. (2017) “Presentation and analysis of a worldwide database of earthquake-induced landslide inventories”, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 1991–2015
- Tekin, S., Çan, T. (2018) “Effects of Landslide Sampling Strategies on the Prediction Skill of Landslide Susceptibility Modelings”, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(8), 1273–1283
- Terzaghi, K. (1950) “Mechanism of Landslides”, *Geological Society of America, Engineering Geology* (Berkley) Volume, 83–123
- Tian, Y., Xiao, C., Liu, Y., Wu, L. (2008) “Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: A case study of Shenzhen”, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 51, 188–198
- Tiburan, C.L., Kobayashi, S., Mizuno, K., Saizen, I. (2009) “Developing a spatial-based approach for vulnerability assessment of Philippine watersheds and its potential in disaster management”, *WIT Transactions on The Built Environment*, 110, 21–32
- Tien Bui, T., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O. (2011) “Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression”, *Natural Hazards*, 59, 1413–1444

- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B. (2012) “Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS”, *Computers and Geosciences*, 45, 199–211
- Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., Revhaug, I. (2016) “Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree”, *Landslides*, 13(2), 361–378
- Trgovac, A.B., Kedron, P.J., Bagchi-Sen, S. (2015) “Geographic variation in male suicide rates in the United States”, *Applied Geography*, 62, 201–209
- Tsangaratos, P., Benardos, A. (2014) “Estimating landslide susceptibility through a artificial neural network classifier”, *Natural Hazards*, 74(3), 1489–1516
- Tsangaratos, P., Ilia, I. (2016) “Landslide susceptibility mapping using a modified decision tree classifier in the Xanthi Prefecture, Greece”, *Landslides*, 13(2), 305–320
- Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Nikolakopoulos, K., Angelitsa, V., Ilia, I. (2018) “Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece”, *Environmental Earth Sciences*, 77:363
- Tu, J. (2013) “Spatial Variations in the Relationships between Land Use and Water Quality across an Urbanization Gradient in the Watersheds of Northern Georgia, USA”, *Environmental Management*, 51, 1–17
- UNESCO Working Party on World Landslide Inventory – WP/WLI (1993) “A suggested method for describing the activity of a landslide”, *Bulletin IAEG*, 47, 53–57
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., Kaynia, A.M. (2008) “A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides”, *Engineering Geology*, 102, 251–256
- Valkaniotis, S., Ganas, A., Papathanassiou, G., Papanikolaou, M. (2014) “Field observations of geological effects triggered by the January–February 2014 Cephalonia (Ionian Sea, Greece) earthquakes”, *Tectonophysics*, 630, 150–157
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghe, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L. (2006) “Prediction of landslide susceptibility using rare events

- logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium)", *Geomorphology*, 76, 392–410
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J. (2012) "State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing susceptibility, hazard and risk", *Geomorphology*, 139–140, 545–558
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., Malet, J.-P., Montanarella, L., Nadim, F. (2012) "Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data", *Landslides*, 9, 357–369
- Van Westen, C.J. (1997) "Statistical landslide hazard analysis", pp. 73–84, In: Van Westen, C.J., López, A.S., Cornejo, P.U., Ardanza, G.C. (eds.) "*ILWIS 2.1 for Windows, Application Guide*", ITC Publication, Enschede, The Netherlands
- Van Westen, C.J. (2000) "The modelling of landslide hazards using GIS", *Surveys in Geophysics*, 21(2–3), 241–255
- Van Westen, C.J. (2004) "Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments", In: *Proceedings of the 9th international symposium on landslides*, London: Balkema, 39–56
- Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J., Soeters, R. (2006) "Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult?", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184
- Van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L. (2008) "Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview", *Engineering Geology*, 102, 112–131
- Varnes, D.J. (1958) "Landslide types and processes", pp. 20–47, In: Eckel, E.B. (ed.) "*Landslides and Engineering Practice*", Highway Research Board Special Report 29, NAS-NRC Publication 544, Washington, D.C.
- Varnes, D.J. (1978) "Slope movement types and processes", pp. 11–33, In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.) "*Landslides: Analysis and Control*", Transportation Research Board Special Report 176, Washington

- Varnes, D.J. (1984) “*Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice (Natural hazards)*”, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization – UNESCO, Paris, France
- Vergari, F., Della Seta, M., Del Monte, M., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. (2011) “Landslide susceptibility assessment in the Upper Orcia Valley (Southern Tuscany, Italy) through conditional analysis: a contribution to the unbiased selection of causal factors”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1475–1497
- Vieira, B.C., Fernandes, N.F., Filho, O.A., Martins, T.D., Montgomery, D.R. (2018) “Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil”, *Environmental Earth Sciences*, 77:260
- Wang, W.D., Xie, C.M., Du, X.G. (2009) “Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, GuiZhou, south-west China”, *Environmental Geology*, 58, 33–43
- Wang, L.-J., Guo, M., Sawada, K., Lina, J., Zhang, J. (2015) “Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: A comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models”, *Catena*, 135, 271–282
- Wang, J., Wang, H.-J., Hong, Y. (2016a) “Comparison of satellite-estimated and model-forecasted rainfall data during a deadly debris-flow event in Zhouqu, Northwest China”, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(2), 139–145
- Wang, L.-J., Guo, M., Sawada, K., Lin, J., Zhang, J. (2016b) “A comparative study of landslide susceptibility maps using logistic regression, frequency ratio, decision tree, weights of evidence and artificial neural network”, *Geosciences Journal*, 20(1), 117–136
- Wold, R.L., Jochim, C.L. (1989) “*Landslide Loss Reduction: A Guide for State and Local Government Planning*”, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA, 182, p. 50
- Wong, H.N., Ho, K.K.S., Chan, Y.C. (1997) “Assessment of consequences of landslides”, pp. 111–149, In: Cruden, D.M., Fell, R. (eds.) “*Landslide Risk Assessment*”, Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii, USA, 19–21 February 1997

- World Bank Group (2017) “*Sierra Leone: Rapid damage and loss assessment of August 14th, 2017 landslides and floods in the Western Area*”, Washington DC, USA
- Wu, H., Song, T. (2018) “An evaluation of landslide susceptibility using probability statistic modeling and GIS's spatial clustering analysis”, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(7), 1952–1968
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Wu, Z., He, H., Shi, F., Wu, X., Xu, S. (2013) “Application of an incomplete landslide inventory, logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping related to the May 12, 2008 Wenchuan earthquake of China”, *Natural Hazards*, 68, 883–900
- Yalcin, A. (2008) “GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations”, *Catena*, 72, 1–12
- Yang, Z.H., Lan, H.X., Gao, X., Li, L.P., Meng, Y.S., Wu, Y.M. (2015) “Urgent landslide susceptibility assessment in the 2013 Lushan earthquake-impacted area, Sichuan Province, China”, *Natural Hazards*, 75, 2467–2487
- Yilmaz, I. (2010) “The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks”, *Environmental Earth Sciences*, 60, 505–519
- Youssef, A.M. (2015) “Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, using analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models”, *Environmental Earth Sciences*, 73, 8499–8518
- Youssef, A.M., Al-Kathery, M., Pradhan, B. (2015a) “Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher Area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models”, *Geosciences Journal*, 19(1), 113–134
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., El-Haddad, B.A., Dhahry, B.K. (2015b) “Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 63–87

- Youssef, A.M., Pradhan, B., Jebur, M.N., El-Harbi, H.M. (2015c) “Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia”, *Environmental Earth Sciences*, 73(7), 3745–3761
- Zadeh, L.A. (1965) “Fuzzy sets”, *Information and Control*, 8, 338–353
- Zaruba, Q., Mencl, V. (1969) “*Landslides and Their Control*”, 1st edition, Elsevier: Amsterdam
- Zelilidis, A. (2000) “Drainage evolution in a rifted basin, Corinth graben, Greece”, *Geomorphology*, 35, 69–85
- Zhang, J., Gurung, D.R., Liu, R., Murthy, M.S.R., Su, F. (2015) “Abe Barek landslide and landslide susceptibility assessment in Badakhshan Province, Afghanistan”, *Landslides*, 12, 597–609
- Zhao, C., Chen, W., Wang, Q., Wu, Y., Yang, B. (2015) “A comparative study of statistical index and certainty factor models in landslide susceptibility mapping: a case study for the Shangzhou District, Shaanxi Province, China”, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9079–9088
- Zhou, C., Lee, C., Li, J., Xu, Z. (2002) “On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong”, *Geomorphology*, 43, 197–207
- Zhou, C., Yin, K., Cao, Y., Ahmed, B., Li, Y., Catani, F., Pourghasemi, H.R. (2018) “Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China”, *Computers and Geosciences*, 112, 23–37
- Zhu, A.X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T. (2014) “An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic”, *Geomorphology*, 214, 128–138
- Zygouri, V., Koukouvelas, I.K. (2018) “Landslides and natural dams in the Krathis River, north Peloponnese, Greece”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1–16

Διαδικτυακοί τόποι – Websites

Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, πρόληψη-αντιμετώπιση κατολισθήσεων: <http://civilprotection.gr/el/κατολισθήσεις-καθιζήσεις> (20/12/2017)

- Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, κατάλογος σεισμικών γεγονότων: <http://www.gein.noa.gr/el/seismikotita/katalogoi-seismwn> (14/01/2018)
- Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, δεδομένα σεισμικών γεγονότων: <http://www.gein.noa.gr/el/seismikotita/xartes> (22/06/2018)
- Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε., δεδομένα “CORINE 2012”: <https://www.ktimatologio.gr/forestmaps/Pages/xrasis-gis.aspx> (09/05/2016)
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία – ΕΜΥ, δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών: http://www.hnms.gr/hnms/greek/Paroxi/paroxi_meteorologika11 (14/01/2018)
- Ελληνικό Κτηματολόγιο, υπηρεσία θέασης ορθοφωτογραφιών: <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx> (10/01/2018)
- Ειδησιογραφικός διαδικτυακός τόπος “CNN Greece”, κατολίσθηση ορυχείου Αμυνταίου: <http://www.cnn.gr/news/ellada/story/84413/amyntaio-allaxe-o-xartis-meta-tin-katolisthisi-anagkastiki-apallotriosi-oikismoy-pics-vid> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός διαδικτυακός τόπος “Iefimerida”, κατολίσθηση Κλεισούρας: <http://www.iefimerida.gr/news/380243/sto-eleos-tis-kakokairias-aitoloakarnania-kai-ipeiros-megales-katastrofes-eikones-vinteo> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός διαδικτυακός τόπος “Npress”, κατολίσθηση Κλεπά: <https://www.npress.gr/nafpaktia/katolisthisi-tis-klepa-apotelesmata-ke-efthynes/> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός διαδικτυακός τόπος “Tempo24”, κατολίσθηση Μικρού Χωριού: <http://www.kosmoslarissa.gr/blog/Τέμπη/εξι-εταιρειες-ζητουν-αποζημιωση-για-το-κλεισιμο-του-δρομου-στα-τεμπη-το-2009> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός διαδικτυακός τόπος “Zougla”, κατολίσθηση Μοίρας: <http://www.zougla.gr/greece/article/axaia-se-apognosi-i-apoklismeni-katiki-stou-mira-apo-tin-katolis8isi> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός μπλογκ “Kosmoslarissa”, κατολίσθηση Τεμπών: <http://tempo24.news/eidisi/114360/i-pio-katastrofiki-katolisthisi-stin-elliniki-istoria> (24/03/2018)
- Ειδησιογραφικός μπλογκ “Protinews”, κατολίσθηση Λεπρεού: <https://www.protinews.gr/blog/sto-lepreo-entos-ton-imeron-klimakio-toy-igme> (24/03/2018)

- Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ, απογραφή πληθυσμού-κατοικιών 2011: <http://www.statistics.gr/el/statistics/pop> (23/05/2018)
- Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ, διανυσματικό σύνολο δεδομένων δημοτικών-τοπικών κοινοτήτων: <http://www.statistics.gr/digital-cartographical-data> (01/07/2018)
- Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών, διαχειριστικό σύστημα καταγραφής κατολισθήσεων: <http://www.geoarch.gr/> (21/04/2016)
- Νόμος 1739/1987, “Διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις” (ΦΕΚ 201/Α/20-11-1987): [http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/201\(20-11-87\)_1739.pdf](http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/201(20-11-87)_1739.pdf) (23/05/2018)
- British Geological Survey – BGS, national landslide inventory database: <http://www.bgs.ac.uk/geoindex/> (03/04/2018)
- Consiglio Nazionale delle Ricerche/Istituto di Ricerche per la Protezione Idrogeologica – CNR/IRPI, national landslide inventory database: <http://webmap.irpi.cnr.it/> (03/04/2018)
- “Copernicus” Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (30/04/2017)
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED, Emergency Events Database – EM-DAT: https://www.emdat.be/emdat_db/ (03/04/2018)
- National Aeronautics and Space Administration – NASA, global landslide inventory map: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4632> (07/06/2018)
- NASA, landslide on Iapetus: https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia06171.html (24/03/2018)
- NASA, landslide on Moon: https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20110518-landslide.html (24/03/2018)
- NASA – Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, landslide on Ceres: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6820> (24/03/2018)
- NASA – Mars Exploration Program, landslide on Mars: <https://mars.nasa.gov/resources/3313/> (24/03/2018)
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention – NIED, national landslide inventory database: <http://lweb1.ess.bosai.go.jp/en/index.html> (03/04/2018)
- OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/> (22/02/2016)

Research Institute for Geo-Hydrological Protection, Landslides in the Solar System:
<http://www.irpi.cnr.it/en/focus/landslides-in-the-solar-system/> (24/03/2018)

“Russell H. Morgan” Department of Radiology and Radiological Science at “Johns Hopkins”
University School of Medicine (Baltimore, Maryland, USA), ROC Analysis – Web-based
Calculator for ROC Curves: <http://www.rad.jhmi.edu/jeng/javarad/roc/JROCFITi.html>
(09/05/2018)

Typeform: <https://www.typeform.com/> (23/12/2016)

United States Geological Survey – USGS, EarthExplorer: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
(12/11/2015)

Γλωσσάρι

Ελληνική ορολογία

Κατολίσθηση

Μετακίνηση μάζας

Κύρια τομή

Δευτερεύουσα τομή

Κεφαλή

Κορυφή

Στέψη

Κύριο σώμα

Επιφάνεια θραύσης

Επιφάνεια αποκόλλησης

Πόδι

Δάκτυλο

Δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης

Αιχμή

Ζώνη βύθισης

Ζώνη διόγκωσης

Πτερύγιο

Μετατοπισμένο υλικό

Αρχική επιφάνεια εδάφους

Πτώση (βράχων/κορημάτων/γαιών)

Ανατροπή (βράχων/κορημάτων/γαιών)

Ολίσθηση (βράχων/κορημάτων/γαιών)

Μεταθετική ολίσθηση

Περιστροφική ολίσθηση

Πλευρική επέκταση (βράχων/κορημάτων/γαιών)

Ροή (βράχων/κορημάτων/γαιών)

Διεθνής ορολογία

Landslide

Mass movement

Main scarp

Minor scarp

Head

Top

Crown

Main body

Surface of rupture

Surface of separation

Foot

Toe

Toe of surface of rupture

Tip

Depletion zone

Accumulation zone

Flank

Displaced material

Original ground surface

(Rock/Debris/Earth) Fall

(Rock/Debris/Earth) Topple

(Rock/Debris/Earth) Slide

Translational slide

Rotational slide

(Rock/Debris/Earth) Lateral spread

(Rock/Debris/Earth) Flow

Ερπυσμός	Creep
Σύνθετη	Complex
Ενεργή	Active
Ανασταλμένη	Suspended
Επανεργοποιημένη	Reactivated
Ανενεργή	Inactive
Σε ύπνωση	Dormant
Εγκαταλειμμένη	Abandoned
Σταθεροποιημένη	Stabilized
Παλαιά-απολιθωμένη	Relict
Προωθούμενη	Advancing
Οπισθοδρομούσα	Retrogressive
Μεγεθυνόμενη	Enlarging
Απομειούμενη	Diminishing
Περιορισμένη	Confined
Κινούμενη	Moving
Διευρυνόμενη	Widening
Διαδοχική	Successive
Απλή	Single
Πολλαπλή	Multiple
Αιτιολογικοί παράγοντες	Causal factors
Παράγοντες ενεργοποίησης	Triggering factors
Φράγμα κατολίσθησης	Landslide dam
Αναγνώριση κατολισθήσεων	Landslide recognition
Παρακολούθηση κατολισθήσεων	Landslide monitoring
Χαρτογράφηση κατολισθήσεων	Landslide mapping
Επιδεκτικότητα κατολισθήσεων	Landslide susceptibility
Κίνδυνος κατολισθήσεων	Landslide hazard
Τρωτότητα κατολισθήσεων	Landslide vulnerability

Επικινδυνότητα κατολισθήσεων

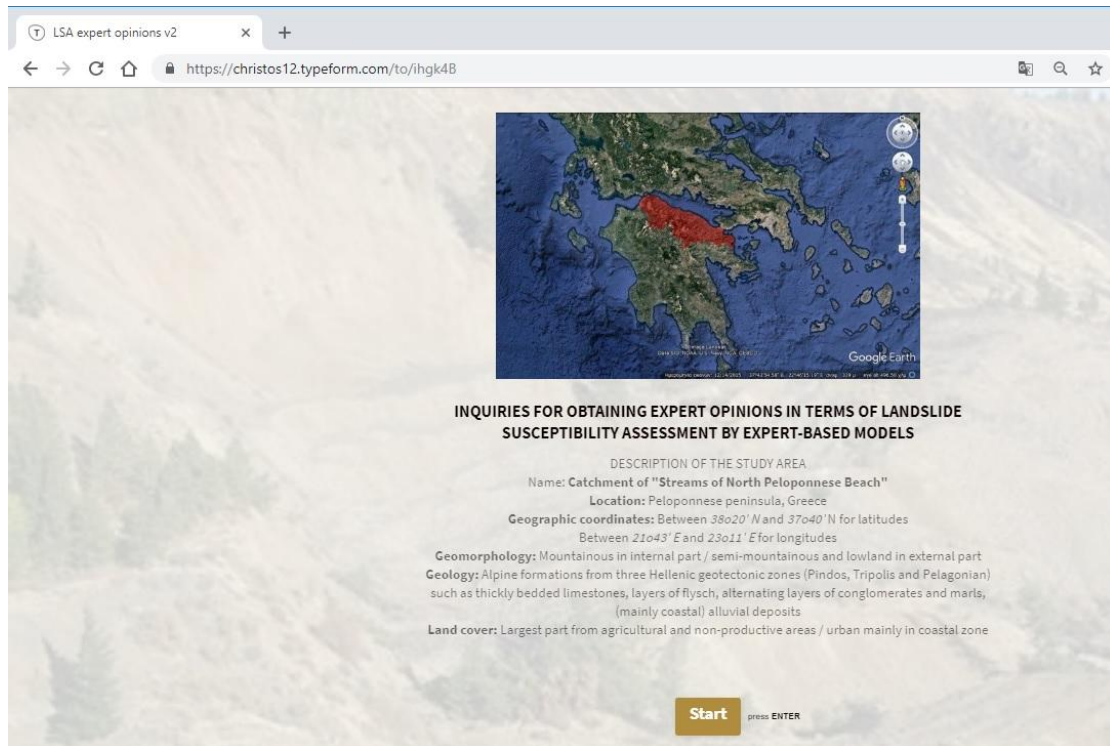
Landslide risk

Στοιχείο σε επικινδυνότητα

Element at risk

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.1: Στιγμιότυπα διαδικτυακού ερωτηματολογίου “Typeform” για την εφαρμογή των ποιοτικών μοντέλων ανάλυσης (<https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B>).



LSA expert opinions v2

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

INQUIRIES FOR OBTAINING EXPERT OPINIONS IN TERMS OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT BY EXPERT-BASED MODELS

DESCRIPTION OF THE STUDY AREA

Name: Catchment of "Streams of North Peloponnese Beach"

Location: Peloponnese peninsula, Greece

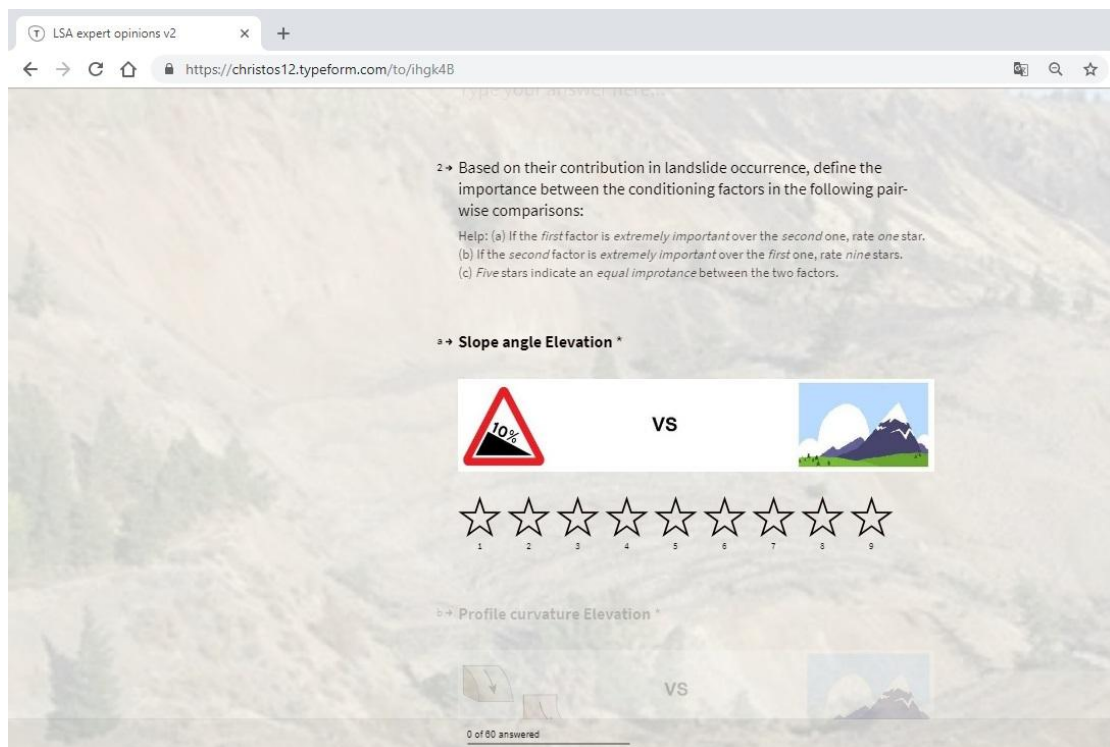
Geographic coordinates: Between 38°20' N and 37°40' N for latitudes
Between 21°43' E and 23°11' E for longitudes

Geomorphology: Mountainous in internal part / semi-mountainous and lowland in external part

Geology: Alpine formations from three Hellenic geotectonic zones (Pindos, Tripolis and Pelagonian) such as thickly bedded limestones, layers of flysch, alternating layers of conglomerates and marls, (mainly coastal) alluvial deposits

Land cover: Largest part from agricultural and non-productive areas / urban mainly in coastal zone

Start press ENTER



LSA expert opinions v2

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

2 → Based on their contribution in landslide occurrence, define the importance between the conditioning factors in the following pair-wise comparisons:

Help: (a) If the first factor is extremely important over the second one, rate one star.
(b) If the second factor is extremely important over the first one, rate nine stars.
(c) Five stars indicate an equal importance between the two factors.

→ **Slope angle Elevation ***

10% VS

1 2 3 4 5 6 7 8 9

→ **Profile curvature Elevation ***

VS

0 of 80 answered

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.1: (Συνέχεια).

LSA expert opinions v2

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

2 → Based on their contribution in landslide occurrence, define the importance bet...

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5 6 7 8 9

→ Vegetation Profile curvature *

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5 6 7 8 9

→ Vegetation Stream density *

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5 6 7 8 9

0 of 80 answered

LSA expert opinions v2

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5 6 7 8 9

3 → Select the level of contribution in landslide occurrence for the following categories of elevation factor:

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5

Very low Moderate Very high

→ Low (277-600 m): *

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1 2 3 4 5

0 of 80 answered

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.1: (Συνέχεια).

LSA expert opinions v2 x +

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

Very long: *

1	2	3	4	5
Very low		Moderate		Very high

Select the level of contribution in landslide occurrence for the following categories of geology factor:



Scree-talus cones: *

1	2	3	4	5
Very low		Moderate		Very high

Recent alluvium deposits: *

0 of 60 answered

LSA expert opinions v2 x +

https://christos12.typeform.com/to/ihgk4B

1	2	3	4	5
Very low		Moderate		Very high

Very dense: *

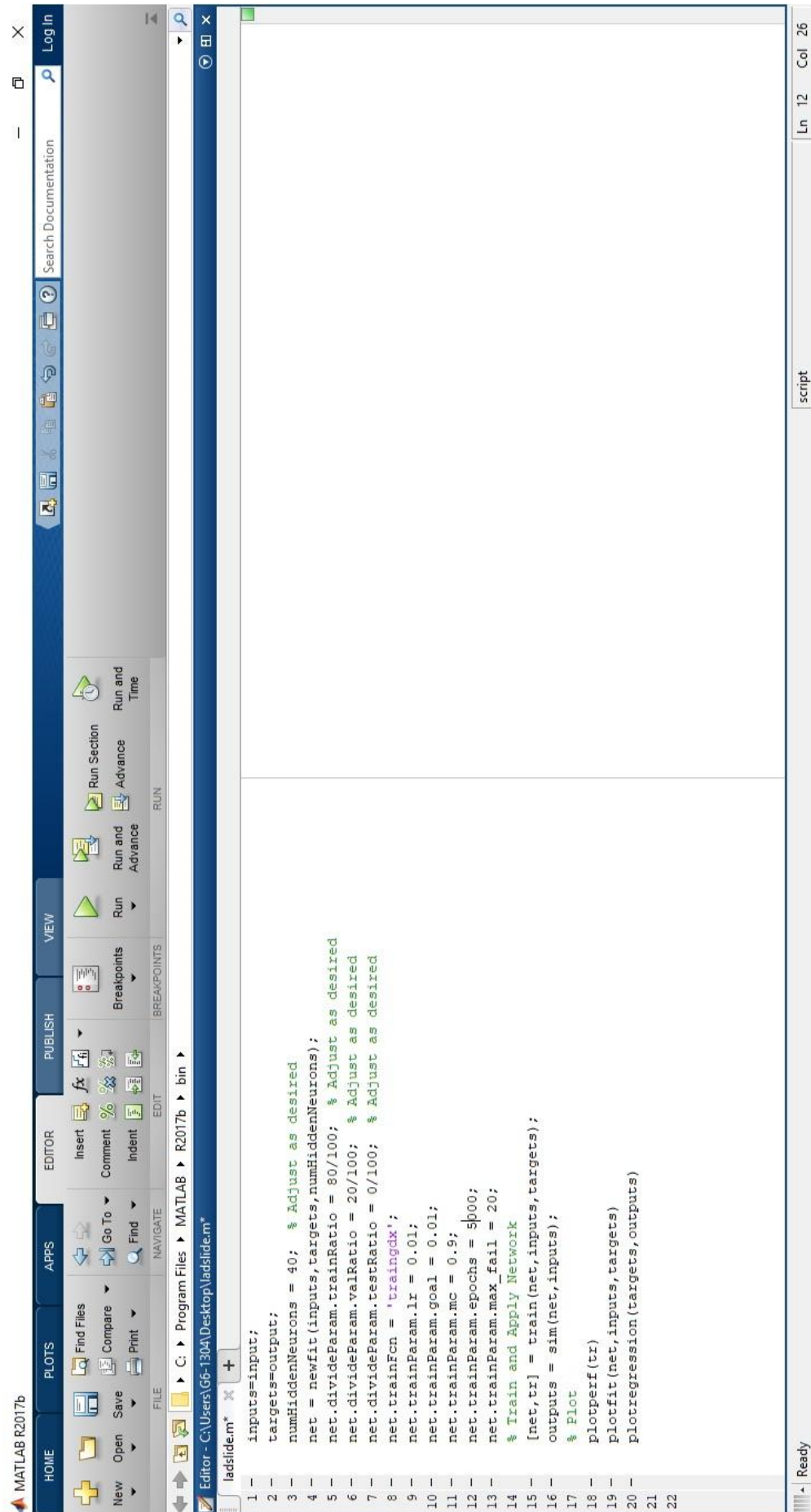
1	2	3	4	5
Very low		Moderate		Very high

Submit press ENTER

Never submit passwords! [Report abuse](#)

0 of 60 answered

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.2: Τμήμα υπολογιστικού κώδικα (script) στο λογισμικό MATLAB (version R2017b).



*«Ακόμα κι αν το κάθε τέλος σ' έχει αφήσει άδειο και εξαντλημένο,
η κάθε αρχή είναι εκεί που εσύ ορίζεις το μηδέν»*

Γιάννης Κουμαριανός

