



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΑΒΟΥΛΑΡΗΣ

Γεωλόγος Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών,
M.Sc. Γενικού Τμήματος Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

ΑΘΗΝΑ, 2017

Νικόλαος Γ. Ταβουλάρης

Γεωλόγος Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών,
M.Sc. Γενικού Τμήματος Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

**ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβλήθηκε στη Σχολή Μηχανικών – Μεταλλείων Μεταλλουργών,
Τομέας Γεωλογικών Επιστημών
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας - Υδρογεωλογίας

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Ιωάννης Κουμαντάκης Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Γεώργιος Κούκης, Ομότιμος Καθηγητής Παν. Πατρών (μέλος συμβουλευτικής επιτροπής)

Δημήτριος Ρόζος, σ. Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (μέλος συμβουλευτικής επιτροπής)

Γεώργιος Τσιαμπάος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Σαμπατακάκης, Καθηγητής Παν. Πατρών

Ανδρέας Μπενάρδος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2017

© Νικόλαος Γ. Ταβουλάρης

© Ε.Μ.Π.

Δρ. Τεχνικός Γεωλόγος Ε.Μ.Π.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα τα οποία αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό, πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

(Ν.5343/1932, Άρθρο 202)



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ Γ. ΤΑΒΟΥΛΑΡΗ

Γεωλόγος Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών,
M.Sc. Γενικού Τμήματος Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Ι. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
2. Γ. ΚΟΥΚΗΣ, Ομ. Καθηγητής Παν/μίου
Πατρών
3. Δ. ΡΟΖΟΣ, σ. Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Ι. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
2. Γ. ΚΟΥΚΗΣ, Ομ. Καθηγητής Παν/μίου
Πατρών
3. Δ. ΡΟΖΟΣ, σ. Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
4. Γ. ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
5. Ν. ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ, Καθηγητής Παν.
Πατρών
6. Α. ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ, Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
7. Κ. ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ, Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2017

Το περιεχόμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί προϊόν πνευματικής προσπάθειας του υποψηφίου. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Η εικόνα του εξώφυλλου είναι από την τοξωτή μεταλλική γέφυρα της Τσακώνας στα όρια των νομών Αρκαδίας και Μεσσηνίας. Είναι η 2η μεγαλύτερη γέφυρα στην Ελλάδα από πλευράς ανοίγματος (μετά τη γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου) και συγκαταλέγεται μεταξύ των μεγαλύτερων τοξωτών γεφυρών παγκοσμίως. Επιλέχθηκε ως λύση για την αντιμετώπιση της μεγάλης κατολίσθησης που έλαβε χώρα τον χειμώνα του 2003. Η πρωτοτυπία και μοναδικότητα του έργου κέντρισε το ενδιαφέρον πολλών Ελληνικών και ξένων τεχνολογικών ιδρυμάτων, τα οποία πραγματοποίησαν εκπαιδευτικές επισκέψεις σε όλα τα στάδια της κατασκευής. Επιπλέον, το έργο έχει αποτελέσει αντικείμενο αναφοράς σε διάφορα τεχνικά συνέδρια και τεχνικά περιοδικά (Πηγή: Ημερίδα Υπουργείου Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων - Η γέφυρα της Τσακώνας- 11^η Μαΐου 2016).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εκτενής περίληψη	1
Extensive Summary.....	14
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	21
Πρόλογος, Αντικείμενο – Στόχος Διδακτορικής Διατριβής	25
1. ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	36
1.1. Γενικά.....	36
1.2. Ταξινόμηση κατά Varnes.....	38
1.2.1. Καταπτώσεις.....	40
1.2.2. Ανατροπές	42
1.2.3. Ολισθήσεις.....	43
1.2.4. Πλευρικές (υποοριζόντιες) εξαπλώσεις.....	49
1.2.5. Ροές.....	51
1.2.6. Μικτές κινήσεις πρανών.....	56
1.2.7. Μερικές πρόσθετες επισημάνσεις.....	58
1.4. επικαιροποίηση της ταξινόμησης κατά Varnes	59
2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΚΡΙΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	61
2.1. Γενικά.....	61
2.2. Περιγραφή των κυριότερων συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας	64
2.2.1. Περιγραφή του γεωλογικού υλικού	64
2.2.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας	67
2.2.2.1. Ταξινόμηση με βάση το RQD.....	68
2.2.2.2. Γεωμηχανική ταξινόμηση κατά Bieniawski (1973-1974, 1979, 1989).....	69
2.2.2.3 Ταξινόμηση Barton et al (Q-System, Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου N.G.I.)....	73
2.2.2.4. Γεωλογικός δείκτης αντοχής (Geological Strength Index, GSI).....	76
2.2.2.5. Τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας για πρανή (Slope Mass Rating, SMR).....	79
2.3. Κριτική ταξινομήσεων	82
2.3.1. Κριτική των μεθόδων Bieniawski – Barton.....	82
2.3.2. Κριτική της ταξινόμησης με βάση το RQD.....	86
2.3.3. Κριτική της ταξινόμησης του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI)	88
2.3.4. Επιπλέον κριτική για ελλείψεις ή ασάφειες που παρατηρούνται σε υφιστάμενα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας και σχετίζονται με την ευρύτερη έννοια της ευστάθειας των πρανών (Hack, 2002).....	91
2.4. Συμπεράσματα για τα συστήματα ταξινόμησης	96

2.5. Περιγραφή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας	100
2.6. Περιγραφή της έννοιας της ασαφούς λογικής.....	103
2.7. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	105
2.7.1 Γενικά	105
2.7.2. Εισαγωγικά στοιχεία	105
2.7.3. Φυσικός και Τεχνητός Νευρώνας.....	106
2.7.4. Οργάνωση νευρώνων σε στρώματα	108
2.7.5. Παράδειγμα εφαρμογής για κατολισθήσεις.....	109
2.8. Οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση της μεθοδολογίας του Rock Engineering System (RES) στην πρόγνωση των κατολισθήσεων.	113
2.8.1 Εισαγωγή.....	113
2.8.2. Συνοπτική επεξήγηση ανάπτυξης της μεθοδολογίας RES για την πρόγνωση των αστοχιών των πρηνών.....	114
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RES	119
3.1 Εισαγωγή.....	119
3.2. Μητρώο αλληλεπίδρασης RES	123
3.2.1. Η φύση του μητρώου και η έννοια της συμμετρίας - ασυμμετρίας	123
3.2.2. Το μέγεθος και η έννοια της ανάλυσης του μητρώου	129
3.3. Άτλαντας μηχανισμών γεωτεχνικής μηχανικής	131
εκσκαφής (Hudson, 1992).	133
3.4. Παράμετροι αλληλεπίδρασης – Ένταση και επικράτηση.....	133
3.4.1. Κωδικοποίηση του μητρώου αλληλεπίδρασης.....	135
3.4.2 Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος	136
3.4.3. Η συμμετρία του μητρώου.....	140
3.4.4 Παρουσίαση του διαγράμματος αιτίου - αποτελέσματος	141
3.5. Παραδείγματα εφαρμογής του μητρώου αλληλεπίδρασης	143
3.6. Ενέργεια και εντροπία.....	149
3.6.1. Κωδικοποίηση του μητρώου αλληλεπίδρασης ενεργειακά	150
3.6.2 Ενεργειακές πηγές και καταβόθρες	151
3.6.3. Διαδρομές ενεργειακών ροών.....	154
3.7. Η εφαρμογή της προσέγγισης του συστήματος RES.....	154
3.7.1. Η στρατηγική.....	154
3.7.2. Η τακτική	157
3.7.3. Μερικά επιπλέον σχόλια για την προτίμηση της μεθοδολογίας RES για την πρόγνωση αστοχιών πρηνών.....	160
4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RES	164
4.1. Εισαγωγή.....	164
4.2. Επιλογή παραμέτρων	164

4.2.1. Ανθρώπινη δραστηριότητα	170
4.2.1.1. Ανθρωπογενής επίδραση στη βλάστηση	172
4.2.1.2. Αστικοποίηση	173
4.2.1.3. Παρεμβάσεις του ανθρώπου με την κατασκευή γραμμικών έργων.....	174
4.2.1.4. Διαφορική θεμελίωση κατασκευών	175
4.2.2. Τεκτονικό καθεστώς.....	176
4.2.3. Μορφολογία.....	179
4.2.3.1. Κλίση πρανών.....	180
4.2.3.2. Προσανατολισμός πρανών	182
4.2.4. Λιθολογία	183
4.2.5.Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	186
4.2.5.1. Χαρακτηριστικά παραδείγματα κατολισθήσεων που συμβαίνουν όταν κύριο αίτιο πρόκλησης είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες	189
4.2.6. Υδρομετεωρολογικές συνθήκες	192
4.2.6.1. Βροχόπτωση.....	192
4.2.6.2. Άνεμος – θερμοκρασία του αέρα	196
4.2.6.3. Εναλλαγές ψύξης – θέρμανσης.....	196
4.2.6.4. Λιώσιμο του χιονιού	197
4.2.7. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	199
4.2.7.1. Ποσοτικός προσδιορισμός του πάχους μανδύα αποσάθρωσης	201
4.2.8. Απόσταση από ποτάμια	202
4.2.9. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	204
4.2.9.1. Επισημάνσεις σχετικές με την έννοια του ενεργού ρήγματος	208
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RES – ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ.....	209
5.1. Εισαγωγή.....	209
5.2. Βαθμονόμηση παραμέτρων	211
5.3. Μερικές επισημάνσεις ως προς τον τρόπο μελέτης και κατανόησης των πινάκων και διαγραμμάτων που συνοδεύουν το μητρώο αλληλεπίδρασης και συνδέονται με τον υπολογιζόμενο δείκτη αστάθειας	213
5.4. Κατολίσθηση Παναγοπούλας, Ν. Αχαΐας	217
5.4.1. Γεωμορφολογία	219
5.4.2. Γεωλογία.....	219
5.4.3. Τεκτονική	221
5.4.4. Σεισμικότητα	222
5.4.5. Υδρογεωλογία.....	223
5.4.6. Μηχανισμός λειτουργίας της κατολίσθησης.....	224
5.5. Κατολίσθηση Μαλακάσας	235
5.5.1. Ιστορικό	235
5.5.2. Γεωλογία της περιοχής.....	236

5.5.3. Αίτια – μηχανισμός της κατολίσθησης – παράγοντες που την προκάλεσαν	238
5.6 Κατολίσθηση στη θέση Τσακώνα, Ν. Αρκαδίας	249
5.6.1. Εισαγωγή.....	249
α) Μορφολογία	252
β) Λιθολογία.....	253
γ) Τεκτονική	255
δ) Υδρογεωλογία.....	259
5.7 Κατολίσθηση στη θέση Χ.Θ. 123+000 (πλησίον της Νεμέας) της Εθνικής Οδού Αθηνών – Κορίνθου – Τρίπολης - Καλαμάτας.....	266
5.8 Συμπεράσματα – Σχολιασμοί από τις αστοχίες που μελετήθηκαν	277
6. ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RES ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ .	280
6.1. Εισαγωγή.....	280
6.2. Κατολισθητική επιδεκτικότητα (landslide susceptibility)	281
6.3. Σχόλια – παρατηρήσεις για τους χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility map)	282
6.4. Επικύρωση (validation) της μεθοδολογίας RES	283
6.5. Η επιλογή της περιοχής του φύλλου Μεγαλόπολη για την εφαρμογή του RES.....	285
6.5.1 Ιστορικό και Πολιτιστικό Περιβάλλον.....	289
6.5.2. Περιγραφή των γεωλογικού καθεστώτος της περιοχής μελέτης.....	291
6.5.2.1. Μορφολογικό ανάγλυφο	291
6.5.2.2. Γεωλογική σύσταση και δομή	291
6.5.2.3. Τεκτονική.....	295
6.5.2.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες	296
6.5.2.5. Υδρομετεωρολογικά στοιχεία.....	298
6.6 Η χρήση των παραμέτρων σε χάρτες με βάση τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	304
6.6.1. Απόσταση από οδικό δίκτυο	305
6.6.2. Τεκτονικό καθεστώς.....	305
6.6.3. Κλίση πρηνών	306
6.6.4. Προσανατολισμός πρηνών	306
6.6.5. Λιθολογία	306
6.6.6. Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	306
6.6.7. Βροχόπτωση	306
6.6.8. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	307
6.6.9. Απόσταση από κοίτες ρεμάτων	307
6.6.10. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία:	307
6.7 Τεχνικογεωλογικό καθεστώς και υπολογισμός δείκτη αστάθειας των θέσεων αστοχίας του Φύλλου Μεγαλόπολη	319
6.7.1. Εφαρμογή RES σε 8 θέσεις αστοχιών πρηνών.....	319

6.7.1.1. Κατολισθητικά φαινόμενα στην κοινότητα Τριπόταμου του Ν. Αρκαδίας	319
α) Μορφολογία	319
β) Γεωλογία.....	320
γ) Γεωτεχνικές συνθήκες	320
6.7.1.2. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Μακρύσι	322
α) Μορφολογία	322
β) Γεωλογία.....	323
γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες	323
δ) Γεωτεχνικές συνθήκες	323
6.7.1.3. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Ραφομάτη	325
α). Μορφολογία	325
β) Γεωλογία.....	326
γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες	326
δ) Γεωτεχνικές συνθήκες	326
6.7.1.4. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Πλάκα	327
α) Μορφολογία	327
β) Γεωλογία.....	327
γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες	328
δ) Γεωτεχνικές συνθήκες	328
6.7.1.5. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Λεοντάρι	329
α). Μορφολογία	329
β) Γεωλογία.....	329
γ) Τεκτονική.....	329
δ). Υδρογεωλογία.....	329
ε) Γεωτεχνικές συνθήκες	330
6.7.1.6. Κατολισθητικό φαινόμενο στον οικισμό Καμποχώρι	331
α) Μορφολογία	331
β) Γεωλογία.....	331
γ) Υδρογεωλογία.....	331
δ). Γεωτεχνικές συνθήκες	331
6.7.1.7. Αστοχία στον ενοριακό σταθμό Κοιμήσεως της Θεοτόκου στον οικισμό Κεραστάρη Μαντίνειας	332
α) Μορφολογία	332
β). Γεωλογία	332
γ) Γεωτεχνικές συνθήκες	333
6.7.1.8. Γεωτεχνικές συνθήκες στο χώρο θεμελίωσης του Ιερού Ναού Κοίμησης της Θεοτόκου της Μονής Μπούρας Φαλαισίας.....	334
α) Μορφολογία	334
β). Γεωλογία	334

6.7.2. Εφαρμογή RES στο τμήμα Χρανών – Διαβολιτσίου της Σιδηροδρομικής Γραμμής Πελοποννήσου	335
6.7.2.1. Προβλήματα στο 184 ^ο χλμ της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας ..	335
α) Μορφολογία	335
β). Γεωλογία	336
γ) Γεωτεχνικές συνθήκες	336
6.7.2.2. Θέση διπλής αστοχίας στο ανάντη της γραμμής πρανές (Χ.Θ. 186+250 – Χ. Θ. 186+420 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.....	338
α) Μορφολογία	338
β) Γεωλογία.....	338
γ) Γεωτεχνικές συνθήκες	339
6.7.2.3. Θέση αστοχίας από το χώρο της γέφυρας Σουφλά (Χ.Θ. 186+900) και μέχρι τη Χ.Θ. 187+300 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.....	340
6.7.2.4. Θέση κατολίσθησης (Χ.Θ. 189+000) στο κατόντη της γραμμής πρανές, με την πηγή νερού της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας	342
α). Μορφολογία	342
β) Γεωτεχνικές συνθήκες	343
6.7.3. Καταγραφές αστοχιών στους οικισμούς Κυπαρίσσια και Μαυριά	344
6.7.3.1. Οικισμός Κυπαρίσσια.....	345
α) Μορφολογία	345
β) Γεωλογία.....	345
γ) Γεωτεχνικές συνθήκες	345
6.7.3.2. Εξέταση αστοχιών στον οικισμό Μαυριά.....	346
6.7.4. Εφαρμογή RES σε έξι (6) θέσεις πυρόπληκτων οικισμών.....	348
6. 7.4.1. Ελληνίτσα.....	349
6.7.4.2. Τουρκολέκας	350
6.7.4.3. Καλύβια	351
6.7.4.4. Μαλλωτά	352
6.7.4.5. Ανεμοδούρι	353
6.7.4.6. Αναβρυτό	354
6.7.5. Εφαρμογή RES σε θέση πλησίον ανατολικής εισόδου Σήραγγας Ραφομάτη	355
6.7.6. Συμπερασματικοί σχολιασμοί.....	356
6.8. Εναλλακτικός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων κατολισθητικής επιδεκτικότητας – Δημιουργία μοντέλου Model Builder.....	370
Εισαγωγή.....	370
6.8.1. Αναπαράσταση χωρικών δεδομένων	372
6.8.2. Το βασικό πρόβλημα	373
6.8.3. Στάδια Δόμησης Μοντέλων.....	374
6.8.4. Παράθυρο Δημιουργίας Διαγράμματος Μοντέλου.....	376

6.8.5. Λειτουργία του μοντέλου.....	378
i. Συστατικά του μοντέλου	378
ii. Πλεονεκτήματα χρήσης του Model Builder.....	379
iii. Παράδειγμα εφαρμογής.....	381
iv) Συμπέρασμα	383
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	385
8. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	395
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	400

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1 Φωτογραφία από ανατροπή block – τεμαχίων στην περιοχή Fort St. John, British Columbia, Canada Καναδάς, USGS (Highland and Bobrowsky, 2008).	43
Εικόνα 1.2. Περιστροφική ολίσθηση στη ζώνη αποσάθρωσης της αργιλικής φάσης του φλύσχη στην Εθνική Οδό Λειβαδιάς – Αράχωβας στα τέλη της δεκαετίας του 1970 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	47
Εικόνα 1.3. Περιστροφική ολίσθηση σε σκληρούς μαργαίτους σχηματισμούς με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο που υπόκειται σε υποσκαφή λόγω θαλάσσιας διάβρωσης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	47
Εικόνα 1.4. Μεταθετική ολίσθηση σε υλικά κορημάτων και τη ζώνη κερματισμού και αποσάθρωσης του φλύσχη στο Δεμάτι Ν. Ιωαννίνων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	49
Εικόνα 1.5. Ξηρή ροή κορημάτων λόγω του σεισμού της Καλαμάτας τον Σεπτέμβριο 1986 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	53
Εικόνα 1.6. Αποκολλήσεις και καταπτώσεις βράχων που εξελίχθηκαν σε ροή κορημάτων και συνέλαβαν στη δημιουργία της λίμνης Τσιβλού στην ορεινή Αχαΐα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	54
Εικόνα 1.7. Το Φεβρουάριο του 2003 πραγματοποιήθηκε ροή εδαφικών υλικών στη Νέα Εθνική Οδό Τρίπολης – Καλαμάτας, στη θέση Τσακώνα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	55
Εικόνα 1.8. Σύνθετη ολίσθηση (μεταθετική και εδαφική ροή) στην Καρυά Ν. Αχαΐας (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	58
Εικόνα 3.1. Άποψη από ένα προδιατυπωμένο βραχώδες μέτωπο πρανούς στην Αττική Οδό (Σταθμός Διοδίων Κατεχάκη).	131
Εικόνα 3.2. Άποψη από ορυχείο, σε πρανές του οποίου οι διακλάσεις του επηρεάζουν τη διαδικασία της έκρηξης (www.usgs.gov – Γεωλογική Υπηρεσία Η.Π.Α.)	134
Εικόνα 3.3. Άποψη από μηχάνημα ολομέτωπης προσβολής (Μαρίνος, 2005).	138
Εικόνα 3.4. Άποψη από χαρακτηριστικό αμφίπλευρο όρυγμα κατά μήκος του αυτοκινητόδρομο .	147
Εικόνα 3.5. Στο βραχώδες πρανές της εικόνας, ο παράγοντας «έκρηξη - blasting» προκαλεί αλλαγές στην συμπεριφορά του βραχώδους υλικού του πρανούς και πιθανόν αστάθεια (από www.geoengineer.org).	148
Εικόνα 3.6. Κατολίσθηση στην τοποθεσία Cucaracha στις όχθες του καναλιού του Παναμά το 1986 (προς το αριστερό τμήμα της φωτογραφίας βρίσκεται ο Ατλαντικός Ωκεανός και προς το δεξιό τμήμα είναι ο Ειρηνικός Ωκεανός), (από www.geoengineer.org).	148
Εικόνα 4.1. Οι αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης στον ταμειυτήρα Ασωμάτων (Αλιάκμονας, Βέροια) και η στενή κοιλάδα με τις απότομες κλίσεις που παρουσιάζει, έχουν ενεργοποιήσει την αστάθεια των πρανών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	203
Εικόνα 5.1. Η κατολίσθηση της Παναγοπούλας (λήψη από ελικόπτερο), στις 28/4/1971, για τους σκοπούς της γεωτεχνικής μελέτης που εκπονήθηκε εκείνη την περίοδο από την ΓΕΩΠΕΡΕΥΝΑ ΑΕ. Πρόκειται περί κατολίσθησης κυκλοειδούς μορφής χωρίς να προϋπάρχει επιφάνεια ολίσθησης. Αν και δεν πρόκειται περί εδαφικού υλικού αλλά βραχώδους, ο κατακερματισμός του βράχου του προσέδωσε πολύ χαμηλή αντοχή (Μαρίνος, 2005).	217
Εικόνα 5.2. Γενική άποψη της θέσης αστοχίας στην Παναγοπούλα από το Ανατολικό άκρο της περιοχής (Υ.ΠΕ. ΧΩ.ΔΕ., 2002).	218
Εικόνα 5.3. Κατάπτωση των εδαφικών σχηματισμών στην επιφάνεια του πρανούς στην Ν.Ε.Ο. Το πρανές της Ε.Ο ταυτίζεται με την ρηξιγενή επιφάνεια της Παναγοπούλας ή αντιστοιχη παράλληλη η οποία ανήκει στην ίδια ρηξιγενή ζώνη (Υ.ΠΕ. ΧΩ.ΔΕ., 2002).	221
Εικόνα 5.4. Άποψη από την αστοχία στη θέση Παναγοπούλα την άνοιξη του 1971 (Μαρίνος, 2005).	227
Εικόνα 5.5. Η καταστροφή του οδοστρώματος της Ε.Ο. Αθηνών – Θεσσαλονίκης στη Χ.Θ. 36+000 (Ρόζος κ.α., 1995).	235
Εικόνα 5.6. Παραμόρφωση της σιδηροδρομικής γραμμής. από την κατολίσθηση της Μαλακάσας (Ρόζος κ.α., 1995).	235
Εικόνα 5.7. Διαχωρισμός ιστορικής αστοχίας και κατολίσθησης (με κόκκινο κύκλο) του 1995 (Ρόζος, 1995).	241
Εικόνα 5.8. Η ρηξιγενή ζώνη Σφενδάλης (περίπου τρία χιλιόμετρα βόρεια της αστοχίας στη Χ.Θ. 36+000) – Αυλώνας. Η απεικόνιση των ενεργών ρηγμάτων (με κόκκινο χρώμα) έχει ληφθεί από τους Ganas et al. (2013).	242

Εικόνα 5.9 (α & β). Λήψεις φωτογραφιών από τη θέση Τσακώνα πριν από το μεγάλο κατολισθητικό γεγονός του 2003 (Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων, 2002).	249
Εικόνα 5.10. Τμήμα του οδοστρώματος που μετακινήθηκε σε απόσταση της τάξης των 30m, κάτω από το αρχικό επίπεδο του αυτοκινητόδρομου (ΚΕΔΕ, 2003).	250
Εικόνα 5.11. Το μορφολογικό βύθισμα της στενής περιοχής της αστοχίας (προσωπική πηγή, 2011). Χαρακτηριστική είναι η μορφή των αναβαθμιδών με τα σεραζανέτια, προκειμένου να παροχετευθεί με ασφάλεια το καθεστώς των επί τόπου υδρογεωλογικών συνθηκών της υπό κατασκευής (εν έτει 2011) τοξωτής γέφυρας και να προστατευθούν οι κατάντη κατασκευαστικές εργασίες ανέγερσής της.	253
Εικόνα 5.12. Πανοραμική άποψη της κατολίθωσης. Στα χαμηλότερα σημεία της τεκτονικής επαφής των Ανωκρητιδικών ασβεστολίθων με τις υποκείμενες λιθολογίες παρατηρούνται εκφορτίσεις του υπόγειου υδροφορέα που αναπτύσσεται στους ασβεστόλιθους (Φουντούλης κ.α., 2004).	258
Εικόνα 5.13. Άποψη από την τελική κατασκευαστική λύση της σύμμεικτης τοξωτής γέφυρας (ΥΠΟΜΕΔΙ, 2016).	259
Εικόνα 5.14. Άποψη του βυθίσματος που προκάλεσε η κατολίθωση στο οδόστρωμα της Ε.Ο. Κορίνθου - Τρίπολης / Χ.Θ. 123+000 (Ντουνιάς κ.α., 2006).	266
Εικόνα 5.15. Άποψη της κατολισθημένης μάζας από ανάντη. Διακρίνεται η στέψη της κατολίθωσης που έφτασε έως το μέσο του ανάντη της Ε.Ο. παράδρομου (Ντουνιάς κ.α., 2006).	268
Εικόνα 5.16. Άποψη της θέσης της αστοχίας. Με κόκκινη γραμμή, η απεικόνιση τεκτονικών ασυνχειών.	272
Εικόνα 6.1. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Τριπόταμο (Google Earth).	320
Εικόνα 6.2. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Μακρύσι (Google Earth).	323
Εικόνα 6.3. Άποψη από τις θέσεις αστοχίας στον οικισμό Ραφομάτη (Google Earth).	325
Εικόνα 6.4. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Πλάκα (Google Earth).	327
Εικόνα 6.5. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Λεοντάρι (Google Earth). Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε γεινάζον ενεργό ρήγμα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης (Ganas et al., 2013)	329
Εικόνα 6.6. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Καμποχώρι (Google Earth)	331
Εικόνα 6.7. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Κεραστάρη (Google Earth)	333
Εικόνα 6.8. Άποψη από τη θέση αστοχίας στη Μονή Μπούρα Φαλαισίας (Google Earth). ...	334
Εικόνα 6.9. Άποψη από τη θέση αστοχίας στο 184 ^ο χλμ της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (Google Earth)	337
Εικόνα 6.10. Άποψη από τη θέση αστοχίας (κόκκινου χρώματος επιφάνεια) στη Χ.Θ. 186+250 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (Google Earth)	339
Εικόνα 6.11. Άποψη από τη θέση αστοχίας στη γέφυρα Σουφλά (Χ.Θ. 186+900) της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (με μπλέ χρώμα ο χείμαρρος Χάραδρος) (Google Earth).	341
Εικόνα 6.12. Άποψη από τη θέση αστοχίας στη Χ.Θ. 189+000 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η παρουσία ενεργού ρήματος) (Google Earth).	342
Εικόνα 6.13. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Κυπαρίσσια (Google Earth)	345
Εικόνα 6.14. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Μαυριά (Google Earth)	347
Εικόνα 6.15. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Ελληνίτσα (Google Earth).	349
Εικόνα 6.16. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Τουρκολέκα (Google Earth). ..	350
Εικόνα 6.17. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Καλύβια (Google Earth).	351
Εικόνα 6.18. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Μαλλωπά. Διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τεχνικά έργα για την αντιμετώπιση τυχόν ολίσθησης. Το cut and cover και ο τοίχος αντιστήριξης (Google Earth)	352
Εικόνα 6.19. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Αμεμοδούρι (Google Earth). ..	353
Εικόνα 6.20. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Αναβρυτό (Google Earth).	354

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων κατά Varnes (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	39
Πίνακας 1.2. Περιγραφικοί όροι ονοματολογίας κατολισθήσεων (τροποποιημένος πίνακας των Cruden and Varnes, 1996).	58
Πίνακας 2.1. Συσχέτιση μεταξύ του RQD και της ποιότητας της βραχώμαζας (Singh and Goel, 1999).	68
Πίνακας 2.2. Ενότητα A - Κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησής τους (Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχώμαζας, Bieniawski, 1989).	72
Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά Barton et al (1974).	75
Πίνακας 2.4. Γεωλογικός δείκτης ανοχής για κερματισμένες βραχώμαζες (Hoek and Marinos, 2000).	78
Πίνακας 2.5. Γεωλογικός δείκτης ανοχής για ετερογενείς βραχώμαζες, όπως ο φλύσχος (Hoek and Marinos, 2000).	79
Πίνακας 2.6. Ταξινόμηση βραχώμαζας για βραχώδη πρανή SMR [(Slope Mass Rating), (Προσαρμογή κατά Romana, 1985)].	81
Πίνακας 3.1. Μητρώο αλληλεπίδρασης με τέσσερις κύριες παραμέτρους στη διαγώνιο.	128
Πίνακας 3.2. Μορφή μητρώου.	130
Πίνακας 4.2. Βαθμονόμηση της ανθρώπινης δραστηριότητας με βάση την απόσταση πρανών από δρόμους.	176
Πίνακας 4.2. Βαθμονόμηση της παραμέτρου «τεκτονικό καθεστώς».	179
Πίνακας 4.3. Βαθμονόμηση της κλίσης πρανών.	182
Πίνακας 4.4. Βαθμονόμηση του προσανατολισμού των πρανών.	183
Πίνακας 4.5. Βαθμονόμηση της λιθολογίας.	186
Πίνακας 4.6. Βαθμονόμηση των υδρογεωλογικών συνθηκών.	192
Πίνακας 4.7. Βαθμονόμηση της βροχόπτωσης.	199
Πίνακας 4.8. Σχέση αποσάθρωσης και είδους κατολισθησης.	201
Πίνακας 4.9. Βαθμονόμηση πάχους μανδύα αποσάθρωσης.	202
Πίνακας 4.10. Βαθμονόμηση της απόστασης από ρέματα.	204
Πίνακας 4.11. Βαθμονόμηση της απόστασης από τεκτονικά στοιχεία.	207
Πίνακας 5.3. Κατηγοριοποίηση σχετικής (κατολισθητικής) επιδεκτικότητας προτεινόμενη από τους Brabb et al (1972).	210
Πίνακας 5.2. Βαθμονόμηση επιλεγμένων παραμέτρων αστοχίας πρανών.	212
Πίνακας 5.3. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Παναγοπούλα.	228
Πίνακας 5.4. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Παναγοπούλα.	229
Πίνακας 5.5. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Παναγοπούλα βάσει και της εργασίας των Tavoularis et al. (2017).	232
Πίνακας 5.6. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στην Παναγοπούλα 233	233
Πίνακας 5.7. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Μαλακάσα.	244
Πίνακας 5.8. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Μαλακάσα.	246
Πίνακας 5.9. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Μαλακάσα.	247
Πίνακας 5.10. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη Μαλακάσα.	248
Πίνακας 5.11. Μητρώο αλληλεπίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα βάσει και της εργασίας των Tavoularis et al. (2015).	261
Πίνακας 5.12. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα.	263
Πίνακας 5.13 Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Τσακώνα βάσει και της εργασίας των Tavoularis et al. (2015).	264
Πίνακας 5.14. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα.	265
Πίνακας 5.15. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη Χ.Θ. 123+000 της Ε.Ο. Αθηνών – Κορίνθου – Τριπόλης – Καλαμάτας (πλησίον της Νεμέας).	273
Πίνακας 5.16. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη Χ.Θ. 123+000 πλησίον της Νεμέας.	275

Πίνακας 5.17. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη χιλιομετρική θέση 123+000 της Ε.Ο. Αθηνών – Κορίνθου – Τρίπολης - Καλαμάτας (πλησίον της Νεμέας).	276
Πίνακας 5.18. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη Χ.Θ. 123+000.	277
Πίνακας 5.19. Συγκεντρωτικές τιμές δείκτη αστάθειας για τις θέσεις αστοχίας σε Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα και Νεμέα.	279
Πίνακας 6.1. Υδρολιθολογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών Λεκάνης Απορροής Αλφειού.	296
Πίνακας 6.2. Συνοπτική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των επιλεγμένων παραμέτρων της περιοχής του φύλλου “Μεγαλόπολη”.	300
Πίνακας 6.3. Μητρώο αλληλεπίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη	301
Πίνακας 6.4. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές αλληλεπίδρασης και επικράτησης για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.	303
Πίνακας 6.5. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Τριπόταμο.	322
Πίνακας 6.6. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μακρούσι.	325
Πίνακας 6.7. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ραψομάτη.	327
Πίνακας 6.8. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Πλάκα.	328
Πίνακας 6.9. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Λεοντάρι.	330
Πίνακας 6.10. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Καμποχώρι.	332
Πίνακας 6.11. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Κερασάρι.	335
Πίνακας 6.12. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση της Μονής Μπούρα Φαλαισίας.	335
Πίνακας 6.13. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση του 184ου χλμ ιδιοδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.	338
Πίνακας 6.14. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Χ.Θ. 186+250 – Χ. Θ. 186+420 σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.	340
Πίνακας 6.15. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Γέφυρα Σουφλά (Χ.Θ. 186+900 έως Χ.Θ. 187+300) της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.	341
Πίνακας 6.16. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Χ.Θ. 189+000 σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.	344
Πίνακας 6.17. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Κυπαρίσσια.	346
Πίνακας 6.18. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μαυριά.	347
Πίνακας 6.19. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ελληνίτσα.	349
Πίνακας 6.20. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Τουρκολέκας.	350
Πίνακας 6.21. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Καλύβια.	351
Πίνακας 6.22. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μαλλωτά.	352
Πίνακας 6.23. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ανεμοδούρι.	353
Πίνακας 6.24. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Αναβρυτό.	354
Πίνακας 6.25. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση πλησίον της ανατολικής εισόδου της Σήραγγας Ραψομάτη.	356
Πίνακας 6.26. Προβλήματα αστοχιών και μέτρα αντιμετώπισης σε θέσεις του Φύλλου Μεγαλόπολη.	358
Πίνακας 6.27. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας των θέσεων αστοχιών (υφιστάμενων και δυνητικών) του Φύλλου Μεγαλόπολη.	359
Πίνακας 6.28. Γεωλογικό υπόβαθρο θέσεων αστοχίας Φύλλου Μεγαλόπολης	364
Πίνακας 6.29. Ποσοστό κλάσεων βαθμονόμησης των επιλεγμένων παραμέτρων στο φύλλο “Μεγαλόπολη”	369

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1 Εναλλαγές άκαμπτων πετρωμάτων με λιγότερο συμπαγή και περισσότερο ευκολοδιάβρωτα πετρώματα (Μαρίνος, 1998).	40
Σχήμα 1.2. Κατάπτωση γκρεμού από εσωτερικό ερπυσμό σε καρστικό οροπέδιο πάνω από το Roquefort Γαλλίας. Στο σύνολό του το φαινόμενο είναι προοδευτικό και όχι απότομο (Μαρίνος, 1998).	41
Σχήμα 1.3. Μορφή κατάπτωσης λόγω της γεωμετρίας των επιπέδων ασυνέχειας (Μαρίνος, 1998).	41
Σχήμα 1.4. Σχέδιο και ονοματολογία μιας τυπικής περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978).	44
Σχήμα 1.5 (α & β). Χαρακτηριστικοί τύποι μεταθετικής ολίσθησης (Ρόζος, 2005).	48
Σχήμα 1.6. Τύποι πλευρικής εξάπλωσης. α) Πλευρική εξάπλωση κερματισμένων ασβεστολίθων που υπέρκειται μαλακότερων σχηματισμών (Varnes, 1978), β) Πολύ γρήγορη πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμου και ιλύος (Varnes, 1978), γ) Σύνθετη ολίσθηση (πλευρική εξάπλωση ασβεστολίθων και αναθόλωση υποκείμενων αργιλικών σχιστολίθων) (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	50
Σχήμα 1.7. Ροές στο υπόβαθρο, λόγω α) ερπυσμού των κεφαλών των στρωμάτων,	52
Σχήμα 1.8. Κάμψη κεφαλών στρωμάτων. Εξέλιξη σε ολίσθηση. 1: Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, 2: Τριαδικό γύψο σε διάλυση, 3: Ααβεστόλιθοι Λιασίου, 4: Σχιστόλιθοι Λιασίου (Άλπεις από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	53
Σχήμα 1.9 (α & β). Ροές α) πολύ γρήγορη ροή – «χιονοστιβάδα κορημάτων», β) «χιονοστιβάδα κορημάτων» σχήματος V (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	54
Σχήμα 1.10. (α) Ροή γαιών πολύ αργή έως γρήγορη (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007), (β) Γρήγορη ροή άμμου – ιλύος.	56
Σχήμα 1.11. Περιπτώσεις σύνθετων κατολισθήσεων: α) πτώσεις βράχων – ερπυσμός κορημάτων, β) πτώσεις βράχων – ροή κορημάτων, γ) περιστροφική ολίσθηση – ανατροπή, δ) περιστροφική ολίσθηση – ροή εδάφους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).	57
Σχήμα 2.1. Διαδικασία για τη μέτρηση και υπολογισμό του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας	69
Σχήμα 2.2. Κίνδυνος λανθασμένου υπολογισμού του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας (RQD) λόγω του προσανατολισμού του άξονα της διάτρησης σε σχέση με τις ασυνέχειες της διατρυόμενης βραχώμαζας (Hack, 2002).	87
Σχήμα 2.3. Απεικόνιση της μεθοδολογίας για την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Από Wikipedia).	101
Σχήμα 2.4. Αποτύπωση βιολογικού νευρώνα (Wikipedia).	107
Σχήμα 2.5. Σύναψη μεταξύ νευρώνων (Wikipedia).	107
Σχήμα 2.6. Δομή νευρωνικού δικτύου (Μπαντής, 2011).	108
Σχήμα 2.7. Οργάνωση νευρώνων σε στρώματα (Μπαντής, 2007).	108
Σχήμα 2.8. Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (Μπαντής, 2011)	109
Σχήμα 2.9. Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (συνέχεια) (Μπαντής, 2011)	110
Σχήμα 2.10 Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (συνέχεια) (Μπαντής, 2011)	110
Σχήμα 3.1. Μητρώο αλληλεπίδρασης που προσδιορίζει και συσχετίζει όλους τους μηχανισμούς της γεωτεχνικής μηχανικής (Hudson, 1992).	122
Σχήμα 3.2. Απόσπασμα από ένα ποίημα που υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχει σχέση μεταξύ όλων των πραγμάτων (Hudson, 1992).	123
Σχήμα 3.3. Παρουσίαση έξι αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στη βραχώδη δομή, την τάση και την ροή του νερού σε περιβάλλον μιας υπόγειας εκσκαφής (Hudson, 1992).	124
Σχήμα 3.4. Το μέγεθος της ανάλυσης σε ένα μητρώο καθορίζει και την κωδικοποίηση των μετρήσεων των ιδιοτήτων της βραχώμαζας (Hudson, 1992).	127
Σχήμα 3.5. Απεικόνιση του τρόπου αύξησης της ανάλυσης σε ένα μητρώο αλληλεπίδρασης (Hudson, 1992).	128
Σχήμα 3.6. Το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να συσχετισθεί με το επίπεδο της ανάλυσης (Hudson, 1992).	130
Σχήμα 3.7. Απόσπασμα από μητρώο διαστάσεων 12 X 12 αλληλεπιδράσεων ενός πρηνούς (Hudson, 1992).	132
Σχήμα 3.8. Απόσπασμα από μητρώο διαστάσεων 12 X 12 αλληλεπιδράσεων μιας υπόγειας	133
Σχήμα 3.9. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης (Hudson, 1992).	134

Σχήμα 3.10. Απεικόνιση του αθροίσματος των κωδικοποιημένων τιμών σε κάθε γραμμή και στήλη για τον υπολογισμό των τιμών αιτίου και αποτελέσματος (Hudson, 1992).	136
Σχήμα 3.11. Παράδειγμα διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος για δύο παραμέτρους (Hudson, 1992).	137
Σχήμα 3.12. Απεικόνιση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών των παραμέτρων ενός μητρώου και συσχέτισή τους με την ένταση αλληλεπίδρασης και κυριαρχίας (Hudson, 1992).	139
Σχήμα 3.13. Απεικόνιση της έννοιας του συμμετρικού μητρώου (Hudson, 1992).	140
Σχήμα 3.14. Απεικόνιση της έννοιας του μη συμμετρικού μητρώου (Hudson, 1992).	140
Σχήμα 3.15. Διάγραμμα θεωρήματος 1 (Hudson, 1992).	141
Σχήμα 3.16. Διάγραμμα θεωρήματος 2.	142
Σχήμα 3.17. Μηχανικό ανάλογο του θεωρήματος 2 με τον κύκλο του Mohr, στο οποίο η διατμητική τάση μεγιστοποιείται στο μισό της απόστασης των σ_1 και σ_2 (Hudson, 1992).	142
Σχήμα 3.18. Κωδικοποίηση τιμών για πρανές (πάνω αριστερά) και το αντίστοιχο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (κάτω δεξιά) (Hudson, 1992).	144
Σχήμα 3.19. Αναλυτικό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος του σχήματος 3.18 (Hudson, 1992). ..	144
Σχήμα 3.20. Κωδικοποίηση τιμών για υπόγεια εκσκαφή (πάνω αριστερά) και το αντίστοιχο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (κάτω δεξιά) (Hudson, 1992).	145
Σχήμα 3.21. Αναλυτικό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος του σχήματος 3.20 (Hudson, 1992). ..	145
Σχήμα 3.22. Αναλυτικότερη αποτύπωση των τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης του σχήματος 3.19β (Hudson, 1992).	146
Σχήμα 3.23. Απεικόνιση ενέργειας – εντροπίας στο μητρώο αλληλεπίδρασης (Hudson, 1992).	149
Σχήμα 3.24. Σε ένα σύστημα, η ενέργεια πριν και μετά την κατασκευή ενός έργου (λόγω της έλευσης νέων παραμέτρων στο υπό μελέτη μητρώο) πρέπει να είναι η ίδια, όχι όμως και οι ιδιότητες της βραχόμαζας πριν και μετά την κατασκευή του συγκεκριμένου έργου (Hudson, 1992).	150
Σχήμα 3.25. Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για ένα κωδικοποιημένο μητρώο που υποδηλώνει, ενεργειακά, την ένταση αλληλεπίδρασης και επικράτησης (Hudson, 1992).	152
Σχήμα 3.26. Προσέγγιση των θεωρημάτων 1 και 2 από ενεργειακή σκοπιά (Hudson, 1992).	153
Σχήμα 3.27. Απεικόνιση εφαρμογής της μεθοδολογίας RES (Hudson, 1992).	155
Σχήμα 3.28. Συνδυασμός ανάλυσης και σύνθεσης για την εφαρμογή της μεθοδολογίας RES	156
Σχήμα 3.29. Διαδικασία ιεράρχησης επί μέρους μητρώων από το γενικό στο ειδικό (Hudson, 1992).	157
Σχήμα 3.30. Μεθοδολογία ανάπτυξης δείκτη αστάθειας που λαμβάνει υπόψη τον σκοπό του έργου και την ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων του μητρώου (Hudson, 1992).	158
Σχήμα 3.31. Ο αριθμός των παραμέτρων που απαιτούνται για μια ταξινόμηση εξαρτάται από τη συγκέντρωση του νέφους των συντεταγμένων των αιτίων – αποτελεσμάτων (Hudson, 1992).	159
Σχήμα 3.32. Τεχνική ενεργειακού ελέγχου και συσχετισμός με την ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων ενός μητρώου (Hudson, 1992).	160
Σχήμα 4.1. Αύξηση της θερμοκρασίας παγκοσμίως από τα τέλη του 19ου αιώνα έως και τις αρχές του εικοστού πρώτου (IPCC, 2007).	198
Σχήμα 4.2. Σχέση βαθμού αποσάθρωσης και τύπου κατολίθησης (Migon and Lidmar-Bergstrom, 2001).	201
Σχήμα 4.3. Γραφική παράσταση της συγκέντρωσης των κατολισθήσεων σε σχέση με την απόσταση από την προβολή στην επιφάνεια του εδάφους του επιπέδου του ρήγματος (Keefner, 2000).	206
Σχήμα 4.4. Γραφική παράσταση της συγκέντρωσης των κατολισθήσεων σε σχέση με την επικεντρική απόσταση στην περιοχή νοτιώς της οροσειράς της Santa Cruz που προκλήθηκαν από τον σεισμό του 1989 στην Καλιφόρνια (Loma Prieta) των ΗΠΑ.	206
Σχήμα 5.1. Χάρτης των κυριότερων ρηγμάτων και γεωλογικών σχηματισμών του δυτικού τμήματος του Κορινθιακού κόλπου (Μαρίνος, 2005).	222
Σχήμα 5.2. Τα ενεργά ρήγματα (από Armijo et al. (1996)) και οι κυριότεροι σεισμοί από το 1965 (1965, 1970: Baker et al., (1997); 1981, 1984: Taymaz (1990), Μηχανισμοί κατά Hatzfeld et al., (1996). Πηγή: (Μαρίνος, 2005).	223
Σχήμα 5.3. Διατομή της αναγνωριστικής γεωλογικής μελέτης από ΓΕΩΕΡΕΥΝΑ Α.Ε. (1972). Πηγή: [Γεν. Γραμ. Δημ. Έργων / Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2002)].	227
Σχήμα 5.4. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Παναγοπούλα.	228
Σχήμα 5.5. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Παναγοπούλα.	229
Σχήμα 5.6. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση Παναγοπούλα.	229

Σχήμα 5.7. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας στη θέση Παναγοπούλα.	232
Σχήμα 5.8. Η κατολίθωση της Μαλακάσας. Μόνο το δεξιό τμήμα του ποδός έχει επηρεάσει την Εθνική Οδό (Ρόζος κ.α., 1995).	239
Σχήμα 5.9. Απεικόνιση τριών βημάτων της ανάπτυξης της κατολίθωσης λόγω του ενεργού ρήγματος (1: Ασβεστόλιθοι, 2: Νεοπαλαιζωϊκός σχηματισμός, 3-4: Τεταρογενείς αποθέσεις (Galanakis et al., 1997).	242
Σχήμα 5.10. Τρισδιάστατη ψηφιακή απεικόνιση της γεωλογίας στην ανατολική λεκάνη του	243
Σχήμα 5.11. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Μαλακάσα.....	245
Σχήμα 5.12. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Μαλακάσα.	245
Σχήμα 5.13. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη Μαλακάσα.....	246
Σχήμα 5.14. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη Μαλακάσα.....	248
Σχήμα 5.15. Προοπτική εικόνα του γεωλογικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής της κατολίθωσης. Η κατασκευή του χάρτη έχει βασιστεί στα στοιχεία του γεωλογικού χάρτη φύλλο “ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ” του ΙΓΜΕ στο οποίο έχουν γίνει τροποποιήσεις. Sc: πλευρικά κορήματα, Pt: λιμναίες αποθέσεις λεκάνης Μεγαλόπολης, Tf: φλύσσης ενότητας Τρίπολης, Tk: ανθρακική ακολουθία ενότητας Τρίπολης, Pk: Ανωκρητιδικό ασβεστόλιθο ενότητας Πίνδου, Pr: Κερατολιθική σειρά και ακολουθία πρώτου φλύσσης ενότητας Πίνδου (Φουντούλης κ.α., 2004).	251
Σχήμα 5.16. Οι Νεοτεκτονικές μακροδομές της ΝΔ Πελοποννήσου. 1: Ολοκαινικές αποθέσεις, 2: Χερσαίες Ανω Πλειστοκαικές αποθέσεις, 3: Θαλάσσιοι ΠλειοΠλειστοκαινοί σχηματισμοί, 4: Λιμναίες αποθέσεις, 5: Αλπικό υπόβαθρο, 6: Άξονες μακροπτυχών, 7: Άξονες περιστροφής, 8: Ρηξιγενείς ζώνες. (Φουντούλης κ.α., 2004).	256
Σχήμα 5.17. Γεωλογική τομή, στην οποία φαίνονται το ανάγλυφο και η τεκτονική επαφή των ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων με τους υποκείμενους σχηματισμούς (Φουντούλης κ.α., 2004). ...	259
Σχήμα 5.18. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Τσακώνα.	261
Σχήμα 5.19. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Τσακώνα.	262
Σχήμα 5.20. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση Τσακώνα.	262
Σχήμα 5.21. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη θέση Τσακώνα.	264
Σχήμα 5.22. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης στη θέση Χ.Θ. 123+000.	273
Σχήμα 5.23. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Χ.Θ. 123+000.	274
Σχήμα 5.24. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση στη Χ.Θ. 123+000.	274
Σχήμα 5.25. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη Χ.Θ. 123+000.	276
Σχήμα 6.1. Στρωματογραφική κολώνα Γεωλογικού Φύλλου Μεγαλόπολης (Παπαδόπουλος, ΙΓΜΕ, 1997).....	293
Σχήμα 6.2. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.	301
Σχήμα 6.3. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για το φύλλο “Μεγαλόπολη”.....	302
Σχήμα 6.4. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για το φύλλο “Μεγαλόπολη”.....	302
Σχήμα 6.5. Σχηματικό Διάγραμμα Χάραξης (Προτεινόμενη Λύση, AL T1-P). Σημειώνεται συνολικά η χάραξη διέλευσης του αγωγού που διέρχεται και στην εξεταζόμενη περιοχή που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη”. Σε κόκκινο κύκλο (Χ.Θ. 109+600 έως Χ.Θ. 120+000) απεικονίζεται η περιοχή, πλησίον της οποίας υπήρχε δυνητική θέση αστοχίας (νότια της ανατολικής εισόδου της Σήραγγας Ραφωμάτη), [ΔΕΣΦΑ, 2010].	355
Σχήμα 6.6. Ιστόγραμμα δείκτη αστάθειας θέσεων αστοχίας φύλλου Μεγαλόπολη.	359
Σχήμα 6.7. Δόμηση μοντέλων (Ανδρουλακάκης, Κουτσόπουλος, 2004)	374
Σχήμα 6.8. Παράδειγμα δημιουργίας μοντέλου ModelBuilder (Ανδρουλακάκης κ.α., 2009).....	377
Σχήμα 6.9. Τυπική διαδικασία στο ModelBuilder (Ανδρουλακάκης, Κουτσόπουλος, 2004).....	378
Σχήμα 6.10. Διάγραμμα ροής των διαδικασιών μέσω του μοντέλου Model Builder των ΓΣΠ για την κατασκευή του χάρτη της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής φύλλου “Μεγαλόπολη”.	382

ΧΑΡΤΕΣ

Χάρτης 6.1. Γεωλογικός χάρτης Φύλλου Μεγαλόπολης κλίμακας 1:50.000 (Παπαδόπουλος, ΙΓΜΕ, 1997)	292
Χάρτης 6.2. Περιοχή μελέτης στις Λεκάνες Απορροής (GR29, GR32) του Υδατικού Διαμερίσματος της Δυτικής Πελοποννήσου (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).	297
Χάρτης 6.3. Κατανομή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Πελοπόννησο και ειδικότερα στην εξεταζόμενη περιοχή έρευνας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).	298
Χάρτης 6.4. Απόσταση από Οδικό Δίκτυο.	309
Χάρτης 6.5. Τεκτονικό καθεστώς.	310
Χάρτης 6.6. Κλίσεις Πρανών.	311
Χάρτης 6.7. Προσανατολισμός Πρανών.	312
Χάρτης 6.8. Λιθολογικός Χάρτης.	313
Χάρτης 6.9. Υδρολιθολογικός χάρτης.	314
Χάρτης 6.10. Χάρτης βροχόπτωσης.	315
Χάρτης 6.11. Χάρτης πάχους μανδύα αποσάθρωσης.	316
Χάρτης 6.12. Χάρτης απόστασης από ρέματα.	317
Χάρτης 6.13. Χάρτης απόστασης από τεκτονικά στοιχεία.	318
Χάρτης 6.14. Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας φύλλου “Μεγαλόπολη”.	362
Χάρτης 6.15. Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας φύλλου “Μεγαλόπολη” μέσω της διαδικασίας του εργαλείου Model Builder.	384

Εκτενής περίληψη

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με έναν πολύ σημαντικό γεωλογικό κίνδυνο, τις κατολισθήσεις στον Ελληνικό χώρο, όπου εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα λόγω των ιδιαίτερων γεωλογικών, γεωμορφολογικών, κλιματικών, τεκτονικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της Ελληνικής επικράτειας. Τα πολυάριθμα κατολισθητικά φαινόμενα που έχουν λάβει χώρα στην Ελλάδα, προκαλούν ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις διαχρονικά, τόσο οικονομικές όσο και κοινωνικές. Οι στατιστικές δείχνουν ότι κατά μέσο όρο, οι καταστροφές από κατολισθήσεις είναι λιγότερο συνηθισμένες από αυτές που προκαλούνται από άλλα φυσικά αίτια και είναι υπεύθυνες σε ένα μικρό ποσοστό για τους θανάτους που έχουν λάβει χώρα λόγω φυσικών κινδύνων παγκοσμίως. Εν τούτοις συνήθως υποτιμούν την επίδραση των κατολισθήσεων, από κοινωνικής και οικονομικής πλευράς γιατί δεν αναδεικνύονται ως αυτόνομα γεγονότα, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις εντάσσονται είτε στο πλαίσιο άλλων καταστροφικών γεωλογικών φαινομένων είτε στην αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων. Επιπλέον, η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού και η μετακίνησή του από τις αγροτικές στις αστικές περιοχές, κάνει επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας νέων κατοικήσιμων περιοχών, οι οποίες όμως θα πρέπει να πληρούν γεωπεριβαλλοντικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της αειφόρου ανάπτυξης.

Η κατανόηση, λοιπόν, του μηχανισμού των κατολισθήσεων είναι σημαντική για την πρόβλεψη και αντιμετώπισή τους με την κατάρτιση κατάλληλων μέτρων προστασίας και αποκατάστασης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι κοινωνικο-οικονομικές συνέπειες αυτών. Η αντιμετώπισή τους γίνεται ακόμα επιτακτικότερη γιατί σαν συνέπεια των κλιματικών αλλαγών και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, αναμένεται αύξηση στην κατολισθητική επικινδυνότητα σε πολλές περιοχές λόγω αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο και ακραίων καιρικών φαινομένων. Έργα προστασίας, για την αντιμετώπιση των κατολισθήσεων συχνά δεν κατασκευάζονται, λόγω περιβαλλοντικών και οικονομικών περιορισμών. Κατά συνέπεια, χρειάζεται να υπάρχει πρόβλεψη των αστοχιών πρανών και κατ' επέκταση της επικινδυνότητας που σχετίζεται με αυτές τις αστοχίες.

Το αντικείμενο της διατριβής αφορά τη διερεύνηση και μελέτη των παραγόντων εκείνων που ελέγχουν το φαινόμενο των κατολισθήσεων με σκοπό τη χρήση τους σε συγκεκριμένη μεθοδολογία για την πρόγνωση των αστοχιών πρανών που είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος οφείλεται στην φύση και συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, στην ανισοτροπία και την ανομοιογένεια αυτών.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί βρίσκονται υπό καθεστώς τάσεων, κυρίως λόγω της βαρύτητας και των δυναμικών κινήσεων του ανώτερου φλοιού (τεκτονικές κινήσεις, σεισμοί, ισοστατικές κινήσεις, κλπ). Επιπλέον, το γεγονός ότι πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν, σε συνδυασμό με τη σύνθετη γεωλογική ιστορία των σχηματισμών καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την μαθηματική μοντελοποίηση των γεωλογικών υλικών μέσω αριθμητικών μοντέλων. Στην διαδικασία μοντελοποίησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των εδαφικών ή/και βραχωδών σχηματισμών με τα τεχνικά έργα, ώστε να προσδιορίζονται και οι επιπτώσεις από και προς αυτά.

Όταν πρόκειται να σχεδιασθεί ένα έργο για να κατασκευασθεί είτε επιφανειακά είτε υπογείως, είναι σημαντικό να υπάρχει σαφής γνώση, ώστε να διασφαλίζεται η κατασκευή και η λειτουργία αυτού. Για να μειωθεί ο επακόλουθος κίνδυνος σε αποδεκτό επίπεδο, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι σχετιζόμενες αβεβαιότητες που στην Αγγλική ορολογία αποδίδονται με τις όρους “epistemic” και “aleatory”. Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην έλλειψη γνώσης σχετικά με μια διαδικασία ή μοντέλο ενώ ο δεύτερος όρος αφορά στην εγγενή τυχαιότητα μιας διαδικασίας ή μοντέλου. Στην παρούσα διατριβή επεξηγείται στο πως η “epistemic” αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Αυτή η αβεβαιότητα προκύπτει από το ότι οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών ποικίλουν σε διαφορετικές κλίμακες και στη διάρκεια του χρόνου. Ο γεωλόγος και ο γεωτεχνικός μηχανικός, θα πρέπει να ερευνούν κάθε φορά τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών στους οποίους πρόκειται να εδρασθεί κάποιο τεχνικό έργο. Μάλιστα, επειδή μόνο ένα ποσοστό αυτών θα είναι δυνατόν να μελετηθεί, υπάρχει πάντοτε μια ανησυχία για το εάν οι προσδιοριζόμενες παράμετροι διέπονται από ακρίβεια και εάν έχει αγνοηθεί κάποιο σημαντικό γεωλογικό-γεωτεχνικό χαρακτηριστικό. Επίσης, όχι μόνο

υπάρχουν δυσκολίες στην απόκτηση αντιπροσωπευτικών τιμών παραμέτρων αλλά επιπλέον είναι δύσκολος ο υπολογισμός των παραμέτρων στην κλίμακα που αντιστοιχεί στην ακτίνα επίδρασης του τεχνικού έργου.

Πολλές βιβλιογραφικές αναφορές μελετούν τις ιδιότητες των γεωλογικών υλικών αλλά λίγες είναι οι οδηγίες-κατευθύνσεις για το ποιες παράμετροι θα πρέπει να αποκτηθούν για συγκεκριμένα τεχνικά έργα και ποιοί μηχανισμοί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Η προσέγγιση του προαναφερθέντος προβλήματος στην παρούσα διδακτορική διατριβή γίνεται με τη μεθοδολογία του Rock Engineering System (RES) μέσω της χρήσης ενός πίνακα που ονομάζεται μητρώο αλληλεπίδρασης, στο οποίο επιλέγονται οι κύριες παράμετροι που θεωρούνται ότι καθορίζουν το εξεταζόμενο, κάθε φορά, έργο, και μελετώνται οι αλληλεπιδράσεις τους. Το πλεονέκτημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι όλοι οι δυνητικοί παράγοντες μπορεί να ληφθούν υπόψη από την αρχή. Ο λόγος που η μεθοδολογία RES μειώνει την αβεβαιότητα οφείλεται στη μελέτη των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις παραμέτρους, υποδεικνύει ποιες από αυτές είναι περισσότερο διαδραστικές στο σύστημα μέσα στο οποίο εξετάζονται, ποιες είναι οι περισσότερο κυρίαρχες και ποιες έχουν μικρότερη επίδραση ή είναι ασήμαντες στην αστοχία ενός πρανούς.

Η μεθοδολογία RES είναι μια αναλυτική προσέγγιση παρά μια διαδικασία σύνθεσης. Με άλλα λόγια, το μοντέλο που πρόκειται να κατασκευασθεί μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης δεν δομείται με την υπόθεση ότι συγκεκριμένες παράμετροι θα ληφθούν υπόψη αυτόματα (σύνθεση), αλλά μελετάται το πρόβλημα με το να αναλύεται σε επιμέρους κύρια τμήματα, αξιολογώντας την σπουδαιότητά των παραμέτρων, ώστε η σχετική σημασία τους να εξακριβωθεί (ανάλυση) και κατ' επέκταση να οδηγήσει στην κατασκευή του κατάλληλου μοντέλου. Να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιλεγμένων παραμέτρων και κατ' επέκταση τις διαστάσεις του μητρώου αλληλεπίδρασης.

Το RES αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 σαν μια ημιποσοπική τεχνική με σκοπό την προσέγγιση αυξανόμενης πολυπλοκότητας προβλημάτων στη μηχανική των πετρωμάτων. Η ημιποσοπική κωδικοποίηση είναι σημαντική,

ιδιαίτερα όταν δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν μηχανισμοί και χρειάζεται να υπάρχει μια εκτίμηση της σημασίας τους.

Η ιδέα του μητρώου έχει τις ρίζες της στη δεκαετία του 1970, όταν χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σχέσης αίτιου – αποτελέσματος ανάμεσα σε υπάρχοντες (περιβαλλοντικούς/φυσικούς) παράγοντες και ανθρώπινες δραστηριότητες. Από τότε έχει τροποποιηθεί και εφαρμοσθεί σε προβλήματα ευστάθειας βράχων, κατολισθητικής επικινδυνότητας και ανάλυσης κινδύνου, μηχανικής πετρωμάτων.

Η βάση αυτής της αναλυτικής προσέγγισης (top-down) είναι πρώτα να καθορισθεί το αντικείμενο του γεωλογικού-γεωτεχνικού προβλήματος, και ακολούθως να κατασκευασθεί ένα διάγραμμα/πίνακας (μητρώο αλληλεπίδρασης), στο οποίο θα περιέχονται οι βασικότερες παράμετροι που σχετίζονται με το συγκεκριμένο πρόβλημα, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους. Είναι τέτοια η δομή του συγκεκριμένου μητρώου, ώστε όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιλεγμένων παραμέτρων να μπορούν να προσδιορισθούν.

Η μέθοδος προτείνει μια κατάλληλη κωδικοποίηση του μητρώου, έτσι ώστε να προσδιορισθεί το πόσο σημαντική για το σύστημα είναι η κάθε παράμετρος. Αυτό προσδιορίζεται από δύο χαρακτηριστικά μεγέθη που είναι η ένταση αλληλεπίδρασης (interactive intensity) και η επικράτηση (dominance). Κάθε σύστημα, όπως και το RES χαρακτηρίζεται από παραμέτρους, οι οποίες ανήκουν στο χώρο του αίτιου (cause) και του αποτελέσματος (effect). Αίτιο θεωρείται η επίδραση της παραμέτρου στο σύστημα ενώ αποτέλεσμα είναι η επίδραση του συστήματος στην παράμετρο. Με την μέθοδο αυτή ποσοτικοποιούνται ποιοτικές ή υποκειμενικές παρατηρήσεις που αφορούν ένα πρόβλημα γεωτεχνικής μηχανικής. Ειδικά στα περισσότερα φυσικά φαινόμενα, η ανάλυση περιπλέκεται λόγω έλλειψης δεδομένων, γεωλογικής πολυπλοκότητας, κλίμακας των φαινομένων αστάθειας και ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων αλληλεπίδρασης. Για να υπάρχει μια δομημένη προσέγγιση σε αυτή την πολυπλοκότητα, μια εμπειριστατωμένη μέθοδος βασισμένη στη μεθοδολογία RES έχει υιοθετηθεί.

Συνεπώς, ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να παρουσιάσει και εξηγήσει με απλό αλλά ταυτόχρονα επιστημονικό τρόπο την συγκεκριμένη μεθοδολογία του RES, ώστε να αναδειχθούν οι κατάλληλες κατά περίπτωση παράμετροι που θα

μπορούν να ποσοτικοποιούνται ευκολότερα από ότι εκείνες που απαιτούν χρόνο και οικονομικό κόστος.

Επίσης, με τη χρήση του RES επιδιώκεται να γίνει γνωστό εάν υπάρχει πιθανότητα να αστοχήσει μια περιοχή όπου υπάρχουν τόσο φυσικά όσο και τεχνητά πρηνή τα οποία δομούνται όχι μόνο από πετρώματα αλλά και εδάφη, ημίβραχους ή και εναλλαγές πετρωμάτων και εδαφών, όπως οι σχηματισμοί του φλύσχη. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι το RES ως εργαλείο μπορεί να συνδράμει στη διερεύνηση της δυνητικής αστοχίας πρηνών πριν γίνουν οι απαραίτητες εκείνες έρευνες που προσδιορίζουν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτης περιοχής.

Επιχειρείται να αποδειχθεί ότι με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, είναι δυνατόν να κατασκευάζεται ένας πίνακας - μητρώο που να μπορεί να χρησιμοποιείται σε περιοχές διαφόρων κλιμάκων [για παράδειγμα, κλίμακας 1:1000/τοπικά (site specific area) ή κλίμακας περιφέρειας 1:50.000 (regional area)] και σε πρηνή που σχετίζονται με διαφορετικούς τύπους γεωλογικών υλικών (εδάφη, βραχώμαζα, αποσαθρωμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί). Ο πίνακας αυτός κατασκευάζεται με βάση βαθμονομημένες παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με την εκάστοτε εξεταζόμενη κατολίσθηση, οι οποίες βοηθούν να γίνουν κατανοητοί οι μεταξύ τους μηχανισμοί αλληλεπίδρασης και κατ' επέκταση να συνδράμουν σημαντικά στην προσπάθεια της πρόγνωσης των αστοχιών πρηνών, μέσω του προσδιορισμού ενός δείκτη αστάθειας και της δημιουργίας χαρτών - ζωνών επιδεκτικότητας σε αστοχία.

Με βάση τα παραπάνω, η διδακτορική διατριβή δομείται σε πέντε κύριες ενότητες ως ακολούθως:

Η πρώτη ενότητα αποτελείται από δύο κεφάλαια, το πρώτο και το δεύτερο.

Στο **1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ** περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές αρχές και έννοιες του φαινομένου της κατολίσθησης (ονοματολογία και ταξινόμηση κατά Varnes), κάνοντας αναφορά και σε πρόσφατες δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με αυτές τις έννοιες.

Στο **2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ** γίνεται συνοπτική ποιοτική παρουσίαση των κυριότερων συστημάτων γεωτεχνικής ταξινόμησης σε βραχώδεις σχηματισμούς (RMR, Q, GSI, SMR) καθώς και των μεθοδολογιών εκείνων που από πολλούς ερευνητές

έχουν προταθεί ως αναλυτικά εργαλεία λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση του κινδύνου των κατολισθήσεων (όπως για παράδειγμα η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, η Ασαφής Λογική και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα). Οι μεθοδολογίες αυτές αξιολογούνται ως προς τον βαθμό επιτυχίας στην αντιμετώπιση της πρόγνωσης αστοχιών πρανών.

Η δεύτερη ενότητα αποτελείται από τα κεφάλαια τρίτο και τέταρτο.

Στο **3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ**, παρουσιάζεται και αναπτύσσεται η έννοια της μεθοδολογίας RES. Πρόκειται για αντικειμενική προσέγγιση που επιτρέπει την χρήση όλων των στοιχείων που είναι σχετικά με ένα τεχνικό έργο, με σκοπό τη σύμπραξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας με τις επί τόπου συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά ενεργειών, οι οποίες παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο και είναι οι ακόλουθες: (α) επιλογή των παραμέτρων που συνδέονται με το τεχνικό έργο, (β) ανάλυση των δυαδικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων, (γ) κωδικοποίηση της σημασίας κάθε αλληλεπίδρασης, (δ) βαθμονόμηση των διαφορετικών κλάσεων των τιμών των παραμέτρων και (στ) υπολογισμό του δείκτη αστάθειας. Με αυτό τον τρόπο, εκείνες οι παράμετροι που είναι ιδιαίτερα ενεργές στη θέση του έργου μπορούν να υπολογισθούν και η σημασία των αλληλεπιδράσεών τους να εξακριβωθεί.

Στην αναλυτική παρουσίαση χρησιμοποιούνται πίνακες και διαγράμματα που επεξηγούν τις βασικές έννοιες της μεθοδολογίας όπως: «αίτιο», «αποτέλεσμα», «ένταση αλληλεπίδρασης», «επικράτηση», «σταθμικός συντελεστής», «δείκτης αστάθειας».

Στο **4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ** παρουσιάζονται και αναλύονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι που συνδέονται με την κατολισθητική επιδεκτικότητα και οι οποίες αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται το μητρώο αλληλεπίδρασης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Για την εύρεση των παραμέτρων αυτών μελετήθηκαν στοιχεία από διάφορους φορείς (ΙΓΜΕ, ΕΜΠ, Γεωλογικά Τμήματα των Πανεπιστημίων Αθηνών, Θεσσαλονίκης και Πάτρας, Υπουργεία Περιβάλλοντος και Αγροτικής Ανάπτυξης, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, ιστοσελίδες γεωλογικού – γεωτεχνικού ενδιαφέροντος από την Ελλάδα και τον διεθνή χώρο, πρακτικά εργασιών από ελληνικά και διεθνή συνέδρια και δημοσιευμένες εργασίες από διεθνή περιοδικά σχετικά με το πεδίο της τεχνικής γεωλογίας και γεωτεχνικής μηχανικής).

Η έρευνα στο πλαίσιο της διατριβής κατέληξε σε δέκα πολύ σημαντικές παραμέτρους που συνδέονται με την κατολισθητική επιδεκτικότητα, εφαρμόζοντας αυτές σε χαρακτηριστικά παραδείγματα από τον Ελληνικό χώρο όπου τεκμηριώνεται η δράση τους. Οι δέκα παράμετροι που μελετήθηκαν είναι οι ακόλουθες: 1) Ανθρώπινη δραστηριότητα (με ειδική αναφορά στην παράμετρο απόσταση από δρόμους), 2) Τεκτονικό καθεστώ, 3) Κλίση πρανούς, 4) Προσανατολισμός πρανούς, 5) Λιθολογία, 6) Υδρογεωλογικές συνθήκες, 7) Βροχόπτωση, 8) Πάχος μανδύα αποσάθρωσης, 9) Απόσταση από ποτάμια, 10) Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία.

Βέβαια, υπάρχουν και άλλες σημαντικές – κρίσιμες παράμετροι (όπως η σεισμικότητα, το ιστορικό των κατολισθήσεων, χρήσεις γης - βλάστηση) αλλά για τους λόγους που επισημαίνονται σε άλλη ενότητα, τελικά δεν ελήφθησαν υπόψη στον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας και στην ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Επίσης, η επιλογή των κύριων παραμέτρων για την ανάλυση έγινε, έχοντας κατά νου να υπάρχει η περισσότερο χρήσιμη και αξιόπιστη αντιπροσώπευση των γεωλογικών, γεωτεχνικών, υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών που σχετίζονται με τις επί τόπου ειδικές συνθήκες και το σκοπό του έργου. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ανάλογα με το μέγεθος της ανάλυσης του μητρώου που απαιτείται για το σχεδιασμό ενός έργου, είναι δυνατόν να εξειδικεύονται περισσότερο οι παράμετροι σε σχέση με τη φύση της ανάλυσης και τον επιδιωκόμενο σκοπό. Για παράδειγμα, ένας μελετητής μπορεί να αναλύσει περισσότερο τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες ή την τεκτονική.

Στην τρίτη ενότητα (5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ), γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας RES σε τέσσερα ιστορικά κατολισθητικά συμβάντα από τον Ελληνικό χώρο (Παναγοπούλα - 1971, Μαλακάσα - 1995, Τσακώνα - 2003, Νεμέα - 2003) με σκοπό την επιβεβαίωση των αστοχιών τους. Με βάση αυτή την προσέγγιση, οι δέκα προαναφερόμενες παράμετροι σχετικές με το έργο, τη θέση, τις γεωπεριβαλλοντικές και γεωμηχανικές συνθήκες λήφθηκαν υπόψη. Τα αίτια και τα αποτελέσματά τους αναλύθηκαν ώστε να δοθούν βάρη σε κάθε παράμετρο σύμφωνα με το βαθμό αλληλεπίδρασής τους στο εξεταζόμενο σύστημα. Ο τελικός δείκτης αστάθειας έλαβε υπόψη του την διαφορετικότητα των τιμών των

παραμέτρων στα επιμέρους πρηνή με την απόδοση διαφορετικών κλάσεων των τιμών των παραμέτρων ως προς την βαθμονόμηση.

Οι συγκεκριμένες κατολισθήσεις (κλίμακας 1:1000) επελέγησαν λόγω του μεγέθους τους (επιφάνεια που επηρέασαν, όγκος κατολισθημένων υλικών) και της σημασίας τους αφού συνετέλεσαν στο κλείσιμο, για μεγάλο χρονικό διάστημα, των κύριων εθνικών δρόμων της χώρας που συνδέονταν με τις παραπάνω τοποθεσίες και ζημίωσαν σημαντικά όχι μόνο την τοπική αλλά κατ' επέκταση και την εθνική οικονομία. Επιπλέον, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποδειχθεί αν και κατά πόσο μπορεί ο δείκτης αστάθειας που προκύπτει από την εν λόγω μεθοδολογία να εφαρμοσθεί ανάλογα και σε άλλες δυνητικά υποψήφιες περιοχές (μεγάλης κλίμακας), επιδεκτικές σε κατολίσθηση, στην Ελλάδα.

Για κάθε μια από τις τέσσερις προαναφερόμενες θέσεις αστοχίας προσδιορίζονται το έργο και οι συνθήκες του περιβάλλοντος (συνολική γεωλογική εικόνα της περιοχής). Ακόμα εξετάζονται πιθανές προηγούμενες ιστορικά αστοχίες πρηνών και οι επιλεγμένες παράμετροι που σχετίζονται με τους γεωλογικούς σχηματισμούς, τις επί τόπου συνθήκες και οι οποίες είναι σχετικές με τη μελέτη της προκαλούμενης αστάθειας.

Στη συνέχεια, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των απαντώμενων γεωλογικών σχηματισμών και των επί τόπου χαρακτηριστικών των πρηνών που μελετώνται προστίθενται στην ανάλυση, ώστε να ολοκληρωθεί η συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων βάσει των οποίων κατασκευάζεται το μητρώο αλληλεπίδρασης και βαθμονομούνται οι επιμέρους παράμετροι. Στην επιλογή των παραμέτρων δεν λαμβάνονται υπόψη αυτές που δεν διαφοροποιούνται στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα η σεισμικότητα.

Από την εφαρμογή του RES στις τέσσερις περιοχές και με βάση την ταξινόμηση του Brabb (1972) σχετικά με την κατηγοριοποίηση του δείκτη αστάθειας, προέκυψε ότι οι ανίστοιχοι δείκτες αστάθειας των τεσσάρων περιοχών έδωσαν τιμές πάνω από 70% (Παναγοπούλα 82,46%, Μαλακάσα 80,53%, Τσακώνα 89,56%, Νεμέα 84,72%) που αντιστοιχεί στο μέγιστο επίπεδο κατηγοριοποίησης κατά Brabb και ισοδυναμεί με κατολισθαίνουσα περιοχή.

Στην τέταρτη ενότητα και στο **6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ** γίνεται επικύρωση των συμπερασμάτων (από την εφαρμογή του RES στα τέσσερα προαναφερόμενα

παραδείγματα αστοχιών) σε μια περιοχή της Περιφέρειας Πελοποννήσου που ανήκει κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στο Νομό Αρκαδίας και συγκεκριμένα στην περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη” (κλίμακας 1:50.000). Ένα πλεονέκτημα των μελετών τέτοιας κλίμακας είναι ότι επιτρέπουν την γρήγορη εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας (μέσω και της χρήσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών) και με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερες σε επιφάνεια περιοχές μπορούν να μελετηθούν σε συντομότερα χρονικά διαστήματα. Ο σκοπός της επικύρωσης είναι να αποδειχθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας του RES και σε μια μεσαίας κλίμακας περιοχή (1:50.000), επιβεβαιώνοντας συνολικά είκοσι μια (21) θέσεις αστοχιών πρηνών (υφιστάμενες και δυνητικές βάσει εκθέσεων του ΙΓΜΕ) σε αυτή τη συγκεκριμένη περιοχή.

Με αυτόν τον τρόπο, το μητρώο αλληλεπίδρασης που παρουσιάζεται από την εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να μοντελοποιηθεί (μέσω και της χρήσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών) και εφαρμοσθεί ανάλογα και σε άλλες δυνητικά υποψήφιες περιοχές, επιδεκτικές σε κατολίσθηση, στην Ελλάδα και όχι μόνο.

Η επικύρωση συνδυάστηκε παράλληλα και με τη δυνατότητα γνώσης του κινδύνου προς κατολίσθηση της εξεταζόμενης περιοχής του Φύλλου Μεγαλόπολης, δημιουργώντας θεματικούς χάρτες ανά επιλεγμένη παράμετρο και αλληλεπιθέτοντάς τους προς παραγωγή ενός συνθετικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Λόγω των πολλών δραστηριοτήτων (οικονομικών και όχι μόνο) στην εξεταζόμενη περιοχή, η διατριβή μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό βοήθημα για την τοπική αυτοδιοίκηση της ευρύτερης περιοχής στα πλαίσια του προγραμματισμού και σχεδίασης διαφόρων τεχνικών έργων, καθώς και στο πλαίσιο του αστικού σχεδιασμού και της βέλτιστης χρήσης γης.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα (που αποτελούν την **πέμπτη και τελευταία ενότητα**):

Τα αποτελέσματα της επικύρωσης έδειξαν πολύ ικανοποιητική ταύτιση ανάμεσα στον τελικό παραγόμενο χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας και στις είκοσι μια θέσεις τόσο των ήδη υφιστάμενων αστοχιών, όσο και των δυνητικά επικείμενων (σύμφωνα με τεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ) να συμβούν μελλοντικά.

Κατά συνέπεια, ο δείκτης αστάθειας που προκύπτει από το μητρώο αλληλεπίδρασης, αφ' ενός δείχνει να συμφωνεί με τις υφιστάμενες αστοχίες πρανών, κάτι που αποδεικνύει την αξία της μεθοδολογίας και αφ' ετέρου συμβάλλει σημαντικά στην αναγνώριση κρίσιμων δυνητικών θέσεων αστοχίας, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισής τους. Συμπερασματικά, η εν λόγω μεθοδολογία έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των ήδη υπάρχοντων συστημάτων, όπως:

1. Βοηθά σε μια πρώτη γρήγορη ανάλυση για τον προσδιορισμό δείκτη αστάθειας σε μια εξεταζόμενη περιοχή.
2. Το μητρώο παρέχει ένα βάρος για κάθε αλληλεπίδραση που προσδιορίζει την έντασή της σε κάθε εξεταζόμενο πρανός.
3. Στα επιμέρους πρανή υπολογίζονται το αίτιο και το αποτέλεσμα σαν το συνολικό άθροισμα των βαθμονομήσεων των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιλεγμένων, κάθε φορά, παραμέτρων. Αυτά οδηγούν στον υπολογισμό της έντασης και επικράτησης, οι οποίες επιτρέπουν, ουσιαστικά, μια αρχική εκτίμηση των κρίσιμων παραμέτρων ευστάθειας ενός πρανούς και κατ' επέκταση των κύριων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.
4. Η βαθμονόμηση των πρανών καθορίζεται από τον μέσο όρο των εντάσεων του διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος, το οποίο είναι ουσιαστικά συνάρτηση όλων των εντάσεων αλληλεπίδρασης και όχι μόνο το άθροισμα των ανεξάρτητων παραμέτρων, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά συστήματα ταξινόμησης.
5. Σχετικά με την κατολισθητική επιδεκτικότητα σε μια περιοχή είναι σημαντικό να επεκταθεί η έρευνα πέρα από τη λογική της χρήσης μιας αριθμητικής τιμής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός γεωλογικού σχηματισμού, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά συστήματα ταξινόμησης. Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως του ότι δείχνει την επίδραση μιας παραμέτρου στις άλλες παραμέτρους του συστήματος και επιπλέον την επίδραση του συστήματος στη συγκεκριμένη παράμετρο. Αυτό, δηλαδή, σημαίνει αλληλεπίδραση των επιλεγμένων παραμέτρων σε δύο διαστάσεις και επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό των παραμέτρων με την μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και επικράτησης.

6. Μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης, γίνεται ανάλυση των σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος για το σύστημα κατολίθωση, κάτι το οποίο δεν καθίσταται δυνατόν με άλλες γνωστές μεθόδους. Με το μητρώο ξεπερνιέται το πρόβλημα του υποκειμενικού προσδιορισμού των βαρών των παραμέτρων. Όπως είναι γνωστό μια κατολίθωση σπάνια συνδέεται με μια και μόνο αιτία. Το μεγάλο εμπόδιο στη μελέτη των κατολισθήσεων, είναι η αναγνώριση όλων των παραμέτρων που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου και κυρίως του προσδιορισμού των μεταξύ τους σχέσεων, το οποίο σύμφωνα με τον Hudson (1992) επιλύεται μέσω της μεθοδολογίας RES. Κατά συνέπεια, προσεκτική συμπλήρωση του μητρώου αλληλεπίδρασης, αξιοποιεί με τον καλύτερο τρόπο την κρίση του ειδικού και τελικώς οι προκύπτοντες σταθμικοί συντελεστές εκφράζουν την μέγιστη δυνατή αντικειμενικότητα, η οποία μπορεί να αποκαλυφθεί από την υφιστάμενη εμπειρία.
7. Το μητρώο επεξεργάζεται τη συνδυασμένη επιρροή όλων των παραγόντων στο σύστημα και τη μεταξύ τους συσχέτιση, ξεπερνώντας τους περιορισμούς της στατιστικής ανάλυσης ανά δύο. Οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης προϋποθέτουν την σύνταξη χάρτη απογραφής υφιστάμενων κατολισθήσεων. Συνεπώς, έχουν εφαρμογή κατ' αρχήν σε περιοχές επιρρεπείς σε κατολισθήσεις. Η συνήθης τεχνική που ακολουθείται για επέκταση του μοντέλου και σε δυνητικά ασταθείς περιοχές είναι η μέθοδος της επέκτασης. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι εφικτός ο προσδιορισμός του κινδύνου ακόμα και σε περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει ιστορικό κατολισθήσεων. Εξ' άλλου, το σκεπτικό χρήσης της μεθοδολογίας RES είναι να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για να γίνει πρόγνωση πιθανής αστοχίας σε μια περιοχή χωρίς να υπάρχει καταγεγραμμένο ήδη κάποιο ιστορικό κατολισθήσεων στην εξεταζόμενη περιοχή.
8. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιλεγμένων παραμέτρων και κατ' επέκταση τις διαστάσεις του μητρώου αλληλεπίδρασης.
9. Επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας των τιμών των παραμέτρων με χρήση του μητρώου για μια εξεταζόμενη περιοχή (για εκτίμηση του δείκτη αστάθειας) από περισσότερους του ενός ειδικούς.

10. Η βελτίωση που φέρνει η παρούσα διατριβή στην αρχική θεωρία του Hudson είναι ότι το RES μπορεί να εφαρμοσθεί όχι μόνο σε μικρής έως μεσαίας κλίμακας περιοχές (κλίμακας έως 1:50.000), όπως έως τώρα έχει εφαρμοσθεί από πολλούς ερευνητές παγκοσμίως αλλά και σε μεγάλης κλίμακας περιοχές (για παράδειγμα 1:5.000 ή 1:1000). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο σε βραχώδη πρρανή (όπως πρωτοεισήγαγε ο Hudson) αλλά και σε πρρανή που δομούνται από εδαφικούς σχηματισμούς, μαλακούς βράχους και γενικά από γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους εναλλάσσονται λιθολογίες με διαφορετική δομή (φλύσσης). Συνεπώς, το πλεονέκτημα του RES είναι η προσαρμοστικότητα του εργαλείου αυτού στις τοπικές συνθήκες και στα δεδομένα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων στοιχείων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την υποκειμενικότητα, τον αυθαίρετο τρόπο επιλογής των παραμέτρων και τον προσδιορισμό των σταθμικών συντελεστών από έναν ειδικό (γεωλόγο, μηχανικό). Έτσι, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός απλού και αποτελεσματικού εργαλείου για τον υπολογισμό της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, χρησιμοποιώντας κάθε φορά παραμέτρους που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν εύκολα σε σχέση με εκείνες που είναι χρονοβόρες και οικονομικά ακριβές έως και ασύμφορες.
11. Το RES δύναται να αποτελέσει ένα επιπρόσθετο πολύ χρήσιμο εργαλείο ικανό να «ανιχνεύει» πολλούς μηχανισμούς που ενδεχομένως ο ειδικός (μελετητής, ερευνητής) να μην μπορεί να αναγνωρίσει (χωρίς αυτό) κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού ενός έργου.
12. Πρακτικά, λοιπόν, ο σκοπός τελικά αυτής της μεθοδολογίας είναι να βοηθήσει έναν επαγγελματία γεωλόγο, μηχανικό ή και ερευνητή στο να προκρίνει τις κατάλληλες παραμέτρους για ένα τεχνικό έργο καθώς και την προτεραιότητα αυτών, τις αλληλεπιδράσεις τους και τα όρια έκτασης της επίδρασής τους.

Η ολοκλήρωση της διατριβής γίνεται με την αναφορά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος. Συμπερασματικά, η παρούσα διδακτορική διατριβή αποσκοπεί στην δημιουργία ολοκληρωμένης μεθοδολογίας - πρόγνωσης του κινδύνου αστοχίας των πρρανών, η εφαρμογή της οποίας αναμένεται να βοηθήσει

στην πρόληψη των κατολισθήσεων με τελικό στόχο την δυνατότητα εφαρμογής των αποτελεσμάτων της έρευνας στο στάδιο λήψης απόφασης και σχεδιασμού.

Extensive Summary

Despite considerable improvements in our understanding of instability mechanisms and the availability of a wide range of mitigation techniques, landslides still cause a significant death toll and significant economic impact all over the world. Landslides are characterized by uncertainties, because of the difficulties of the variability of the causative and triggering factors, which make the analyses of such phenomena a very difficult task.

The rapid increase in population world - wide, coupled with the migration from rural to urban areas, has meant that the creation of new settlement sites, mostly, in cities has become an urgent necessity. For this reason, it is important that the selection of such sites should be based on geo-environmental criteria, taking into account both a sustainable environment and disaster sensitive planning.

Authorities and decision makers need maps depicting the areas that may be affected by landslides so that they are considered in development plans and so that appropriate risk mitigation measures are implemented.

Thus, many methods have been proposed to evaluate landslide susceptibility including qualitative (or semi-qualitative), quantitative (or semi-quantitative) such as RMR, Q, GSI, SMR, analytical hierarchy process and artificial intelligence approaches such as Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Systems.

Traditional rock mass classifications systems (such as RMR, Q) utilizing five or six parameters might be suitable if they contained the 'essence' of the system behavior but this is unlikely to always be the case. In addition, all these methodologies have some weak points concerning the estimation of instability index and as a consequence the production of landslide susceptibility maps.

To deal with such events, many researchers have developed ranking assessment tools. Rapid assessment methods to ascertain the suitability of a site/region for development are not available to planners, landowners and others and for this reason, there is an urgent need to demarcate regions susceptible to slope failure with a fixed set of relevant parameters.

These parameters usually provide to the engineering geology experts a cost and time effective tool for tracing the most critical slope sites (appropriate for land – use planning), which exhibit high inherent instability potential.

Concerning landslide susceptibility mapping, it is believed that its accuracy increases when all determining parameters are included in the analytical process. However, this is rarely achieved because of the difficulty in obtaining all these data or the data are available at very low resolution or at very high cost. To overcome this difficulty and to ensure that all the necessary variables have been included and the interactions between them are understood, a guiding methodology is needed such as **Rock Engineering System (RES)**.

To this direction, PhD thesis, presents and analyzes RES, which is a semi-quantitative rock engineering approach and the basic tool for representing the parameters and their interaction mechanisms. It is based on an interaction matrix which represents the key parameters, as leading diagonal terms and their binary interaction mechanisms as off-diagonal terms.

RES has been developed by Hudson (1992) to determine interaction of a number of parameters in rock engineering design and calculate instability index for rock slopes. Since then, it has been modified and applied to rock stability problems, landslide susceptibility analysis and rock engineering. In this thesis, an attempt is made to prove, how RES can be implemented with the same success in landslides (i.e. site specific area, such as for example 1:1.000 – 1:2.000), which are related to a variety of geomaterials (for instance soils, rocks, weathering mantle, etc) selecting each time the wider appropriate parameters that are relevant to the ad hoc potential slope failure.

Moreover, RES has been used, in this PhD thesis, for evaluating landslide susceptibility by adopting parameters that can be quantified easily than those of time and money consuming ones (like strength, etc). Besides, as Hudson's theory describes, interaction matrix can be further analyzed to many more sub matrices, which means that the study of a site (concerning matrix construction) depends on the degree of analysis we are about to execute.

In this PhD thesis, the methodology of RES is presented and analyzed in order to be implemented in medium and large scale areas. It verifies the already existing slope failures which are defined in those areas and as a result important conclusions come out dealing with the estimation of instability index.

So, the main scope has been defining the important causative and triggering factors responsible for the slope failures, quantifying their interactions, obtaining their weighted coefficients and calculating the instability index, which refers to the potential instability of the examined natural slope. One of the RES outcomes is to provide the experts (geologists, engineers) with a tool which should be used before site investigation (geological – geotechnical) for a project takes place and without knowing if in this area any slope failure has manifested earlier.

The method is used in conjunction with Geographical Information Systems (GIS) approach, which facilitates the manipulation of ten selected thematic map layers and it is believed that can be useful in decision making, regarding the land use and development planning processes in landslide susceptible areas and thus providing a tool for zoning landslide hazard. Moreover, a geoprocessing GIS function called “Model Builder” has been applied in order to be proved, as an alternative (faster) choice, that RES utilization can be used by an expert in landslide susceptibility maps.

RES approach is novel in listing and presenting the rock and soil engineering parameters so that all the interactive or coupled mechanisms and terms can be identified. The interaction matrix, which lists the chosen parameters derived from the experience of the user and refers to the rock/soil engineering system and their interactions, is the key in the application of RES. For the purpose of the present work, a range of possible interactivity from 0 to 4, corresponding to ‘none’ (coded 0 - most stable conditions), ‘weak’ (coded 1), ‘medium’ (coded 2), ‘strong’ (coded 3) and ‘critical’ interactions (coded 4 - most favorable condition for slope failure) is adopted.

The influential role of each parameter on slope failure (weighted of coefficient influence) is revealed from a cause versus effect diagram. The **Cause+Effect** values will be transformed into a percentage form acting as weighting coefficients, which express the proportional share of each parameter (as a failure causing factor) in slope failure and normalized by dividing with the maximum rating (4), giving the a_i percentage.

By coding the interaction matrix components and then summing the values in the row and column through each parameter, “cause” and “effect” co – ordinates are

generated, indicating a parameter's interaction intensity and dominance. By this, we can consider how to quantify parameter significance, through the two measures of parameter interaction which are intensity (as the distance along the diagonal) and dominance (the perpendicular distance from this diagonal to the parameter point).

According to Hudson (1992), there are many “constellations” that could occur, the two main ones being mainly along the C=E line or mainly along a line perpendicular to it. If the parameter points are scattered along the C=E line but fairly close to it, then they can be ranked according to their parameter interaction intensity; in other words, they can be listed in order of interactive importance. If, on the other hand, the parameter points are scattered about a line perpendicular to the C=E line, they will have similar interaction intensities but widely differing dominance values. In the former case, it might be possible to use, say, five or six parameters in such a scheme; in the latter case, all the parameters would have to be used.

The next step is to compute the instability index (I_i) for the considered slope, by using the following equation: $I_i = \sum a_i \times P_{ij}$, where i refers to parameters (from 1 to 10), j refers to the examined slope and a_i is the weighting coefficient of each parameter given by the formula: $a_i = 1/4 * [(C+E)/(\sum_i C + \sum_i E)]\%$, scaled to the maximum rating of P_{ij} (maximum value=4). P_{ij} is the rating value assigned to the different category of each parameter's separation which also fits better to the conditions related to the parameter in question regarding the examined slope failure. The instability index is an expression of the inherent potential instability of the slope, where the maximum value of the index is 100 and refers to the most unfavorable conditions.

Regarding the aforementioned, this thesis presents an application of RES in an attempt to verify the inherent instability potential of: a) Panagopoula landslide in the region of NE Achaia, Peloponnese (Greece), which manifested on 25th – 26th April 1971 and 3rd May 1971, b) Malakasa landslide in the region of NW Attiki (Greece), which manifested on 18th February 1995, c) Tsakona landslide in the region of SW Arcadia, Peloponnese, Greece which happened on February 2003,

and d) Nemea landslide in the region of SW Corinth Peloponnese, Greece on 8th February 2003, through the choice of the better involving parameters.

Utilizing RES method in the examined slopes, the calculated Instability index value (Ii) were found **Ii=82.46** (Panagopoula landslide), **Ii=80.53** (Malakasa landslide), **Ii=89.56** (Tsakona landslide), **Ii=84.72** (Nemea landslide) and classified as (L – landslide) according to the classification for landslide susceptibility by Brabb et al. (1972). These values are confirmed from the slope failures that took place in those particular case study areas.

In the above case studies, ten parameters were selected as independent controlling factors for the landslide occurrence and each factor was classified into 5 classes. These factors, which were utilized for the RES methodology, were: (i) Distance from roads, (ii) Tectonic regime, (iii) Slope inclination, (iv) Slope orientation (aspect), (v) Lithology, (vi) Hydrogeological conditions, (vii) Rainfall, (viii) Thickness of weathering mantle, (ix) Distance from rivers and (x) Distance from tectonic elements. The selection of the appropriate parameters was based not only on valuable knowledge from literature and mainly on the overall experience gained from the study of landslide phenomena in Greek territory and additionally from case studies from all over the world but also on their affinity with landslide occurrence in each study area.

In the present thesis, both geological and geotechnical information has been considered based on the previous ten (10) parameters and all the interactions that come out from this knowledge has been implemented through the interaction matrix. The results of the application of RES method in the selected landslides are presented, such as the interactions of the examined principal parameters, the calculation of their weighting coefficients and finally the instability index accompanying with charts and tables which they decode and translate the aforementioned geodata.

The cause-effect plot is helpful to understand the role of each factor within a project. The more a system is interactive, the more the stability of a slope is low because there is more chance of a small variation in one parameter significantly affecting the system behavior. The computation of the level of interactivity via the C+E value may be an indicator for identifying parameters whose variation is likely

to induce significant changes in the system. As a consequence, RES can be used to decide which interactions are beneficial for engineering and hence could be enhanced and conversely which ones are detrimental for engineering and hence could be minimized.

In this thesis an attempt is made to provide landslide susceptibility estimation of some disastrous landslides in Greece using RES methodology. It represents an approach that seeks to manage a number of interacting factors involved in a landslide problem that is normalized by the overall interactivity of the system through weighted factors. The parameters selected were commensurate with limited time available for the field survey, thereby providing a rapid “first pass” analysis to identify parameters of detriment to slope stability.

To that end, the implementation of RES methodology has been used and found to be a very useful tool, which can allow the designer to taking into account mechanisms which previously might not have been evaluated.

The validity of this approach was tested in a a medium scaled area (1:50.000) using the slope failures happened in a region which is defined by the Geological Map of Megalopolis (South West of Prefecture of Arcadia, Peloponnese, Greece) and calculating the instability index of those failures that have happened in this area, through the use of RES and Geographical Information System.

The majority (95%) of the instability index of those slopes calculated bigger than 54 (out of 100), proving their instability. Besides, through RES, it made clear that many more possible slopes could be take place in the wider region of Megalopolis. It is concluded that RES can be implemented in both small to medium and large scale landslide susceptibility areas. Besides, RES was tested that can be used not only in rock slopes (as Hudson firstly did) but also in slopes associated with other types of geomaterials such as soil, hard soils - soft rocks, rocks with intercalations of different geologic structures (i.e. flysch). So, it is suggested that this procedure could be used in other regions with different geological conditions.

As a consequence, its adaptability to local conditions and to the given characteristics of existing geodata allow the use of an efficient tool in estimating landslide susceptibility by adopting parameters that can be quantified easily compared to other more expensive and time-consuming techniques. Therefore,

RES could be useful in decision making regarding land use and development planning processes in landslide prone areas.

The following suggestions are made to highlight where further work is required and where the research can be directed in the future.

- The methodology is ideally suited to incorporation of uncertainty (e.g. fuzzy techniques) and to landslide risk assessment (production of hazard and risk maps).
- RES could be used in conjunction with Geographical Information System and potential flood zones in order to be used in civil protection policy.
- In the field of urban planning, RES could contribute as an additional tool for Geological Studies Suitability.
- Based on already funded projects in the Region of Peloponnese in Greece such as **Moonrises** [concerning an estimation model for desert hazard (2008)], **Landslides** [concerning a monitoring system for landslides (2011)] and **SoilPro** [which is associated with soil erosion and protection (2014)], RES could be another additional tool for the authorities in order to cope slope failures successfully in advance.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Την χρονική διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής την χαρακτηρίζω ως ένα μεγάλο ταξίδι, σαν το αντίστοιχο που περιγράφει ο ποιητής Κ. Καβάφης στο έργο του Ιθάκη «*Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη, να εύχεται νάναι μακρύς ο δρόμος, γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις ...*». Ήταν μια εξαιρετικά κοπιώδης προσπάθεια, η οποία πρέπει να σημειωθεί ότι συνδυάστηκε με τις απαιτήσεις της επαγγελματικής μου δραστηριότητας και τις υποχρεώσεις του έγγαμου βίου αλλά ταυτόχρονα πολύ ενδιαφέρουσα διαδρομή, αφού κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, εμβάθυνα σε νέα μονοπάτια γνώσης, γνώρισα πολύ αξιόλογους ανθρώπους και βρέθηκα σε τοποθεσίες που διαφορετικά δεν θα επισκεπτόμουν. Την προσπάθειά μου για την ευτυχή κατάληξη αυτού του εγχειρήματος, την οφείλω εκτός της δικής μου επιμονής, υπομονής και αντοχής στο να ανταπεξέλθω σε αυτή την μακρόχρονη εργασία, σε μερικούς ανθρώπους όπου άλλοι περισσότερο, άλλοι λιγότερο και άλλοι έμμεσα με βοήθησαν ώστε να ολοκληρωθεί αυτή διατριβή. Συγκεκριμένα:

Ευχαριστώ, την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή του θέματος της διατριβής. Κατ' αρχήν τον κ. Ιωάννη Κουμαντάκη, Ομότιμο καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της διατριβής, ο οποίος από τον καιρό της παρακολούθησης προαπαιτούμενων μεταπτυχιακών (αλλά και κάποιων προπτυχιακών) μαθημάτων στα πλαίσια του προδιδακτορικού κύκλου σπουδών μου, με εντυπωσίαζε ως προς τον τρόπο παράδοσης των μαθημάτων στις αίθουσες διδασκαλίας με το να προσπαθεί με τη μέθοδο του Σωκράτη, να «εκμαιεύει» τις απαντήσεις των μεταπτυχιακών φοιτητών στα ερωτήματα που αφορούσαν στη σχέση της γεωλογίας, τεχνικής γεωλογίας και υδρογεωλογίας με τα τεχνικά έργα και το περιβάλλον. Επιπρόσθετα, τον ευχαριστώ για τις συμβουλές του στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Δημήτριο Ρόζο, τ. Αναπληρωτή καθηγητή ΕΜΠ, για την αμέριστη και άμεση βοήθειά του σε όλα τα στάδια της έρευνας και ο οποίος υπήρξε ο βασικότερος συντελεστής στην καθοδήγηση εκπόνησης του θέματος της διατριβής καθώς και στην τελική διαμόρφωση του κειμένου αυτής.

Οι συζητήσεις με το τρίτο μέλος της επιτροπής, κ. Γεώργιο Κούκη, Ομότιμο καθηγητή Τεχνικής Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών, στα πλαίσια ελέγχου της προόδου της διατριβής, ομολογώ ότι είχαν μια ανεκτίμητη αξία ως προς τον

πλούτο των ιδεών και λύσεων που μου έδινε για την απρόσκοπτη συνέχιση του παρόντος πονήματος, καθώς και στην τελική διαμόρφωση του κειμένου αυτού.

Ευχαριστώ, θερμά τον Κώστα Λουπασάκη Επίκουρο καθηγητή Τεχνικής Γεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ και τον Παρασκευά Τσαγγαράτο, Δρ. Μηχανικό Μεταλλείων ΕΜΠ, για τις εποικοδομητικές συζητήσεις σε θέματα της διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα, την κα Κωνσταντίνα Νίκα, επιτελικό στέλεχος της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος για το σχετικό ψηφιακό υλικό που μου χορήγησε και αφορούσε τα Διαχειριστικά Σχέδια των Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής και Ανατολικής Πελοποννήσου καθώς και τους Παναγιώτη Σαμπατακάκη Δρ. Υδρογεωλόγο (ΙΓΜΕ), Λάμπρο Πυργιώτη Δρ. Τεχνικό Γεωλόγο (ΙΓΜΕ) και Ναταλία Σπανού Τεχνικό Γεωλόγο M.Sc. (ΙΓΜΕ), για την βοήθειά τους με συμβουλές, χορήγηση σχετικών εργασιών και ψηφιακών δεδομένων σχετικών με το θέμα της διατριβής. Για την χορήγηση στοιχείων που αφορούν τα μετεωρολογικά (βροχομετρικά) δεδομένα ευχαριστώ την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και τον κ. Β. Τσαρμπό, Γεωλόγο του Υπουργείου Γεωργίας.

Ακόμα, ευχαριστώ θερμά το προσωπικό της βιβλιοθήκης του ΙΓΜΕ στην Αθήνα καθώς και το γεωλόγο κ. Κ. Αγγελόπουλο από το Παράρτημα του ΙΓΜΕ στην Τρίπολη, που συνέδραμαν στην αναζήτηση και συγκέντρωση εργασιών και εκθέσεων σχετικών με το θέμα.

Εκτιμώ, ιδιαίτερα, τη βοήθεια των Θ. Παππά (Τεχνικό Γεωλόγο M.Sc.) και του εργοταξιάρχη κ. Ν. Ντονά (Πολιτικό Μηχανικό) από την κατασκευαστική εταιρεία ΤΕΡΝΑ για στοιχεία που μου χορήγησαν σχετικά με τα έργα αποκατάστασης (κατασκευή γέφυρας) της κατολισθήσης στην θέση Τσακώνα του Ν. Αρκαδίας καθώς και τον κ. Ι. Κωνσταντινίδη, Γεωλόγο της Δ/σης Μελετών Έργων Οδοποιΐας του πρώην πλέον Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (νυν Υ.ΠΟ.ΜΕ.ΔΙ), για χορήγηση στοιχείων που αφορούσαν τις κατολισθήσεις σε Τσακώνα και Νεμέα Κορινθίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Νίκο Ανδρουλακάκη Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό ΕΜΠ (ΙΓΜΕ) και πρώην θεματικό Αντιπεριφερειάρχη Περιφέρειας Αττικής σε ζητήματα Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης και Ψηφιακής Πολιτικής, για τη χορήγηση ψηφιακού υλικού για τις ανάγκες του θέματος καθώς και για τις εξαιρετικές γνώσεις του σε

θέματα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, οι οποίες με βοήθησαν (με συζητήσεις μαζί του) σημαντικά στην εκ μέρους μου ορθή δόμηση της σχεπικής γεωβάσης και της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν για τις ανάγκες της διατριβής.

Ο Δρ. Γεωλόγος Σ. Μπέλλας (με χορήγηση εργασιών από τη θητεία του στο Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.) και ο Δρ. Τεχνικός Γεωλόγος Γ. Τσιφουτίδης, στέλεχος του Υπουργείου Περιβάλλοντος (με συζητήσεις), επίσης συνέδραμαν στην υποβοήθηση σκέψεων και ενεργειών για τη σωστή δόμηση της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά την αιρετή διοίκηση της Περιφέρειας Πελοποννήσου (τον Περιφερειάρχη κ. Π. Τατούλη και τον αντιπεριφερειάρχη κ. Ε. Γιαννακούρα) καθώς και τους (πρώην) άμεσα προϊσταμένους μου στις Δ/σεις Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος της Περιφερειακής Ενότητας Αρκαδίας (πρώην Νομαρχία Αρκαδίας) κ. Ι. Παναγιωτούρο και κα Β. Καλαμούτσου αντίστοιχα, για την κατανόηση που έδειξαν και τις διευκολύνσεις που μου παρέιχαν κατά την πορεία συγγραφής του θέματος της διατριβής.

Ευχαριστώ πολύ, ακόμα, τους διευθύνοντες συμβούλους κ.κ. Ι. Μάλιο, Β. Σωτηρόπουλο, Π. Λασκαράτο, Σ. Πατέρα και τα μελετητικά τους γραφεία αντίστοιχα: «Γραφείο Μάλιου Α.Ε.», «Π. Λασκαράτος – Β. Σωτηρόπουλος», «Γενική Μελετών ΕΠΕ – Ίστρια», γιατί η εμπειρία που απέκτησα (με την ιδιότητα του συνεργάτη με αυτά τα μελετητικά σχήματα για μια οκταετία περίπου, συνολικά κατά την χρονική περίοδο 2002-2009) ως γεωλόγος – μελετητής σε γεωλογικές – γεωτεχνικές έρευνες και μελέτες για δημόσια, κυρίως, έργα που αφορούσαν το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟ, ΕΡΓΟΣΕ, ΙΟΝΙΑ ΟΔΟ, ΟΛΥΜΠΙΑ ΟΔΟ, Ε-65 καθώς και μικρότερης φύσης ιδιωτικά έργα, με βοήθησε να σκέπτομαι, σύμφωνα με τους κανόνες της επιστήμης και της τεχνικής, τον τρόπο με τον οποίο να εφαρμόζω τη γεωλογική γνώση στην πράξη, κάτι που οπωσδήποτε συνετέλεσε στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες, θερμές, στον Καθηγητή Γεωτεχνικής Μηχανικής κ. L. Cascini και στον Καθηγητή κ. M. Calvello, του Πανεπιστημίου Salerno της Ιταλίας, βασικούς οργανωτές του θερινού σχολείου LARAM School (**L**andslide **R**isk **A**ssessment and **M**itigation), στο οποίο πραγματοποιούνται (κάθε Σεπτέμβριο για δύο εβδομάδες

στο Σαλέρνο που βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Ιταλίας) υπό την εποπτεία του Τμήματος Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Salerno, σεμινάρια και διαλέξεις σε θέματα διαχείρισης και αντιμετώπισης του κατολισθητικού κινδύνου για υποψήφιους διδάκτορες από κάθε γωνιά της γης και οι οποίοι με επέλεξαν (ύστερα από αίτησή μου σε σύνολο εκατοντάδων υποψηφιοτήτων από όλα τα διεθνή πανεπιστήμια – πολυτεχνικές σχολές) να συμμετάσχω σε αυτό το ιδιαίτερο σχολείο.

Ιδιαίτερη αναφορά, θα ήθελα να κάνω για την επικοινωνία που είχα με τον ίδιο τον εμπνευστή της θεωρίας που παρουσιάζεται, αναλύεται και εφαρμόζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Ευχαριστώ, λοιπόν, θερμότατα, τον κ. John Hudson, ομότιμο (πλέον) καθηγητή του Imperial College of London (Faculty of Engineering, Department of Earth Science & Engineering), για την ομολογουμένως (εντυπωσιακά) άμεση και ουσιαστική ανταπόκρισή του σε ερωτήματά μου σχετικά με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή και για τα θερμά λόγια που μου εξέφρασε για το ότι είχε υπόψη του την προσπάθεια που γίνεται από έλληνες ερευνητές σχετικά με την εφαρμογή και εξέλιξη της μεθοδολογίας **Rock Engineering System (RES)** που πρώτος προσπάθησε να εφαρμόσει στον ευρύτερο χώρο της γεωτεχνικής μηχανικής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις συμβουλές του και τον Dr Peter Arnold, νυν Διευθυντή της εταιρείας Red Rock Geoscience Ltd (υποψήφιο διδάκτορα φοιτητή του κ. Hudson κατά τη χρονική περίοδο 1990-1994), ο οποίος εκπόνησε την πρώτη σχετική διδακτορική διατριβή με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γιώργο και Ανδριάνα για τον τρόπο που με μεγάλωσαν και για τα εφόδια που μου πρόσφεραν, ώστε να μπορέσω να ανταποκριθώ και σε αυτό τον δύσκολο στόχο, τις αδελφές μου Σία και Νατάσα για την συνεχή συμπαράστασή τους στην επίπονη αυτή (και όχι μόνο) προσπάθεια και τέλος τη σύζυγό μου Νεκταρία και τον γιό μου Γιώργο, οι οποίοι δίνουν διαφορετικό νόημα στην προσπάθεια επίτευξης των στόχων μου στηρίζοντάς με, με την αγάπη τους και το χαμόγελό τους.

Πρόλογος, Αντικείμενο – Στόχος Διδακτορικής Διατριβής

Η Γη, ως φυσικό σύστημα, χαρακτηρίζεται από σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενδογενών και εξωγενών διεργασιών στη λιθόσφαιρα, υδρόσφαιρα και ατμόσφαιρα που πραγματοποιούνται σε ένα επαναλαμβανόμενο κύκλο φθοράς και αναγέννησης. Ορογένεση, σεισμοί, εκρήξεις ηφαιστείων, αποσάθρωση, διάβρωση, απόθεση υλικών, αποτελούν τις πιο χαρακτηριστικές μεταβολές συντελούμενες σε γεωλογική χρονοκλίμακα. Τα φυσικά φαινόμενα που προκύπτουν από τις διεργασίες αυτές, πολλές φορές αποτελούν απειλή για την ανθρώπινη ζωή με σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Είναι, λοιπόν, αντιφατικό το γεγονός ότι τα φαινόμενα αυτά ενώ στερούν ανθρώπινες ζωές και καταστρέφουν περιουσίες, παράλληλα αποτελούν αποτέλεσμα φυσικών μεταβολών που συντελούν στη διατήρηση της ζωής στον γήινο πλανήτη.

Η κατανόηση των φυσικών διαδικασιών είναι απαραίτητη καθώς πολλοί από τους κινδύνους που σχετίζονται με αυτές θέτουν περιορισμούς στην ανάπτυξη και ασκούν σημαντική επιρροή στην κοινωνία. Υπολογίζεται πως οι φυσικοί κίνδυνοι κοστίζουν στην παγκόσμια οικονομία περισσότερα από \$50 δισεκατομμύρια το χρόνο. Τα 2/3 αυτού του ποσού ανιππροσωπεύουν τις άμεσες ζημιές και την αποκατάστασή τους και το υπόλοιπο 1/3 αντιστοιχεί στα έξοδα για πρόβλεψη, πρόληψη και αποφυγή των καταστροφών (Τσέργα, 2007).

Ως «φυσικοί κίνδυνοι» ή όπως συχνά αναφέρονται «γεωλογικοί κίνδυνοι» ορίζονται οι γεωλογικές διεργασίες ή απροσδόκητα - ανεξέλεγκτα φυσικά γεγονότα ασυνήθιστου μεγέθους που αποτελούν απειλή για την ασφάλεια, την υγεία, τις δραστηριότητες και την οικονομία μιας κοινωνίας. Μία φυσική καταστροφή είναι η συνέπεια ενός φυσικού κινδύνου (για παράδειγμα μίας ηφαιστειακής έκρηξης, ενός σεισμού ή μίας κατολίσθησης) που έχει επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι κίνδυνοι είναι δυνατό να προκύψουν από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια.

Οι φυσικοί γεωλογικοί κίνδυνοι χαρακτηρίζονται από την ένταση και τη συχνότητα εκδήλωσής τους. Οι ανθρωπογενείς γεωλογικοί κίνδυνοι προκύπτουν από αλληλεπιδράσεις των δραστηριοτήτων του ανθρώπου με το περιβάλλον, οι οποίες επιταχύνουν ή μεταβάλλουν φυσικές διεργασίες των γεωλογικών συστημάτων. Οι ανθρωπογενείς γεωλογικοί κίνδυνοι εξελίσσονται αργά και στις περισσότερες

περιπτώσεις είναι δυνατό να μειωθούν σημαντικά ή και να αποφευχθούν. Γίνεται, λοιπόν, εμφανές πως οι φυσικοί κίνδυνοι αποτελούν μόνιμη απειλή για τις σύγχρονες κοινωνίες, τόσο στις αναπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η σημασία των επιπτώσεών τους, οι οποίες περιλαμβάνουν τεράστιες απώλειες ανθρώπινων ζωών και ανυπολόγιστες υλικές καταστροφές, καθιστά επιτακτική την ανάγκη διερεύνησης και υλοποίησης ενός σχεδίου ολοκληρωμένης αντιμετώπισής τους (Τσέργα, 2007).

Η παρούσα διατριβή ασχολείται διεξοδικά με έναν από τους σημαντικότερους γεωλογικούς κινδύνους που εμφανίζονται σε παγκόσμια κλίμακα και είναι το φαινόμενο των κατολισθήσεων (οι οποίες έχουν καταστροφικές συνέπειες για το φυσικό και το δομημένο περιβάλλον). Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στον Ελληνικό χώρο, όπου εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα λόγω των ιδιαίτερων γεωλογικών, γεωμορφολογικών, κλιματικών και τεκτονικών χαρακτηριστικών. Μάλιστα, η κατανομή (και η συχνότητα) των κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο, έχει καταγραφεί και οριοθετηθεί σε τρεις μεγάλες γεωγραφικές ενότητες από τους Κούκη και Ρόζο (1982), οι οποίες είναι η Δυτική, Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα. Τα πολυάριθμα κατολισθητικά φαινόμενα που έχουν λάβει χώρα στην Ελλάδα, έχουν προκαλέσει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις τόσο οικονομικές όσο και κοινωνικές. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα σημαντικών κατολισθήσεων είναι: (α) η κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Καρπενησίου που εκδηλώθηκε το 1963 και προκάλεσε το θάνατο δεκατριών ανθρώπων και την καταστροφή του χωριού, (β) η κατολίσθηση κατά μήκος της Εθνικής οδού Αθηνών – Λαμίας στο ύψος της Μαλακάσας που έλαβε χώρα το 1995 και επέφερε σημαντική οικονομική επιβάρυνση στην εθνική οικονομία με ποσά άνω του ενός δισεκατομμυρίου δραχμών, (γ) σημαντικά κατολισθητικά συμβάντα όπως στην Παναγοπούλα (1971), Τσακώνα (2003), Νεμέα (2003) και βραχοπτώσεων στα Τέμπη σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (η τελευταία, μάλιστα σοβαρή κατάπτωση που έλαβε χώρα στις 17-12-2009, συνδέθηκε με την απώλεια του Ιταλού μηχανικού κ. Sergio Sianni.

Με βάση τις καταγραφές που έχουν γίνει από τους αρμόδιους κρατικούς φορείς (Υπουργεία Βιομηχανίας, Συντονισμού, Εθνικής Οικονομίας και Γεωργίας, Ι.Γ.Μ.Ε.,

Πανεπιστήμια, κ.λπ.), διαπιστώνεται ότι κατά τη μεταπολεμική περίοδο έχουν εκδηλωθεί στον Ελληνικό χώρο πάνω από πεντακόσιες (500) κατολισθήσεις ενώ ο συνολικός αριθμός θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερος δεδομένου ότι ο ανωτέρω αριθμός αφορά μόνο κατολισθήσεις κατά μήκος του οδικού δικτύου και μέσα σε οικιστικούς χώρους ή κατολισθήσεις με κάποια οικονομική ή κοινωνική επίπτωση (EL 0071, 2012).

Στατιστικές από το κέντρο έρευνας στην επιδημιολογία των καταστροφών [Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)], δείχνουν ότι κατά μέσο όρο, οι καταστροφές από κατολισθήσεις είναι λιγότερο συνηθισμένες από όπ οι καταστροφές που προκαλούνται από άλλα φυσικά αίτια όπως οι πλημμύρες και οι καταιγίδες και είναι υπεύθυνες σε ένα μικρό ποσοστό για όλους τους θανάτους που έχουν λάβει χώρα λόγω φυσικών κινδύνων παγκοσμίως (Hervás and Delattre, 2010).

Ωστόσο, αυτές οι στατιστικές υποτιμούν την κοινωνικό – οικονομική επίδραση των κατολισθήσεων, γιατί ξετάζονται ξεχωριστά από τους υπόλοιπους φυσικούς εναυσματικούς κινδύνους, όπως πολύ ισχυρή (ακραία) βροχόπτωση, σεισμοί ή πλημμύρες. Αυτή η υποεκτίμηση, συμβάλλει στο μειωμένο ενδιαφέρον τόσο των αρχών όσο και του κοινού. Υπολογίσθηκε ότι ο συνολικός αριθμός απωλειών ανθρώπινης ζωής λόγω κατολισθήσεων έχει αυξηθεί από 600 άτομα κάθε χρόνο στην έναρξη της δεκαετίας του 1970, σε αρκετές χιλιάδες κάθε έτος στην έναρξη της δεκαετίας του 1990. Μια περισσότερο συστηματική μελέτη έδειξε έναν μέσο όρο απώλειας ανθρώπινης ζωής περίπου στα 4000 άτομα για την περίοδο από το 1980 έως το 2003 (Hervás and Delattre, 2010).

Επιπλέον, η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού και η μετακίνησή του από τις αγροτικές στις αστικές περιοχές, κάνει επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας νέων κατοικήσιμων περιοχών, οι οποίες όμως θα πρέπει να πληρούν γεωπεριβαλλοντικά κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της αειφόρου ανάπτυξης (Dai et al., 2001).

Συνεπώς, η κατανόηση του μηχανισμού των κατολισθήσεων είναι σημαντική για την πρόβλεψη και αντιμετώπισή τους, είτε με την πλήρη αποσόβηση του κινδύνου είτε με το σχεδιασμό κατάλληλων μέτρων προστασίας και αποκατάστασης. Εντάσσονται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών και είναι αποτέλεσμα

διατάραξης της ισορροπίας εδαφικών ή βραχωδών πρηνών, φυσικών ή τεχνητών. Πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα που στην περίπτωση των κατολισθήσεων συνδέεται άμεσα με τις έννοιες «γεωλογικό περιβάλλον» και «τεχνικά έργα».

Οι κατολισθήσεις, λοιπόν, αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα στην ανάπτυξη έργων υποδομής είτε τα έργα αυτά είναι σε φάση μελέτης είτε σε φάση λειτουργίας και συντήρησης (και αυτό γιατί απαιτούν χρόνο και χρήμα για να διερευνηθούν και μελετηθούν). Ενέχουν αρκετές αβεβαιότητες και εφ' όσον εκδηλωθούν, οι συνέπειές τους είναι συνήθως καταστρεπτικές με μεγάλα κόστη ζημιών (υλικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών κτλ.) και υψηλά κόστη αποκατάστασης. Οι παραπάνω δυσκολίες γίνονται μεγαλύτερες και κρισιμότερες όσο αυξάνει η κλίμακα του έργου καθώς με αυτήν αυξάνει και εύρος, αλλά και το μέγεθος των συνεπειών. Έτσι, διαφορετικά αντιμετωπίζεται η περίπτωση υλοποίησης ενός τεχνικού έργου πάνω ή στην κοντινή περιοχή μιας εν δυνάμει ή υπάρχουσας κατολίσθησης αν το έργο πρόκειται για μια επαρχιακή οδό, έναν αυτοκινητόδρομο ταχείας κυκλοφορίας, έναν οικισμό ή ένα φράγμα (Σακουμπέντα, 2007).

Σαν συνέπεια των κλιματικών αλλαγών και της δυνητικής παγκόσμιας υπερθέρμανσης, αναμένεται μια αύξηση στην κατολισθητική επικινδυνότητα σε πολλές περιοχές λόγω αυξανόμενης βροχόπτωσης, αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο και ακραίων καιρικών φαινομένων. Σε συνδυασμό, δε, με την αύξηση της έκθεσης σε κατολισθητικό κίνδυνο σε πολλά μέρη της γης, η κατολισθητική επικινδυνότητα ολοένα και αυξάνεται. Έργα προστασίας, σε περιοχές με υψηλή δημογραφική πυκνότητα, για την αντιμετώπιση των κατολισθήσεων που μπορεί να εκδηλωθούν συχνά δεν κατασκευάζονται, λόγω περιβαλλοντικών και οικονομικών περιορισμών και επιπλέον δεν είναι συνεχώς εφικτό να εκκενώνονται οικισμοί λόγω κοινωνικών αιτίων. Κατά συνέπεια, χρειάζεται να γίνεται πρόγνωση της εμφάνισης των αστοχιών πρηνών και κατ' επέκταση της επικινδυνότητας και του κινδύνου που σχετίζονται με αυτές (Hervás and Delattre, 2010).

Το αντικείμενο της διατριβής αφορά την διερεύνηση και μελέτη των παραμέτρων εκείνων που ελέγχουν το φαινόμενο των κατολισθήσεων με σκοπό την πρόγνωση των αστοχιών πρηνών (Ως αστοχία ορίζεται όχι μόνο ένα καταστρεπτικό γεγονός αλλά και η μη ικανοποιητική συμπεριφορά ή η εκδήλωση ενός ανεπιθύμητου

γεγονότος δηλαδή ζημιάς με πολύ μεγάλες δαπάνες ανακατασκευής). Αυτό θα πραγματοποιηθεί με το να προσδιορισθεί ένας σταθμικός συντελεστής – βάρος (που θα προκύψει από την διερεύνηση μιας μεθοδολογίας, η οποία ήδη έχει εφαρμοσθεί σε βραχώδη πρηνή) με τον οποίο συντελεστή κάθε παράμετρος συμμετέχει στην όλη διαδικασία εξέλιξης του φαινομένου.

Το πρόβλημα των παραμέτρων που συνεισφέρουν στην εκδήλωση του φαινομένου και η συστηματική εξέταση σε βάθος του μηχανισμού γένεσης των κατολισθήσεων αποτελεί πρόκληση για περαιτέρω έρευνα και μελέτη καθώς τα αίτια δεν έχουν διερευνηθεί και κατανοηθεί από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα με επάρκεια έως και σήμερα. Η μελέτη των βασικών διεργασιών και του μηχανισμού εξέλιξης του φυσικού αυτού κινδύνου αποτελεί αντικείμενο έρευνας, η οποία αποσκοπεί στο να οδηγήσει σε λεπτομερή διάγνωση μελλοντικών κινήσεων - ενεργοποιήσεων νέων κατολισθήσεων καθώς και στον προσδιορισμό των κυρίαρχων παραμέτρων για την δημιουργία τους (Φερεντίνου, 2004).

Στην συγκεκριμένη διατριβή εξετάζεται και διερευνάται η συμμετοχή εκείνων των παραμέτρων που συντελούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων που αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος οφείλεται στην φύση και συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, στην ανισοτροπία και την ανομοιογένεια οι οποίες τους χαρακτηρίζουν. Συνεπώς, στις περισσότερες περιπτώσεις η κατανόηση των εδαφικών ή των βραχωδών σχηματισμών δεν είναι πάντα ικανή να παρέχει την δυνατότητα για ασφαλείς προβλέψεις της συμπεριφοράς τους (Φερεντίνου, 2004).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί βρίσκονται συνεχώς υπό καθεστώς τάσεων, κυρίως μέσω της βαρύτητας, των δυναμικών κινήσεων του ανώτερου φλοιού (οι τεκτονικές κινήσεις, οι σεισμοί, οι ισοστατικές κινήσεις, οι κύκλοι των παγετωδών περιόδων, οι παλίρροιες). Επιπλέον, το γεγονός ότι πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν καθώς και η σύνθετη γεωλογική ιστορία των σχηματισμών καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την μαθηματική μοντελοποίησή τους μέσω αριθμητικών μοντέλων. Στην διαδικασία μοντελοποίησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των εδαφικών ή βραχωδών σχηματισμών με την κατασκευή τεχνικών έργων, ώστε να προσδιορίζονται και οι επιπτώσεις από και προς αυτά (Φερεντίνου, 2004).

Με βάση τις παραπάνω επιστημόσεις, ο Hudson (1992), καθηγητής Γεωτεχνικής Μηχανικής από το Imperial College του Λονδίνου, εισήγαγε μια μέθοδο αναλυτικής προσέγγισης των προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής, υπό μορφή μητρώου, την οποία ονόμασε Μητρώο Αλληλεπίδρασης (Interaction Matrix). Το μητρώο αυτό βασίζεται σε μια μεθοδολογία σχεδιασμού αλληλεπίδρασης παραμέτρων που καλείται ως **Rock Engineering System (RES)**. Ο συγκεκριμένος τρόπος απεικόνισης αποτελεί μια εναλλακτική παρουσίαση της ιεράρχησης των παραμέτρων που συνδέονται με κατολισθήσεις. Η μέθοδος προτείνει μια κατάλληλη κωδικοποίηση του μητρώου έτσι ώστε να προσδιοριστεί το πόσο σημαντική για το σύστημα είναι η κάθε παράμετρος. Αυτό προσδιορίζεται από δύο χαρακτηριστικά μεγέθη που είναι η ένταση αλληλεπίδρασης (interactive intensity) και η επικράτηση (dominance). Κάθε σύστημα χαρακτηρίζεται από παραμέτρους, οι οποίες ανήκουν στο χώρο του αίτιου (cause) και του αποτελέσματος (effect). Αίτιο θεωρείται η επίδραση της παραμέτρου στο σύστημα ενώ αποτέλεσμα είναι η επίδραση του συστήματος στην παράμετρο. Βασικά χαρακτηριστικά των μητρώων που χρησιμοποιούνται σε κάθε γεωτεχνικό πρόβλημα είναι η συμμετρία ή όχι του μητρώου καθώς και οι διαστάσεις του. Η προβολή αυτών των χαρακτηριστικών απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα αίτιου – αποτελέσματος.

Όπως θα εξηγηθεί σε επόμενη ενότητα, η συμμετρία ή μη του μητρώου είναι σημαντική καθώς αντανακλά την κατάσταση του συστήματος. Τα περισσότερα συστήματα βραχομηχανικής και εδαφομηχανικής είναι μη συμμετρικά. Η επίδραση μιας παραμέτρου χ σε μια παράμετρο ψ δεν είναι γενικά η ίδια με την συμπληρωματική αλληλεπίδραση της παραμέτρου ψ στην παράμετρο χ . Η θεώρηση αυτή αποτελεί πρωτότυπη ιδέα του Hudson, η οποία έχει πολλές προεκτάσεις και εφαρμογές καθώς προσφέρεται για τη χρήση σύγχρονων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης (Φερεντίνου, 2004). Με την μέθοδο αυτή ποσοτικοποιούνται ποιοτικές ή υποκειμενικές παρατηρήσεις που αφορούν ένα πρόβλημα γεωτεχνικής μηχανικής.

Για να γίνει κατανοητό το πλαίσιο πάνω στο οποίο βασίσθηκε η ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, αναφέρονται ερωτήματα που συνδέονται γενικά με προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής, όπως:

- α) η δυσκολία της γνώσης των ιδιοτήτων εδάφους και βραχώμαζας που εμπλέκονται σε ένα τεχνικό έργο,
- β) η δυσκολία αναγνώρισης των μηχανισμών αστοχιών που εμπλέκονται στο έργο,
- γ) ποιές είναι οι κατασκευαστικές συνέπειες στις ιδιότητες των γεωλογικών υλικών και στους δυνητικούς μηχανισμούς αστοχίας.

Ένα παράδειγμα για να γίνει κατανοητός ο παραπάνω προβληματισμός είναι η τραγωδία που έλαβε χώρα το 1999 στην πόλη Sarno της νότιας Ιταλίας, πολύ κοντά στο όρος Βεζούβιο, ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις. Η ανάπτυξη της πόλης στα χαμηλά σημεία του αναγλύφου, χωρίς να ληφθούν υπόψη σημαντικά γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία, ούτε βεβαίως το ευρύτερο γεωπεριβάλλον της περιοχής, οδήγησε στην καταστροφή του 1999, όπου υλικά ηφαιστειακής τέφρας πάνω στις πλαγιές των λόφων ρευστοποιήθηκαν ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις, προκαλώντας ροές γαιών που κάλυψαν, κατά την κάθοδό τους τμήμα της συγκεκριμένης πόλης.

Το παράδειγμα αυτό επισημαίνει όχι μόνο την ύπαρξη δυσκολιών στην απόκτηση κατάλληλων και αντιπροσωπευτικών δεδομένων για την κατανόηση των συνθηκών των γεωλογικών υλικών που περιβάλλουν μια υπό μελέτη περιοχή, αλλά και την αβεβαιότητα στο πως αυτά θα συμπεριφερθούν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την κατασκευή, έως την ικανοποίηση πλήρως του σκοπού της κατασκευής ενός τεχνικού έργου (στη συγκεκριμένη περίπτωση η ανάπτυξη της πόλης του Sarno).

Ο σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διατριβής είναι να παρουσιάσει και να εξηγήσει με απλό αλλά ταυτόχρονα επιστημονικό τρόπο την συγκεκριμένη μεθοδολογία του RES, ώστε κάθε φορά ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής και τις ιδιαιτερότητες του τεχνικού έργου, να επιλέγονται οι κατάλληλες, κατά περίπτωση, παράμετροι που θα μπορούν να ποσοτικοποιούνται ευκολότερα από ότι εκείνες που απαιτούν χρόνο και οικονομικό κόστος.

Επίσης, με τη χρήση του RES επιδιώκεται να γίνει γνωστό εάν υπάρχει πιθανότητα να αστοχήσει μια περιοχή στην οποία υπάρχουν τόσο φυσικά όσο και τεχνητά πρηνή που αποτελούνται όχι μόνο από βράχο αλλά και από εδάφη, ημίβραχους και εναλλαγές πετρωμάτων και εδαφών, όπως οι σχηματισμοί του φλύσχη. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι το RES ως εργαλείο βοηθά να διερευνηθεί

η δυνητική αστοχία πρηνών πριν γίνουν οι απαραίτητες εκείνες έρευνες που θα προσδιορίσουν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής.

Επιχειρείται, λοιπόν, να αποδειχθεί ότι με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένας πίνακας - μητρώο που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές διαφόρων κλιμάκων [για παράδειγμα, κλίμακας 1:1000/τοπικά (site specific area) ή κλίμακας περιφέρειας 1: 50.000 (regional area)] και σε πρηνή που συνδέονται με ποικιλία γεωλογικών υλικών (εδάφη, βραχώμαζα, αποσαθρωμένοι σχηματισμοί). Ο πίνακας αυτός συμπεριλαμβάνει βαθμονομημένες παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με κατολίσθηση, οι οποίες βοηθούν να γίνουν κατανοητοί οι μεταξύ τους μηχανισμοί αλληλεπίδρασης και κατ' επέκταση να συνδράμουν σημαντικά στην προσπάθεια πρόγνωσης των αστοχιών πρηνών, μέσω του προσδιορισμού του δείκτη αστάθειας και της δημιουργίας χαρτών - ζωνών επιδεκτικότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, ο τρόπος δόμησης της παρούσας έρευνας αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Συνοπτική παρουσίαση των βασικών αρχών και εννοιών του φαινομένου της κατολίσθησης (**Κεφάλαιο 1^ο**).
- Ποιοτική παρουσίαση των κυριότερων συστημάτων γεωτεχνικής ταξινόμησης βραχομάζας, (RMR, Q, GSI, SMR) καθώς και των μεθοδολογιών εκείνων που από πολλούς ερευνητές έχουν προταθεί ως αναλυτικά εργαλεία λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση του κινδύνου των κατολισθήσεων (όπως για παράδειγμα η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, η Ασαφής Λογική και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα), τα οποία αξιολογούνται ως προς τον βαθμό που επιτυγχάνουν με την χρήση τους στην αντιμετώπιση του ζητήματος της πρόγνωσης αστοχιών πρηνών (**Κεφάλαιο 2^ο**).
- Αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας του Rock Engineering System και ο τρόπος που αυτή χρησιμοποιείται για την ανάλυση της παρούσας έρευνας (**Κεφάλαιο 3^ο**).
- Παρουσίαση εκείνων των παραμέτρων που συνδέονται με την κατολισθητική επιδεκτικότητα και παράθεση χαρακτηριστικών παραδειγμάτων από τον Ελληνικό και διεθνή χώρο που τεκμηριώνουν τη δράση τους (**Κεφάλαιο 4^ο**). Οι υπολογισμοί των συνθηκών ευστάθειας ενός πρηνούς και κατά συνέπεια του

επιπέδου επιδεκτικότητας σε αστοχία, χρειάζονται την απόκτηση ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών, όπως γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωμορφολογικών και γεωμηχανικών. Τα δεδομένα εισόδου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιδεκτικότητας, αντιπροσωπεύουν τα αίτια ή τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των κατολισθήσεων σε μια εξεταζόμενη περιοχή (Sdao et al., 2013). Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε σε αυτή τη διατριβή λαμβάνει υπόψη της αλλά δεν βασίζεται στη γνωστή θεώρηση ότι: «το παρόν και το παρελθόν είναι τα κλειδιά για το μέλλον», κάτι το οποίο είναι θεμελιώδης αρχή της εκπόνησης χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Στην αρχή αυτή τα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων κατολισθήσεων είναι αναγκαία για την εκτίμηση πιθανών περιοχών μελλοντικών κατολισθήσεων. Το RES μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν ακολουθεί αυτό το «αξίωμα», αφού είναι τέτοια η δομή της μεθοδολογίας, που ουσιαστικά αποτελεί τον «ιχνηλάτη», δηλαδή το εργαλείο, για να ανιχνεύσει ο ειδικός (γεωλόγος, μηχανικός, ερευνητής) τη δυνατότητα – πιθανότητα να αστοχήσει μια περιοχή χωρίς απαραίτητα να υπάρχει ιστορικό προηγούμενων αστοχιών. Άλλωστε, αυτή θα είναι τελικά και πρακτικά η χρησιμότητα του RES, δηλαδή να μπορεί να προγνώσει δυνητική αστοχία σε ένα μέρος, στο οποίο ποτέ στο παρελθόν δεν έχει εκδηλωθεί κατολίσθηση.

- Εφαρμογή της μεθοδολογίας του RES σε τέσσερα σημαντικά κατολισθητικά συμβάντα από τον Ελληνικό χώρο (Παναγοπούλα - 1971, Μαλακάσα - 1995, Τσακώνα - 2003, Νεμέα - 2003), έτσι ώστε αφ' ενός μεν να αποδειχθεί ότι μπορεί να εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία σε θέσεις, ήδη επιδεκτικές ιστορικά σε κατολίσθηση και αφ' ετέρου να επιβεβαιώσει, τα συμπεράσματα και πορίσματα που προέκυψαν από την εκ υστέρων ανάλυση των συγκεκριμένων κατολισθήσεων. Τα πορίσματα αυτά προέρχονται από γεωλογικές/γεωτεχνικές έρευνες - μελέτες και ενόργανες (γεωμηχανικά) μετρήσεις – παρακολουθήσεις που έλαβαν χώρα μετά την εμφάνιση των αντίστοιχων συμβάντων. Με αυτόν τον τρόπο θα καθορισθεί αν και κατά πόσο ο δείκτης αστάθειας που παρουσιάζεται από την εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να μοντελοποιηθεί και εφαρμοσθεί ανάλογα και σε άλλες δυνητικά υποψήφιας περιοχές, επιδεκτικές σε κατολίσθηση, στην Ελλάδα και όχι μόνο (**Κεφάλαιο 5^ο**).

➤ Επικύρωση των συμπερασμάτων που θα προκύψουν από τη μελέτη – εφαρμογή του RES στα τέσσερα προαναφερόμενα παραδείγματα αστοχιών σε μια περιοχή της Περιφέρειας Πελοποννήσου που κατά μεγάλο ποσοστό ανήκει στο Νομό Αρκαδίας (και πολύ λιγότερο στο Νομό Μεσσηνίας) και συγκεκριμένα στην περιοχή που καλύπτεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη” (κλίμακας 1:50.000). Με τη συνδρομή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) και με ψηφιακό υπόβαθρο τον τοπογραφικό και γεωλογικό χάρτη του φύλλου “Μεγαλόπολη” πραγματοποιήθηκε συγκέντρωση, εισαγωγή, επεξεργασία, ανάλυση και παρουσίαση γεωλογικών, γεωτεχνικών, μορφολογικών, περιβαλλοντικών και κλιματικών στοιχείων. Η ανάλυση αυτών έγινε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές, έρευνες για κατολισθήσεις από την Ελληνική επικράτεια (Ζιούρκας, 1989, Koukis and Zioukcas, 1991) και την εμπειρία από αντίστοιχες περιπτώσεις, που οδήγησαν στην δημιουργία ενός χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (**Κεφάλαιο 6^ο**). Η επικύρωση προέκυψε από τη σύγκριση των, ήδη, γνωστών κατολισθήσεων στο συγκεκριμένο φύλλο (με βάση τεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ) με τον παραγόμενο χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας και κατέδειξε ότι οι προσδιοριζόμενες θέσεις αστοχιών πρηνών χωροθετούνται σε ζώνες υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε εκτός των άλλων γιατί ο συγγραφέας της παρούσας διατριβής εργάστηκε στις Διευθύνσεις Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης της πρώην Νομαρχίας Αρκαδίας και νυν Περιφερειακής Ενότητας Αρκαδίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου για τρία έτη (2009-2012). Επιπρόσθετα, στα πλαίσια αναζήτησης βιβλιογραφίας για το θέμα της διατριβής, διαπιστώθηκε ότι η ευρύτερη περιοχή της υπό εφαρμογή μεθοδολογίας, ήταν ένα από τα πρώτα τμήματα της Ελληνικής επικράτειας που ξεκίνησε η γεωλογική έρευνα στην Ελλάδα (Μαραβέγιας, 2009). Τέλος, στην εξεταζόμενη περιοχή βρίσκεται και ένα σημαντικό αρχαιολογικό μνημείο, η Αρχαία Λυκόσουρα που εντοπίζεται στις νότιες υπώρειες του Λυκαίου όρους, ένα χιλιόμετρο νότια του ομώνυμου χωριού και αποτελεί Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Μεγαλόπολης και θεωρείται ως η αρχαιότερη πόλη στον κόσμο με εκτιμώμενη χρονολόγηση το 10.000 – 8.000 π.Χ. (Ο Πausanίας τη χαρακτηρίζει ως την αρχαιότερη από

όλες τις πόλεις που υπήρξαν ποτέ πάνω σε ηπειρωτική ή νησιωτική γη, ως την πρώτη πόλη που είδε το φως του ήλιου. Κατά την αρχαιότητα ήταν ιερή πόλη των Αρκάδων).

- Συμπεράσματα (**Κεφάλαιο 7ο**) και προτεινόμενη μελλοντική επέκταση της διατριβής (**Κεφάλαιο 8ο**).

Συνοψίζοντας, η παρούσα διδακτορική διατριβή αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός πρότυπου – μοντέλου πρόγνωσης που μπορεί να αποτελέσει το βασικό εργαλείο πάνω στο οποίο θα βασίζεται εκ των προτέρων η εκάστοτε αξιολόγηση των επιτόπου γεωλογικών – γεωτεχνικών υπαρχόντων στοιχείων μιας υπό μελέτη περιοχής όπου μελλοντικά προβλέπεται να κατασκευασθεί ένα τεχνικό έργο ή να ενταχθεί σε σχέδιο οικιστικής καταλληλότητας. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να προβλεφθούν μελλοντικές αστοχίες αλλά και να διασφαλισθεί ότι το οποιοδήποτε τεχνικό έργο, λόγω της παραπάνω μεθοδολογίας δύναται να βασιστεί σε αξιόπιστα γεωλογικά και γεωμηχανικά στοιχεία.

1. ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

1.1. Γενικά

Όταν πρόκειται να ερευνηθεί μια κατολίσθηση, προκύπτουν ερωτήματα όπως: α) τί θα παρατηρήσει ουσιαστικά ένας ερευνητής ή μελετητής και β) πώς αυτές οι παρατηρήσεις θα περιγραφούν ξεκάθαρα.

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω ερωτήματα και τις έννοιες που σχετίζονται με την έρευνα και μελέτη μιας κατολίσθησης, οι απαντήσεις που αναζητεί ένας ερευνητής – μελετητής ξεκινούν αρχικά από την ορθή εκτίμηση – διάγνωση για το είδος και τύπο της εκάστοτε εξεταζόμενης κατολίσθησης.

Εδαφικές ή βραχώδεις μάζες που βρίσκονται είτε κάτω από οριζόντια μορφολογική επιφάνεια, είτε πίσω από κεκλιμένη (πρανές), μπορούν να υποστούν διατάραξη της ισορροπίας τους, ύστερα από ορισμένες εσωτερικές ή εξωτερικές μεταβολές. Οι διαταράξεις αυτές μπορούν να προκληθούν από εξωτερικές παρεμβάσεις με την άμεση ή την έμμεση συμβολή του ανθρώπου. Επίσης, μπορούν να προκληθούν και χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις από διάφορες φυσικές διεργασίες, οι οποίες εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου. Εξετάζοντας το σύνολο αυτών των μεταβολών, από κινηματική άποψη, διακρίνονται δύο συνιστώσες κίνησης, οριζόντια και κατακόρυφη (EL 0071, 2012).

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο κατακόρυφη μετακίνηση, το φαινόμενο καλείται καθίζηση ή κατάρρευση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου εκτός από την κατακόρυφη, υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα κίνησης, το φαινόμενο καλείται με την ευρύτερη έννοια του όρου κατολίσθηση.

Οι δύο βασικές συνιστώσες κίνησης που προαναφέρθηκαν, συνδέονται με την ανάπτυξη ορθής ή διατμητικής τάσης. Έτσι, αν δρα ορθή τάση σε οριζόντιο επίπεδο, σε περίπτωση μετακίνησης της μάζας υπάρχει κατακόρυφη κίνηση, δηλαδή καθίζηση. Αν συνυπάρχει και διατμητική τάση, η οποία μάλιστα υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους ή της ασυνέχειας μιας βραχώδους μάζας, θα υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα στην κίνηση (δηλαδή κατολίσθηση), η οποία, συνήθως, δεν λαμβάνει μεγάλες τιμές, όμως μερικές φορές μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλη σε σχέση με την κατακόρυφη (EL 0071, 2012).

Κατά συνέπεια με τη γενική έννοια του όρου, κατολίσθηση είναι κάθε μικρή ή μεγάλη αλλαγή της επιφάνειας μιας κλιτύος η οποία συνοδεύεται με μετακίνηση

υλικού με ρήξη ή όχι της συνέχειάς της, αργή ή ξαφνική που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας και οφείλεται σε φυσικά ή τεχνητά αίτια. Εκφράζει, δηλαδή, το αποτέλεσμα της αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους που εκτός από την περίπτωση των τεχνητών αιτίων αποτελεί μια φυσική γεωμορφολογική εξέλιξη, όπως για παράδειγμα η διάβρωση αλλά με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες (Μαρίνος, 1998).

Σύμφωνα με τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007), ο όρος «κατολίσθηση» αποτελεί την απόδοση του αντίστοιχου αγγλικού όρου «Landslide», ο οποίος ετυμολογικά δεν ανταποκρίνεται με ακρίβεια στο γενικότερο φαινόμενο, γιατί εκτός της ολίσθησης (slide) μπορεί να περιλαμβάνεται η πτώση, η ανατροπή ή και η ροή. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει όχι μόνο στη ξηρά αλλά και μέσα σε υδάτινο περιβάλλον (λίμνη, ταμιευτήρα και θάλασσα).

Στην ειδική έκδοση της Αμερικανικής Γεωλογικής Εταιρείας (USGS), δίνονται οι παρακάτω όροι - προϋποθέσεις για την κατάταξη μιας κίνησης στις κατολισθήσεις (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Η δύναμη που παίζει πρωτεύοντα ρόλο να είναι η βαρύτητα.
- Να ανήκει στις κινήσεις των μαζών.
- Το μετακινούμενο υλικό να είναι τμήμα όρους ή λόφου.
- Το μετακινούμενο υλικό να περιλαμβάνει μέρος του μανδύα ή του μητρικού πετρώματος ή και τα δύο.
- Η ζώνη ή το επίπεδο της κίνησης να μην ταυτίζεται με γεωλογικό ρήγμα.
- Η κίνηση να γίνεται προς τα κάτω και προς τα έξω με ελεύθερη επιφάνεια.
- Η ταχύτητα της κίνησης να είναι σχετικά μεγάλη (όχι ερπυσμός).
- Η κίνηση να εκδηλώνεται με πτώση, ολίσθηση ή ροή.

Από το έτος 1978 και μέχρι σήμερα έχει επικρατήσει ο όρος «μετακίνηση μαζών» αντί του όρου «κατολίσθηση» και με αυτόν περιλαμβάνεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρηνούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό και δεν περιλαμβάνονται οι καθιζήσεις (Varnes, 1978). Η ευρύτητα που αποδίδεται στον όρο φαίνεται και από τον ορισμό που δίνεται από την Ομάδα Εργασίας της UNESCO για τη διεθνή καταγραφή των κατολισθήσεων, που ορίζει την κατολίσθηση σαν «την κίνηση μιας μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατόντη ενός πρηνούς».

Για την ταξινόμηση των κατολισθήσεων, έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές, κατά καιρούς, διάφορες προτάσεις, οι οποίες θεωρήθηκε ότι ήταν απαραίτητες στην περιγραφή, στην έρευνα και στην αντιμετώπιση των φαινομένων αλλά και γενικότερα στην καλύτερη επικοινωνία μεταξύ των ασχολούμενων με το θέμα αυτό. Σε κάθε μια περίπτωση ταξινόμησης, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε παραμέτρους που έχουν σχέση με: α) τον τύπο και το είδος του υλικού κατολίσθησης, β) την περιεχόμενη υγρασία του κατολισθαίνοντος υλικού, γ) τον τύπο της κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή), δ) την ταχύτητα της κίνησης, ε) το αίτιο της κίνησης (σεισμός, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας), στ) τη σχέση ολίσθησης και επιφάνειας ολίσθησης (επίπεδη, περιστροφική), ζ) την τοποθεσία όπου γίνεται το φαινόμενο (ξηρά, θάλασσα, λίμνη), η) τη γεωμετρία και μορφολογία του πρηνούς, θ) το περιβαλλοντικό καθεστώς και τις κλιματικές συνθήκες και ι) τον μηχανισμό της ολίσθησης.

Η παρούσα διατριβή θα αναφερθεί στην ταξινόμηση που προτείνει ο Varnes γιατί έχει γίνει διεθνώς αποδεκτή, χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα και μπορεί, εύκολα, να προσαρμοστεί σε όλες τις συνθήκες.

1.2. Ταξινόμηση κατά Varnes

Ο Varnes (1978) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων, τα βασικά κριτήρια για την ταξινόμηση του οποίου είναι ο τύπος της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού. Ανάλογα με τον τύπο της μετακίνησης διακρίνονται: α) πτώσεις, β) ανατροπές, γ) ολισθήσεις, δ) πλευρικές εξαπλώσεις και ε) ροές ενώ μία ακόμα ομάδα περιλαμβάνει τις σύνθετες μετακινήσεις που αποτελούν συνδυασμό περισσότερων τύπων μετακίνησης. Ανάλογα με το είδος του γεωλογικού υλικού που μετακινείται, διακρίνονται κινήσεις οι οποίες εκδηλώνονται: α) στο βραχώδες υπόβαθρο και β) στους εδαφικούς σχηματισμούς. Στον Πίνακα 1.1 δίνονται, συνοπτικά, οι διάφοροι τύποι μετακίνησης πρηνών που προκύπτουν από τους συνδυασμούς των παραπάνω τύπων μετακίνησης και του είδους του μετακινούμενου υλικού.

Σύμφωνα με την παραπάνω ταξινόμηση σαν βραχώδες υπόβαθρο ορίζεται η μάζα εκείνη, η οποία πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης ήταν ένα σκληρό πέτρωμα που βρισκόταν από γεωλογική άποψη στη φυσική του θέση ενώ σαν

έδαφος, τα ασθενώς συνδεδεμένα συσσωματώματα ορυκτών και πετρωμάτων που έχουν προκύψει από αποσάθρωση, διάβρωση και μεταφορά προϋπαρχόντων πετρωμάτων ή από την επί τόπου αποσάθρωσή τους. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή κάθε τύπου μετακίνησης, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του Varnes.

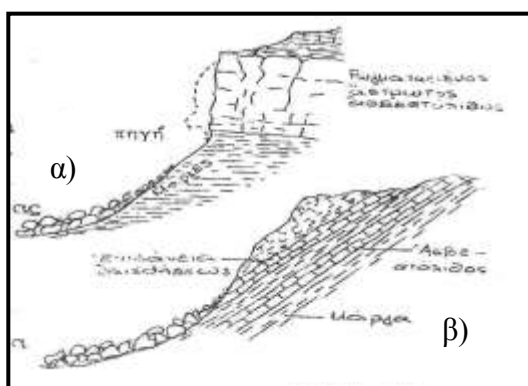
Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση κατολισθητικών κινήσεων κατά Varnes (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

ΤΥΠΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ						
		ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ		ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ				
				ΚΥΡΙΩΣ ΑΔΡΟΜΕΡΗ		ΚΥΡΙΩΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΗ		
ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ	Αφορούν κυρίως βραχώδεις μάζες, πακτωμένους μαζών που μετακινούνται λόγω βάρους με ή χωρίς επιρροή από νερό.	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	
ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ	Αφορούν κυρίως εδαφικούς σχηματισμούς.	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΕΔΑΦΩΝ	ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ ΕΔΑΦΩΝ	
ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ κυκλική επιφάνεια, με βρούσιες στην κεφαλή σημαντικού ποσού πολλές φορές δάμπεως και συσσωρευση υλικών στον πόδο. Αφορούν κυρίως εδαφικούς σχηματισμούς.	ΛΙΓΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	
	ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΕΣ επί οριζόντιου επιπέδου επιφάνειας και αφορούν κυρίως βραχώδεις μάζες, που ολισθαίνουν σαν μπλοκ ή σαν κατακερματισμένα τεμάχια που συνήθως "πλέθουν" μέσα σε εδαφικό υλικό.	ΠΟΛΛΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΕΔΑΦΩΝ
			ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ
ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ (ΥΠΟΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ) ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ			ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΜΑΖΩΝ	ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΜΑΖΩΝ	ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΕΞΑΛΑΔΙΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	
ΡΟΕΙΣ	Γρήγορες ή και αργές μετακινήσεις μεταμορφωμένων εδαφικών μαζών. Η μετακίνηση αρχίζει κυρίως μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις. "Χιονοστιβάδες" φυσικών κορμμάτων (προϊόντων αποσάθρωσης κυρίως βραχώδων σχηματισμών). "Τεχνητό" κορμάκι, τα προϊόντα εκσκαφών διάσχισης δρόμων ή άλλων τεχνικών έργων που συνήθως αποτίθενται στα προνή χωριά προστασία. Οι ροές στα τελευταία οδηγούν τα υλικά αυτά στις κοίτες των ρομών και σε περιπτώσεις πλήρητων προκαλούν καταστροφικά φαινόμενα σε οικισμούς.		ΡΟΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΜΑΖΩΝ	ΡΟΕΙΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΜΑΖΩΝ	ΡΟΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΡΟΕΙΣ ΑΔΡΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	ΡΟΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	
ΜΙΚΤΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ		ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΥΟ Ή ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ						
ΕΡΠΥΣΜΟΙ	Αργές έως πολύ αργές παραμορφώσεις στο χώρο έως πολύ αργές ολισθήσεις εδαφικών μαζών, που αν δεν αντιμετωπισθούν εξελίσσονται σε περιστροφικές ολισθήσεις.							
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ	<0.06 μ / χρόνο	0.06 – 1.5 μ / χρόνο	1.5 μ / χρόνο έως 1.5 μ / μήνα	1.5 μ / μήνα έως 1.5 μ / ημέρα	1.5 μ / ημέρα έως 0.3 μ / λεπτό	0.3 μ / λεπτό έως 3 μ / δευτερόλεπτο	>3 μ / δευτερόλεπτο	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΑΡΑ ΠΟΛΥ ΑΡΓΗ	ΠΟΛΥ ΑΡΓΗ	ΑΡΓΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΓΡΗΓΟΡΗ	ΠΟΛΥ ΓΡΗΓΟΡΗ	ΠΑΡΑ ΠΟΛΥ ΓΡΗΓΟΡΗ	

1.2.1. Καταπτώσεις

Σαν κατάπτωση ορίζεται η ελεύθερη, απότομη και γρήγορη πτώση τεμαχών από απόσπαση σε απότομη κλιτύ (Μαρίνος, 1998). Τα υλικά της πτώσης συσσωρεύονται στη βάση και σχηματίζουν, συχνά, κώνους κορημάτων. Οι καταπτώσεις αφορούν τις περισσότερες φορές πετρώματα αλλά έχει συμβεί πολλές φορές το συγκεκριμένο φαινόμενο να εκδηλώνεται και σε εδάφη όταν αυτά έχουν μεγάλη συνοχή, όπως για παράδειγμα οι σκληρές άργιλοι και οι μάργες. Αν και στα εδάφη μπορούν να παρουσιασθούν όλες οι μορφές κατολισθήσεων, η αστάθεια των πετρωμάτων εκδηλώνεται, σχεδόν, τις περισσότερες φορές με τη μορφή των καταπτώσεων. Αναλυτικότερα, οι πιο συχνές περιπτώσεις αναφέρονται σε:

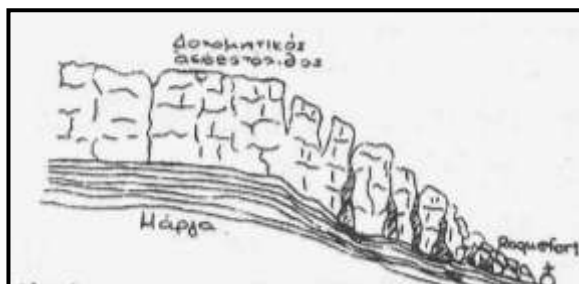
- **Εναλλαγές άκαμπτων πετρωμάτων με λιγότερο συμπαγή και περισσότερο τρωτά στην αποσάθρωση ή διάβρωση πετρώματα.** Η κατάπτωση γίνεται από υποσκαφή της βάσης του άκαμπτου πετρώματος από εξωγενείς γεωδυναμικούς παράγοντες. Αν το λιγότερο συμπαγές πέτρωμα είναι στεγανό και ταυτόχρονα το άκαμπτο μακροδιαπερατό, η εκδήλωση πηγής στην επαφή τους βοηθάει την κατάπτωση (Σχήμα 1.1α). Η ρήξη της συνέχειας του πρηνούς μπορεί να γίνει και με διαφορετικό τρόπο, δηλαδή με ολίσθηση του άκαμπτου πετρώματος πάνω στην επιφάνεια επαφής του, που καταλήγει στη συνέχεια σε κατάπτωση (Σχήμα 1.1β).



Σχήμα 1.1 Εναλλαγές άκαμπτων πετρωμάτων με λιγότερο συμπαγή και περισσότερο ευκολοδιάβρωτα πετρώματα (Μαρίνος, 1998).

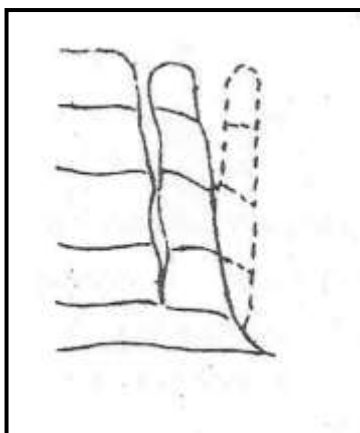
Στην περίπτωση του συγκεκριμένου εδαφίου ανήκουν και οι καταπτώσεις που προκαλούνται από εσωτερικό ερπυσμό που συμβαίνει όταν το αργιλικό υποκείμενο στρώμα από ευαισθησία έρπει (εσωτερικά) κάτω από το βάρος του

υπερκείμενου συμπαγούς πετρώματος. Ωστόσο, για να οδηγήσει ο εσωτερικός ερπυσμός σε κατάπτωση θα πρέπει να συντελέσει και η μορφολογία του εδάφους, διαφορετικά το φαινόμενο θα αποτελεί μια τυπική μορφή κατολίσθησης (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2. Κατάπτωση γκρεμού από εσωτερικό ερπυσμό σε καρστικό οροπέδιο πάνω από το Roquefort Γαλλίας. Στο σύνολό του το φαινόμενο είναι προοδευτικό και όχι απότομο (Μαρίνος, 1998).

- **Συμπαγή πετρώματα ανάλογα με τη γεωμετρία των επιπέδων ασυνέχειας.** Στις καταπτώσεις αυτής της περίπτωσης, οι αποκολλήσεις προκαλούνται από μια μη ευνοϊκή διάταξη των επιπέδων ασυνέχειας του πετρώματος (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3. Μορφή κατάπτωσης λόγω της γεωμετρίας των επιπέδων ασυνέχειας (Μαρίνος, 1998).

Στο Σχήμα 1.3 οι ρωγμές μπορεί να οφείλονται σε διακλάσεις ή να δημιουργήθηκαν από την εκφόρπιση των τάσεων του πετρώματος που είναι (στην συγκεκριμένη περίπτωση) περισσότερο έντονη λόγω της παρουσίας απότομου πρανούς. Οι ρωγμές είναι παράλληλες προς το πρανές και σβήνουν σε κάποιο βάθος. Αυτή η αποσυμπίεση ευνοεί, φυσικά, το άνοιγμα των διακλάσεων που προϋπάρχουν και κατά συνέπεια η κατάπτωση μπορεί να προκληθεί από την

απώλεια της πλευρικής συνέχειας του πετρώματος αλλά και τη συνδρομή του νερού. Συγκεκριμένα, το νερό εκτός του ότι διευκολύνει την εξέλιξη των διακλάσεων, φορτίζει με την πίεση του νερού των πόρων (υδροστατική πίεση) το χαλαρωμένο πέτρωμα. Αν μάλιστα, το νερό παγώσει μέσα στις διακλάσεις, τότε εξασκεί πρόσθετες τάσεις στα τοιχώματα λόγω της αύξησης του όγκου του. Το φαινόμενο αυτό απαντάται, κυρίως, στις ορεινές περιοχές. Επιπλέον, αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι ρίζες των δένδρων στις άκρες των πρανών προκαλούν πρόσθετες τάσεις με συνέπεια την χαλάρωση των βράχων.

Στην περίπτωση καταπτώσεων κορημάτων η μάζα που αποκολλάται είναι κορήματα, τα οποία αποτελούνται από θραύσματα που δημιουργήθηκαν πριν την εμφάνιση του φαινομένου της μετακίνησης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Ο Rapp (1960) διακρίνει τις καταπτώσεις σε: α) πρωτογενείς καταπτώσεις (πτώσεις υλικών απ'ευθείας από το μητρικό πέτρωμα) και β) δευτερογενείς καταπτώσεις (πτώσεις μεταφερμένων χαλαρών υλικών: χαλικιών μεγέθους <75mm, κροκαλών μεγέθους <300mm και τεμαχών μεγέθους >300mm).

1.2.2. Ανατροπές

Στις ανατροπές η κίνηση είναι περιστροφή προς τα έξω της αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες κυρίως πρανές γύρω από σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας (Εικόνα 1.1). Προκαλείται, κυρίως, από τη βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές. Η ανατροπή της μάζας εξελίσσεται συνήθως σε πτώση ή ολίσθηση, ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και της μετακινούμενης μάζας καθώς και της επιφάνειας αποκόλλησης. Η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή στα αρχικά στάδια και να μετατραπεί σε εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια. Τέλος, η ανατροπή κορημάτων και γαιών είναι ένα σπάνιο φαινόμενο και στην κατηγορία αυτή εντάσσονται κυρίως δευτερογενείς ανατροπές λόγω εφελκυστικών ρωγμών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 1.1. Φωτογραφία από ανατροπή block – τεμαχίων στην περιοχή Fort St. John, British Columbia, Canada Καναδάς, USGS (Highland and Bobrowsky, 2008).

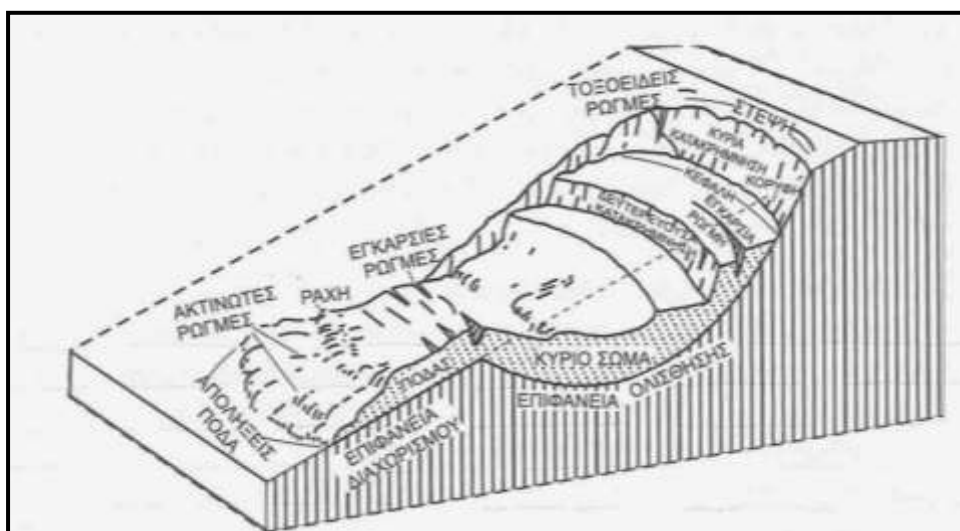
1.2.3. Ολισθήσεις

Πρόκειται για μετακινήσεις, οι οποίες συνοδεύονται με θραύση κατά μήκος μιας ή περισσοτέρων επιφανειών. Διακρίνονται δύο τύποι ολισθήσεων από τους οποίους, στον μεν πρώτο υπάρχει περιστροφική κίνηση της μάζας γύρω από έναν νοητό άξονα, στο δε δεύτερο υπάρχει μετάθεση της μάζας χωρίς να ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο τόξο.

Στους βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς η ολίσθηση μπορεί να συνίσταται από μετακίνηση πάνω σε καλά διαμορφωμένες επιφάνειες ασυνεχειών (στρώση, διάκλαση, σχιστότητα κ.λπ.), χωρίς να παρατηρείται πρωτογενής θραύση του υλικού οπότε και η επιφάνεια ολίσθησης είναι σαφώς καθορισμένη. Έτσι, είναι δυνατό η ολισθαίνουσα μάζα να κινηθεί πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης, η οποία και αποτελεί πλέον μία επιφάνεια διαχωρισμού για τη μετακινούμενη μάζα. Επίσης, διακρίνονται δύο τύποι, ανάλογα με το αν η μετακινούμενη μάζα έχει υποστεί μικρές ή μεγάλες παραμορφώσεις. Ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης καθώς και το μηχανισμό μετακίνησης, οι ολισθήσεις διακρίνονται στις περιστροφικές και στις μεταθετικές (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

α) Περιστροφικές ολισθήσεις: είναι ολισθήσεις, οι οποίες γίνονται κατά μήκος μιας επιφάνειας θραύσης που είναι κοίλη προς τα πάνω (με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας) και αποτελούν τον πιο κοινό τύπο κατολισθήσεων (Σχήμα 1.4). Η περισσότερο συνηθισμένη μορφή είναι αυτή της

«κάθισης» και παρατηρούνται τόσο σε ομογενή υλικά όσο και σε ετερογενή. Ειδικά στις περιπτώσεις, όπου η ολίσθηση εκτείνεται σε ένα μεγάλο τμήμα του πρηνούς κάθετα στη διεύθυνση μετακίνησης, η επιφάνεια θραύσης μπορεί να παραλληλισθεί με κύλινδρο, ο άξονας του οποίου είναι παράλληλος στο πρηνές. Το ανώτερο τμήμα της επιφάνειας διάρρηξης είναι σχεδόν κατακόρυφο με αποτέλεσμα τα ακραία μη μετακινηθέντα τεμάχια να είναι ασταθή και έτσι να παρατηρούνται νέες θραύσεις ενώ στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση ή φούσκωμα (EL 0071, 2012). Επίσης, μπορούν να εκδηλωθούν σε έντονα ασυνεχείς βραχομάζες, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν σαν ανισότροπες. Συνήθως, οι πρώτες ενδείξεις πριν την εκδήλωση μιας περιστροφικής ολίσθησης είναι η εμφάνιση τοξοειδών ρωγμών στο έδαφος, κατά μήκος των οποίων θα αναπτυχθεί η κύρια κατακρήμιση με τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της ολίσθησης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Σχήμα 1.4. Σχέδιο και ονοματολογία μιας τυπικής περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978).

Στο προηγούμενο σχήμα απεικονίζεται ένα πρότυπο σχέδιο περιστροφικής ολίσθησης που προτάθηκε από τον Varnes και αποτέλεσε τη βάση για την περιγραφή κατολισθητικής κίνησης.

Το έτος 1990 η Ειδική Επιτροπή για τις κατολισθήσεις που συστάθηκε από τη Διεθνή Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας, πρότεινε αναλυτική ονοματολογία για τις περιστροφικές ολισθήσεις, η οποία σε γενικές γραμμές συμπληρώνει αυτήν του Varnes. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά και η ονοματολογία που προτάθηκαν, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια και δίνονται στο Σχήμα 1.4.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι η συγκεκριμένη ονοματολογία χρησιμοποιείται για την περιγραφή όλων των κατολισθήσεων γενικότερα (όχι μόνον των περιστροφικών) σε διεθνές, πλέον, επίπεδο. Αναλυτικά οι επιμέρους όροι της συγκεκριμένης ονοματολογίας είναι οι ακόλουθοι (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

(1) Στέψη: Το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.

(2) Κύρια κατακρήμνιση: Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης (στέψη) που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.

(3) Κορυφή: Το υψηλότερο σημείο επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

(4) Κεφαλή: Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

(5) Δευτερεύουσα κατακρήμνιση: Δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της μετακινούμενης μάζας που έχει προέλθει από διαφορικές μετακινήσεις της μάζας αυτής.

(6) Κύριο σώμα: Το τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.

(7) Πόδας: Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και το οποίο υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

(8) Άκρο: Το σημείο της απόληξης που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης.

(9) Απόληξη: Το κατώτερο, συνήθως κυρτό όριο της μετακινούμενης μάζας. Απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κύρια κατακρήμνιση.

(10) Επιφάνεια ολίσθησης: Η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης κάτω από τη μετακινούμενη μάζα της κατολίσθησης, πάνω στην οποία έγινε η ολίσθηση.

(11) Απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης: Η τομή του κατώτερου τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης και της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.

(12) Επιφάνεια διαχωρισμού: Το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα της κατολίσθησης.

(13) Μετακινούμενη μάζα: Η μάζα του πρσανούς που έχει μετακινηθεί από την αρχική της θέση, λόγω της κατολίσθησης.

(14) Ζώνη απομείωσης: Η περιοχή της κατολίσθησης στην οποία η μετακινούμενη μάζα κείται κάτω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Στη ζώνη αυτή, το υψόμετρο της αρχικής επιφάνειας του εδάφους μειώνεται.

(15) Ζώνη συσσώρευσης: Η περιοχή της κατολίσθησης στην οποία η μετακινούμενη μάζα κείται πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Στη ζώνη αυτή, το υψόμετρο της αρχικής επιφάνειας του εδάφους αυξάνεται.

(16) Απομείωση: Ο όγκος που ορίζεται μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης, της απομειούμενης μάζας και της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.

(17) Απομειούμενη μάζα: Τμήμα της μετακινούμενης μάζας το οποίο υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης και υπόκειται της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.

(18) Συσσώρευση: Τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.

(19) Πλευρά: Η δεξιά ή αριστερή πλευρά της κατολίσθησης (όπως φαίνεται από τη στέψη) που είναι προέκταση της κυρίας κατακρήμνισης.

(20) Αρχική επιφάνεια εδάφους: Η επιφάνεια του εδάφους πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης.

Στη συνέχεια απεικονίζονται δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις περιστροφικής ολίσθησης από τον Ελληνικό χώρο (Εικόνες 1.2 & 1.3).



Εικόνα 1.2. Περιτροφική ολίσθηση στη ζώνη αποσάθρωσης της αργιλικής φάσης του φλύσχη στην Εθνική Οδό Λειβαδιάς – Αράχωβας στα τέλη της δεκαετίας του 1970 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 1.3. Περιτροφική ολίσθηση σε σκληρούς μαργαϊκούς σχηματισμούς με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο που υπόκειται σε υποσκαφή λόγω θαλάσσιας διάβρωσης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

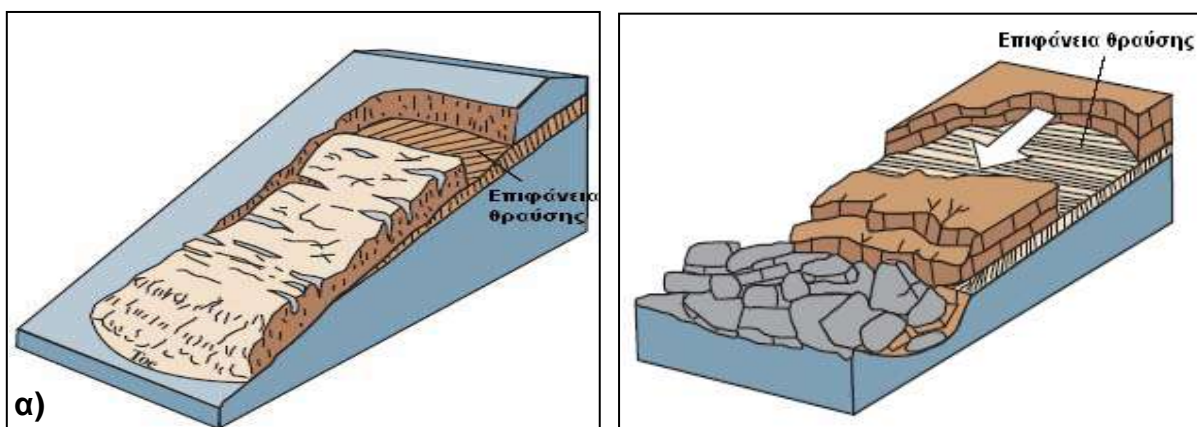
β) Μεταθετικές ολισθήσεις: είναι ολισθήσεις, οι οποίες γίνονται κατά μήκος μιας επίπεδης ή σχεδόν επίπεδης επιφάνειας και το εδαφικό ή βραχώδες υλικό (ολίσθηση τεμαχούς) κινείται κατά μήκος αυτής προς τα κάτω και προς τα έξω. Η κίνηση (η οποία ελέγχεται από την ύπαρξη ασυνεχειών), δηλαδή, δεν περιλαμβάνει σημαντική στροφή ή στροφή προς τα πίσω της κεφαλής και με αυτόν τον τρόπο διακρίνεται εύκολα από την περιστροφική ολίσθηση. Το διάνυσμα της ολίσθησης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο εάν η επιφάνεια ολίσθησης έχει μια σημαντική κλίση και η διατμητική αντίσταση κατά μήκος της είναι μικρή. Διακρίνονται σε ολισθήσεις τεμαχών όταν η μάζα είναι μεγάλη και σε ολισθήσεις κατακερματισμένων τεμαχών όταν υπάρχουν πολλές μικρές μονάδες (EL 0071, 2012).

Η διάκριση της μεταθετικής από την περιστροφική ολίσθηση είναι σημαντική για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στην περιστροφική ολίσθηση, όπου η επιφάνεια ολίσθησης στην περιοχή του πόδα κλίνει προς το πρηνές, υπάρχει η

εγγενής τάση αποκατάστασης της ισορροπίας στην ασταθή μάζα. Αντίθετα, σε μία μεταθετική ολίσθηση μπορεί η μετακίνηση να προχωρεί απεριόριστα, όταν η επιφάνεια ολίσθησης έχει σημαντική κλίση και εφόσον η διατμητική αντίσταση κατά μήκος της επιφάνειας αυτής παραμένει μικρότερη από τη σταθερή δύναμη που προκαλεί την κίνηση (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Σε πολλές μεταθετικές ολισθήσεις, η ολισθαίνουσα μάζα παραμορφώνεται έντονα και διαχωρίζεται σε πολλές ημιανεξάρτητες μονάδες (τότε η συνολικά, μετακινούμενη μάζα καλείται κερματισμένη ολίσθηση). Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση και η αποσύνθεση και ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νερό, η αποσυντεθειμένη πλέον μάζα που ολισθαίνει μπορεί να μεταπέσει σε εδαφική ροή. Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι γενικά πιο αβαθείς από τις περιστροφικές και συνήθως το μήκος τους υπερβαίνει το δεκαπλάσιο του βάθους τους σε αντίθεση με τις περιστροφικές στις οποίες το μήκος τους είναι 3 - 7 φορές το βάθος τους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Στις μεταθετικές ολισθήσεις που γίνονται στους εδαφικούς σχηματισμούς, η κίνηση, συνήθως, ελέγχεται από την παρουσία υποκείμενων πυκνότερων ή μεγαλύτερης συνεκτικότητας εδαφικών στρώσεων, από την επαφή ανάμεσα στο υπόβαθρο και στα υπερκείμενά του αποσαθρώματα ή κορήματα κ.λπ. Αντίθετα στους βραχώδεις σχηματισμούς καθοριστικής σημασίας στην εκδήλωσή τους είναι η παρουσία και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (όπως ρήγματα, κάθε είδους ρωγμές, επίπεδα στρώσης, διακλάσεις, σχιστότητα κ.λπ.). Στο Σχήμα 1.5 (α&β) και στην Εικόνα 1.4 δίνονται μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις μεταθετικών ολισθήσεων.



Σχήμα 1.5 (α & β). Χαρακτηριστικοί τύποι μεταθετικής ολίσθησης (Ρόζος, 2005).



Εικόνα 1.4. Μεταθετική ολίσθηση σε υλικά κορημάτων και τη ζώνη κερματισμού και αποσάθρωσης του φλύσχη στο Δεμάτι Ν. Ιωαννίνων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

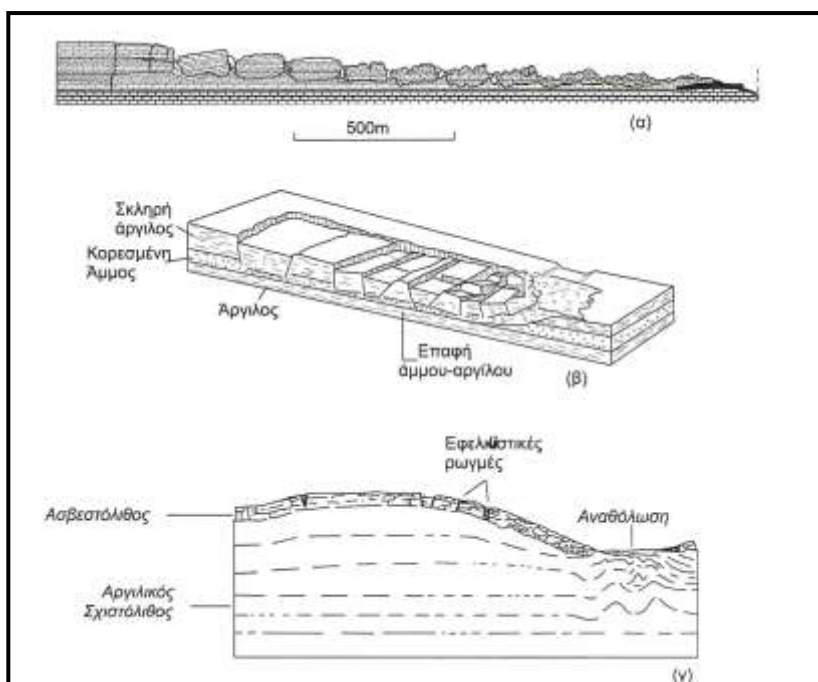
1.2.4. Πλευρικές (υποοριζόντιες) εξαπλώσεις

Στις εξαπλώσεις αυτές που ονομάζονται και υποοριζόντιες, η κίνηση που επικρατεί είναι η πλευρική διάσταση του υλικού που διευκολύνεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. Γενικά, η κίνηση μπορεί να είναι επέκταση βραχώμαζας ή συνεκτικών εδαφών πάνω σε μαλακά εδαφικά υλικά όπως ρέουσες πλαστικές άργιλοι ή λεπτόκοκκες άμμοι που ρευστοποιούνται. Έτσι, η υπερκείμενη βραχώμαζα κερματίζεται σε μεγάλα κινούμενα τμήματα που περιστρέφονται, θρυμματίζονται ή βυθίζονται. Ο όρος «εξάπλωση» προτάθηκε αρχικά από τους Terzachi και Peck για την περιγραφή των απότομων μετακινήσεων υδροφόρων στρωμάτων άμμου ή ιλύος, στα οποία υπέρκεινται ομογενή στρώματα αργίλου ή τα οποία έχουν φορτιστεί από επιχώματα. Αποτέλεσμα αυτών είναι η μετακίνηση αργίλων σε πολύ ομαλό μορφολογικό ανάγλυφο που για δεκαετίες δεν παρουσίαζαν κάποιες ενδείξεις για επικείμενες μετακινήσεις τους. Διακρίνονται οι παρακάτω βασικοί τύποι πλευρικών εξαπλώσεων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

α) εξάπλωση τεμαχών (βραχωδών μαζών και συνεκτικών αδρομερών υλικών), όπου βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχια και το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται (Σχήμα 1.6α).

β) εξαπλώσεις (εδαφών) λόγω ρευστοποίησης, που δημιουργούνται κυρίως σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες, οι οποίες παρουσιάζουν απώλεια της αντοχής τους

όταν διαταραχθούν και αλλοιωθεί η αρχική τους δομή. Συχνά, η αρχική θραύση (η οποία είναι, συνήθως, βαθμιαία) είναι μία εκτεταμένη καθίζηση και η προοδευτική επέκτασή της γίνεται από την αρχική θραύση προς τη στέψη. Γενικά, η κίνηση αρχίζει απροειδοποίητα και εξελίσσεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και πλευρικές εξάπλωσεις λόγω ρευστοποίησης κορεσμένων, χαλαρών εδαφικών στρώσεων μετά από ισχυρές σεισμικές δονήσεις (Σχήμα 1.6β). Στους ισχυρούς σεισμούς, οι κύριες καταστροφές προκαλούνται από ολισθήσεις του τύπου αυτού.



Σχήμα 1.6. Τύποι πλευρικής εξάπλωσης. α) Πλευρική εξάπλωση κερματισμένων ασβεστολίθων που υπέρκειται μαλακότερων σχηματισμών (Varnes, 1978), β) Πολύ γρήγορη πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμου και ιλύος (Varnes, 1978), γ) Σύνθετη ολίσθηση (πλευρική εξάπλωση ασβεστολίθων και αναθόλωση υποκείμενων αργιλικών σχιστολίθων) (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

γ) σύνθετες πλευρικές εξάπλώσεις, είναι μετακινήσεις που εκδηλώνονται σε κοιλάδες σε σχεδόν οριζόντια επιφανειακά σκληρά και διερρηγμένα πετρώματα που υπέρκειται μεγάλου πάχους στρωμάτων σκληρών ρωγματωμένων αργίλων ή ασθενών σχιστόλιθων, τα οποία με τη σειρά τους υπέρκειται κάποιου σκληρού βραχώδους υπόβαθρου. Μία κάμψη του επιφανειακού σκληρού πετρώματος έχει ως αποτέλεσμα την πλευρική εξάπλωση των τεμαχών του, την ανατροπή τους και τη βύθισή τους προς την κοιλάδα. Τα φαινόμενα αυτά συνοδεύονται από έντονες

παραμορφώσεις και αναθόλωση του πυθμένα της κοιλάδας. Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες εξαπλώσεις συμβαίνουν και στο βραχώδες υπόβαθρο και ιδιαίτερα στις κορυφές των υβωμάτων (Σχήμα 1.6γ).

1.2.5. Ροές

Πρόκειται για γρήγορες ή αργές μετακινήσεις χαλαρών υλικών με ή χωρίς την παρουσία υγρής φάσης. Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις, οι μετακινήσεις και οι ταχύτητες έχουν τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων και των ταχυτήτων των ρευστών με υψηλό ιξώδες ενώ ορισμένοι από τους τύπους των ροών αναφέρονται από άλλους ερευνητές και σαν ερπυσμοί (που θα εξηγηθούν παρακάτω). Έτσι, η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων νερού σε κορήματα προκαλεί τις αποκαλούμενες χιονοστιβάδες κορημάτων ενώ αντίστοιχη παρουσία νερού σε λεπτόκοκκα υλικά προκαλεί τις ροές λάσπης. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, τα επιφανειακά στρώματα του πάγου τήκονται ευκολότερα και τροφοδοτούν με νερό τα εδάφη, τα οποία κινούνται πάνω στα κατώτερα στρώματα του πάγου. Στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές, κοντινές ρωγμές – διακλάσεις, καθώς και εκείνες που παρατηρούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση. Σε πολλές περιπτώσεις η κατανομή των ταχυτήτων μετακίνησης πλησιάζει εκείνη των ιξωδών ρευστών και οι κινήσεις μπορεί να περιγραφούν σαν μια μορφή άθικτου πετρώματος (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Οι αργές ροές ταξινομούνται από τον Varnes και άλλους ερευνητές στον ερπυσμό που είναι μια αργή έως πολύ αργή, αδιόρατη κίνηση του επιφανειακού μανδύα του εδάφους ή του σαθρού καλύμματος των πετρωμάτων που δεν αναπτύσσουν εφελκυστικές ρωγμές και συνεπώς δεν είναι εύκολο να εντοπισθεί η ζώνη δράσης τους. Μάλιστα, εξελίσσονται συνήθως σε περιστροφικές ολισθήσεις αν δεν αντιμετωπισθούν έγκαιρα. Μπορεί να θεωρηθεί σαν μία φυσική εξέλιξη της κλίσης της κλιτύος που οφείλεται σε διαμοριακές τάσεις και υποβοηθείται από τη βαρύτητα. Αναγνωρίζεται από τη κλίση δέντρων, στύλων ή ακόμα από τη σχετική θέση των θραυσμάτων κάποιου χαρακτηριστικού γεωλογικού ορίζοντα. Το βάθος της μετακίνησης είναι συνήθως της τάξεως των λίγων δεκάδων εκατοστών αλλά

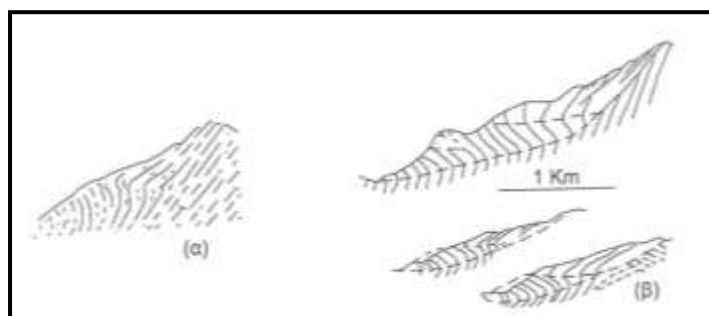
μερικές φορές, όταν η βαρύτητα αποτελεί το βασικό αίτιο μετακίνησης, φτάνει τα 2 έως 3 μέτρα (βαθύς ή συνεχής ερπυσμός).

Η διάκριση γενικά μεταξύ αργών ολισθήσεων και ροών γίνεται με την ύπαρξη καλά καθορισμένων, λείων επιφανειών ολίσθησης που πολλές φορές φέρουν γραμμώσεις τριβής, στοιχεία που δεν παρατηρούνται στις ροές ενώ επιπρόσθετα στις ροές η μετακινούμενη μάζα υφίσταται έντονες παραμορφώσεις.

Διακρίνονται σε:

α) Ροές βραχωδών μαζών

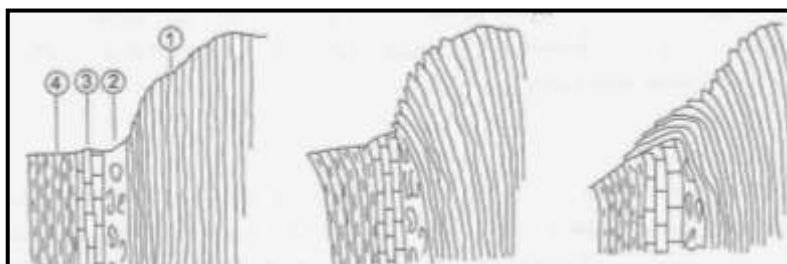
Περιλαμβάνουν παραμορφώσεις της βραχομάζας που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές και μικρές ή μεγάλες διακλάσεις, χωρίς εντοπισμό της μετατόπισης κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας. Οι μετακινήσεις είναι εξαιρετικά αργές και περίπου σταθερές στο χρόνο. Τέτοιες μετακινήσεις προέρχονται από πτυχώσεις, κάμψεις (π.χ. κάμψεις κεφαλών στρωμάτων), διογκώσεις ή άλλες εκδηλώσεις πλαστικής παραμόρφωσης και παρατηρούνται συχνότερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Η κατανομή των ταχυτήτων μπορεί προσεγγιστικά να προσομοιωθεί με εκείνη των ιξωδών ρευστών [Σχήμα 1.7 (α&β)]. Η κάμψη της κεφαλής των στρωμάτων παρατηρείται σε λεπτοπλακώδη στρώματα ή πετρώματα με σχιστότητα και εμφανίζεται με κάμψη των ανώτερων τμημάτων τους στην επιφάνεια, όταν είναι κατακόρυφα ή έχουν μεγάλη κλίση. Παλαιότερα το φαινόμενο είχε αποδοθεί στο πέρασμα των παγετώνων αλλά στην πραγματικότητα η αποσυμπύεση, η βαρύτητα και η διαφορική ολίσθηση είναι οι καθοριστικοί παράγοντες.



Σχήμα 1.7. Ροές στο υπόβαθρο, λόγω α) ερπυσμού των κεφαλών των στρωμάτων, β) πτύχωσης και κάμψης των κεφαλών των στρωμάτων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Στα ανώτερα τμήματα, τουλάχιστον, συμβάλλουν και δράσεις ανάλογες με εκείνες του ερπυσμού (νερό, πάγος, θερμοκρασία κ.α.). Δηλαδή, το φαινόμενο δεν έχει

καμιά σχέση με την τεκτονική δομή του πετρώματος και για αυτό τον λόγο δεν πρέπει να μετρούνται κλίσεις και παρατάξεις για γεωλογική επεξεργασία σε τέτοιες ζώνες γιατί οι αληθινές κλίσεις είναι σε χαμηλότερες θέσεις και μπορεί να φαίνονται στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. στις φυσικές τομές – ρέματα). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φαινόμενα κάμψης είναι πολύ συνηθισμένα ακόμα και όταν τα πετρώματα καλύπτονται από εδαφικό κάλυμμα (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8. Κάμψη κεφαλών στρωμάτων. Εξέλιξη σε ολίσθηση. 1: Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, 2: Τριαδικό γύψο σε διάλυση, 3: Ααβεστόλιθοι Λιασίου, 4: Σχιστόλιθοι Λιασίου (Άλπεις από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

β) Ροές αδρομερών υλικών

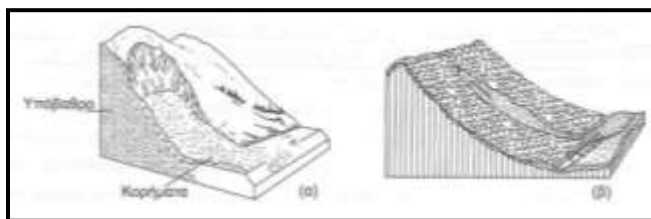
Στις ροές κορημάτων υπάρχει μια πλήρης διαβάθμιση από ολίσθηση μέχρι ροή, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό των υλικών, την κινητικότητα τους καθώς και το χαρακτήρα της μετακίνησης ενώ έχει γίνει αποδεκτό ότι οι ροές κορημάτων αναφέρονται σε υλικό που περιέχει σχετικά υψηλό ποσοστό αδρομερών θραυσμάτων των πετρωμάτων (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5. Ξηρή ροή κορημάτων λόγω του σεισμού της Καλαμάτας τον Σεπτέμβριο 1986 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Ένα συνηθισμένο φαινόμενο στις ορεινές ζώνες είναι η ξηρή ροή κορημάτων (ποικίλου μεγέθους βραχωδών θραυσμάτων) που είναι αποτέλεσμα της βαρύτητας σε απότομες κλιτύες, χωρίς την παρουσία νερών. Το έναυσμα μετακίνησης αποτελεί η διατάραξη της ευστάθειας λόγω προσπιθέμενων υλικών, η υποσκαφή της βάσης λόγω διάβρωσης ή ακόμα η διατάραξη λόγω σεισμικής δόνησης (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Μία ολίσθηση κορημάτων μπορεί να μετατραπεί σε «χιονοστιβάδα κορημάτων», καθώς η μετακίνηση γίνεται συνεχώς πιο γρήγορη λόγω της παρουσίας χαλαρών υλικών που συμπαρασύρονται, της μεγαλύτερης περιεκτικότητας νερού και γενικά της μεγαλύτερης κλίσης των πρανών (Σχήμα 1.9α). Οι «χιονοστιβάδες κορημάτων» είναι συνήθως επιμήκεις και στενές και συχνά αφήνουν στην περιοχή της κεφαλής ένα πριονωτό ή σχήματος V ίχνος (Σχήμα 1.9β), σε αντίθεση με την πεταλοειδή κατακρήμνιση μιας περιστροφικής ολίσθησης.



Σχήμα 1.9 (α & β). Ροές α) πολύ γρήγορη ροή – «χιονοστιβάδα κορημάτων», β) «χιονοστιβάδα κορημάτων» σχήματος V (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Στις περιπτώσεις αυτές, ολόκληρη σχεδόν η εδαφική μάζα βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, ρέει προς τα κάτω συνήθως κατά μήκος μιας μισγάγγειας και μπορεί να φτάσει αρκετά μακρύτερα από το πόδι του πρανούς (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6. Αποκολλήσεις και καταπτώσεις βράχων που εξελίχθηκαν σε ροή κορημάτων και συνέλαβαν στη δημιουργία της λίμνης Τσιβλού στην ορεινή Αχαΐα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Γενικά, στα χαλαρά υλικά οι ροές αναγνωρίζονται πιο εύκολα σε σχέση με εκείνες στο βραχώδες υπόβαθρο, γιατί οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες και πολύ πιο ευκρινείς. Το όριο ανάμεσα στη μετακινούμενη μάζα και στο υλικό που δεν παίρνει μέρος στη μετακίνηση είναι σαφές και εντοπίζεται σε μία επιφάνεια διαφορετικής κίνησης όπου η διατμητική αντοχή των υλικών γίνεται πολύ μεγαλύτερη. Να σημειωθεί ότι η εσωτερική παραμόρφωση του υλικού που ρέει είναι πολύ μεγάλη ενώ η εσωτερική του δομή είναι διαφορετική από αυτή που είχε στην αρχική του θέση. Ωστόσο, επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μετακινούμενη μάζα δεν είναι ορατές.

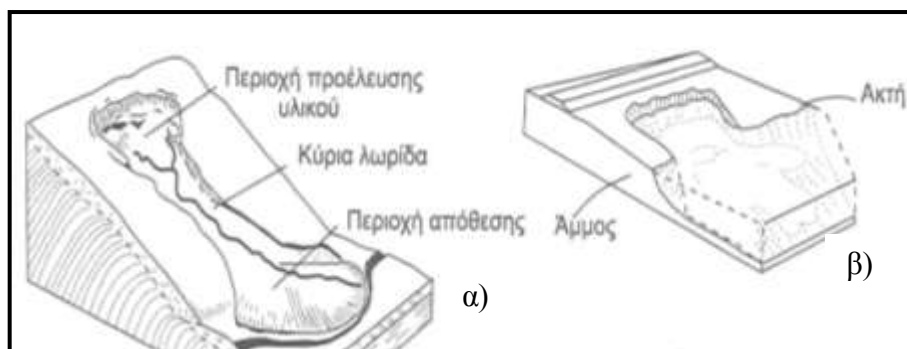
γ) Ροές εδαφών

Αποκαλούνται και ως ροές λάσπης και αναφέρονται σε γαιώδη υλικά αρκετά διαβρεγμένα που ρέουν σχετικά γρήγορα με περιεκτικότητα τουλάχιστον 50% σε άμμο, ιλύ και άργιλο. Συνήθως δημιουργούνται από ισχυρή βροχόπτωση ή από λιώσιμο χιονιού και ευνοούνται από την παρουσία εδάφους σε απότομες κλιτύες από τις οποίες έχει απαμακρυνθεί η φυτοκάλυψη λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7. Το Φεβρουάριο του 2003 πραγματοποιήθηκε ροή εδαφικών υλικών στη Νέα Εθνική Οδό Τρίπολης – Καλαμάτας, στη θέση Τσακώνα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Ροές γαιών μεγάλης ταχύτητας συμβαίνουν, επίσης, στα λεπτόκοκκα υλικά (ιλύες, αργίλους και αργιλικές άμμους) [Σχήμα 1.10 (α&β)]. Πολλές από τις ροές αυτές προσομοιάζουν με πλευρικές εξαπλώσεις, όπου «ρευστοποιείται» όχι μόνο το υποκείμενο υλικό αλλά ολόκληρη η ολισθαίνουσα μάζα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).



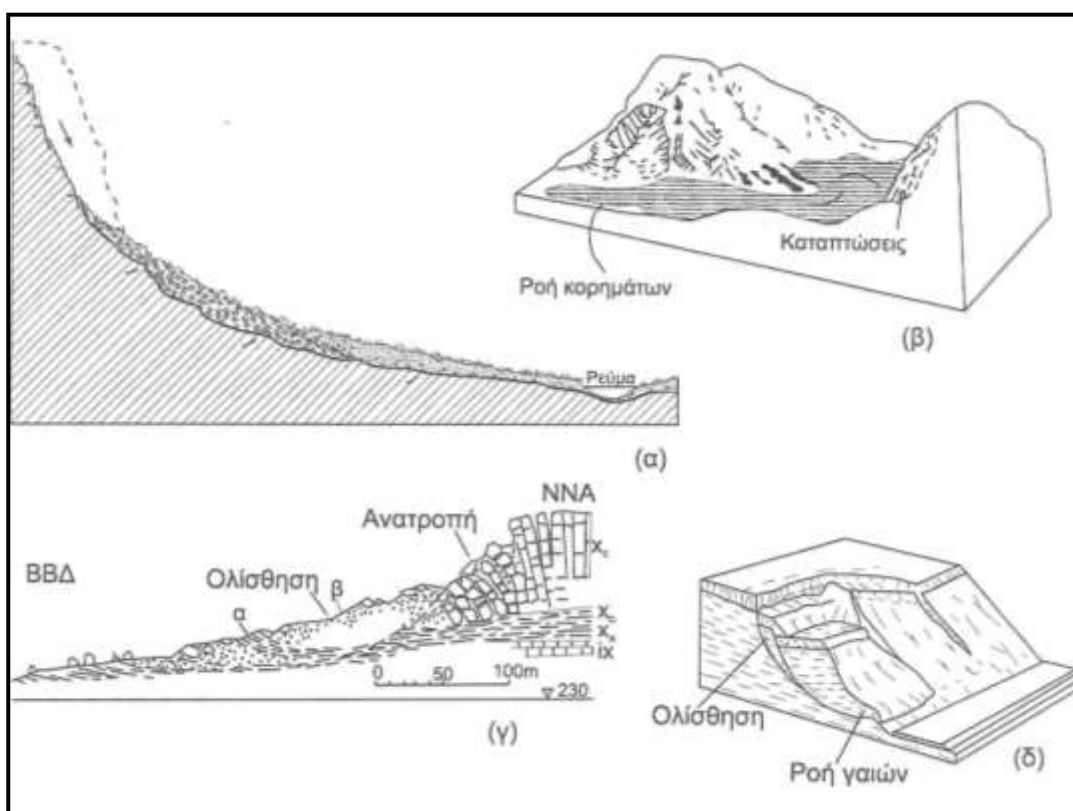
Σχήμα 1.10. (α) Ροή γαιών πολύ αργή έως γρήγορη (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007), (β) Γρήγορη ροή άμμου – ιλύος.

Μία άλλη μορφή ροής γαιών είναι η εδαφική ροή, όπου ορίζεται ως η μετακίνηση κορεσμένου επιφανειακού τμήματος του εδάφους πάνω σε επίπεδο που κάτω από αυτό το έδαφος είναι παγωμένο. Σήμερα, ο όρος έχει γενικευθεί για όλα τα εδάφη που περιέχουν μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών και διατηρούν το επιφανειακό τμήμα τους κορεσμένο. Το φαινόμενο αυτό είναι συνηθισμένο στα ψυχρά κλίματα ή στα ορεινά μέρη αλλά επειδή με τη γενικευμένη μορφή του όρου η ροή σχετίζεται άμεσα με το πέρασμα του λεπτόκοκκου εδάφους στις περιοχές πλαστικότητας ή και υδαρότητας συνεπάγεται ότι η ροή μπορεί να εμφανισθεί ακόμα και σε θερμά κλίματα. Η κίνηση είναι πολύ αργή, συνεχής και προσβάλλει ολόκληρο το χώρο της κλιτύς σε τέτοιο βαθμό όπου είναι δύσκολο να καθορισθούν τα όρια μεταξύ ασταθούς και σταθερού εδάφους. Η ροή είναι εύκολο να εκδηλωθεί και σε μικρές κλίσεις της επιφάνειας του εδάφους ($2^{\circ} - 5^{\circ}$) ενώ το βάθος εκδήλωσης του φαινομένου φθάνει τα 50cm έως το πολύ 1m (Μαρίνος, 1998).

1.2.6. Μικτές κινήσεις πρανών

Οι μετακινήσεις των πρανών είναι, συνήθως, ένας συνδυασμός των κύριων τύπων μετακινήσεων που περιγράφηκαν έως τώρα, που εκδηλώνονται είτε στα διάφορα

τμήματα της μετακινούμενης μάζας είτε στο διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης. Σαν σύνθετες κινήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες ένας τύπος κίνησης μετατρέπεται τοπικά σε κάποιον άλλον τύπο ή συμβάλλει στη δημιουργία κίνησης διαφορετικού τύπου (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Σημειώνεται ότι, ιδιαίτερα, επικίνδυνες είναι οι πολύ γρήγορες πτώσεις και ολισθήσεις βράχων - ροές κορημάτων που συχνά αναφέρονται και σαν «χιονοστιβάδα από καταπτώσεις βράχων» (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11. Περιπτώσεις σύνθετων κατολισθήσεων. α) πτώσεις βράχων – ερπυσμός κορημάτων, β) πτώσεις βράχων – ροή κορημάτων, γ) περιστροφική ολίσθηση – ανατροπή, δ) περιστροφική ολίσθηση – ροή εδάφους(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Συνηθισμένες στον Ελληνικό χώρο είναι οι περιπτώσεις μεταθετικών ολισθήσεων που μεταπίπτουν σε ροές εδαφών (Εικόνα 1.8). Ουσιαστικά, ο έκτος τύπος ταξινόμησης που έχει προταθεί από τον Varnes, δεν υφίσταται ως νέα, διακριτή κατηγορία ταξινόμησης απλά περιγράφει τον εκάστοτε συνδυασμό των πέντε κύριων προαναφερθέντων τύπων κατολίσθησης.



Εικόνα 1.8. Σύνθετη ολίσθηση (μεταθετική και εδαφική ροή) στην Καρυά Ν. Αχαΐας (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

1.2.7. Μερικές πρόσθετες επισημάνσεις

Το όνομα μιας κατολίσθησης μπορεί να αναλυθεί περισσότερο όσο πιο πολλές πληροφορίες είναι διαθέσιμες σχετικά με την μελετούμενη κίνηση. Πολλά επίθετα μπορούν να προστεθούν σαν μια ακολουθία χαρακτήρων. Μια προτιμώμενη τέτοια σειρά σχετικά με την ονοματολογία της κίνησης είναι η ακόλουθη (Πίνακας 1.2). ενεργότητα, συχνότητα κίνησης, περιεχόμενο σε νερό, γεωλογικό υλικό, τύπος κίνησης (WP/WLI 1990). Σε αυτή την προτεινόμενη ονοματολογία έχουν προστεθεί όροι όπως «προκαταρκτική», «οριακή» και «επιδιορθωμένη», οι οποίοι αφορούν στάδια εξέλιξης της ενεργότητας μιας κατολίσθησης καθώς και οι όροι «παγωμένο» και «σε απόψυξη» που αφορούν το περιεχόμενο σε νερό μιας κατολισθαίνουσας μάζας (Cruden and Couture, 2011).

Πίνακας 1.2. Περιγραφικοί όροι ονοματολογίας κατολισθήσεων (τροποποιημένος πίνακας των Cruden and Varnes, 1996).

Καθεστώς Ενεργότητας		Κατανομή ενεργότητας	Είδος	Συχνότητα	Περιεχόμενο σε νερό	Γεωλογικό υλικό	Τύπος
Προκαταρκτική		Προωθούμενη	Σύνθετη	Εξαιρετικά γρήγορη	Ξηρό	Βράχος	Πτώση
Οριακή		Ανάδρομη	Σύνθετη	Πολύ γρήγορη	Με υγρασία	Έδαφος	Ανατροπή
Ενεργή		Διευρυνόμενη	Πολλαπλή	Γρήγορη	Υγρό		Ολίσθηση
Επανεργοποιημένη		Μεγεθυνόμενη	Διαδοχική	Μέτρια	Πολύ υγρό		Εξάπλωση
Παροδικά ανενεργές ή υπό αναστολή		Παρεμποδισμένη	Απλή	Αργή	Παγωμένο	Κορήματα	Ροή
Ανενεργές		Απομειωμένη		Πολύ αργή	Σε απόψυξη		
	Σε λανθάνουσα κατάσταση	Μετακινούμενη		Εξαιρετικά αργή			
	Μη ενεργοποιήσιμη κατολίσθηση						
	Σταθεροποιημένη						
	Επιδιορθωμένη						
	Αρχαία ή απολιθωμένη						

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η προσεκτική τεκμηρίωση ταξινόμησης μιας κατολίσθησης είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση του κατολισθητικού κινδύνου (Cruden and Couture, 2011).

1.4. Επικαιροποίηση της ταξινόμησης κατά Varnes

Οι Hungr, Leroueil και Picarelli (2014), δημοσίευσαν μια εργασία, σκοπός της οποίας ήταν η αναθεώρηση κάποιων απόψεων σχετικά με το ευρύτατα διαδεδομένο σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων που προτάθηκε από τον Varnes (1978). Η βασική ιδέα ήταν η τροποποίηση του ορισμού των γεωλογικών υλικών που συνδέονται με κατολίσθηση ώστε να συσχετισθεί με την αποδεκτή γεωτεχνική και γεωλογική ορολογία των εδαφών και βράχων. Επιδίωξή τους δεν ήταν να δημιουργήσουν ένα εξ' ολοκλήρου νέο σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων αλλά να παρουσιάσουν διαφοροποιήσεις στην ταξινόμηση του Varnes, που να συμβαδίζουν με τις πρόσφατες εξελίξεις στην κατανόηση του κατολισθητικού φαινομένου, των γεωλογικών υλικών και των μηχανισμών που αυτό περιλαμβάνει.

Το είδος του γεωλογικού υλικού είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζει την συμπεριφορά των κατολισθήσεων. Ωστόσο, οι τρεις κύριες κατηγορίες γεωλογικών υλικών που προτάθηκαν από τον Varnes (1978), δηλαδή βράχος (rock), κορήματα (debris), έδαφος (earth), δεν είναι συμβατές ούτε με την γεωλογική ορολογία των υλικών που προσδιορίζονται από την προέλευσή τους, ούτε με τις γεωτεχνικές ταξινομήσεις που βασίζονται στις μηχανικές ιδιότητες. Κατά συνέπεια, ο χαρακτηρισμός των γεωλογικών υλικών που περιγράφουν την ταξινόμηση του Varnes χρειάζεται, κατά τους ανωτέρω συγγραφείς, επικαιροποίηση.

Το τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης Varnes περιλαμβάνει 32 τύπους κατολίσθησης σε σύγκριση με τους 29 ήδη γνωστούς τύπους της ταξινόμησης του 1978. Να σημειωθεί ότι σύνθετου τύπου κατολισθήσεις δεν περιλαμβάνονται στο τροποποιημένο σύστημα σαν ξεχωριστή κατηγορία αλλά δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να συνδυάσει ο ίδιος δύο ή περισσότερους τύπους κατολίσθησης.

Η άποψη των συγγραφέων σχετικά με την τροποποίηση του συστήματος είναι ότι η ορολογία που βασίζεται σε γεωτεχνικούς όρους είναι περισσότερο χρήσιμη,

καθώς συσχετίζεται καλύτερα με την μηχανική συμπεριφορά μιας κατολίσθησης. Έτσι, ο σκοπός είναι να τονισθεί το συστατικό που είναι το πιο κρίσιμο στην επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατολίσθησης τόσο κατά, όσο και μετά την αστοχία.

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΚΡΙΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

2.1. Γενικά

Με σκοπό να δειχθεί η ανάγκη της μεθοδολογίας για πρόγνωση πρηνών που διαπραγματεύεται η παρούσα διατριβή, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση και κριτική, συστημάτων γεωτεχνικής ταξινόμησης βραχώμαζας, τα οποία αν και αρχικά εφαρμόστηκαν στις σήραγγες, λόγω της επιτυχημένης εφαρμογής τους στις υπόγειες εκσκαφές, χρησιμοποιήθηκαν και στα βραχώδη, κυρίως, πρηνή.

Στη διάρκεια της γεωλογικής μελέτης αναγνώρισης μιας περιοχής, όπου πρόκειται να κατασκευασθεί ένα τεχνικό έργο, δεν αρκεί μόνο η συνηθισμένη λεπτομερής χαρτογράφηση και τα πιθανώς απαραίτητα ερευνητικά έργα (δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, γεωφυσικές μέθοδοι κ.α.) προκειμένου να συνταχθεί η όσο το δυνατόν περισσότερο αξιόπιστη τομή γεωλογικών προβλέψεων. Στη διάρκεια της έρευνας αυτής, η μελέτη του γεωλογικού υλικού (έδαφος και βραχώμαζα) επεκτείνεται και στην εξέταση όλων εκείνων των παραγόντων που είναι δυνατό να επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σαν συνόλου, στην κατασκευή του έργου. Βασική, δηλαδή, είναι και η μελέτη του βαθμού αποσάθρωσης και της πυκνότητας, προσανατολισμού και υλικών πλήρωσης των ασυνεχειών του πετρώματος (διακλάσεις, στρώσεις, σχιστότητα), που τελικά είναι δυνατό να μεταβάλλουν, εντελώς, την τεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζάς του, όπως μεγάλης σημασίας είναι και οι υδρογεωλογικές συνθήκες που συσχετίζονται με τις ιδιότητες της βραχώμαζας (Μαρίνος, 1979).

Αξίζει να επισημανθεί ότι τις τελευταίες δεκαετίες, η μελέτη των ασυνεχειών στη βραχομηχανική έχει αναπτυχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Για κατασκευές όπως τα πρηνή, τις θεμελιώσεις και τις μικρού βάθους σήραγγες, έχει αναγνωρισθεί ότι οι ασυνέχειες ασκούν μεγάλη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας. Αυτή, όμως, η παραδοχή έχει σημαντικές επιπτώσεις για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς της. Περιγραφές και χαρακτηρισμοί, τεχνικογεωλογικοί χάρτες και υπολογισμοί για κατασκευές πάνω ή μέσα σε βραχώμαζα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τις ιδιότητες και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Ωστόσο, διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες μπορεί να είναι σημαντικές

κατά μήκος μιας επιφάνειας ασυνέχειας και αν πιθανόν υπάρχει μεγάλος αριθμός ασυνεχειών σε μια βραχώμαζα με την κάθε μια να έχει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τότε σε συνδυασμό με την ανομοιογένεια του βραχώδους υλικού οδηγεί στη διαπίστωση ότι για την περιγραφή ή τον υπολογισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας με ακρίβεια και λεπτομέρεια απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων από επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές, ο οποίος όμως είναι χρονοβόρος και προβληματικός (Hack, 2002).

Το γεγονός αυτό από καιρό πρόβαλε την ανάγκη για μια ειδικότερη ταξινόμηση των πετρωμάτων, μέσω της βραχώμαζάς τους, έτσι ώστε να αντανακλάται άμεσα η πιθανή συμπεριφορά τους στην κατασκευή του τεχνικού έργου (Μαρίνος, 1979). Η ειδικού τύπου αυτή ταξινόμηση δίνει αριθμητικές τιμές σε εκείνες τις ιδιότητες ή τους χαρακτήρες της βραχώμαζας που θεωρείται ότι επηρεάζουν τη συμπεριφορά της και συνδυάζουν τις επί μέρους αυτές τιμές σε μια συνολική βαθμολογία. Η βαθμολογία αυτή χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της γεωτεχνικής ποιότητας της βραχώμαζας και περαιτέρω συσχετίζεται με τη συμπεριφορά της (για παράδειγμα: εκτίμηση αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας).

Η ανάγκη για ανάπτυξη κριτηρίων που να περιγράφονται και τελικά να βαθμονομούνται ποσοτικά, ώστε τελικά και τα στοιχεία εισόδου στην ταξινόμηση να είναι αριθμητικά, οδήγησε λίγο μετά τις αρχές της δεκαετίας του 1970, κυρίως, τους Bieniawski και Barton et al., να καταλήξουν σε πιο ολοκληρωμένα συστήματα όπου λαμβάνεται υπόψη σε ποσοτική μορφή ένας μεγαλύτερος αριθμός από παράγοντες που υπολογίζονται από τους πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και τις επιφανειακές εμφανίσεις. Αυτοί αφορούν ανάμεσα σε άλλους παράγοντες, την κατάσταση των ασυνεχειών του πετρώματος, το υπόγειο νερό, την αντοχή του πετρώματος της βραχώμαζας, την εντατική κατάσταση της περιοχής με αποτέλεσμα η ταξινόμηση να έχει και μεγαλύτερη τεχνική σημασία. Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι συγκεκριμένες ταξινομήσεις βασίσθηκαν σε υπάρχουσες εμπειρίες κατασκευασμένων ή υπό κατασκευή σηράγγων και συνεπώς έχουν ένα εμπειρικό χαρακτήρα (Μαρίνος, 1979).

Οι εμπειρικές, αυτές, μέθοδοι διακρίνονται σε ποιοτικές και ποσοτικές μεθόδους ταξινόμησης της βραχώμαζας (Παπαδόπουλος, 2004). Η γνωστότερη από τις ποιοτικές μεθόδους είναι η μέθοδος Terzaghi, στην οποία κριτήρια ένταξης σε

κατηγορίες αποτελούν η γεωλογική δομή της βραχώμαζας και η εισροή ύδατος. Οι ποσοτικές εμπειρικές μέθοδοι διακρίνονται σε μονοπαραμετρικές [κατά Deere (RQD)] και πολυπαραμετρικές [κατά Bieniawski (RMR), κατά Barton (Q), κατά Hoek and Marinos (GSI)].

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των προαναφερθέντων ταξινομήσεων είναι ένα πολύτιμο συμπλήρωμα της παραδοσιακής γεωλογικής μελέτης προβλέψεων αλλά δεν την αντικαθιστούν. Άλλωστε, οι ταξινομήσεις πρέπει κάθε φορά να γίνονται με προσεκτική και αντιπροσωπευτική συλλογή των απαραίτητων για αυτές στοιχείων, γεγονός που είναι αδύνατο χωρίς τη σωστή γεωλογική γνώση της περιοχής (Μαρίνος, 1979).

Πολλές ερωτήσεις έχουν τεθεί από ερευνητές - μελετητές που ασχολούνται με τον ευρύτερο χώρο της τεχνικής γεωλογίας – γεωτεχνικής μηχανικής σχετικά με το αν: α) έχει λογική η δημιουργία συστημάτων ταξινόμησης για τους γεωλογικούς σχηματισμούς, β) αυτού του είδους η ταξινόμηση μπορεί να είναι επιτυχής για την αντιμετώπιση ή καλύτερα τη διαχείριση κρίσεων σχετικά με τους γεωλογικούς κινδύνους, γ) ένα σύστημα ταξινόμησης μπορεί να έχει εφαρμογή για όλα τα είδη των γεωλογικών σχηματισμών, δ) τελικά ένα σύστημα ταξινόμησης αποτελεί επιστημονική προσέγγιση (Singh and Goel, 1999).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται, όσο το δυνατόν πιο συνοπτικά, τα περισσότερα γνωστά γεωτεχνικά συστήματα ταξινόμησης – βαθμονόμησης (RMR, Q, GSI, SMR) και εξετάζονται οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις ως προς τη φιλοσοφία τους, την αξία τους και τα ενδεχόμενα προβλήματα που παρουσιάζουν είτε στις αρχές τους είτε στη χρήση τους αλλά και οι περιορισμοί τους σε σχέση πάντα με το θέμα της παρούσας διατριβής. Οι παρατηρήσεις αυτές, να μεν μπορεί να επικεντρώνονται στις ιδιαιτερότητες της βραχώμαζας αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη η φύση και οι ιδιότητες και των εδαφικών σχηματισμών. Άλλωστε, όταν κανείς μιλά για βραχώμαζα, δηλαδή για αέριο – άρρηκτο βράχο και ασυνέχειες, στην όλη εικόνα υπεισέρχεται ο ρόλος της αποσάθρωσης – διάβρωσης και κατ' επέκταση και η έννοια του εδαφικού υλικού που προέρχεται από τις συγκεκριμένες διαδικασίες.

Επίσης, παρουσιάζονται και άλλες προτάσεις αντιμετώπισης της κατολισθητικής επικινδυνότητας, όπως η θεωρία της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, η θεωρία

της Ασαφούς Λογικής, τα Τεχνικά Νευρωνικά Δίκτυα και αφού αξιολογηθούν για το αν οδηγούν σε αξιόπιστες λύσεις ως προς την απάντηση των ερωτημάτων που θέτει το θέμα της υπό μελέτης διατριβής (πρόγνωση αστοχιών πρανών), θα δικαιολογηθεί και η σπουδή για την ανάδειξη μιας νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού (Rock Engineering System) στην επίλυση του υπό έρευνα θέματος που αφορά την πρόγνωση όχι μόνο των βραχωδών αλλά και των εδαφικών πρανών.

2.2. Περιγραφή των κυριότερων συστημάτων ταξινόμησης της βραχόμαζας

Η ταξινόμηση της βραχόμαζας αποτελεί βασικό στοιχείο της προσέγγισης του εμπειρικού σχεδιασμού και εφαρμόζεται ευρύτατα στον χώρο της βραχομηχανικής. Γενικά, τα συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια αρκετά δημοφιλή και έχει αποδειχθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται σωστά, τότε μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό ενός γεωτεχνικού έργου γιατί έχουν την δυνατότητα να διαχειρίζονται γεωλογικές και γεωτεχνικές αβεβαιότητες.

Τα συστήματα ταξινόμησης που βασίζονται σε αριθμούς και όχι σε ποιοτικά χαρακτηριστικά έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στην Νότια Αφρική, την Ευρώπη (κυρίως Αυστρία, Ιταλία, Γερμανία, Νορβηγία, Ιταλία), την Ινδία και τις Η.Π.Α. και αυτό συμβαίνει γιατί: α) προσφέρουν ευκολότερο κώδικα επικοινωνίας μεταξύ των γεωλόγων, των μηχανικών, των εργολάβων και των κατασκευαστών, β) πολλές φορές, η ποσοτικοποίηση της πληροφορίας που εκφράζει ποιοτικά ένα γεωλογικό υλικό, βοηθά την καλύτερη οργάνωση και εφαρμογή της προσλαμβανόμενης πληροφορίας, γ) οι παρατηρήσεις, η εμπειρία και η κρίση ενός γεωλόγου / μηχανικού συσχετίζονται και γίνονται πολύ περισσότερο κατανοητές με τη χρήση ενός ποσοτικού συστήματος ταξινόμησης (Singh and Goel, 1999).

2.2.1. Περιγραφή του γεωλογικού υλικού

Ένα γεωλογικό υλικό (και ειδικά η βραχόμαζα) σπάνια είναι συνεχές, ομογενές και ισότροπο. Συνήθως, είναι ρωγματωμένο (κερματισμένο ή και κατακερματισμένο), διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, παρουσιάζει διαφορετικό, από θέση σε θέση, βαθμό αποσάθρωσης και συμπεριφέρεται ανισότροπα. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή

μέσω της περιγραφής και ταξινόμησής του σε κατηγορίες και στη συνέχεια μέσω της εκτίμησης των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση, ειδικά, της βραχόμαζας, συνήθως, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι: α) η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχόμαζα, β) ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD), γ) οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους και δ) η παρουσία υπόγειου νερού (Καββαδάς, 2000).

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα πετρώματα σε υγιή κατάσταση παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια αντοχή υλικού σε σύγκριση με αυτή της βραχόμαζας τους, καθώς η τελευταία επηρεάζεται από την παρουσία των ασυνεχειών που τη διασχίζουν. Συνεπώς, στην περίπτωση αστοχίας ενός πρανούς, πρωταρχικό ρόλο παίζει όχι η διατμητική αντοχή του ακέραίου πετρώματος αλλά η διατμητική αντοχή της βραχόμαζας, η οποία διαμορφώνεται από τον αριθμό, τα κύρια χαρακτηριστικά και την αλληλοεμπλοκή των συστημάτων ασυνεχειών της. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τη μελέτη ευστάθειας ενός πρανούς η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας καθορίζεται, κυρίως, από το καθεστώς διάρρηξης που τη χαρακτηρίζει. Οι ασυνέχειες, συνήθως, ομαδοποιούνται σε συστήματα, τα μέλη των οποίων έχουν περίπου κοινό προσανατολισμό ενώ η συμπεριφορά τους σχετίζεται και με μια σειρά άλλων παραμέτρων, όπως το μήκος, η απόσταση, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης, η αντοχή, η τραχύτητα των τοιχωμάτων καθώς και οι συνθήκες του νερού. Συνεπώς, είναι αναγκαία η γνώση τόσο των γεωμετρικών στοιχείων όσο και των παραμέτρων αυτών (Ρόζος, 2007). Αναλυτικά τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται ως ακολούθως (Καββαδάς, 2000).

α. Μηχανική αντοχή του πετρώματος

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχόμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}), που προκύπτει κατά τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια του ακέραίου πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, η μηχανική αντοχή

του οποίου εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το βαθμό αποσάθρωσής του.

β. Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (Rock Quality Designation - RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχόμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ο συγκεκριμένος δείκτης ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχών μήκους άνω των 10 cm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης. Αποτελεί έναν από τους, συνηθέστερα, χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχόμαζας αν και παρουσιάζει μειονεκτήματα, τα οποία θα αναφερθούν σε επόμενη ενότητα.

γ. Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Οι ασυνέχειες της βραχόμαζας μπορεί να οφείλονται σε: α) ρήγματα, β) διακλάσεις, γ) επιφάνειες στρώσης, δ) επιφάνειες σχιστότητας. Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχόμαζας καθορίζεται από:

- Τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών) ασυνεχειών. Κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ίδιου τύπου. Για παράδειγμα οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ένα σύστημα ασυνεχειών.
- Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος.

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχόμαζας καθορίζεται από:

- Την τραχύτητα. Ανάλογα του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές.
- Το βαθμό εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών. Ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (που συνήθως είναι προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος).

δ. Επιρροή του υπόγειου νερού

Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει αρνητικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, ιδιαίτερα σε βραχώμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (εξαλλοίωση προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχώμαζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχώμαζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχώμαζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο, οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διήθησης.

2.2.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Τα περισσότερο εφαρμοζόμενα, σήμερα, πολυπαραμετρικά συστήματα ταξινόμησης είναι αυτά των Bieniawski (RMR, 1973) και Barton et al (Q-System, 1974). Αρχικά αναπτύχθηκαν για να βοηθήσουν στην επιλογή των μέτρων υποστήριξης διάνοιξης σηράγγων σε κερματισμένες βραχώμαζες και τελικά έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην εξέλιξη της μελέτης και κατασκευής των σηράγγων. Το 1992, οι Hoek et al στην προσπάθεια βελτίωσης του κριτηρίου αστοχίας, που είχε διατυπωθεί παλαιότερα από τους Hoek & Brown, για τη δυνατότητα εύκολου υπολογισμού των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον τύπο του κριτηρίου αστοχίας, πρότειναν τη χρήση ενός νέου δείκτη που ονομάστηκε GSI (Geological Strength Index). Ο δείκτης αυτός συνδυάζει τη δομή της βραχώμαζας (κερματισμός, συστήματα ασυνεχειών) με την κατάσταση των ασυνεχειών από πλευράς αποσάθρωσης, τραχύτητας, υλικού πλήρωσης κλπ., δίνοντας μια βαθμονόμηση από 10 έως 100 (Ρόζος, 2007).

Με τα συστήματα ταξινόμησης αναλύονται οι παράμετροι αναφοράς και προκύπτει η βαθμονόμησή τους. Επιπρόσθετα, γίνεται η τελική ποιοτική βαθμονόμηση της βραχώμαζας και η απόκτηση των ορίων διακύμανσης των γεωμηχανικών παραμέτρων αυτής, δηλαδή διευκολύνεται η ομαδοποίηση της βραχώδους μάζας με βάση ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα σε ενότητες με παρόμοια γεωμηχανική συμπεριφορά (Ρόζος, 2007). Πάντως, είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι το

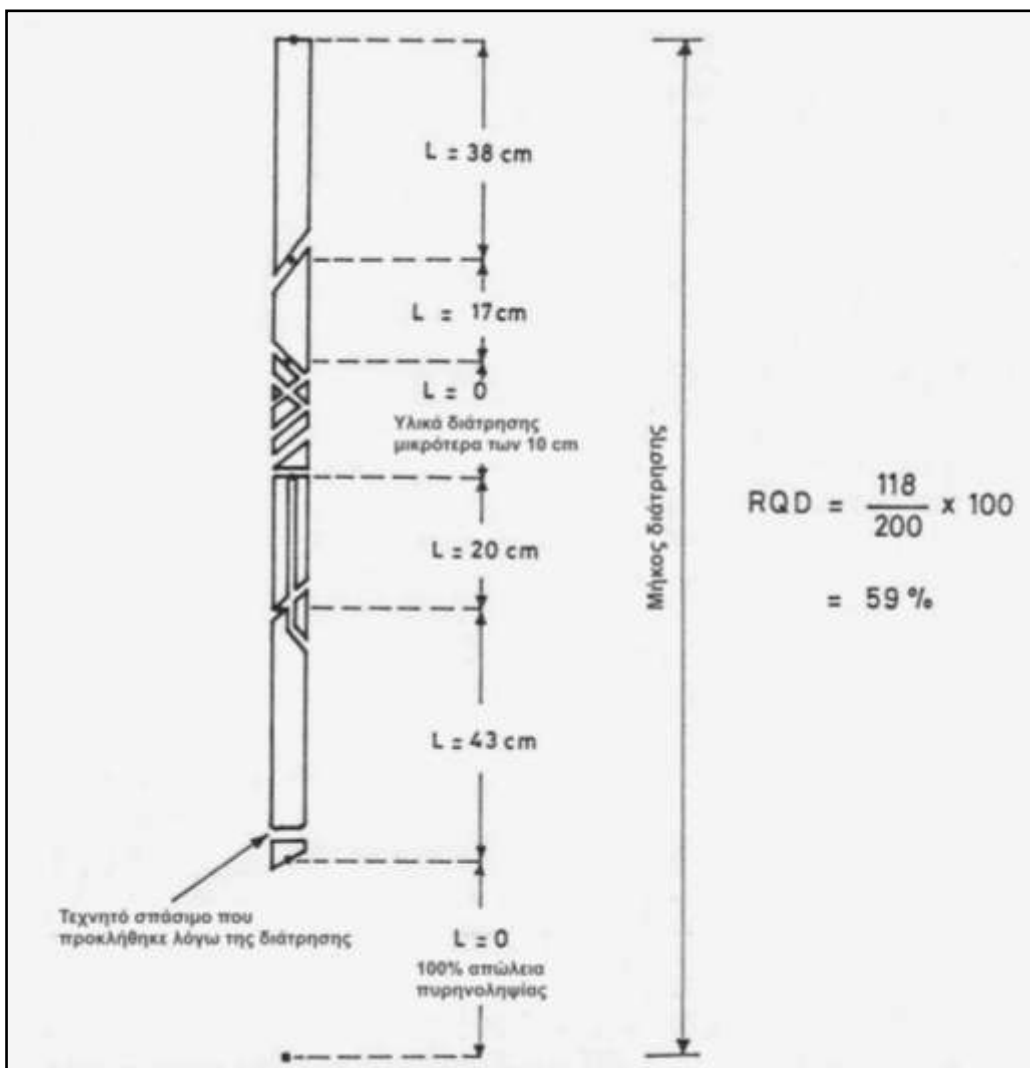
Βασικό πρόβλημα της βαθμονόμησης κατά την εφαρμογή των ποσοτικών εμπειρικών μεθόδων έγκειται στον καθορισμό των γεωλογικών παραμέτρων στο στάδιο της μελέτης του έργου, το οποίο είναι δύσκολο και απαιτεί περαιτέρω βασική έρευνα. Δυσκολία υπάρχει ακόμα στην πληροφόρηση, η οποία βασίζεται συνήθως σε στοιχεία από γεωτρήσεις ή από την επιφανειακή γεωλογία. Αναλυτικότερα, για κάθε μια από τις προαναφερόμενες ταξινομήσεις μπορεί να αναφερθούν τα ακόλουθα.

2.2.2.1. Ταξινόμηση με βάση το RQD

Όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος υπολογίζεται άμεσα από μετρήσεις σε βραχώδη δείγματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και ορίζεται σαν η απόληψη πυρήνων σε ποσοστό του ολικού μήκους που διατρήθηκε, αφού αφαιρεθούν τα τμήματα που έχουν μήκος μικρότερο από 10 cm ή έμμεσα με συστηματικές μετρήσεις της απόστασης των ασυνεχειών επί τόπου (Πίνακας 2.1, Σχήμα 2.1) και τον υπολογισμό του δείκτη J_v , ο οποίος ισούται με το συνολικό άθροισμα της επιμέρους πυκνότητας των κύριων συστημάτων ασυνεχειών ανά m^3 από εξέταση επιφανειακών εμφανίσεων και όχι πυρήνων γεωτρήσεων, σύμφωνα με το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI), όπου $RQD=115-3,3 J_v$ με $RQD=100$ για $J_v < 4,5$ (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Πίνακας 2.1. Συσχέτιση μεταξύ του RQD και της ποιότητας της βραχώμαζας (Singh and Goel, 1999).

α/α	RQD (%)	Ποιότητα βράχου
1	<25	Πολύ φτωχή
2	25-50	Φτωχή
3	50-75	Μέτρια
4	75-90	Καλή
5	90-100	Άριστη



Σχήμα 2.1. Διαδικασία για τη μέτρηση και υπολογισμό του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας (Singh και Goel, 1999).

2.2.2.2. Γεωμηχανική ταξινόμηση κατά Bieniawski (1973-1974, 1979, 1989)

Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) αναπτύχθηκε από τον Bieniawski στην Επιστημονική και Βιομηχανική Ερευνητική Επιτροπή της Νοτίου Αφρικής (1973) με βάση τις εμπειρίες του σε επιφανειακές σήραγγες ιζηματογενών πετρωμάτων (Singh and Goel, 1999). Έχει υποστεί διαδοχικές τροποποιήσεις στις βαθμονομήσεις των διαφόρων παραμέτρων μέχρι σήμερα, καθώς όλο και περισσότερες περιπτώσεις έχουν μελετηθεί (επιπλέον μπορεί να γίνει χρήση του και για βαθμονόμηση πρανών). Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος δείκτης αναπτύχθηκε σε γεωλογικά περιβάλλοντα όπου η βραχώμαζα ήταν καλής

ποιότητας ($RMR > 40$). Αντίθετα, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας ($RMR < 40$), η μέθοδος δεν ενδείκνυται επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος πμών. Επιπλέον, στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη RMR έχει μεγάλη σημασία η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών με πιθανό εύρος πμών 0 ή 10 εάν το πάχος του υλικού πλήρωσης είναι περισσότερο από 5mm ή λιγότερο από 5mm. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή RMR αλλάζει κατά 10 μονάδες (ποσοστό 50% της συνολικής τιμής) εάν το πάχος του υλικού πλήρωσης μεταβληθεί από 4,9mm σε 5,1mm. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η επιρροή αυτή είναι υπερβολική και μάλιστα δεδομένου ότι η εκτίμηση του πάχους του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών έχει σημαντική αβεβαιότητα.

Κατά τον Bieniawski (1973) η βαθμονόμηση του πετρώματος πρέπει να ανταποκρίνεται στις ακόλουθες απαιτήσεις: α) να δίνει την δυνατότητα αναγνώρισης ενοτήτων με παρόμοια συμπεριφορά (λιθολογική σύσταση, προσανατολισμός και απόσταση κύριων ασυνεχειών, φυσική κατάσταση γεωλογικού σχηματισμού), β) να παρέχει μια βάση για την κατανόηση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της μάζας του πετρώματος, γ) να παρέχει ποσοτικά στοιχεία για τον σχεδιασμό και την μελέτη και δ) να παρέχει μια κοινή βάση επικοινωνίας μεταξύ αυτών που ασχολούνται με τα διάφορα θέματα του έργου.

Η μέθοδος (στην περίπτωση μελέτης σπηραγγών) δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε μαλακούς βράχους και ειδικότερα σε συνθήκες διόγκωσης, σύνθλιψης, ροής, δυσμενούς πεδίου τάσεων, εκτίναξης πετρωμάτων και βάθους μεγαλύτερου των 1000 μέτρων. Επίσης, η μέθοδος αφορά πετρώματα με τρία συστήματα ασυνεχειών και εφόσον υπάρχουν λιγότερα, η εκτίμηση της ποιότητας είναι συντηρητική (Μαρίνος, 1998). Ο Bieniawski (1973) έκρινε ότι για μια αντιπροσωπευτική ταξινόμηση μιας βραχώμαζας δεν έφθανε η χρήση μιας παραμέτρου ή ενός μόνο δείκτη που θα μπορούσε να περιγράψει ποσοτικά, σε ικανοποιητικό βαθμό, τη συμπεριφορά της μάζας του διακλασμένου πετρώματος για τις ανάγκες κατασκευής μιας σπηραγγας και κατ' επέκτασης γενικά ενός τεχνικού έργου (π.χ. ενός πρानούς). Έτσι, κατέληξε στις ακόλουθες παραμέτρους που εύκολα μπορούν να μετρηθούν στο ύπαιθρο (Μαρίνος, 1998).

1. **Την ανεμπόδιση θλίψη του υλικού του πετρώματος.** Με τον παράγοντα αυτό, ο Bieniawski, λαμβάνει υπόψη το ρόλο αυτού του ίδιου του πετρώματος

όταν η ρωγμάτωση της βραχώμαζας που συνθέτει είναι αραιή ή ασυνεχής οπότε και η ευστάθειά της ελέγχεται λιγότερο από τις ασυνεχειές της. Η τιμή της ανεμπόδιστης θλίψης προσδιορίζεται άμεσα με την εκτέλεση της εργαστηριακής δοκιμής αντοχής σε ανεμπόδιστη – μοναξονική θλίψη ή έμμεσα με τη χρήση της δοκιμής σε σημειακή φόρτιση ή ακόμα από επί τόπου μετρήσεις με τη χρήση του γεωλογικού σφυριού.

2. **Το δείκτη RQD.** Όταν το σκληρό, αρχικά, πέτρωμα βρίσκεται σε πολύ αποσαθρωμένη κατάσταση, το RQD όπως είναι φανερό έχει μηδενική τιμή.
3. **Τη συχνότητα και προσανατολισμό των ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, σχιστότητες)** για κάθε συγκεκριμένο σύστημα ασυνεχειών του πετρώματος που δεν ήταν δυνατό να εκφραστούν από το δείκτη RQD και που ο ρόλος τους είναι προφανής στη μείωση της αντοχής της βραχώμαζας. Τα στοιχεία που απαιτούνται πρέπει να συλλέγονται όχι από τα δείγματα των πυρήνων των γεωτρήσεων αλλά από έρευνα πάνω στις εμφανίσεις της βραχώμαζας όλων των οικογενειών των ασυνεχειών της.
4. **Την απόσταση και κατάσταση των ασυνεχειών** για κάθε σύστημα ασυνεχειών χωριστά από πλευράς εύρους του κενού που δημιουργούν (όπου λαμβάνεται υπ' όψη το άνοιγμα των ασυνεχειών τόσο των στρώσεων όσο και των διακλάσεων, η εμμογή τους στο χώρο, η τραχύτητά τους, η σκληρότητα ή ο μαλακός χαρακτήρας των τοιχωμάτων τους και η φύση τυχόν υλικών πλήρωσής τους).
5. **Το υπόγειο νερό που μειώνει την αντοχή και ευστάθεια της βραχώμαζας.**

Για διάφορα εύρη μεταβολών κάθε παραμέτρου δίνεται μια τιμή βαθμολογίας, λαμβάνοντας υπ' όψη το βάρος της συμμετοχής της παραμέτρου στη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η συνολική βαθμολογία της βραχώμαζας (RMR) αποκτάται με πρόσθεση των τιμών των βαθμολογιών των επί μέρους παραμέτρων. Αυτή η τιμή πρέπει να προσαρμόζεται με διορθωτική αφαίρεση βαθμών ανάλογα με τον ευνοϊκό ή όχι προσανατολισμό της σήραγγας. Στον Πίνακα 2.2 δίνεται η βαθμολογία των παραμέτρων της μεθόδου RMR του Bieniawski.

Πίνακας 2.2. Ενότητα Α - Κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησης τους (Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχώμαζας, Bieniawski, 1989).

1	Αντοχή συμπίεσης πετρώματος	Δείκτης αντοχής συμπίεσης (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προσέγγιση η δυνατή ανεπιθύμητη διάσπαση		
		Αντοχή σε ανεπιθύμητη διάσπαση (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Βαθμός		15	12	7	4	3	1	0
2	Γραμμάτιο επιτόμιο RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Βαθμός		20	17	13	8	3		
3	Αδιάσπαση μεταξύ ασυνεχειών (m)		>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	0,06		
	Βαθμός		20	15	10	8	5		
4	Κατάσταση διακλάσεων	Πολύ τραχείες σφαιρικές. Ασυμμετρικές χωρίς διαχωριστικό. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες σφαιρικές. Λαμπροσφαιρικές <1mm. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες σφαιρικές. Λαμπροσφαιρικές <1mm. Μελανικά τοιχώματα	Επιφανειακά ολισθηρές (αδικοειδούς) ή υδατοπληρούς <5mm ή διακλάσεις ανοικτές 1-5mm. Συνεχείς διακλάσεις	Μελανικά υδατοπληρούς σφαιρικές >5mm ή διακλάσεις ανοικτές >5mm. Συνεχείς διακλάσεις			
		Βαθμός	30	25	20	10	0		
5	Υδατικό νερό	Εισροή για 10m μήκους στήλης	Καμιά	<10 l/m ²	1/m ² 10-25	25-125 l/m ²	1/m ²	>125 l/m ²	
		Τιμή κλίσης νερού κατά μήκος της μήκους της στήλης	0	0,8-0,1	0,8-0,2	0,2-0,5	0	>0,5	
		Γωνιά συνθήκης	0	0	0	0	0	0	
		Βαθμός	Επιπέδως στεγνό	Μέγ. υγρό	Υγρό μέτ.	Υγρό μέτ.	Υγρό μέτ.	Υγρό μέτ.	Σεβαστά προέλευση νερού
		15	10	7	4	0			

Ενότητα Β. Προσαρμογή με βάση τον προσαποταλισμό των ασυνεχειών

Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών	Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμοί	Σήραγγες και μεταλλεία	0	-2	-5	-12
	Θεμελίωση	0	-2	-7	-15
	Προμή	0	-5	-25	-60

Τελική βαθμολογία: $RMR_{\text{δια}}$ = βαθμός από προσαρμογή με βάση τον προσαποταλισμό των ασυνεχειών

Ενότητα C. Κατηγορίες βραχωμάζας με βάση την τελική βαθμολογία

Βαθμολογία	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Χαρακτηρισμός	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Ποσχή	Πολύ σπαστή

Ενότητα D. Τεχνική σημασία ταξινόμησης

Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Μέσος χρόνος διατήρησης διατομής στήλης	20 χρόνια για άνοιγμα 15 m	1 χρόνο για άνοιγμα 10 m	1 εβδομάδα για άνοιγμα 5 m	10 ώρες για άνοιγμα 2-3 m	30 min για άνοιγμα 1 m
Συνεχής βραχώμαζας (δΡ%)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Γωνία τριβής βραχώμαζας	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Παράμετρος	Β α θ μ ο ί				
	<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m
Συνέχεια	6	4	2	1	0
	Κανένας	<0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	>5 mm
Διαχωρισμός (άνοιγμα)	6	5	4	1	0
	Πολύ τραχείες	Τραχείες	Ελαφρά τραχείες	Ομαλές	Ολισθηρές
Τραχύτητα	6	5	3	1	0
	Κανένα	Σκληρό < 5mm	Σκληρό > 5mm	Μαλακό < 5mm	Μαλακό > 5mm
Υλικό πλήρωσης	6	4	2	0	0
	Υγιείς	Ελαφρά	Μέτρια	Πολύ	Αποσυνθεμένοι
Αποσάθρωση τοιχωμάτων	6	5	3	1	0

2.2.2.3 Ταξινόμηση Barton et al (Q-System, Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου N.G.I.)

Στην ίδια λογική με τον Bieniawski, οι Barton, Lien και Laude του Νορβηγικού Ινστιτούτου (1974) δίνουν περισσότερη βαρύτητα και σε παραμέτρους όπως η τραχύτητα των ασυνεχειών, τα χαρακτηριστικά αντοχής (τριβής) του υλικού πλήρωσής τους και το γεωστατικό φορτίο. Η ταξινόμηση που προτάθηκε βασίσθηκε σε περισσότερες από διακόσιες (200) πραγματικές περιπτώσεις υπόγειων τεχνικών έργων, ώστε οι συστάσεις για την υποστήριξη να είναι λεπτομερείς και να καλύπτουν μεγάλο εύρος βραχομαζών. Ωστόσο, οι περισσότερες περιπτώσεις αφορούσαν εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα και λιγότερο ιζηματογενή πετρώματα καθώς επίσης και ότι υπήρχαν περιπτώσεις όπου οι ασυνέχειες δεν είχαν υλικό πλήρωσης ή τα τοιχώματά τους δεν ήταν αποσαθρωμένα (Μαρίνος, 1998).

Για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας αλλά και την αντιμετώπιση των προβλημάτων υποστήριξης στις σήραγγες ο Barton et al (1974) πρότεινε τη χρήση του δείκτη ποιότητας υπόγειων εκσκαφών σε βραχώδεις σχηματισμούς (Q), ο οποίος δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα σε τέτοια γεωλογικά περιβάλλοντα (Ρόζος, 2007). Αυτό το σύστημα ταξινόμησης, στηρίχθηκε πάνω στην προϋπάρχουσα μέθοδο ταξινόμησης των Deere et al (1967) που στηριζόταν στο RQD αλλά με την εισαγωγή πέντε επιπρόσθετων παραμέτρων, με σκοπό να βελτιστοποιήσει τα αποτελέσματα, λαμβάνοντας συνολικά υπόψη: (α) το RQD, (β) τον αριθμό των συστημάτων ασυνεχειών (joint set number, jn), (γ) την τραχύτητα των ασυνεχειών (joint roughness number, jr), (δ) το βαθμό αποσάθρωσης και την πλήρωση αυτών (joint alteration number, ja), (ε) το καθεστώς του νερού στις ασυνέχειες (joint water reduction factor, jw) και (στ) τις ποικίλες δυσμενείς παραμέτρους που συνδέονται με τη χαλάρωση, τις υψηλές τάσεις καθώς και το βαθμό συμπίεσης και διόγκωσης του υλικού (Stress Reduction Factor, SRF). Για κάθε παράμετρο, ο προσδιορισμός δίνεται με πμές από τον Πίνακα 2.3, τέτοιες ώστε η τελική βαθμονόμηση να κυμαίνεται από 0.001 έως 1000. Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας Q δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

$Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$, όπου μπορούν να σημειωθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

Ο λόγος RQD/J_n αντιπροσωπεύει την δομή της βραχόμαζας και εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχίων που αποτελούν τη βραχόμαζα.

Ο λόγος J_r/J_a αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας και εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των βραχωδών τεμαχίων.

Ο λόγος J_w/SRF αντιστοιχεί σε μια εμπειρική έκφραση του πεδίου των τάσεων που επιδρούν στη βραχόμαζα και αποτελεί έναν συνδυασμό της επίδρασης: α) των υδροστατικών πιέσεων που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών προκαλώντας απόπλυση του υλικού πλήρωσης και β) των επί τόπου γεωστατικών και τεκτονικών τάσεων που έχουν προκαλέσει σύνθλιψη του πετρώματος, ασθενείς χαλαρωμένες ζώνες ή επιβολή τοπικά υψηλών φορτίων στο πέτρωμα.

Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά Barton et al (1974).

1. Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD)			4. Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση τοιχωμάτων – Joint alteration number (J_d)			5. Κατάσταση από πλευρές υδάτων – Joint water reduction factor (J_w)				
Περιγραφή	Τιμές RQD (%)	RQD κατά DEERE (1963)	Περιγραφή	Τιμές J_d	ϕ_j (Παραμόρφωση)	Περιγραφή	Τιμές J_w	Αν έχουν εγκατασταθεί μέτρα αποσάθρωσης, σύμφωνα με τη τιμή του J_w		
Πολύ πτωχή	0–25	Για RQD < 10 (περισσότερα και η τιμή ϕ_j) λαμβάνεται RQD = 10 Η τιμή του RQD λαμβάνεται πάντα στην πλησιότερη πεντάδα π.χ. 15, 20, 25 κ.λπ.	4 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή	0.75		Στηνή εκσκαφή ή μικρή εισροή (τοπικό 5 l/min). Πέτρα < 1 kg/cm ²	1	Αν έχουν εγκατασταθεί μέτρα αποσάθρωσης, σύμφωνα με τη τιμή του J_w		
Πτωχή	25–50		Εποικυμμένα τοιχώματα με σκληρό και αδαίτητο υλικό (π.χ. γρανίτης, επιδοσίτη)			Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πέτρα 1–2.5 kg/cm ²	0.66	Ειδικά προβλήματα που έχουν σχέση με παγετό δεν λαμβάνονται υπόψη		
Μέτρια	50–75		Οριζωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση			Μεγάλη εισροή ή πίεση σε καλής ποιότητας πέτρωμα με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης. Πέτρα 2.5–10 kg/cm ²	0.50			
Καλή	75–90		Ελαφρά αποσπασμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσπασμένου πετρώματος (δη αρθρικής σύστασης)			Μεγάλη εισροή ή πίεση με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πέτρα 2.5–10 kg/cm ²	0.33			
Εξαιρετική	90–100		Σηαρός υμένας από αμμώδη ή ιλυώδη άργιλα			Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση με προσδεδειγμένη μείωση με την πάροδο του χρόνου. Πέτρα > 10 kg/cm ²	0.2–0.1			
		Μαλακός αρθρικός υμένας ή από ορυκτά με μικρή κωνία τριβής (πάλλες, χλωρίτης, γύψος) πάχους μέχρι 1–2 mm	Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση σταθερή. Πέτρα > 10 kg/cm ²	0.05–0.1						
2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών – Joint set number (J_n)			4 Β. Επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διαμετρική μετατόπιση			6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF)				
Περιγραφή	Τιμές J_n	Στις περιοχές διαταραχών μέσα στη σήραγγα λαμβάνεται (3 x J_n)	Υλικό πλήρωσης αμμώδης ή από θρυμματισμένο πέτρωμα (δη αρθρικής σύστασης)	4	25°–30°	Περιγραφή	Τιμές SRF	Μείωση της τιμής του SRF κατά 25–50 % αν οι ασυνέχειες δίνεις επηρεάζουν αλλά δεν διατέμνουν την σκάρα		
Συμπλοκή πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5–1.0		Υλικό πλήρωσης από σπαστή υπερστερεοποιημένη άργιλα, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	6	16°–24°	6 Α. Ασθενείς ζώνες (π.χ. ζώνες ρηγματών) που τέμνουν την σκάρα και μπορούν να χαλαρώσουν τη δοκιμασία με την κατασκευή της σήραγγας	5			
Ένα σύστημα ασυνεχειών	2		Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλα, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	8	12°–16°	Αρθρικές ζώνες με αρθρικό υλικό ή αποσπασμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για αποσάθρωση βάθος)			10	
Ένα κύριο σύστημα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	3		Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλα, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	8–12	6°–12°	Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)			5	
Δύο συστήματα ασυνεχειών	4		Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλα, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	8–12	6°–12°	Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)			2.5	
Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	6	Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλα, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	8–12	6°–12°	Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες, έντονα διακοσμημένη μάζα ή δομή «ελαφρύς» (για αποσάθρωση βάθος)	5				
Τρία συστήματα ασυνεχειών	9	Στις περιοχές των εισόδων (στημινί) της σήραγγας λαμβάνεται (2 x J_n)	4 Γ. Κακή επαφή τοιχωμάτων κατά τη δόμηση			6 Β. Συμπλοκή καλής αντίστασης πέτρωμα με προβλήματα τάσεων	σ_c / σ_1	σ_1 / σ_2	Σε έντονα ανισότροπο τασικό πεδίο (που έχει μετρηθεί), όπου $5 < \sigma_1 / \sigma_2 < 10$ μείωση του σ_c και σ_1 σε 0.6 σ_c και 0.8 σ_1 . Όταν $\sigma_1 / \sigma_2 > 10$ μείωση αντίστοιχα σε 0.6 σ_c και 0.6 σ_1 . Ανταρτή σε ανεπιδοσμένη άκρη σ_1 αντοχή σε εφελκυσμό και σ_2 σε μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση	
Τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	12		Ζώνες ή διαστρώσεις από θρυμματισμένο πέτρωμα	6	6°–24°	Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	> 200	> 13		2.5
Πάσσαρ ή περισσότερο συστήματα, κυρίως προσανατολισμός πολύ διακοσμημένο πέτρωμα, δομή «ελαφρύς cube»	15		Ζώνες ή διαστρώσεις από άργιλα και θρυαλισμένο πέτρωμα	8	6°–24°	Μέσες τάσεις	200–10	13–0.66		1
Θρυμματισμένο πέτρωμα (δομή εδάφους)	20		Ζώνες ή διαστρώσεις από άργιλα και θρυαλισμένο πέτρωμα	8–12	8°–12°	Υψηλές τάσεις, πολύ σφαιρική δομή	10–5	0.66–0.33		0.5–2
			Ζώνες ή διαστρώσεις από σπαστή ιλυώδη ή αμμώδη άργιλα με χαμηλό περιεχόμενο αρθρικό κλάσμα	5	8°–12°	Ηπια εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπλοκές πέτρωμα)	5–2.5	0.33–0.16		5–10
3. Τραχύτητα των ασυνεχειών – Joint roughness number (J_r)			10, 13	8°–24°	Έντονη εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπλοκές πέτρωμα)	< 2.5	< 0.16	10–20		
Περιγραφή	Τιμές J_r	13–20	10, 13	8°–24°	6 Γ. Συνθλιβόμενο πέτρωμα. Πλαστική παραμόρφωση πετρώματος κάτω από πολύ υψηλές τάσεις			5–10		
3 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διαμετρική μετατόπιση					Μέτρια πίεση συνθλίψεως*			10–20		
Ασυνέχειες διακλάσεις	4	Αν η μέση απόσταση των ασυνεχειών του κυρίου συστήματος υπερβαίνει τα 3 m προστίθεται 1 στην τιμή του J_r	Παχές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστροφικές άργιλα	10, 13	8°–24°	Μεγάλη πίεση συνθλίψεως*				
Τραχιές ή ακανόνιστες-κυματοειδείς διακλάσεις	3		Παχές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστροφικές άργιλα	10, 13	8°–24°	6 Δ. Δοκιμαζόμενο πέτρωμα λόγω ανεργότητας με την παρουσία νερού				
Ομαλές-κυματοειδείς διακλάσεις	2		Οι τιμές του J_d εφάρμόζονται από το είδος και την κατάσταση της άργιλα (σπαστή, μαλακή, δοκιμαζόμενη) και την παρουσία-δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες	10, 13	8°–24°	Μέτρια πίεση διάλυσης			5–10	
Ολισθηρές-κυματοειδείς	1.5		Ζώνες ή διαστρώσεις από σπαστή ιλυώδη ή αμμώδη άργιλα με χαμηλό περιεχόμενο αρθρικό κλάσμα	10, 13	8°–24°	Μεγάλη πίεση διάλυσης			5–10	
Τραχιές ή ακανόνιστες-επίπεδες	1.5		Παχές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστροφικές άργιλα	10, 13	8°–24°	Μεγάλη πίεση διάλυσης			5–10	
Ομαλές-επίπεδες	1	Οι τιμές του J_d εφάρμόζονται από την κατάσταση της άργιλα (σπαστή, μαλακή, δοκιμαζόμενη), το ποσοστό του αρθρικού υλικού (πχ μονορρομιοίτης) και την παρουσία-δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες	10, 13	8°–24°						
Ολισθηρές-επίπεδες	0.5	Τιμή $J_r = 0.5$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθηρές διακλάσεις με γραμμώσεις που παρουσιάζουν προσανατολισμό								
3 Β. Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή κατά τη δόμηση										
Ζώνη (υλικό πλήρωσης) που περιέχει αρθρικό ορυκτό σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1									
Αμμώδης, χαλικώδης ζώνη ή ζώνη θρυμματισμού σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1									

2.2.2.4. Γεωλογικός δείκτης αντοχής (Geological Strength Index, GSI)

Οι Hoek et al (1992) στην προσπάθεια βελτίωσης του κριτηρίου αστοχίας που είχε διατυπωθεί παλαιότερα από τους Hoek & Brown (Hoek & Brown criterion), διαπίστωσαν ότι η αξία του κριτηρίου και η επέκτασή του ακόμα και για κατακερματισμένες βραχομάζες σχετίζεται με τη δυνατότητα εύκολου υπολογισμού των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον τύπο και αφορούν στα χαρακτηριστικά της βραχομάζας (Ρόζος, 2007). Το σύστημα GSI δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικά πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με $RMR < 40$ (ακόμα και με $GSI < 5$) αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Το συγκεκριμένο σύστημα σχεδιάστηκε, ώστε γενικά να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με $RMR > 40$, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Όμως, για βραχώμαζες με $RMR < 40$, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR (Καββαδάς, 2000).

Ο Γεωλογικός Δείκτης χαρακτηρισμού της βραχώμαζας (GSI) βασίζεται στη συναξιολόγηση δύο παραμέτρων: α) της δομής της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών (δηλαδή εφαρμόζεται σε βραχώμαζα με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού, τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της), β) της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Ουσιαστικά αποτελεί ένα σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση της απομείωσης της αντοχής της βραχώμαζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες και βασίζεται σε υπαίθριες παρατηρήσεις (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων παραμέτρων αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση του τύπου της βραχώμαζας και του υπολογισμού της τιμής του GSI, όπως δίνεται στον Πίνακα 2.4 και αναφέρεται σε ομοιογενή πετρώματα ενώ υπάρχει και συμπληρωματικός πίνακας εκτίμησης του δείκτη αποκλειστικά για την περίπτωση ετερογενών βραχομαζών όπως είναι ο φλύσχης (Πίνακας 2.5).

Να σημειωθεί ότι το GSI δεν περιλαμβάνει το RQD και δίνει μεγαλύτερη σημασία στις γεωλογικές παρατηρήσεις των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας (υλικό, δομή, γεωλογική ιστορία). Το κρίσιμο στοιχείο σχετικά με την ταξινόμηση της

βραχόμαζας, βάσει του GSI, είναι ότι υπάρχει μια προσεκτική τεχνικογεωλογική περιγραφή της που ουσιαστικά είναι ποιοτική, αφού βασίζεται στην εκτίμηση της λιθολογίας, της δομής και της κατάστασης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών της βραχόμαζας και υπολογίζεται από την οπτική εξέτασή της, η οποία (βραχόμαζα) εκτίθεται σε ορύγματα, μέτωπα σηράγγων καθώς και πυρήνες γεωτρήσεων. Από τη στιγμή, λοιπόν, που έχει αποφασισθεί η τιμή GSI, αυτό το νούμερο θα εισαχθεί σε ένα σύστημα εξισώσεων που θα υπολογίσουν τις ιδιότητες της βραχόμαζας.

Ωστόσο, οι προσπάθειες να ποσοτικοποιηθεί αριθμητικά το συγκεκριμένο σύστημα πρέπει να γίνονται προσεκτικά όχι μόνο γιατί η ποσοτικοποίηση σχετίζεται με την συχνότητα και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών αλλά και γιατί δεν λειτουργεί καλά σε τεκτονικά διαταραγμένες βραχόμαζες, στις οποίες η θεμελιώδης δομή έχει καταστραφεί. Αντίθετα, σε τέτοιου τύπου βραχόμαζες προτείνεται η χρήση ποιοτικής προσέγγισης βασισμένης σε προσεκτική οπτική παρατήρηση. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ανισότροπα και η αστοχία λαμβάνει χώρα σε προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας, δεν εφαρμόζεται ο γεωλογικός δείκτης αντοχής.

Τέλος, η δύναμη και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης της βραχόμαζας εξαρτώνται από το αλληλοκλείδωμα των ανεξάρτητων κομματιών του ακέραιου πετρώματος που σχηματίζουν τη βραχόμαζα. Φυσικά το άνοιγμα των ασυνεχειών που διαχωρίζουν αυτά τα ανεξάρτητα κομμάτια έχει σημαντική επιρροή στις ιδιότητες της βραχόμαζας. Στον πίνακα GSI δεν υπάρχει ειδική αναφορά στο άνοιγμα των ασυνεχειών αλλά στον παράγοντα D, ο οποίος εξαρτάται από το βαθμό διατάραξης που έχει υποστεί η βραχόμαζα υπό την επίδραση των εκρηκτικών ή και από την ανακατανομή και αποτόνωση των τάσεων και κυμαίνεται από την τιμή 0 για αδιατάρακτες βραχόμαζες στη φυσική τους κατάσταση έως την τιμή 1 για πολύ διαταραγμένες. Ακολουθώς, παρατίθενται οι Πίνακες 2.4 και 2.5, οι σχετικοί με τα προαναφερθέντα.

Πίνακας 2.4. Γεωλογικός δείκτης αντοχής για κερματισμένες βραχώμαζες (Hoek and Marinos, 2000).

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ισотροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνεχείες έχουν εμφανή στην ανάπτυξη τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις.		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
		Πολύ τραχείες, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες	Τραχείες, ελαφρά αποσθρωμμένες και αξείδωμένες επιφάνειες	Ομαλές, μέτρια αποσθρωμμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	Με ολισθρές επιφάνειες, πολύ αποσθρωμμένες με συμπανείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος	Ολισθρές επιφάνειες, πολύ αποσθρωμμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης.	
ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
	ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Αρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνεχείες	90				N/A	N/A
	ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδω-μα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.	80					
	ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) - Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύ πλεονα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλειδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.		70				
	ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) - Πτυχωμένη βραχώμαζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμφανή στρώση ή σχιστότητας.		60				
	ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλειδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων.			50			
	ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINA-TED/SHEARED) - Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης.			40		30	
						20	
							10
		N/A	N/A				

Πίνακας 2.5. Γεωλογικός δείκτης αντοχής για ετερογενείς βραχώμαζες, όπως ο φλύσξης (Marinos and Hoek, 2000).

GSJ ΓΙΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (Marinos, P and Hoek, E, 2000) Με βάση την περιγραφή της λιθολογίας, της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας (ιδίαιτερα των επιπέδων της στρώσης), επιλέγεται ένα κουτί στο διάγραμμα. Τοποθετείται η θέση στο κουτί που αντιστοιχεί στην κατάσταση των ασυνεχών και εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τα οριζόντια. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός. Η επιλογή εύρους τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μία συγκεκριμένη τιμή π.χ GSI = 35. Σημειώνεται ότι το κριτήριο Hoek και Brown δεν εφαρμόζεται σε δομικά ελιγχομένους οσασίες. Όπου υπάρχουν δυσμενώς προσανατολισμένα συνεχή ασθενή επίπεδα ασυνέχειας αυτά καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή μερικών τύπων βραχώμαζας μειώνεται από την παρουσία υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να γίνει επιτρεπτό με μία μικρή μετατόπιση στο δεξιό μέρος των στηλών για μέτριες πιωχές και πολύ πιωχές συνθήκες. Η πίεση του νερού δεν αλλάζει την τιμή του GSI και αντιμετωπίζεται με ανάλυση των ενεργών τάσεων.		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (επιφάνεια στρώσης)		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσφραγισμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσφραγισμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μέτρα αποσφραγισμένες ή ελασματοειδείς επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά θέσεις ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγείς ομίχες ή υλικό πλήρωσης με γυάλινη πρόσδεση	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, ολισθηρές ή έντονα αποσφραγισμένες επιφάνειες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης.
<p>A. Παχυστρωματώδης, πολύ τεμαχισμένος ψαμίτης. Η επίδραση των πληθικών επικαλύψεων στα επίπεδα στρώσης ελαχιστοποιείται από την συνεκτικότητα της βραχώμαζας. Σε μικρού βάθους σήραγγες ή πρανή αυτά τα επίπεδα στρώσης μπορούν να προκαλέσουν αστόθεια λόγω δομής.</p>	70							
<p>B. Ψαμίτης με διαστρώσεις πηλίτη</p> <p>C. Ψαμίτης με πηλίτη σε παρόμοιες ποσότητες.</p> <p>D. Πηλινή ή πηλτικός σχίστης με ψαμιτικές στρώσεις.</p> <p>E. Ασθενής ψαμίτης ή αργιλικός σχίστης με ψαμιτικές στρώσεις.</p>	50							
<p>Τα C, D, E και B μπορεί να είναι λίγο ή περισσότερο πτυχωμένα από ότι απεικονίζεται αλλά αυτό δεν αλλάζει την αντοχή. Τεκτονική παραμόρφωση, ρωγμάτωση και σπύλακα της συνέχειας μετατοπίζουν αυτές τις κατηγορίες σε F και H.</p> <p>F. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος/ρωγματοειδής διατμημένος αργιλικός σχίστης ή πηλινός με ρωγματοειδείς και παραμορφωμένες στρώσεις ψαμίτη που σχηματίζουν μια σχεδόν χροσκή δομή.</p>	40							
<p>G. Αδιατάρακτος αργιλικός ή πηλτικός σχίστης ή χωρίς λίγα πολύ λεπτά στρώματα ψαμίτη.</p> <p>H. Τεκτονικά παραμορφωμένος αργιλικός ή πηλτικός σχίστης που σχηματίζει χροσκή δομή με πηλτικούς φακούς. Λεπτές στρώσεις ψαμίτη μετατρέπονται σε μικρά βραχώδη τεμάχια.</p>								

2.2.2.5. Τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας για πρανή (Slope Mass Rating, SMR)

Το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης προτάθηκε από τον Romana (1985) για (βραχώδη) πρανή εισόδων σήραγγων σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (Πίνακας 2.6). Η πρακτική εφαρμογή του συστήματος RMR και οι παρατηρήσεις της πραγματικής συμπεριφοράς των πρανών έχουν δείξει ότι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών στην ευστάθεια των πρανών έχει μεγάλη βαρύτητα, αφού ο δυσμενής προσανατολισμός αλλά και η ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μειώνουν σημαντικά τη βαθμολογία της βραχώμαζας, με αποτέλεσμα τη συχνή υποεκτίμηση της ποιότητάς της (Τσιαμπάος κ.α., 1994).

Ο Romana (1985) μετά από στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων υπολογισμού ευστάθειας 35 πρανών από τα οποία 20 αστόχησαν και χρησιμοποιώντας γωνία τριβής και συνοχή που προέκυψαν από την ταξινόμηση RMR, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι αρκετά επισφαλής η χρήση της μεθόδου αυτής στον

σχεδιασμό βραχωδών πρηνών. Πρότεινε, λοιπόν, μια προσαρμογή του συστήματος RMR για πρηνή, δίνοντας βαρύτητα στην βαθμονόμηση του προσανατολισμού των ασυνεχειών της βραχόμαζας σε σχέση με τη γεωμετρία και στον τρόπο διάνοιξης των πρηνών. Η βαθμολογία της βραχόμαζας σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα SMR προκύπτει από το RMR (χωρίς τη βαθμονόμηση προσανατολισμού ασυνεχειών) από τη σχέση:

$$\mathbf{SMR} = \mathbf{RMR}_{\text{basic}} - (\mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \times \mathbf{F}_3) + \mathbf{F}_4,$$

όπου $\mathbf{RMR}_{\text{basic}}$ είναι η βαθμονόμηση σύμφωνα με το σύστημα RMR χωρίς να ληφθεί υπ' όψη η απομείωση που προκύπτει από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

Η παράμετρος \mathbf{F}_1 αναφέρεται στην παραλληλότητα μεταξύ της διεύθυνσης των διακλάσεων και του μετώπου του πρηνούς. Κυμαίνεται από 1.00 (ασυνέχειες σχεδόν παράλληλες με το πρηνές) έως και 0.15 όταν η γωνία μεταξύ των δύο διευθύνσεων (κύριων ασυνεχειών και πρηνούς) είναι μεγαλύτερη των 30°.

Η παράμετρος \mathbf{F}_2 αξιολογεί την πιθανότητα εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης με βάση την μέγιστη κλίση των κύριων ασυνεχειών. Ασυνέχειες με γωνία κλίσης >45° βαθμολογούνται με συντελεστή 1 ενώ η μικρότερη βαθμολογία (0.15) δίνεται σε ασυνέχειες με γωνία κλίσης μικρότερη από 20°.

Η παράμετρος \mathbf{F}_3 αναφέρεται στην σχέση μεταξύ της κλίσης του μετώπου του πρηνούς και της κλίσης των κύριων ασυνεχειών. Σε περίπτωση επίπεδης ολίσθησης που συμβαίνει όταν η διεύθυνση του μετώπου και των κύριων ασυνεχειών είναι σχεδόν παράλληλα, οι συνθήκες είναι πολύ δυσμενείς όταν το πρηνές έχει κλίση κατά 10° μεγαλύτερη της κλίσης της ασυνέχειας.

Τέλος, η παράμετρος \mathbf{F}_4 αξιολογεί την μέθοδο εκσκαφής η οποία έχει άμεση επίδραση στην χαλάρωση της βραχόμαζας και εισάγεται για πρώτη φορά στο σύστημα ταξινόμησης. Τα φυσικά πρηνή λαμβάνουν τη βαθμολογία 15 γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα λόγω της μακροχρόνιας διάβρωσης που έχουν υποστεί και άλλων προστατευτικών μηχανισμών που έχουν αναπτύξει, όπως φυσικό κάλυμμα. Η εκσκαφή με χρήση προδιάτμησης αυξάνει την ευστάθεια του πρηνούς ($\mathbf{F}_4=+10$). Η εκσκαφή του πρηνούς με τη μέθοδο των λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) όταν γίνεται σωστά αυξάνει την ευστάθεια του πρηνούς ($\mathbf{F}_4=+8$). Η σωστή χρήση συνήθων εκρηκτικών και η μηχανική εκσκαφή

δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς ($F_4=0$). Αντίθετα κακή χρήση εκρηκτικών επιβαρύνει την ευστάθεια του πρανούς ($F_4=-8$).

Από την εφαρμογή της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει μια τελική βαθμονόμηση της βραχόμαζας σε διάφορες κατηγορίες και μια ταξινόμηση ανάλογα με τα προτεινόμενα μέτρα προστασίας των πρανών κατά κατηγορία.

Συγκρίνοντας τα δύο προαναφερόμενα συστήματα, στην περίπτωση του υπολογισμού ευστάθειας των 35 πρανών, προέκυψε ότι το σύστημα RMR υποεκτιμούσε συστηματικά την ποιότητα της βραχόμαζας κυρίως λόγω της μεγάλης βαρύτητας που απέδιδε στον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Αποτέλεσμα αυτού, ήταν η επιλογή πολύ συντηρητικών παραμέτρων διατηρητικής αντοχής της βραχόμαζας με αποτέλεσμα των υπερσχεδιασμό των πρανών. Αντίθετα, το σύστημα Romana καταλήγει σε εκτιμήσεις που πλησιάζουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες.

Πίνακας 2.6. Ταξινόμηση βραχόμαζας για βραχώδη πρανή SMR [(Slope Mass Rating), (Προσαρμογή κατά Romana, 1985)].

SMR = RMR _{bas} - (F ₁ F ₂ F ₃) + F ₄						
ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ						
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
P	$ \alpha - \alpha_0 $	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
T	$ \alpha - \alpha_0 - 180° $					
P/T	F ₁	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta $	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
P	F ₂	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F ₃	1	1	1	1	1
P	$\beta_1 - \beta_0$	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< -10°
T	$\beta_1 + \beta_0$	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
P/T	F ₃	0	6	25	50	80

P : επίπεδη ολισθήση α_0 : φορά κλίσης πρανούς α : φορά κλίσης ασυνέχειας
T : ανατροπή β_0 : κλίση πρανούς β_1 : κλίση ασυνέχειας

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ					
Μέθοδος	Φυσικό πρανές	Πρότμηση	Λέιων τοιχωμάτων	Εκρηκτικά ή μηχανικά	Αιελή εκρηκτικά
F ₄	15	10	8	0	- 8

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ SMR					
Κατηγορία	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Περιγραφή	Πολύ πτωχή	Πτωχή	Μέτρια	Καλή	Πολύ καλή
Ευστάθεια	Τελείως ασταθής	Ασταθής	Μερικά σταθερό	Σταθερό	Τελείως σταθερό
Ολισθήσεις	Εκτεταμένες επίπεδες ή εδαφικού τύπου	Επίπεδες ή εκτεταμένες σφήνες	Πολλές σφήνες	Μερικά τεμάχια	Καμία
Μέτρα προστασίας	Τοίχος βαρύτητας ή τοίχος με αγκύρωση. Επανεκακαφή	Οπλισμένο εκταχυόμενο ακυρόδεμα, τοίχος αναχώπισης, επανεκακαφή, βαθιά αποστράγγιση	Τάφρος και πλέγμα, τοίχος αναχώπισης, αγκυρώσεις	Τάφρος, πλέγμα, σποραδικές αγκυρώσεις	Κανένα

Όμως, το βασικότερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι αφ' ενός έχει χρήση μόνο σε βραχώδη πρανή, αφ' ετέρου δίνει μόνο ποιοτικές εκτιμήσεις της αναμενόμενης ευστάθειας και όχι ποσοτικές παραμέτρους σχεδιασμού (παραμέτρους διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας: γωνία τριβής ϕ και συνοχή c), ώστε αυτές να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αναλύσεις ευστάθειας.

2.3. Κριτική ταξινομήσεων

Αν και η εφαρμογή των μεθόδων ταξινόμησης είναι πολύ χρήσιμη, παρουσιάζει ατέλειες και πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά ενώ σε καμιά περίπτωση δεν πρέπει να υποκαθιστά τη μηχανικο - γεωλογική κρίση στην εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας. Οι μέθοδοι δεν μπορούν πάντα να αξιολογήσουν, πλήρως, σημαντικές παραμέτρους ορισμένου προβλήματος με συνέπεια αν εφαρμόζονται τυφλά χωρίς προσαρμογές, όταν αυτές απαιτούνται, να οδηγούν σε αστοχίες. Οι μέθοδοι ταξινόμησης δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο για τις βραχώμαζες και για τις γεωλογικές καταστάσεις εκείνες που προσομοιάζουν με τις περιπτώσεις στις οποίες βασίσθηκε η ανάπτυξή τους. Διαφορετικά οι εφαρμογές τους, σε περιπτώσεις χωρίς προηγούμενες εμπειρίες, είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα (Μαρίνος, 1994).

2.3.1. Κριτική των μεθόδων Bieniawski – Barton

1) Τόσο η μέθοδος ταξινόμησης RMR κατά Bieniawski όσο και η αντίστοιχη Q κατά Barton δεν ανταποκρίνονται σε βραχομάζα με πολύ πτωχή ποιότητα (λόγω του ότι πτωχή ποιότητα σημαίνει ότι δεν υπάρχει τιμή RQD, άρα δεν υφίσταται και τιμή για το RMR και το Q, αφού όπως είναι γνωστό τα εν λόγω συστήματα προκύπτουν και από τον συνυπολογισμό του RQD), η οποία μπορεί να οφείλεται σε διογκώσεις, ερπυστικά φαινόμενα στο πέτρωμα ή στο υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, ή ακόμα σε θραύση λόγω συμπίεσης. Η εφαρμογή, δηλαδή, της μεθόδου ταιριάζει καλύτερα στα ψαθυρής θραύσης πετρώματα και όχι σε αυτά που παρουσιάζουν πλαστιμότητα (Μαρίνος, 1994).

Σχετικό με το προηγούμενο σχόλιο είναι και το ότι στη μέθοδο Bieniawski το μέγεθος των τεμαχών του πετρώματος (RQD και αποστάσεις ασυνεχειών) συμμετέχει σημαντικά στη διαμόρφωση της τελικής βαθμολογίας (40 στα 100) εις βάρος της αντοχής των ασυνεχειών (Μαρίνος, 1994).

Η παρατήρηση περί της περιορισμένης εφαρμογής σε πτωχής ποιότητας πετρώματα ή το ότι απαιτούνται οι κατάλληλες κατά περίπτωση προσαρμογές, αναγνωρίζεται από πολλούς ερευνητές. Για παράδειγμα, οι Douglas and Arthur (1983) και ο Dearman (1983) αναφέρουν ότι η ταξινόμηση Bieniawski δεν προσφέρεται για ασθενή πετρώματα και σε καμιά περίπτωση η συγκεκριμένη ταξινόμηση δεν αναφέρεται σε εδάφη (Μαρίνος, 1994).

2) Ένα μειονέκτημα που περιορίζει τη μέθοδο Bieniawski, ακόμα και σε άλλες κατηγορίες πετρωμάτων, είναι ότι δεν είναι αρκετά ευαίσθητη έναντι των μεταβολών των επιμέρους παραμέτρων που τη συνθέτουν (Μαρίνος, 1994). Π.χ. έστω ότι μια βραχομάζα έχει χαρακτηριστεί με συνολική βαθμολογία RMR= 38, όπου η κατάσταση των ασυνεχειών έχει βαθμολογηθεί με 20 (ελαφρά τραχείες επιφάνειες - διαχωρισμός μικρότερος του 1 mm. Η βραχομάζα αυτή αντιστοιχεί στην κατηγορία IV (πτωχή). Αν εδώ, αντίθετα, η κατάσταση των ασυνεχειών ήταν με επιφάνειες ολίσθησης, ή με υλικό πλήρωσης μικρότερο των 5 mm πάχους, δηλαδή βαθμολογίας 10, η νέα συνολική βαθμολογία θα ήταν RMR = 28. Και πάλι, με βάση την ταξινόμηση, η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως κατηγορίας IV (πτωχή). Η συμπεριφορά της, όμως, είναι εντελώς διαφορετική ως προς την αντοχή σε διάτμηση των ασυνεχειών (η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη στη μέθοδο Q του Barton).

Η παράμετρος «κατάσταση ασυνεχειών» έχει ποιοτικό χαρακτήρα και για λόγους ακριβέστερης εκτίμησής της δίνεται ο Πίνακας 2.2 που προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της ISRM (1981). Όμως, σε ειδικές περιπτώσεις, η τραχύτητα των επιφανειών των ασυνεχειών αποκτά μηδενική σημασία όταν υπάρχει υλικό πλήρωσης σημαντικού πάχους. Στην περίπτωση αυτή, το να βαθμονομηθεί η τραχύτητα δίνει λανθασμένη εικόνα της ποιότητας της βραχομάζας.

3) Αξίζει να παρατηρηθεί ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου Bieniawski, ζώνες διαταραγμένες από ρήγματα ή με έντονες συμπιέσεις από πτυχωσεις ή διατμήσεις δεν καλύπτονται από τις έξι (6) παραμέτρους της βραχομάζας που χρησιμοποιούνται για τη βαθμολόγησή της ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη το επί τόπου πεδίο των τάσεων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Ακόμα, μια αδυναμία του συστήματος Bieniawski είναι ότι βασίζεται στις τυπικά μέσες καταστάσεις και εάν υπάρχουν ακραίες τιμές μιας παραμέτρου μπορεί, ανάλογα με τη σχέση τους με τη θέση του υπό μελέτη έργου να δημιουργούν σαφώς χειρότερες καταστάσεις.

4) Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση όσον αφορά την απόσταση των ασυνεχειών, για το RMR έχει βασισθεί στην παραδοχή τριών συστημάτων ασυνεχειών και ο Bieniawski έχει αναγνωρίσει ότι όταν το σύστημα εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με λιγότερα από τρία συστήματα ασυνεχειών, τότε θα πρέπει να εφαρμόζονται περισσότερο συντηρητικοί υπολογισμοί και προτείνει μια αύξηση για την βαθμονόμηση του πεδίου «απόσταση των ασυνεχειών» κατά 30%.

5) Θα πρέπει ακόμα να επισημανθεί η απουσία της αντοχής του ακέραιου πετρώματος καθώς και η απουσία της απόστασης των ασυνεχειών από το σύστημα Q, στοιχεία που, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν χαρακτηριστικά στοιχεία της ταυτότητας μιας βραχώμαζας για την ταξινόμησή της. Ένα ακόμα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, είναι ότι η τάση δεν περιλαμβάνεται στο RMR αλλά λαμβάνεται υπόψη στο Q.

6) Τα δύο συστήματα ταξινόμησης RMR και Q δημιουργήθηκαν για τον υπολογισμό της υποστήριξης μιας υπό εκσκαφή σήραγγας και για αυτό τον λόγο θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή για έργα και εφαρμογές εκτός του προαναφερόμενου λόγου, γιατί έχουν υπάρξει αντιρρήσεις για την χρησιμοποίησή τους και την προέκτασή τους, χωρίς τροποποιήσεις, και για άλλες χρήσεις πέρα από αυτές για τις οποίες αναπτύχθηκαν (Hudson και Harrison, 1997). Εξ' άλλου, σύμφωνα με δήλωση του εμπνευστή του RMR (Bieniawski, 1989): «*το RMR είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται για τον σκοπό για τον οποίο αναπτύχθηκε και όχι να εφαρμόζεται σαν λύση σε όλα τα προβλήματα σχεδιασμού*».

7) Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν είναι σωστό να χρησιμοποιούνται οι ίδιες παράμετροι ταξινόμησης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μέρος και το είδος του έργου, γιατί ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του έργου και της περιοχής που πρόκειται να κατασκευασθεί θα απαιτηθούν συγκεκριμένες παράμετροι που ενδέχεται να μην είναι οι κατάλληλες για διαφορετικό έργο και μέρος (Hudson και Harrison, 1997).

8) Επιπρόσθετα, το σύστημα Q έχει δυνατότητα εφαρμογής μόνο σε υπόγεια τεχνικά έργα, δεν οδηγεί σε εκτιμήσεις των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας και δεν λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ασυνεχειών παρά μόνο έμμεσα στην εκτίμηση του λόγου J_r/J_a που αναφέρεται στο περισσότερο δυσμενές σύστημα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

9) Οι εισερχόμενες παράμετροι, τόσο κατά Bieniawski όσο και κατά Barton, είναι δυνατόν να εισέλθουν στην κατάταξη με κάποια υποκειμενική εκτίμηση, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στην έλλειψη εμπειρίας, είτε σε τοπικά φαινόμενα (Μάλιος, 1994).

10) Σχετικά με την αντοχή του ακέραιου πετρώματος που αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες βαθμονόμησης της βραχώμαζας κατά Bieniawski πρέπει να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη αντοχή ορίζεται σαν η αντοχή του βραχώδους υλικού μεταξύ των ασυνεχειών που το περιβάλλουν. Οι τιμές αντοχών που χρησιμοποιούνται είναι, συνήθως, από εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UCS tests). Τα προβλήματα που προκύπτουν από τους προηγούμενους συλλογισμούς είναι τα ακόλουθα (Hack, 2002):

- Το δείγμα που θα υποστεί την εργαστηριακή δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης είναι, συχνά, 10 cm και αν η απόσταση των ασυνεχειών είναι μικρότερη από αυτό το μέγεθος, τότε το δείγμα μπορεί να περιλαμβάνει ασυνέχειες.
- Τα δείγματα που επιλέγονται για εργαστηριακές δοκιμές συνηθίζεται να είναι καλύτερης ποιότητας από τον αντιπροσωπευτικό μέσο όρο του υπό δοκιμή πετρώματος και συνεπώς πτωχής ποιότητας δείγματα από την υπό μελέτη περιοχή, λόγω της δομής τους που μπορούν εύκολα να σπάσουν κατά την διατρητική διεργασία απορρίπτονται, δεν εξετάζονται και κατά συνέπεια δεν υπάρχει αντιπροσωπευτική εικόνα του πετρώματος από την συγκεκριμένη περιοχή του εν λόγω έργου.
- Ο υπολογισμός της αντοχής του ακέραιου πετρώματος εξαρτάται από τον προσανατολισμό του δείγματος με την προϋπόθεση ότι το ακέραιο πέτρωμα παρουσιάζει ανισοτροπία.
- Στην πραγματικότητα, η εργαστηριακή δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης δεν είναι μια έγκυρη παράμετρος και αυτό γιατί τα περισσότερα πετρώματα θα υποστούν τάσεις κάτω από συνθήκες που προσομοιάζουν καλύτερα σε περιβάλλον τριαξονικών δοκιμών παρά σε συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης.
- Κάποια συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν την δοκιμή σημειακής φόρτισης για να εκφράσουν την τιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Εδώ υπάρχει ο κίνδυνος με την ύπαρξη ασυνέχειας στο δείγμα, να είναι η τιμή της συγκεκριμένης αντοχής που θα προκύψει με δοκιμή παράλληλα στην

ασυνέχεια μικρότερη από τη δοκιμή που θα εφαρμοζόταν κάθετα στην ασυνέχεια.

- Υπάρχει το μειονέκτημα της χρήσης του σφυριού Schmidt για τον υπολογισμό της αντοχής του ακέραιου πετρώματος λόγω του επηρεασμού των πιθανών ασυνεχειών που ενδέχεται να βρίσκονται πίσω από την εξεταζόμενη επιφάνεια.

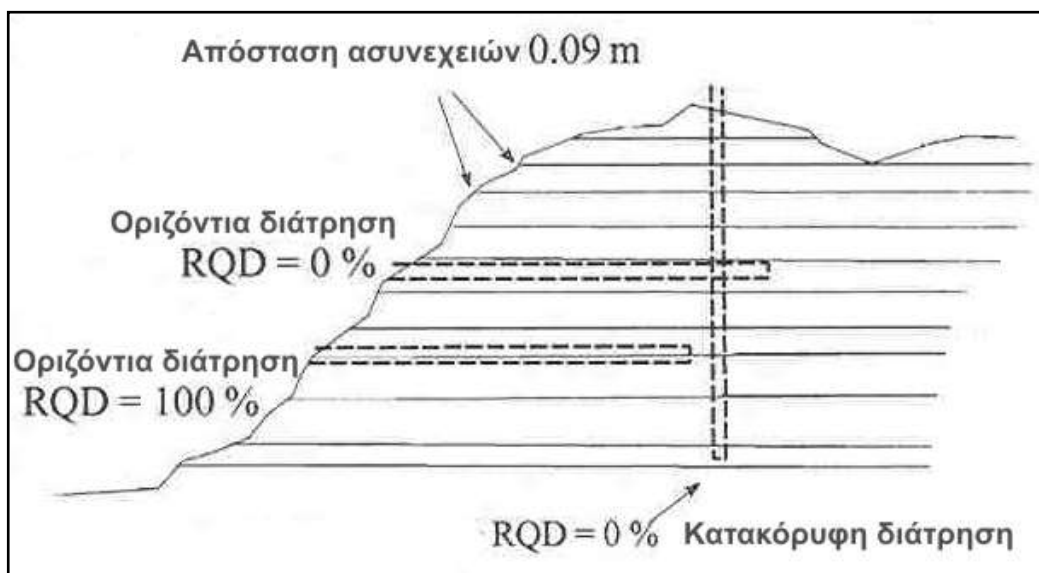
2.3.2. Κριτική της ταξινόμησης με βάση το RQD

Η ίδια η έννοια του ορισμού του δείκτη ποιότητας που έχει καθορισθεί από τους Deere et al. (1967, 1988, 1989) καθώς και η καθημερινή πρακτική εφαρμογής του παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα, τέτοια ώστε αυτός να παρουσιάζει εσφαλμένες εκτιμήσεις – προβλήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα (Hack, 2002):

- Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Η τιμή των δέκα εκατοστών για ακέραιο (μη σπασμένο) βραχώδες δείγμα είναι ένα ασαφές και ταυτόχρονα σχετικό διακριτό όριο και αυτό γιατί αν υποθεθεί ότι υπάρχει μια βραχώμαζα με απόσταση ασυνεχειών ίση με εννέα εκατοστά, η οποία έχει προσανατολισμό με διεύθυνση κάθετη στον άξονα μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης, αυτό σημαίνει ότι θα δώσει μια τιμή RQD ίση με μηδέν τοις εκατό ενώ αντίθετα μια απόσταση ασυνεχειών που θα ισούται με έντεκα εκατοστά θα δώσει μια τιμή RQD ίση με 100%. Επιπρόσθετα, ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμιά αύξηση του συγκεκριμένου δείκτη (Καββαδάς, 2002). Αν και μικρή διαφοροποίηση στην ποιότητα μπορεί να προκύψει από την διαφορά στις αποστάσεις των ασυνεχειών, δεν θα πρέπει να αποτελεί σημείο αναφοράς, ώστε να υπάρχει τέτοια διαφορά στην ποιότητα μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής για ένα τμήμα της βραχώμαζας που συνεχίζει να έχει τα ίδια χαρακτηριστικά μόνο που κάθε φορά εξετάζεται από διαφορετική οπτική γωνία. Είναι φανερό ότι σε μια βραχώμαζα οι αποστάσεις των ασυνεχειών δεν είναι όλες ίδιες και για αυτό το λόγο το αποτέλεσμα του ορίου των 10cm είναι λιγότερο ή περισσότερο σχετικό (αφηρημένο) που εξαρτάται από την κατανομή των ανοιγμάτων. Αυτό συνδέεται άμεσα με την τιμή του εν λόγω δείκτη, ο οποίος επηρεάζεται από τον προσανατολισμό που μπορεί να έχει μια ασυνέχεια σε σχέση με την κατακορυφότητα του άξονα της διατρητικής

στήλης. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD από ότι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες (Σχήμα 2.2).

- Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (α. χειρισμός της διατρητικής διεργασίας όπως ταχύτητα περιστροφής, πίεση στην κοπτική κεφαλή, είδος της κοπτικής κεφαλής, β. κατάλληλος γεωτρητικός εξοπλισμός). Όλοι οι προηγούμενοι παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επι τόπου πετρώματος. Ειδικά, σε ασθενή πετρώματα, τα παραπάνω αν δεν είναι τα ενδεδειγμένα, ενδέχεται να οδηγήσουν ακόμα και σε μικρότερες τιμές στον δείκτη ποιότητας από αυτές που δυνητικά θα μπορούσε να έχει (Καββαδάς, 2002).



Σχήμα 2.2. Κίνδυνος λανθασμένου υπολογισμού του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας (RQD) λόγω του προσανατολισμού του άξονα της διάτρησης σε σχέση με τις ασυνέχειες της διατρυόμενης βραχώμαζας (Hack, 2002).

- Το RQD είναι, ουσιαστικά, ανύπαρκτο στις ασθενείς βραχώμαζες.
- Τέλος, ενώ η τιμή του δείκτη θα έπρεπε να καθορίζεται ανά λιθολογία, πολλοί είναι εκείνοι που δεν το λαμβάνουν υπόψη λόγω της ασάφειας των διακριτών ορίων που σχετίζονται με τη λιθολογία. Αυτό το ζήτημα αποκτά μεγαλύτερη σημασία αν συμβεί απώλεια υλικού κατά τη διάτρηση σε εναλλαγές λιθολογιών, κατά την οποία ο ασθενέστερος λιθολογικός σχηματισμός λόγω της φύσης του δεν επιτυγχάνεται να συλληχθεί με τη διάτρηση.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο δείκτης ποιότητας δεν είναι πολύ καλά καθορισμένος, ότι πιθανόν να μην εκφράζει την ποιότητα της βραχώμαζας στον επιθυμητό βαθμό και ότι οι τιμές του δείκτη μπορεί να είναι και παραπλανητικές. Συνεπώς, η συμβολή του δείκτη ποιότητας στην ταξινόμηση των συστημάτων ελέγχεται. Επιπλέον, πολλά συστήματα ταξινόμησης περιλαμβάνουν τον δείκτη ποιότητας ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνουν και παράμετρο για το άνοιγμα των ασυνεχειών, κάτι το οποίο φαίνεται όχι και τόσο λογικό αφού με αυτόν τον τρόπο ουσιαστικά διπλασιάζεται η επίδραση του ανοίγματος των ασυνεχειών στην τελική βαθμονόμηση.

2.3.3. Κριτική της ταξινόμησης του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI)

1) Το σύστημα ταξινόμησης GSI βασίζεται στην παραδοχή ότι η βραχώμαζα περιέχει έναν ικανοποιητικό αριθμό τυχαία προσανατολισμένων ασυνεχειών με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να συμπεριφέρεται ισότροπα (δηλαδή, η συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι ανεξάρτητη από την διεύθυνση των επιβαλλόντων φορτίων). Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα ταξινόμησης GSI δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται σε εκείνες τις βραχώμαζες στις οποίες υπάρχει ένα προσδιορισμένο κυρίαρχο σύστημα ασυνεχειών. Για παράδειγμα, η βραχώμαζα ενός μη διαταραγμένου τεκτονικά σχιστόλιθου, της οποίας η μηχανική της συμπεριφορά χαρακτηρίζεται έντονα ανισοτροπική δεν θα πρέπει να κρίνεται με βάση το GSI. Ωστόσο, θα πρέπει το GSI να εφαρμόζεται με προσοχή εάν η αστοχία μιας τέτοιου τύπου βραχώμαζας δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία της (όπως στην περίπτωση ενός πρανούς, στο οποίο το κυρίαρχο σύστημα δομικής ασυνέχειας κλίνει προς το πρανές και η αστοχία μπορεί να συμβεί μέσα στη βραχώμαζα). Σε τέτοιες περιπτώσεις, δεν είναι πρόβλημα τόσο η ανισοτροπία, όσο ότι η διαφορά στην αντοχή μεταξύ του βράχου και των ασυνεχειών του είναι μικρή (Marinos V. et al., 2005).

2) Σύμφωνα με τον τύπο του γενικευμένου κριτηρίου των Hoek and Brown, ισχύει: $\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} [(m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s]^a$, όπου σ'_1, σ'_3 : η μέγιστη και ελάχιστη ενεργή κύρια τάση κατά τη θραύση, σ_{ci} η αντοχή σε μοναξονική θλίψη του βραχώδους υλικού, m_b, s : σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βραχώδους υλικού και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, a : σταθερά καθώς και $m_b = m_i \cdot e^{[(GSI-100)/(28-14D)]}$.

Η σταθερά m_b (η οποία ένα από τα κύρια ζητούμενα μεγέθη για την επίλυση του ομώνυμου κριτηρίου μέσω του δείκτη GSI) αντιπροσωπεύει την «απομειωμένη»

τιμή της αντίστοιχης σταθεράς m_i , η οποία προσδιορίζεται εργαστηριακά μέσω των τριαξονικών δοκιμών σε κυλινδρικά δοκίμια του βραχώδους υλικού. Οι συγκεκριμένες δοκιμές είναι σχετικά εύκολες για τα εκρηξιγενή, τα μεταμορφωμένα και τα υψηλής αντοχής ιζηματογενή πετρώματα αλλά στην περίπτωση ιζηματογενών πετρωμάτων χαμηλής αντοχής (όπως οι ιλυόλιθοι, μάργες), οι συγκεκριμένες δοκιμές είναι αρκετά δύσκολες λόγω της προβληματικής διαμόρφωσης των δοκιμίων. Για να λυθεί το πρόβλημα, αυτό έχει προταθεί από τους Hoek και Marinos (2000) ένας πίνακας βασισμένος σε αναλύσεις από δημοσιευμένα στοιχεία τριαξονικών δοκιμών. Το πρόβλημα, όμως, είναι ότι φαίνεται να υπάρχει σημαντική διακύμανση των τιμών του m_i για τον ίδιο λιθολογικό τύπο πετρώματος και αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές του m_i εξαρτώνται από τη σύσταση και τη δομή του βραχώδους υλικού και ειδικότερα από τις παραμέτρους που καθορίζουν την τριβή μεταξύ των κόκκων του βραχώδους υλικού (Κούκης και Σαμπτακάκης, 2007).

3) Το GSI είναι ακόμα ακατάλληλο να χρησιμοποιείται σε μέτωπα εκσκαφής πολύ σκληρών πετρωμάτων με λίγες ασυνέχειες που έχουν αποστάσεις μεταξύ τους που ισοδυναμούν με μεγέθη παρόμοια των διαστάσεων ενός πρανούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ευστάθεια ενός πρανούς ελέγχεται από την τρισδιάστατη γεωμετρία των αλληλοτεμνόμενων ασυνεχειών και των μετώπων που προκύπτουν από την εκσκαφή και είναι λογικό ότι το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης (GSI) δεν εφαρμόζεται (Marinos V. et al., 2005).

4) Πρανή εκσκαφών, πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων καθώς και τομές, δίνουν τις περισσότερο σχετικές πληροφορίες για τον υπολογισμό των τιμών GSI μιας βραχόμαζας των παραπάνω εμφανίσεων. Όμως το ερώτημα είναι πως αυτές οι τιμές που προκύπτουν από την εξέταση μιας υπαίθριας επιφάνειας μπορούν να προεκταθούν στο χώρο. Όσον αφορά μια τομή, ναι μεν στα αρχικά στάδια ενός έργου αποτελεί μια πολύτιμη πηγή δεδομένων αλλά υπολείπεται στο ότι η επίδραση των εξωγενών παραγόντων πιθανόν να αλλοιώσει σημαντικά την εμφάνιση των στοιχείων της βραχόμαζας. Πρανή εκσκαφών είναι, πιθανόν, η περισσότερο αξιόπιστη πηγή όσον αφορά την εκτίμηση του GSI με την προϋπόθεση ότι βρίσκονται κοντά στον υπό μελέτη χώρο και η βραχόμαζα είναι ίδια (Marinos V. et al., 2005).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω αποτελεί η περίπτωση των πολύ σκληρών βραχωδών μαζών, στις οποίες είναι εύλογη μια επιτρεπτή παραδοχή αλλοίωσης των εξ' αρχής υψηλών γεωτεχνικών παραμέτρων τους λόγω μηχανικής εκσκαφής ή έκρηξης. Καθώς ο σκοπός του υπολογισμού του GSI είναι να εκτιμηθούν ιδιότητες στην βραχώμαζα, η οποία θα υποστεί εκσκαφή, αποτυχία να υπολογισθούν οι συνέπειες μιας έκρηξης, κατά τον υπολογισμό του GSI, θα οδηγήσει σε εκτίμηση τιμών που θα είναι πολύ συντηρητικές. Κατά συνέπεια, αν απουσιάζουν δεδομένα από μια δειγματοληπτική γεώτρηση, είναι σημαντικό ο γεωλόγος να προσπαθήσει να μελετήσει τρισδιάστατα τον περιβάλλοντα χώρο της επιφάνειας προσβολής και να επιχειρήσει να εκτιμήσει τις τιμές GSI στη βάση των επιτόπου (φυσικών) χαρακτηριστικών της υπό μελέτη βραχώμαζας (πριν δηλαδή τον επηρεασμό της από μια έκρηξη).

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν δεν είναι εφικτή η άμεση εκτίμηση των συνθηκών βάθους, και μάλιστα μπορεί να γίνει εκτίμηση κατά προσέγγιση με βάση το σχετικό διάγραμμα GSI (προς τα άνω και αριστερά για υγιέστερο γεωλογικό υλικό) αλλά το μέγεθος της μετακίνησης στο συγκεκριμένο διάγραμμα εξαρτάται από την κρίση και εμπειρία του παρατηρητή της εκάστοτε υπό μελέτη βραχώμαζας.

Οι τιμές του GSI για ασθενείς βραχώμαζες τείνουν να πάρουν τιμές προς τα δεξιά του διαγράμματος. Επιπλέον, αν η αποσάθρωση έχει διαλύσει τον βράχο σε τέτοιο βαθμό ώστε οι ασυνέχειες και η δομή να έχουν εξαφανισθεί, τότε η βραχώμαζα πρέπει να υπολογισθεί ως έδαφος και συνεπώς τότε το σύστημα GSI δεν θα μπορεί να έχει εφαρμογή.

Τέλος, σε πετρώματα όπως μάρμαρα, ιλυόλιθοι, πηλόλιθοι και ασθενείς ψαμμίτες που σχηματίζουν βραχώμαζες χωρίς ασυνέχειες, η βραχώμαζα μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ακέραη με τις μηχανικές παραμέτρους να δίνονται από εργαστηριακές δοκιμές. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σύστημα GSI δεν έχει εφαρμογή.

Συμπερασματικά, και μάλιστα ο δείκτης GSI έχει γεωλογική λογική και περιορίζει τη «λογιστική» στην συνεκτίμηση των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη στην αριθμητική βαθμονόμηση της βραχώμαζας (Μαρίνος Β. κ.α., 2004), αλλά υπάρχουν περιορισμοί, τέτοιοι που η ταξινόμηση ακόμα και με τη συνδρομή της γεωλογικής κρίσης δεν καλύπτει απόλυτα το μεγάλο εύρος των βραχωμαζών και καταστάσεων.

2.3.4. Επιπλέον κριτική για ελλείψεις ή ασάφειες που παρατηρούνται σε υφιστάμενα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας και σχετίζονται με την ευρύτερη έννοια της ευστάθειας των πρηνών (Hack, 2002).

α) Απόσταση των συστημάτων των ασυνεχειών

Σε πολλά συστήματα ταξινόμησης η απόσταση των ασυνεχειών χρησιμοποιείται ως παράμετρος αλλά δεν εξηγείται τι θα συμβεί αν η μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας ελέγχεται από περισσότερα από ένα συστήματα ασυνεχειών.

β) Εμμόνη των ασυνεχειών

Τα συστήματα των ασυνεχειών που δεν έχουν εμμόνη στο χώρο δεν έχουν την ίδια επίδραση στην ευστάθεια με τα συστήματα που παρουσιάζουν αυτό το χαρακτηριστικό.

γ) Κατάσταση των ασυνεχειών

Η κατάσταση των ασυνεχειών (υλικό και γωνία τριβής υλικού πλήρωσης, τραχύτητα, αντοχή του τοιχώματος των ασυνεχειών) καθορίζει την διατμητική και εφελκυστική αντοχή των ασυνεχειών. Ένα σημαντικό πρόβλημα με πολλά συστήματα ταξινόμησης είναι ότι χρησιμοποιούν για την εκτίμηση της κατάστασης των ασυνεχειών ένα μόνο σύστημα ασυνεχειών. Οπωσδήποτε, δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα αν όλα τα υπάρχοντα συστήματα ασυνεχειών σε μια βραχώμαζα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, ωστόσο σε μια βραχώμαζα που χαρακτηρίζεται από συστήματα ασυνεχειών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, είναι δύσκολο ποιο σύστημα ασυνεχειών θα πρέπει να επιλεγεί για τον προσδιορισμό του δείκτη ποιότητας.

Οι Bieniawski και Barton σημειώνουν ότι: α) θα πρέπει να περιλαμβάνεται η περίπτωση του συστήματος ασυνεχειών με την φτωχότερη συμπεριφορά, β) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση του συστήματος των ασυνεχειών που έχει την περισσότερο σημαντική επίδραση στην ποιότητα της βραχώμαζας.

Ο Romana (1985, 1991, 1995) προτείνει ότι θα πρέπει να υπολογίζεται η βαθμολογία για κάθε ξεχωριστό σύστημα ασυνεχειών και αυτό με τη χαμηλότερη βαθμολογία να καθορίζει – προσδιορίζει τον υπολογισμό της ευστάθειας των πρηνών.

Επιπρόσθετα, ο Bieniawski σημειώνει ότι το σύστημα με την περισσότερο κρίσιμη εκ των προτέρων επίδραση στην ευστάθεια θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και θέτει τον προβληματισμό για το ποια είναι η δυσμενέστερη περίπτωση

συστήματος ασυνεχειών: αυτή στην οποία υπάρχει μεγάλο άνοιγμα ασυνεχειών αλλά είναι σε κακή κατάσταση ή αυτή στην οποία το άνοιγμα ασυνεχειών είναι μικρό αλλά βρίσκεται σε καλή κατάσταση.

δ) Ανισοτροπία της τραχύτητας των ασυνεχειών

Η τραχύτητα μιας ασυνέχειας μπορεί να έχει χαρακτηριστικά ανισοτροπίας και κατ' επέκταση η διατμητική αντοχή που προκύπτει από αυτή (τραχύτητα) θα έχει τα ίδια χαρακτηριστικά. Έτσι, η τραχύτητα θα πρέπει να υπολογισθεί σε σχέση με τον προσανατολισμό της ασυνέχειας και μάλιστα αυτή που θα ληφθεί υπόψη για το σύστημα ταξινόμησης θα πρέπει να είναι αυτή που θα είναι η περισσότερο σημαντική για την ευστάθεια ενός πρανούς. Τα περισσότερα συστήματα ταξινόμησης δεν περιλαμβάνουν την παραπάνω ιδιαιτερότητα.

ε) Επιδεκτικότητα σε αποσάθρωση

Η τάση προς αποσάθρωση είναι μια σημαντική παράμετρος για την ευστάθεια των πρανών και αυτό γιατί στη διάρκεια ύπαρξης ενός τεχνικού έργου, η μελλοντική αποσάθρωση – εξαλλοίωση των ασυνεχειών του ευρύτερου περιβάλλοντος του έργου καθώς του βραχώδους υλικού πιθανόν να οδηγήσει σε συνθήκες αστάθειας. Ο παράγοντας αυτός δεν περιλαμβάνεται στα γνωστά συστήματα ταξινόμησης.

στ) Παραμόρφωση του ακέραίου πετρώματος και της βραχόμαζας, απελευθέρωση τάσεων, εξωτερικές τάσεις

Η παραμόρφωση του άρρηκτου βράχου δεν λαμβάνεται υπόψη σε κανένα από τα προαναφερθέντα συστήματα ταξινόμησης, ωστόσο χρησιμοποιείται έμμεσα (στο σύστημα Q) στον υπολογισμό της αντοχής του ακέραίου πετρώματος σε σχέση με την απελευθέρωση των τάσεων λόγω των ασθενών – διατμημένων ζωνών στη βραχόμαζα. Αυτού του τύπου η παραμόρφωση που σχετίζεται με απελευθέρωση τάσεων ή και εξωτερικές τάσεις (οι οποίες, μάλιστα, δεν προέρχονται από το πρανές), μπορεί να προκαλέσει ανάμεσα σε άλλα κίνηση κατά μήκος των ασυνεχειών, αύξηση της γωνίας κλίσης, τα οποία προφανώς επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς.

ζ) Σχεπικός προσανατολισμός πρανούς - ασυνεχειών

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό του πρανούς έχει αξιοσημείωτο και αποφασιστικό ρόλο στην ευστάθειά του. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιούν όλα τα συστήματα ταξινόμησης για τον υπολογισμό της ευστάθειας πρανούς, κάποια παράμετρο που θα υπολογίζει αυτή την ιδιαιτερότητα

αλλά και αυτά που το κάνουν, όπως του Bieniawski και του Romana, δεν το κάνουν ολοκληρωμένα, επιτρέποντας μια μείωση της τελικής τιμής του RMR κατά 60% (αν το πρανές έχει δυσμενή προσανατολισμό) και 52% αντίστοιχα.

η) Ύψος πρανούς

Το ύψος ενός πρανούς επηρεάζει άμεσα τις τάσεις που λαμβάνουν χώρα στη βραχόμαζα ενός πρανούς. Μάλιστα, ένα υψηλό πρανές μπορεί να παρουσιάσει περισσότερες ευκαιρίες για αστοχία επειδή ο αριθμός των ασυνεχειών που διασχίζουν το πρανές είναι μεγαλύτερος. Επειδή, λοιπόν, αναδεικνύεται η σημασία του συγκεκριμένου παράγοντα για την ευστάθεια ενός πρανούς και επειδή δεν λαμβάνεται υπόψη σε κανένα από τα προαναφερόμενα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας, τονίζεται η κρισιμότητα της απουσίας του συγκεκριμένου παράγοντα για τη μελέτη ευστάθειας ενός πρανούς.

θ) Ο ρόλος του νερού

Η παρουσία ή η πίεση του νερού στις ασυνέχειες είναι μια παράμετρος που εμπεριέχεται σε όλα τα γνωστά συστήματα ταξινόμησης. Η πίεση του νερού και η ροή του ασκούν πιέσεις στις βραχόμαζες. Η διατμητική αντοχή κατά μήκος των ασυνεχειών επηρεάζεται δυσμενώς από την πίεση του νερού των πόρων ενώ η παρουσία του νερού μπορεί με τη σειρά της να μειώσει την διατμητική αντοχή του υλικού πλήρωσης και των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Επίσης, ο ρόλος της αποσάθρωσης είναι σημαντικός στον περιορισμό της διατμητικής αντοχής.

Η συμμετοχή του παράγοντα «νερού» στα συστήματα ταξινόμησης, όσον αφορά τον τυχόν επηρεασμό της πίεσης του νερού των πόρων στην ευστάθεια ενός τεχνικού έργου είναι συζητήσιμη για τους ακόλουθους λόγους:

- Μελετώντας την τιμή επηρεασμού του εν λόγω παράγοντα που καθορίζεται από την ποσότητα του νερού που εξέρχεται από μια βραχόμαζα προκύπτουν μερικά ζητήματα, τα οποία προσδιορίζονται από το γεγονός ότι κάθε φορά σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ορισμένη ποσότητα νερού εξέρχεται από καθορισμένο τμήμα ή επιφάνεια ενός πρανούς. Άλλωστε, στην πραγματικότητα, οι ασυνέχειες σε όλες τις βραχόμαζες αποτελούν τα «κανάλια» εκείνα μέσω των οποίων παροχετεύεται το υδατικό φορτίο. Στα συστήματα ταξινόμησης, το μέγεθος του πρανούς δεν λαμβάνεται υπόψη σε σχέση με την παράμετρο του νερού ενώ εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι ο αριθμός των ασυνεχειών και η ποσότητα του νερού που

εξέρχεται από αυτές εξαρτάται από το μέγεθος του πρανούς. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η ποσότητα του νερού δεν σχετίζεται απαραίτητα με την πίεση του νερού στις ασυνέχειες γιατί μια μικρή ποσότητα νερού που εκφορτίζεται από χαμηλής περατότητας βραχόμαζα μπορεί να συνδέεται με υψηλή πίεση του νερού των πόρων στις ασυνέχειες συγκριτικά με μια μεγάλη ποσότητα νερού που εκφορτίζεται από μια βραχόμαζα με υψηλή περατότητα.

- Η ποσότητα του νερού που εξέρχεται από ένα πρανές συχνά δεν είναι σταθερή ως προς το ύψος του πρανούς. Στο κατώτερο τμήμα του πρανούς μιας βραχόμαζας, η πίεση του νερού των πόρων και κατά συνέπεια το υδραυλικό φορτίο είναι υψηλότερο από ότι στο ανώτερο τμήμα του πρανούς. Συνεπώς, ο προβληματισμός για το εάν θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας μέσος όρος της εκφόρτισης του νερού σε ένα σύστημα ταξινόμησης ή θα πρέπει να οδηγήσει σε δύο ή περισσότερα συστήματα που να εφαρμόζονται σε διαφορετικά επίπεδα του πρανούς δεν περιγράφεται από κανένα υφιστάμενο, έως τώρα, σύστημα ταξινόμησης που να σχετίζεται με την ευστάθεια ενός πρανούς.
- Στις υπόγειες εκσκαφές, η τάση γύρω από το άνοιγμα γενικά συμβάλλει σε υψηλότερες συμπιεστικές τάσεις στις ασυνέχειες που κείτονται κάθετα στα τοιχώματα του ανοίγματος και κοντά σε αυτό από ότι σε αυτές που βρίσκονται πιο μακριά από αυτό το άνοιγμα. Έτσι, υψηλότερες συμπιεστικές τάσεις προκαλούν κλείσιμο των ασυνεχειών στην κατεύθυνση του ανοίγματος και κατά συνέπεια οι πιέσεις του νερού των πόρων είναι παρούσες σε αυτές (που γειτνιάζουν με το άνοιγμα). Αντίθετα, στα πρανή η απελευθέρωση των τάσεων συμβάλλει στο άνοιγμα των ασυνεχειών που βρίσκονται πολύ κοντά στο μέτωπο του πρανούς με συνέπεια να αυξάνεται η αποθηκευτική ικανότητα προς εκείνη την κατεύθυνση (μέτωπο του πρανούς) που συνεπάγεται μείωση της πίεσης του νερού. Μάλιστα, η μείωση της πίεσης στην κατεύθυνση του μετώπου μπορεί να είναι μεγάλη. Αυτή η διαφορά στην πίεση του νερού μεταξύ ενός ανοίγματος σε υπόγεια εκσκαφή και σε μια επιφάνεια πρανούς είναι πιθανόν να προκαλέσει στο νερό να συμπεριφέρεται διαφορετικά σε ένα σύστημα ταξινόμησης προσαρμοσμένο σε ένα πρανές από ότι σε ένα σχετικό με υπόγεια εκσκαφή (π.χ. RMR, Q).

Να σημειωθεί ότι τα προηγούμενα σχόλια αντιστοιχούν για καταστάσεις όπου το νερό παρουσιάζει δυναμικά χαρακτηριστικά (δηλαδή ροή και όχι στασιμότητα) και ότι οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στα υφιστάμενα συστήματα ταξινόμησης που περιλαμβάνουν τον επηρεασμό της παραμέτρου «πίεση νερού» στη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας θα πρέπει να επανεξεταστεί.

ι) Η επίδραση του πάγου και του χιονιού

Ο πάγος και το χιόνι έχουν σημαντική επίδραση στην ευστάθεια ενός πρανούς. Το πάγωμα του νερού σε μια ασυνέχεια θα προκαλέσει πολύ υψηλή πίεση στα τοιχώματα των ασυνεχειών. Στις υπόγειες κατασκευές αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα γιατί οι θερμοκρασίες υπογείως δεν είναι, συνήθως, κάτω από το μηδέν. Αντίθετα, όσον αφορά τα πρανά, το συγκεκριμένο θέμα μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα σχετικά με τα ζητήματα ευστάθειά τους. Έτσι, το πάγωμα του νερού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο άνοιγμα των ασυνεχειών, μετακίνηση – απόσπαση επιμέρους τεμαχών βραχώμαζας από το μέτωπο του πρανούς αλλά ακόμα και σε κλείσιμο του ανοίγματος των ασυνεχειών, απόφραξη της εκφόρτισης του κατεισδύοντος νερού που μπορεί με τη σειρά του να οδηγήσει σε μεγαλύτερο υδραυλικό φορτίο στο πρανά.

Το χιόνι, επίσης, μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για την ευστάθεια ενός πρανούς εξ' αιτίας του επιπρόσθετου βάρους του στο μέτωπό του. Να σημειωθεί ότι ο επηρεασμός του πάγου και του χιονιού για την ευστάθεια εξαρτάται και από τον προσανατολισμό του πρανούς σε σχέση με την κατεύθυνση του ήλιου και μάλιστα μια εναλλαγή μεταξύ παγετού και ζέστης επιδρά αρνητικά στην ποιότητα της βραχώμαζας. Οι δύο αυτοί παράγοντες (πάγος και χιόνι) είναι σημαντικοί για την ευστάθεια των πρανών και δεν φαίνεται να λαμβάνονται υπόψη, τουλάχιστον άμεσα από τα γνωστά συστήματα ταξινόμησης.

κ) Δυναμική φόρτιση - Σεισμοί

Η δυναμική φόρτιση σε ένα πρανά (π.χ. από ένα σεισμό) μπορεί να προκαλέσει την αστοχία ενός πρανούς. Σύμφωνα με τον Hack et al (2002), υπάρχουν διάφορα συστήματα ταξινόμησης που συσχετίζουν την γεωμετρία του πρανούς και των ιδιοτήτων της βραχώμαζας με την ευστάθεια και τον τύπο του σεισμού, βασιζόμενα σε περιορισμένο αριθμό στοιχείων και αντλούμενα από τοπικές μελέτες, όπου η ικανότητά τους για πρόβλεψη είναι μάλλον περιορισμένη. Θα πρέπει, πάντως, σε

ένα σύστημα ταξινόμησης να περιλαμβάνεται και η παράμετρος της δυναμικής φόρπισης και αυτό είναι ιδιαίτερα επιτακτικό σε μια περιοχή επιδεκτική σε σεισμούς.

κα) Μέθοδος εκσκαφής

Ο τρόπος με τον οποίο έχει καθορισθεί η έκθεση ενός πρανούς στο περιβάλλον, προσδιορίζει και τον επηρεασμό εκείνων των παραμέτρων που παρατηρούνται ή υπολογίζονται στις συγκεκριμένες συνθήκες. Για παράδειγμα, η μακροχρόνια (εκατοντάδων ή και χιλιάδων ετών) έκθεση ενός πρανούς στην όχθη ενός ποταμού, σχηματίζει μια τέτοιου τύπου έκθεση με σχετικά περιορισμένο αριθμό ορατών ασυνεχειών ενώ οι υπάρχουσες τάσεις είτε δεν υπάρχουν είτε είναι πολύ μικρές λόγω της αργής διαδικασίας της αποσάθρωσης. Η τάση για άνοιγμα των ασυνεχειών είναι μικρή και για αυτό τον λόγο ένας μεγάλος αριθμός των εν δυνάμει ασυνεχειών δεν είναι ορατός. Από την άλλη πλευρά, σε μια έκθεση πρανούς που έχει προκύψει από χρήση εκρηκτικών εμφανίζεται αισθητά πολύ μεγαλύτερος αριθμός ασυνεχειών γιατί αφ' ενός μεν, μερικώς, το ανέπαφο πέτρωμα έχει κερματισθεί λόγω της έκρηξης και αφ' ετέρου και πιο καίρια, τα υπάρχοντα επίπεδα με εγγενείς αδυναμίες που πριν την έκρηξη δεν ήταν ορατά, ύστερα από αυτή έχουν ανοίξει λόγω της πίεσης των αερίων και του ωστικού κύματος, έχουν γίνει πλέον ορατά και συνεπώς μπορούν να μετρηθούν ως ασυνέχειες. Κάποια από τα υπάρχοντα συστήματα λαμβάνουν υπόψη το παραπάνω γεγονός (π.χ. Romana), τα οποία μειώνουν τη συνολική βαθμονόμηση της βραχόμαζας με μια παράμετρο που λαμβάνει υπόψη τα προαναφερθέντα.

2.4. Συμπεράσματα για τα συστήματα ταξινόμησης

Μετά από όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, σκόπιμο είναι να σχολιασθούν σχετικά με τη χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχόμαζας και τα παρακάτω:

- Οι μέθοδοι ταξινόμησης συντάσσονται έχοντας υπόψη ότι θα πρέπει να ικανοποιούν αντικρουόμενες απαιτήσεις, όπως να είναι πολλαπλής χρήσης ώστε να ανταποκρίνονται σε όσο το δυνατόν περισσότερα έργα στον διεθνή χώρο, να είναι συνοπτικές, απλές, να απαιτούν περιορισμένο αριθμό στοιχείων για να είναι εύχρηστες κατά τα πρώτα στάδια του έργου (επιτόπου έρευνα, προμελέτη) και η επιλογή μιας εμπειρικής μεθόδου να βασίζεται στην

δυνατότητα απόκτησης των παραμέτρων μέσα στον διαθέσιμο χρόνο. Πριν από τη χρήση οποιουδήποτε συστήματος ταξινόμησης της μάζας του πετρώματος, ο χρήστης θα πρέπει να μελετήσει τις περιπτώσεις πάνω στις οποίες έχει βασισθεί το σύστημα ή τουλάχιστον να μελετήσει τις προϋποθέσεις ισχύος του συστήματος γιατί ιδιαίτερα τα συστήματα Bieniawski και Barton έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικά μέρη, σε διαφορετικού τύπου ορυχεία και πετρώματα και πάνω από όλα χρησιμοποιούν, μερικώς, διαφορετικές παραμέτρους, οι οποίες έχουν προσδιορισθεί με διαφορετικά κριτήρια.

- Ο χαρακτηρισμός του πετρώματος με ένα μόνο αριθμό αποτελεί υπεραπλούστευση της βραχόμαζας που χαρακτηρίζεται από ποικίλα τεχνικογεωλογικά γνωρίσματα και αυτό συνεπάγεται ότι δεν εξετάζονται οι μηχανισμοί της αστοχίας και των παραμορφώσεων (Μαρίνος Β., 2007). Μάλιστα, εκφράζεται η άποψη έναντι των δύο μεθόδων ταξινόμησης (RMR, Q), ότι οι μηχανισμοί της βραχομηχανικής δεν είναι δυνατό να αντιπροσωπευθούν από έναν απλό αριθμό.
- Ο ίδιος ο Bieniawski τονίζει ότι ο εμπειρικός σχεδιασμός με βάση τις διεθνείς γενικές βαθμονομήσεις θα πρέπει να εφαρμόζεται κριτικά σαν μια βοήθεια στη μελέτη και ποτέ σε αντικατάσταση της μελέτης. Η, δε, αξία τους έγκειται στην ποσοτικοποίηση των τεχνικών γεωλογικών περιγραφών και στην μεταφορά της εμπειρίας. Για αυτό, θα πρέπει να αποτελούν μέρος της καταγραφής του έργου και υπογραμμίζει τις παγίδες που υπάρχουν αν οι ταξινομήσεις, γενικά, θεωρηθούν ως πλήρες υποκατάστατο του τεχνικού σχεδιασμού. Πρέπει να συνδυάζονται με τις μεθόδους παρατήρησης και τις αναλυτικές μεθόδους, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι συμβατό με τη γεωλογία της εκάστοτε περιοχής. Συνιστά, επίσης, όπως και πολλοί άλλοι ερευνητές, τη χρησιμοποίηση περισσότερων της μιας μεθόδου ταξινόμησης στον χαρακτηρισμό μιας βραχόμαζας (Bieniawski, 1989).
- Η ευρεία χρήση των ταξινομήσεων, πέρα από τη μεγάλη αξία της κοινής γλώσσας που προσφέρει μεταξύ γεωλόγων και μηχανικών, έχει αντικαταστήσει την κρίση που τόσο μεγάλη αξία έχει για τον γεωλόγο και μάλιστα για τον γεωλόγο της υπαίθρου. Οι γνωστές ταξινομήσεις καλούνται πολλές φορές να περιγράψουν όλες τις γεωλογικές συνθήκες για διάφορες συνθήκες τάσεων, υπόγειων νερών και κατασκευαστικών θεμάτων και όταν δεν τα καταφέρνουν,

κατηγορούνται. Επίσης, ενώ δημιουργήθηκαν αρχικά για την κερματισμένη βραχώμαζα, χρησιμοποιούνται και εκτός των ορίων εφαρμοσιμότητάς τους σε γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους κυριαρχούν πολύ πτωχές βραχώμαζες. Όμως, τα συστήματα ταξινόμησης μπορούν να εφαρμόζονται με επιτυχία σε βραχώμαζες ανάλογα με αυτές της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξή τους (Μαρίνος Β., 2007).

- Η δυνατότητα ο ίδιος βαθμός χαρακτηρισμού να μπορεί να προκύψει με διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων ταξινόμησης για διαφορετικές βραχώμαζες, αποτελεί βασικό αρνητικό στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι ίδιες πιές μπορεί να έχουν διαφορετικές συμπεριφορές άρα και διαφορετικά απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης (Μαρίνος Β., 2007).
- Τέλος, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που ακολουθείται, επαναλαμβάνεται η ανάγκη της αντιπροσωπευτικής συλλογής των χαρακτήρων που βαθμονομούν τη βραχώμαζα. Ειδικότερα, προσοχή χρειάζεται στο δείκτη RQD. Ο κίνδυνος που ελλοχεύει για την τιμή που χρησιμοποιείται να μην είναι αντιπροσωπευτική δεν προέρχεται μόνο από την ικανότητα ή όχι του χειριστή του γεωτρυπάνου αλλά και από το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις δεν είναι δυνατό ή απαραίτητο να είναι πάντα αρκετές σε αριθμό ή οι ανάγκες να τις έχουν τοποθετημένες σε θέσεις που δεν είναι αντιπροσωπευτικές της ρωγματώσεως της βραχώμαζας.
- Οι μέθοδοι υπολογισμού που χρησιμοποιούνται στα επιμέρους συστήματα ταξινόμησης διαφέρουν σε ευρεία κλίμακα γιατί χρησιμοποιούν την πρόσθεση, την αφαίρεση, τον πολλαπλασιασμό και παραμέτρους που συνδέονται με λογαριθμικές, γραμμικές και μη γραμμικές σχέσεις. Τα παραπάνω χρησιμοποιούνται είτε ανεξάρτητα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους (Hack, 2002).
- Τέλος, τα συστήματα RMR, SMR και GSI είναι μόνο για βραχώδη πρανή ενώ το Q δεν είναι καν για πρανή.

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα, αξίζει να καταγραφεί ένα σχόλιο σχετικό με τα προαναφερθέντα από έναν σημαντικό οργανισμό των Η.Π.Α. (American Society for Testing and Materials):

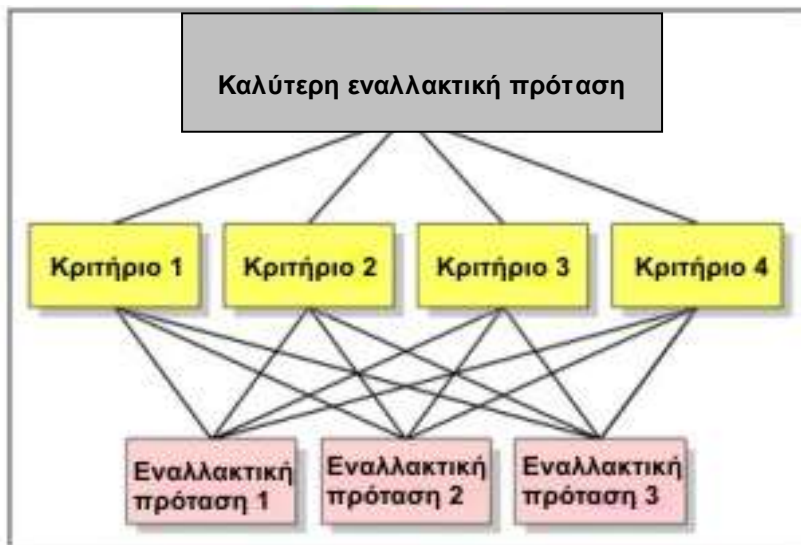
“Rock mass classifications are not to be taken as a substitute for engineering design. They should be applied intelligently and used in conjunction with observational methods and analytical studies to formulate an overall rationale for design and construction compatible with the project objectives

and the site geology. They should not be used as a “cook book”. (Rock Mass Classification Systems for Engineering Purposes, STP 984, p. 26, ASTM 1988)”.

Στην επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου γίνεται συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογιών που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές για ποικίλες ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν και για τις ανάγκες πρόγνωσης των αστοχιών πρανών, όπως είναι κατά σειρά παρουσίασης: α) η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία, β) η έννοια της ασαφούς λογικής και γ) τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

2.5. Περιγραφή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία [**A**nalytical **H**ierarchy **P**rocess (AHP)], είναι μια δομημένη τεχνική που βελτώνει την κατανόηση πολύπλοκων δράσεων. Περισσότερο από το να προτείνει μια «σωστή» απόφαση, η συγκεκριμένη διαδικασία βοηθά να οργανωθεί η ποσοτική και ποιοτική πληροφορία, βασιζόμενη σε τρεις αρχές (Saaty, 1980): α) την ανάλυση του προβλήματος (καθορισμός και αποδόμηση της πολυπλοκότητας), β) την σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος βασισμένων σε κριτήρια και γ) την σύνθεση των συγκρινόμενων προτάσεων για τον υπολογισμό της προτεραιότητας των εναλλακτικών λύσεων με σεβασμό στο κάθε κριτήριο και στη βαρύτητά του με στόχο τον επιδιωκόμενο σκοπό. Βασισμένη στα μαθηματικά και στη ψυχολογία, η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία αναπτύχθηκε από τον Thomas L. Saaty στη δεκαετία του 1970 και από τότε μελετάται και ερευνάται έως και σήμερα. Παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την κατασκευή της δομής ενός προβλήματος απόφασης, για την παρουσίαση, ποσοτικοποίηση και συσχέτιση των επιμέρους στοιχείων του προβλήματος με τον επιδιωκόμενο στόχο και κατ' επέκταση για την εκτίμηση των εναλλακτικών επιλογών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σαν τεχνική επίλυσης προβλημάτων, χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ πεδίο αντικειμένων για λήψη απόφασης, όπως σε κυβερνητικές, επιχειρηματικές αποφάσεις καθώς και σε τομείς όπως της υγείας, της εκπαίδευσης αλλά και στις γεωεπιστήμες. Για την λύση ενός προβλήματος προτείνονται ορισμένες εναλλακτικές προτάσεις (alternatives), οι οποίες συνοδεύονται από κάποια κριτήρια (criteria), τα οποία βοηθούν στην επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής πρότασης (goal). Τα κριτήρια είναι δείκτες της αποτελεσματικότητας ή της δυνατότητας – ικανότητας πιθανών ενεργειών και θα πρέπει να είναι μετρήσιμα σύμφωνα με αμοιβαία συμφωνημένες πρακτικές και να διαφοροποιούνται μεταξύ τους, έτσι ώστε να διαφοροποιούν και τις εναλλακτικές προτάσεις. Έτσι, για να επιλεγεί το καλύτερο σχέδιο επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, θα πρέπει κάθε εναλλακτική πρόταση να υπολογίζεται σύμφωνα με τα δεδομένα, κάθε φορά, κριτήρια και εκείνη η πρόταση που θα προκύπτει με τη μεγαλύτερη επιμέρους βαθμολογία να επιλέγεται και να εφαρμόζεται (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3. Απεικόνιση της μεθοδολογίας για την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Από Wikipedia).

Τα βήματα στην συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι (Steiguer et al., 2003):

Βήμα 1ο: Έναρξη με την ανάπτυξη μιας ιεραρχικής απόφασης, που αποτελείται από τον αντικειμενικό σκοπό, τις εναλλακτικές λύσεις (π.χ. 1, 2, 3) και τα κριτήρια (π.χ. 1, 2, 3, 4). Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να έχει τόσα στάδια όσα κρίνεται σκόπιμο ότι μπορούν να την χαρακτηρίσουν πλήρως.

Βήμα 2ο: Στη συνέχεια, αυτοί που θα λάβουν την τελική απόφαση μελετούν τη σχετική σημασία των κριτηρίων και των επιμέρους εναλλακτικών, κάνοντας συγκρίσεις ανά δύο και βαθμολογώντας (σύμφωνα με την κλίμακα Saaty) από το 1 (που ισοδυναμεί με εξίσου ισοδύναμη προτίμηση των δύο συγκρινόντων στοιχείων) έως και το 9 (που ισοδυναμεί με την χωρίς αμφισβήτηση επιλογή του ενός ή του άλλου στοιχείου).

Βήμα 3ο: Αφού ολοκληρωθούν οι επιμέρους βαθμονομήσεις, ακολουθεί η διαδικασία της σύνθεσης στην οποία υπολογίζεται ο δείκτης μέτρησης της προτεραιότητας των κριτηρίων και ακολούθως ο αντίστοιχος για τις εναλλακτικές προτάσεις.

Βήμα 4ο: Οι δύο δείκτες πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους για να δώσουν τελικά την τιμή εκείνη η οποία θα επιλεγεί σαν η επικρατέστερη λύση του προβλήματος.

Ωστόσο, η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία παρουσιάζει μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα (Steiguer et al., 2003):

- Δεν υπάρχει θεωρητική βάση πάνω στην οποία να στηρίζεται η συγκεκριμένη θεωρία κάτι που σημαίνει ότι σε παρόμοια (ή ακόμα και ίδια φαινομενικά)

προβλήματα προς επίλυση, μπορεί να δοθούν διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με την ιεράρχηση των επιλεγέντων κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων και συνεπώς διαφορετική τελική λύση.

- Η βαθμονόμηση που προκύπτει από την μέθοδο αυτή είναι ασαφής, γιατί στηρίζεται σε υποκειμενική κρίση.
- Υπάρχουν ατέλειες στην μεθοδολογία υπολογισμού των επιμέρους δεικτών για την σύνθεση των τελικών δεικτών.
- Το AHP μπορεί να είναι χρονοβόρο και κουραστικό αν υπάρχουν πολλά επίπεδα στην ιεραρχική διαδικασία.
- Υπάρχει ένα αξίωμα, το οποίο αναφέρει ότι όταν προστίθενται νέες επιλογές στο προς απόφαση πρόβλημα, η διαβάθμιση – ιεραρχία των παλαιών εναλλακτικών δεν πρέπει να αλλάξει. Η αξιοπιστία αυτής της πρότασης, όμως, ελέγχεται γιατί από επικριτές υποστηρίζεται ότι αν αλλαχθεί η κλίμακα π.χ. από το 1 έως το 9 με μια άλλη, π.χ. από το 1 έως το 29, τα τελικά νούμερα θα επηρεασθούν (Forman και Gass, 2001).
- Είναι αντιφατική λόγω της ασαφούς βαθμονόμησης (μη αριθμητικά σταθερή, γιατί η βαθμονόμηση δεν στηρίζεται στην έννοια της μαθηματικής μεταβατικότητας: «αν το A είναι καλύτερο από το B και το B καλύτερο από το Γ, τότε το A θα πρέπει να είναι καλύτερο από το Γ») και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αδιακρίτως (Coyle, 2004).
- Ένα πρόσθετο αρνητικό στοιχείο για την υπό συζήτηση μεθοδολογία είναι ότι λειτουργεί γιατί ακριβώς τα μητρώα που την αποτελούν είναι όλα της ίδιας μαθηματικής φόρμας, δηλαδή αν «το A είναι περισσότερο σημαντικό από το B και μάλιστα κατά εννιά φορές, τότε το B πρέπει να είναι λιγότερο σημαντικό από το A κατά το 1/9». Η προηγούμενη διατύπωση άλλους τους βρίσκει σύμφωνους και άλλους όχι (Coyle, 2004).

Στις γεωεπιστήμες και ειδικότερα στο πεδίο της τεχνικής γεωλογίας / γεωτεχνικής μηχανικής, η παραπάνω μεθοδολογία έχει επιχειρηθεί από πολλούς ερευνητές να εφαρμοσθεί στην εκτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας (ανάμεσα σε άλλους: Demir et al. 2013, Pourghasemi et al. 2013, Rozos et al. 2011). Όμως, οι περισσότεροι καταλήγουν στη σημασία που έχει για την συγκεκριμένη μεθοδολογία, η υποκειμενική κρίση του εκάστοτε μελετητή που επιχειρεί να

κατασκευάσει χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας και στην ικανότητά του να εκτιμά τις απαραίτητες, κάθε φορά, κατολισθητικές παραμέτρους της υπό εξέταση περιοχής. Συνεπώς, καταλήγει κάποιος στο συμπέρασμα ότι για την πρόγνωση των αστοχιών πρηνών η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει ασάφειες και χρειάζονται περισσότερες διευκρινίσεις και έρευνα ως προς την διαδικασία πρόγνωσης των κατολισθήσεων.

2.6. Περιγραφή της έννοιας της ασαφούς λογικής

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία ενός μοντέλου πρόβλεψης εξαρτάται από τον αριθμό και την ποιότητα των εισαγόμενων δεδομένων. Ο πολυπαραμετρικός χαρακτήρας των φυσικών φαινομένων και η διακύμανση των επιμέρους παραμέτρων, θέτουν πάντοτε το ερώτημα της επάρκειας διαθέσιμων στοιχείων και εισάγουν την ανάλογη αβεβαιότητα πρόβλεψης. Με στόχο τη διαχείριση της αβεβαιότητας σε δεδομένα, έχει αναπτυχθεί η λεγόμενη «ήπια υπολογιστική μεθοδολογία» της «θολής λογικής». Η αξία της έγκειται στο ότι επιτρέπει να εκφράζεται μια αξιολόγηση για παράδειγμα ως «ναι» με βαρύτητα 65% και ως «όχι» με 35%, ανάλογα με την αβεβαιότητα των δεδομένων που καθορίζουν την αξιολόγηση αυτή (Μπαντής, 2007).

Η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic) παρουσιάσθηκε, αρχικά, από τον Lofti A. Zadeh το 1965 και αποτελεί μια ευφυή τεχνική ελέγχου, η οποία δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων που ενσωματώνουν την εμπειρία των ειδικών και τις διαθέσιμες μετρήσεις σε ένα σύνολο εύκολα κατανοητών κανόνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ασχολείται με την ασάφεια της γνώσης (fuzziness, θεωρία δυνατοτήτων) και όχι με την τυχαιότητά της (randomness, θεωρία πιθανοτήτων). Σύμφωνα λοιπόν με τον Zadeh, είναι πιθανό να κατανοήσουμε μια πραγματική κατάσταση σαν αληθή (αντίστοιχα ψευδή) με βαθμό βεβαιότητας 0,70.

Η ασαφής λογική είναι μια επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής. Μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής με κάποιο βαθμό αλήθειας και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με απλά λόγια, η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι άσπρο-μαύρο αλλά αποχρώσεις του γκρι. Η ιδέα αυτή αποτέλεσε επανάσταση στη θεωρία της λογικής, γιατί ξέφυγε από το μοντέλο που κυριαρχούσε εδώ και δύομισι χιλιάδες χρόνια, δηλαδή το μοντέλο του «0-1» ή «αληθές-ψευδές». Για παράδειγμα, ένα προϊόν Α έχει μια τιμή $X \in$. Το αντίστοιχο προϊόν Β από μια ανταγωνιστική εταιρία κοστίζει $\Psi \in$ ($\Psi > X$). Η κλασσική λογική καθορίζει ότι η

πρόταση «Το Β είναι ακριβότερο από το Α» είναι αληθής. Η ασαφής λογική, όμως, ορίζει ότι η παραπάνω πρόταση είναι αληθής μεν, αλλά με κάποιο βαθμό αληθείας, π.χ. αληθής κατά 20%. Ας θεωρηθεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη μόνο η τιμή του προϊόντος αλλά και άλλα χαρακτηριστικά τα οποία είναι υποκειμενικά όπως: α) η ποιότητα, β) η καλαισθησία και γ) η χρηστικότητα. Η κλασική λογική δεν μπορεί να κωδικοποιήσει τα παραπάνω χαρακτηριστικά γιατί δεν υπάρχει σαφής ποσοτικοποίησή τους. Δηλαδή δεν μπορεί να πει ότι η ποιότητά του είναι πέντε (5). Η ασαφής όμως λογική μπορεί να κάνει κάτι τέτοιο γιατί χρησιμοποιεί λεκτικές μεταβλητές, οι οποίες διαχωρίζονται στο χώρο ορισμού τους. Κάποιες φορές δεν έχει σημασία λοιπόν η ακριβής τιμή, αλλά ένας ποιοτικός της χαρακτηρισμός.

Όσον αφορά τις γεωεπιστήμες, εφαρμογή των προαναφερθέντων γίνεται όταν οι γεωλόγοι και μηχανικοί χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα γνωστά συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας και πιθανόν να αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν, για παράδειγμα, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η εγγενής διαφορετικότητα των βραχωδών μαζών. Για παράδειγμα, αν η μέση τιμή του ανοίγματος ενός συστήματος ασυνεχειών ποικίλει από 0,3 έως 2m, προκύπτει το ερώτημα τι τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για το σύστημα. Με το να συσχετίζεται ένα ασαφές νούμερο σε τέτοιες παραμέτρους και μετά να χρησιμοποιούνται οι τεχνικές της ασαφούς αριθμητικής, είναι πιθανό να παράγεται ένας ασαφής αριθμός που θα αντιπροσωπεύει μια τιμή ταξινόμησης, η οποία θα κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής και θα προσδιορίζει και τον τρόπο της μεταβολής μεταξύ αυτών των δύο χαρακτηριστικών τιμών (Hudson and Harrison, 1997).

Συχνά, ο βαθμός αληθείας, συγχέεται με την έννοια της πιθανότητας καθώς και οι δύο έννοιες χρησιμοποιούνται για να εκφραστεί η αβεβαιότητα (Ζαχαριάς, 2008). Ενώ χρησιμοποιούνται (και οι δύο έννοιες) για να υποδηλώσουν υποκειμενική εκτίμηση, η ασαφής λογική χρησιμοποιεί το μέγεθος του βαθμού αληθείας (σε ποιο βαθμό μια μεταβλητή ανήκει σε ένα σύνολο) ενώ η θεωρία πιθανοτήτων χρησιμοποιεί το μέγεθος της πιθανότητας (πόσο πιθανό είναι μια μεταβλητή να ανήκει σε ένα σύνολο). Αν και η διαφορά είναι λεπτή, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει αντιστοιχία μεταξύ των δύο μεγεθών. Παρ' όλα αυτά, το συγκεκριμένο θέμα αποτελεί για χρόνια σημείο τριβής μεταξύ των ερευνητών με άλλους να υποστηρίζουν ότι μόνο μια έκφραση της αβεβαιότητας θα πρέπει να

υπάρχει, αυτή των πιθανοτήτων και άρα τα συστήματα ασαφούς λογικής στερούνται νοήματος και με άλλους να υποστηρίζουν ότι η ασαφής λογική παρέχει μια ευρύτερη προσέγγιση της αβεβαιότητας, η οποία και ενσωματώνει την θεωρία των πιθανοτήτων.

Στο χώρο των γεωεπιστημών και ειδικότερα στο πεδίο της κατολισθητικής επικινδυνότητας, πολλοί ερευνητές αναφέρουν ότι η μεθοδολογία της ασαφούς λογικής είναι υποκειμενική, εξαρτάται από τις γνώσεις του ερευνητή – μελετητή που εκτιμά, κάθε φορά, την σημασία των επιμέρους παραμέτρων κατολισθητικότητας (Bonham – Carter, 1994, Schernthanner 2005) και επιπλέον δεν μειώνει την αβεβαιότητα (Sdao et al., 2013).

Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση της ασαφούς λογικής για την πρόγνωση της αστοχίας κλιτύων κρίνεται, μέχρι σήμερα, ως μη ικανοποιητική μεθοδολογία για την αντιμετώπιση της κατολισθητικής επικινδυνότητας.

2.7. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

2.7.1 Γενικά

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) – Artificial Intelligence (AI) ορίστηκε, αρχικά, σαν η τέχνη και επιστήμη κατασκευής «ευφυών» μηχανών και υπολογιστών (Ζαχαριάς, 2008). Από τότε, ο όρος χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα για να περιγράψει τη νοημοσύνη όπως παρατηρείται σε τεχνητές οντότητες, κατασκευασμένες από ανθρώπους. Η Τεχνητή Νοημοσύνη χωρίζεται σε δύο μεγάλες σχολές σκέψης: α) τη Συμβατική Τεχνητή Νοημοσύνη και β) την Υπολογιστική Τεχνητή Νοημοσύνη. Η Συμβατική Τεχνητή Νοημοσύνη χρησιμοποιεί μεθόδους μηχανικής μάθησης που χαρακτηρίζονται από αυστηρούς μαθηματικούς αλγόριθμους και στατιστικές μεθόδους ανάλυσης ενώ η Υπολογιστική Τεχνητή Νοημοσύνη βασίζεται στη μάθηση μέσω επαναληπτικών διαδικασιών - εμπειρικών δεδομένων και διακρίνεται ανάμεσα σε άλλα σε Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) και Συστήματα Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Systems).

2.7.2. Εισαγωγικά στοιχεία

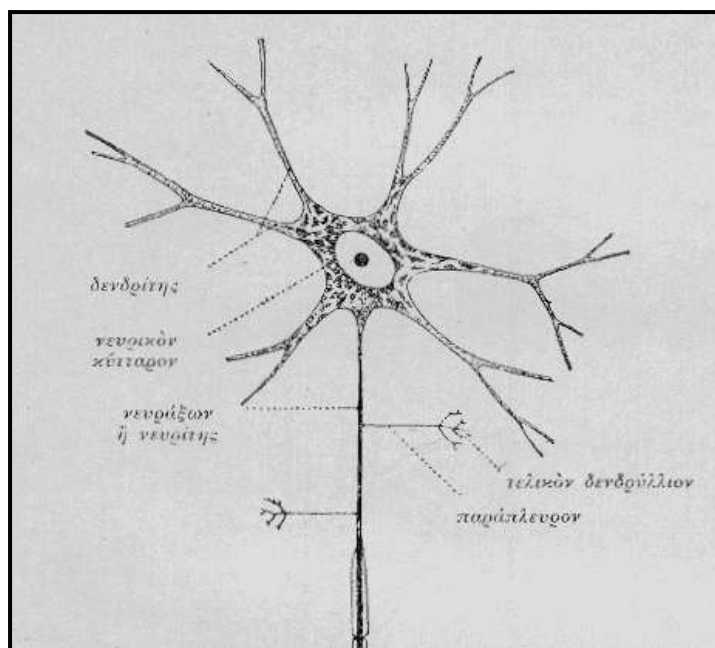
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) είναι μια σχετικά νέα ιδέα στο χώρο των υπολογιστών, η οποία βασίστηκε σε έρευνες μοντελοποίησης της δομής και της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου (Ζαχαριάς, 2008). Η ιδέα, βέβαια, προϋπήρχε από την δεκαετία του 1940 αλλά στη δεκαετία του 1980 οι εξελίξεις

στο λογισμικό και στο υλικό των ηλεκτρονικών υπολογιστών, επέτρεψαν την επιτυχή ανάπτυξη των ΤΝΔ. Ως Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο ορίζεται ένα μοντέλο επεξεργασίας πληροφοριών, εμπνευσμένο από τον τρόπο με τον οποίο βιολογικά νευρικά συστήματα, όπως ο εγκέφαλος, επεξεργάζονται πληροφορίες. Το βασικό στοιχείο αυτού του μοντέλου είναι η πρωτότυπη δομή του συστήματος επεξεργασίας πληροφοριών, η οποία και αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό πυκνά διασυνδεδεμένων στοιχείων επεξεργασίας, τους νευρώνες.

Τα μοντέλα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων βασίζονται σε έννοιες, οι οποίες προέρχονται από την έρευνα της φύσης του ανθρώπινου εγκεφάλου, μαθαίνουν μέσω παραδειγμάτων ακριβώς όπως και ο ανθρώπινος εγκέφαλος και έχουν σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων, τα οποία δεν είναι, όμως, ακριβή και πλήρη. Και αυτό συμβαίνει, γιατί δεν χρειάζονται μια συγκεκριμένη περιγραφή της λύσης του προβλήματος αλλά ο χρήστης επιτρέπει στο ΤΝΔ να εκπαιδευτεί και να προσαρμοστεί κατά την διάρκεια της περιόδου «εκπαίδευσης». Η εκπαίδευση, συνήθως, περιλαμβάνει ένα σύνολο ικανοποιητικού πλήθους δεδομένων με καθορισμένη δομή, το οποίο αποτελεί το υλικό του ΤΝΔ, το οποίο στη συνέχεια είναι σε θέση να μάθει τις βασικές αρχές της λύσης και να χρησιμοποιηθεί στην λύση παρόμοιων αλλά και νέων προβλημάτων.

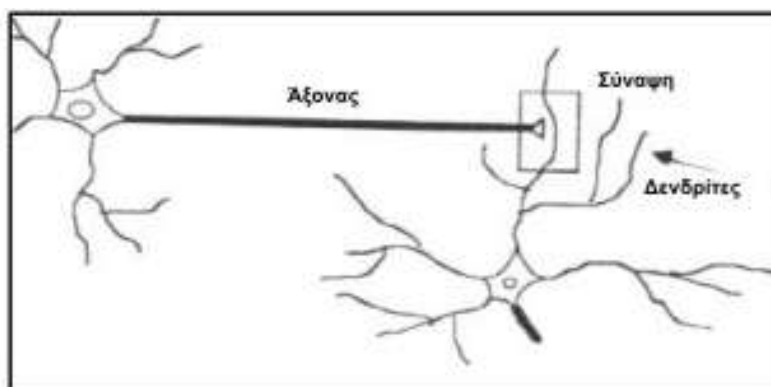
2.7.3. Φυσικός και Τεχνητός Νευρώνας

Η λεπτομερής διερεύνηση της εσωτερικής δομής των βιολογικών νευρικών κυττάρων, απεκάλυψε ότι όλοι οι νευρώνες του εγκεφάλου αποτελούνται από τα ίδια βασικά μέρη, ανεξάρτητα από το μέγεθος και από το σχήμα τους, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.4. Το κεντρικό μέρος ονομάζεται σώμα του κυττάρου (cell body). Από το σώμα εξέρχονται κάποιες επεκτάσεις σαν ρίζες, οι δενδρίτες (dendrites), όπως επίσης και ένα επίμηκες σωληνοειδές και λεπτό νεύρο, ο άξονας (axon), ο οποίος διαχωρίζεται στο τέλος σε έναν αριθμό μικρών κλάδων. Ενώ οι δενδρίτες λειτουργούν ως λήπτες σημάτων από τους διπλανούς νευρώνες, ο σκοπός του άξονα είναι η μετάδοση της δραστηριότητας του νευρώνα σε άλλα κύτταρα ή μυϊκές ίνες. Η ένωση μεταξύ του τέλους ενός αξονικού κλάδου και ενός άλλου νευρώνα ονομάζεται σύναψη (Ζαχαριάς, 2008).



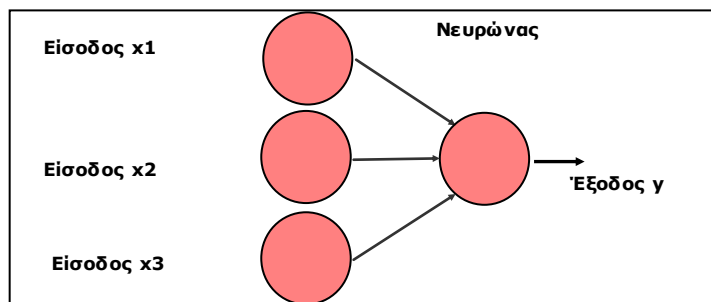
Σχήμα 2.4. Αποτύπωση βιολογικού νευρώνα (Wikipedia).

Ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο δημιουργείται με την ίδια ακριβώς προσέγγιση, σε μια προσπάθεια απομίμησης των εγκεφαλικών νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, όπως αποτυπώνεται και στο ακόλουθο σχήμα, στην περίπτωση των τεχνητών νευρώνων, οι κόμβοι (nodes) αντιστοιχούν στο σώμα του κυττάρου, οι συνδέσεις (links) μεταξύ των κόμβων στους δένδριτες και τον άξονα και τα βάρη στις συνάψεις (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5. Σύναψη μεταξύ νευρώνων (Wikipedia).

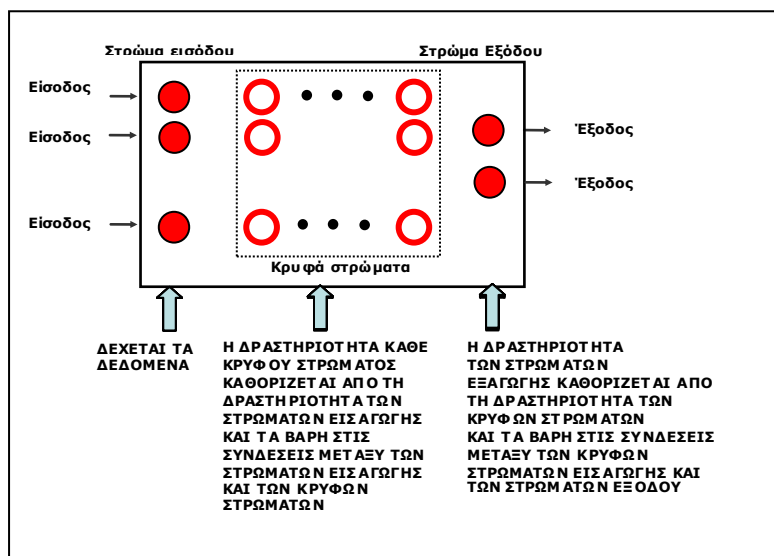
Η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων είναι να εκτιμούν συναρτήσεις τύπου $f: x \rightarrow y$ από δείγμα δεδομένων (Μπαντής, 2007). Κάθε νευρώνας, λοιπόν, είναι μια μονάδα επεξεργασίας πληροφοριών, δέχεται πληροφορίες (είσοδοι), τις επεξεργάζεται και δίνει μια έξοδο (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. Δομή νευρωνικού δικτύου (Μπαντής, 2011).

2.7.4. Οργάνωση νευρώνων σε στρώματα

Οι νευρώνες οργανώνονται σε στρώματα. Οι νευρώνες κάθε στρώματος εκτελούν την ίδια εργασία ταυτόχρονα. Το πρώτο στρώμα ονομάζεται στρώμα εισόδου, γιατί είναι εκείνο που δέχεται τα ερεθίσματα από το εξωτερικό περιβάλλον. Το τελευταίο στρώμα ονομάζεται στρώμα εξόδου, γιατί οι αντιδράσεις που δίνει αποτελούν τη συνολική αντίδραση του δικτύου. Τα στρώματα που βρίσκονται ανάμεσα στο στρώμα εισόδου και εξόδου ονομάζονται κρυφά στρώματα και δεν έρχονται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7. Οργάνωση νευρώνων σε στρώματα (Μπαντής, 2007).

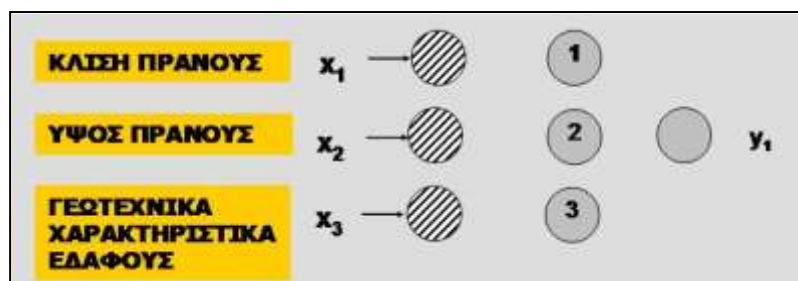
Κάθε νευρώνας ενός στρώματος συνδέεται με τους νευρώνες των γειτονικών στρωμάτων. Οι συνδέσεις (συνάψεις) σε έναν αλγόριθμο υλοποιούνται μέσω των βαρών. Το βάρος μίας σύνδεσης συμβολίζεται με w και αντιστοιχεί σε μία αριθμητική τιμή. Τα βάρη είναι το μέγεθος της ισχύος με την οποία μια σύνδεση

υποβιβάζει ή πριμοδοτεί μια πληροφορία. Η ισχύς των συνδέσεων καθορίζει τη συμπεριφορά ενός νευρωνικού δικτύου. Αυτό συμβαίνει γιατί οι συνδέσεις ανάμεσα στους νευρώνες είναι σταθερές και μεταβάλλεται μόνο η ισχύς τους. Τα βάρη αποθηκεύονται στην τοπική μνήμη του συστήματος και μεταβάλλονται πραγματοποιώντας συνεχείς υπολογισμούς ανάμεσα στους νευρώνες του συστήματος.

Ένας τυπικός νευρώνας συμπεριφέρεται μέσα στο δίκτυο ως μία συνάρτηση με μία ή περισσότερες εισόδους. Λαμβάνει ερεθίσματα μέσω των συνάψεων από τους νευρώνες του προηγούμενου στρώματος, υπολογίζει το ερέθισμα εισόδου με τη συνάρτηση εισόδου και στη συνέχεια υπολογίζει την έξοδο χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ενεργοποίησης (συνήθως είναι μια μη-γραμμική συνάρτηση: σιγμοειδής συνάρτηση). Η ικανότητα πρόβλεψης ενός νευρωνικού δικτύου εξαρτάται από το βαθμό εκπαίδευσής του. Η εκπαίδευση πραγματοποιείται κατά προτίμηση με αληθινά περιστατικά, δηλαδή το νευρωνικό δίκτυο καθοδηγείται να προβλέψει καταγεγραμμένα περιστατικά, για τα οποία υπάρχει επαρκής τεκμηρίωση ως προς τα αίτια που τα προκάλεσαν. Ουσιαστικά, μέσω της εκπαίδευσης επιτυγχάνεται βαθμονόμηση των συντελεστών βαρύτητας, ώστε ο αλγόριθμος του νευρωνικού δικτύου να συγκλίνει υπολογιστικά στις επιθυμητές απαντήσεις (Μπαντής, 2007).

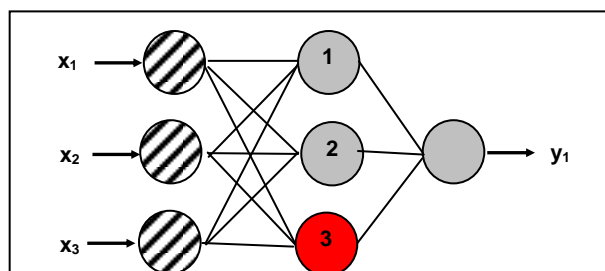
2.7.5. Παράδειγμα εφαρμογής για κατολισθήσεις

Έστω στο Σχήμα 2.8, ότι η κατολισθητική επιδεκτικότητα y_1 , είναι συνάρτηση τριών παραμέτρων που περιγράφουν ιδιότητες ενός πρανούς π.χ της κλίσης x_1 , του ύψους x_2 και των γεωτεχνικών συνθηκών x_3 (Μπαντής, 2011).



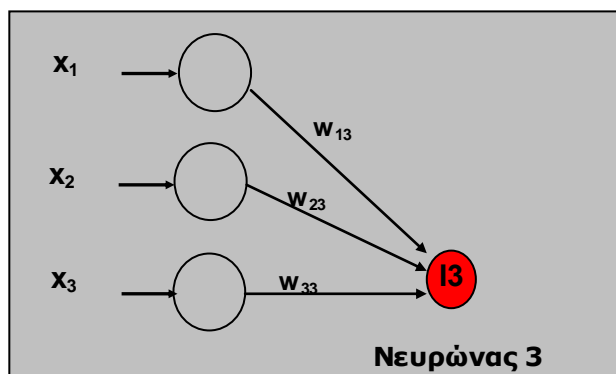
Σχήμα 2.8. Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (Μπαντής, 2011)

Το δίκτυο επιλέγεται να έχει τρεις νευρώνες στο στρώμα εισόδου (δηλαδή ένα νευρώνα για κάθε παράμετρο του προβλήματος) και ένα νευρώνα στο στρώμα εξόδου. Επιλέγεται το δίκτυο να έχει μόνο ένα κρυφό στρώμα τριών νευρώνων. Κάθε νευρώνας στο στρώμα εισόδου, δέχεται ένα ερέθισμα εισόδου, για παράδειγμα ο νευρώνας της κλίσης έχει εισοδο την τιμή X_1 . Η εξερχόμενη τιμή X_1 μεταβιβάζεται δια μέσου των συνάψεων στους νευρώνες του κρυφού στρώματος, εν προκειμένω, η X_1 μεταφέρεται σε τρεις συνάψεις (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9. Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (συνέχεια) (Μπαντής, 2011)

Σε κάθε σύναψη η X_1 πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή βαρύτητας της σύναψης π.χ η X_1 με το W_{13} της σύναψης που καταλήγει στον τρίτο νευρώνα του κρυφού στρώματος (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Δομή νευρωνικού δικτύου για κατολισθήσεις (συνέχεια) (Μπαντής, 2011)

Κάθε νευρώνας στο κρυφό στρώμα για παράδειγμα ο νευρώνας 3, δημιουργεί την είσοδο του I_3 , συνθέτοντας τα ερεθίσματα εισόδου: $X_1.W_{13}$, $X_2.W_{23}$ και $X_3.W_{33}$. Μαθηματικά, η σύνθεση γίνεται με χρήση μιας συνάρτησης που ονομάζεται συνάρτηση εισόδου. Κάθε νευρώνας του κρυφού στρώματος που έχει δεχθεί το αριθμητικό αποτέλεσμα I_3 της συνάρτησης εισόδου, στη συνέχεια μετασχηματίζει την είσοδο σε έξοδο με χρήση μιας συνάρτησης ενεργοποίησης.

Με βάση τα παραπάνω για την φιλοσοφία της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, προκύπτουν τα ακόλουθα σχόλια (Τσέργα 2007, Φερεντίνου 2004):

- Το μοντέλο δεν προβλέπει αξιόπιστα αποτελέσματα εκτός του εύρους τιμών των «εκπαιδευτικών» παραμέτρων που εξετάζονται. Τα νευρωνικά δίκτυα, από τη βιβλιογραφία, εκπαιδεύονται μόνο με χρήση δεδομένων εισόδου και εξόδου. Τα μοντέλα που δημιουργούν, αναφέρονται ως μοντέλα οδηγούμενα από δεδομένα με συνέπεια τα νευρωνικά δίκτυα να εφαρμόζονται σε προβλήματα όπου υπάρχουν δεδομένα εισόδου-εξόδου αλλά δεν είναι γνωστή η λειτουργία του συστήματος. Η εξάρτηση αυτή επηρεάζει και την ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου. Η σωστή πρόβλεψη σε νέα δεδομένα (δηλαδή σε ερεθίσματα που δεν ανήκουν σε εκείνα της εκπαίδευσης) μετά την εκπαίδευση, εξαρτάται από το ποιοτικό περιεχόμενο των δεδομένων εκπαίδευσης. Πρέπει τα δεδομένα εκπαίδευσης να καλύπτουν όλο το φάσμα στο οποίο οι διάφορες μεταβλητές αναμένεται να μεταβληθούν. Πολλά δεδομένα που περιγράφουν τη συμπεριφορά σε ορισμένα τμήματα του χώρου τιμών οδηγούν σε ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων με ελλειμματική ικανότητα γενίκευσης. Αυτό είναι και το ευαίσθητο σημείο των νευρωνικών δικτύων, δηλαδή η ανάγκη τους για δεδομένα. Εκπαιδεύοντας το δίκτυο με δεδομένα εισόδου-εξόδου, στην ουσία ζητείται από το δίκτυο να προσαρμοστεί σε ακριβείς εντολές δράσης - αντίδρασης, αγνοώντας ότι στην εφαρμογή ενδιαφέρει η γενικότερη συμπεριφορά και ζητούμενο είναι η ικανότητα πρόβλεψης σε νέες περιπτώσεις εκπαίδευσης.
- Κρίσιμοι μηχανισμοί (για παράδειγμα ο μηχανισμός αστοχίας σε ένα πρανές) μπορεί και να παραλείπονται στο μοντέλο εκπαίδευσης.
- Υπάρχει έλλειψη θεωρητικού υποβάθρου για επαλήθευση και επικύρωση των προαναφερθέντων τεχνικών και των αποτελεσμάτων τους.
- Δημιουργούνται μοντέλα οδηγούμενα από δεδομένα. Όμως, η ορθότητα των προβλέψεων εξαρτάται από τα δεδομένα που επιλέγονται ή είναι διαθέσιμα. Για αυτό το λόγο, ο χρήστης είναι απαραίτητο να προχωρεί σε αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Επιπλέον, επειδή πολλές φορές προκύπτουν ελλείψεις και ασάφειες των δεδομένων, η σωστή εφαρμογή των μεθόδων και η ορθότητα των αποτελεσμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κρίση, την εμπειρία και τις γνώσεις του χρήστη.

- Αδυνατούν να εξηγήσουν ποιοτικά τη γνώση που μοντελοποιούν, ενώ υπεισέρχεται και η παράμετρος της υποκειμενικότητας.
- Όταν δημιουργείται ένα νευρωνικό δίκτυο πρέπει οι συνδέσεις να αποκτήσουν ισχύ, δηλαδή έναν αριθμό που ονομάζεται βάρος. Πρόβλημα αποτελεί όταν οι αρχικές τιμές των βαρών δίνονται είτε τυχαία είτε με χρήση προσεγγιστικής μεθόδου κατά την οποία σκοπός είναι να διαμορφωθούν οι κατάλληλες συνθήκες εκπαίδευσης.
- Η χρήση ΤΝΔ προϋποθέτει ότι η έρευνα διεξάγεται σε μια περιοχή εκδηλωμένων κατολισθήσεων.
- Με τη χρήση των ΤΝΔ επιτυγχάνεται εκτίμηση του βαθμού κινδύνου μιας περιοχής σε κατολίσθηση, αλλά δεν εξαγονται συμπεράσματα σχετικά με τον βαθμό επιρροής των επιμέρους παραμέτρων στην πρόκληση των κατολισθήσεων.

Στην έρευνα της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, το εργαλείο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων θεωρείται ως μεθοδολογία καθοδηγούμενη από τα δεδομένα (Data-driven susceptibility method), η οποία επηρεάζεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά, που θεωρούνται ως μειονεκτήματα (Corominas et al., 2014):

α) τη γενική θεώρηση ότι οι κατολισθήσεις συμβαίνουν λόγω του ίδιου συνδυασμού παραμέτρων σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης.

β) την άποψη ότι η έκταση του ελέγχου μερικών χωρικών παραμέτρων μπορεί να διαφέρει ευρύτατα σε περιοχές με πολύπλοκες γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες.

γ) την έλλειψη κατάλληλης γνώμης ειδικού για διαφορετικούς τύπους κατολισθήσεων, διεργασιών και παραγόντων υπαίτιων σε αστοχία πρανών.

Για τους παραπάνω λόγους, λοιπόν, κρίνεται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο (ΤΝΔ) δεν ικανοποιεί όλα εκείνα τα στοιχεία που πρέπει να έχει μια μεθοδολογία πρόγνωσης κατολισθητικής επικινδυνότητας.

Συμπερασματικά, εξετάζοντας τις μεθοδολογίες των ΑΗΡ (Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία), Fuzzy Logic (Ασαφής Λογική) και ΤΝΔ (Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα), διαπιστώνεται ότι προς το παρόν παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα ως προς την δυνατότητα πρόγνωσης της κατολισθητικής επικινδυνότητας.

2.8. Οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση της μεθοδολογίας του Rock Engineering System (RES) στην πρόγνωση των κατολισθήσεων.

2.8.1 Εισαγωγή

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί (εδafικοί και βραχώδεις σχηματισμοί) περιγράφονται από τους πρώτους γεωλογικούς χάρτες που εμφανίσθηκαν έως και σήμερα. Οι περιγραφές βασίζονταν, αρχικά, σε καθαρά γεωλογικούς όρους. Με την πάροδο του χρόνου και την μεγαλύτερη εξοικείωση με την επιστήμη της γεωλογίας και την επίδραση που είχαν οι αρχές και οι εφαρμογές σε τεχνικά έργα, το μέγεθος των πληροφοριών που υιοθετείτο για την περιγραφή όρων που αφορούσαν έργα πολιτικού μηχανικού ολοένα και αυξανόταν, οδηγώντας σε κανόνες για την περιγραφή ή τον χαρακτηρισμό μιας βραχώμαζας με κριτήρια γεωτεχνικής μηχανικής.

Παράλληλα με αυτή την ανάπτυξη, δημιουργήθηκε στους χώρους της τεχνικής γεωλογίας και της γεωλογίας μεταλλείων, η ανάγκη για χρήση της περιγραφής της βραχώμαζας στις ανάγκες υποστήριξης των υπόγειων έργων. Αυτό, τελικά, οδήγησε στην δημιουργία των συστημάτων ταξινόμησης, κυρίως, της βραχώμαζας. Θα πρέπει, όμως, να τονισθεί ότι τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν σχεδιασθεί ακολουθώντας πολλές διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους και επιπλέον οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι και η επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα διαφέρει από σύστημα σε σύστημα. Αυτό, φυσικά, θέτει κάποιους προβληματισμούς για την εγκυρότητα των συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας (Hack, 2002).

Επιπλέον, οι επιτυχείς εφαρμογές (τουλάχιστον στα τελικώς κατασκευασμένα υπόγεια έργα) των συστημάτων ταξινόμησης στις υπόγειες εκσκαφές, οδήγησε στην εκτίμηση να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των πρηνών. Σύντομα, όμως, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή αυτή δεν έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα και αυτό οδήγούσε στο να επανεξετάζονταν κάποια στοιχεία των συστημάτων για χρήση των υπόγειων εκσκαφών, έτσι ώστε να προσαρμόζονταν στις απαιτήσεις για λύση των προβλημάτων της ευστάθειας των πρηνών. Αυτό, όμως, σήμαινε ότι τελικά τα «διορθωμένα» συστήματα «κληρονομούσαν» στοιχεία που σχετιζόνταν άμεσα με την ταξινόμηση των συστημάτων των υπόγειων εκσκαφών και τα οποία είτε δεν ήταν, τελικά, εφαρμόσιμα για την επίλυση της ευστάθειας των πρηνών είτε έλειπαν από αυτά

(τα συστήματα) τα στοιχεία εκείνα που θα ήταν σημαντικά για τον συγκεκριμένο σκοπό (Hack, 2002).

Η ευρεία, όμως, χρήση των γνωστών ταξινομήσεων οδηγεί αρκετές φορές σε αντίθετα αποτελέσματα, να αγνοούνται δηλαδή βασικές αρχές τόσο της γεωλογίας όσο και της μηχανικής, που αποτελούν το θεμελιώδες υπόβαθρο ενός σχεδιασμού για την κατασκευή των τεχνικών έργων και ιδιαίτερα των πρानών. Συγκεκριμένα, η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης, όσο σωστά και να γίνεται, συχνά περιορίζεται μόνο στον ποσοτικό χαρακτηρισμό της βραχώμαζας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη και η συμπεριφορά που το γεωλογικό υλικό «προτιμάει» κατά την εκσκαφή του. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να διαφέρει από βραχώμαζα σε βραχώμαζα ακόμα και αν αυτές έχουν τον ίδιο χαρακτηρισμό (από την ταξινόμηση) και βέβαια ανάλογα με το κατά περίπτωση εντατικό πεδίο και το καθεστώς των υπόγειων νερών. Συνεπώς, οι ταξινομήσεις πρέπει να συνοδεύονται και από τη συμπεριφορά της βραχώμαζας στα πρानή ως προς τον τύπο και τον μηχανισμό αστοχίας που τους «ταιριάζει». Διαφορετικά χάνεται η γεωλογική ταυτότητα του γεωλογικού υλικού ενώ παράλληλα αγνοούνται οι ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει κατά περίπτωση και που μπορεί να είναι σημαντικές για την ευστάθεια του πρανούς (Μαρίνος Β., 2007).

Απαιτείται, λοιπόν, μια μεθοδολογία επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού μέσα από την εκτίμηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς κατά την μελέτη και κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Οι παράμετροι σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι στενά εναρμωσμένοι και με την κατηγορία της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς (Μαρίνος Β., 2007).

2.8.2. Συνοπτική επεξήγηση ανάπτυξης της μεθοδολογίας RES για την πρόγνωση των αστοχιών των πρανών

Δραστηριότητες της γεωτεχνικής μηχανικής όπως η εκσκαφή ενός υπόγειου χώρου ή ενός πρανούς διαταράσσουν το αρχικό εντατικό πεδίο της βραχώμαζας που βρίσκεται στον υπό εκσκαφή χώρο και παράγουν δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους παραμέτρων της. Συνεπώς, οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ των επηρεαζόμενων παραμέτρων είναι τα κλειδιά για να γίνει κατανοητή η συνολική μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας. Επιπλέον, οι βραχώμαζες χαρακτηρίζονται, λόγω της φύσης τους, από ασυνέχεια, ανομοιογένεια, ανισοτροπία κλπ. Η παρουσία, δε, των ασυνεχειών είναι το «πρωτεύον κλειδί»

(δανειζόμενοι έναν όρο από τη φιλοσοφία της βάσης δεδομένων Access που είναι μια από τις εφαρμογές του MS-Office) στη λειτουργία της συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Με βάση όλα τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι οι προαναφερθέντες μηχανισμοί αλληλεπίδρασης είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με παραδοσιακές τεχνικές και μεθοδολογίες. Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για την έλευση νέων μεθόδων που θα μελετούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Με αφορμή την κεντρική ιδέα του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI), η οποία διατυπώνει την αρχή ότι είναι προτιμότερο να επιλέγει κανείς ένα εύρος πμών παρά μια μόνο πμή για τον υπολογισμό του δείκτη, το γεγονός ότι η εγγενής διαφορετικότητα (inherent variability) των γεωλογικών υλικών σημαίνει ότι κάθε ιδιότητα υλικού θα πρέπει να προσδιορίζεται με ένα εύρος πμών παρά από μια απλά μεμονωμένη τιμή (Hoek, 1999) και το ότι οι υπάρχουσες μεθοδολογίες – μοντέλα λήψης αποφάσεων για την κατολισθητική επικινδυνότητα (όπως η θεωρία της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, η θεωρία της Ασαφούς Λογικής και τα Τεχνικά Νευρωνικά Δίκτυα) δίνουν μη ξεκάθαρες και εμπειριστατωμένες λύσεις, έως σήμερα, για την πρόγνωση του κινδύνου αστάθειας των κλιτύων, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία σχεδιασμού **Rock Engineering System (RES)**, που έχει σχεδιαστεί για τη μελέτη της συμπεριφοράς βραχωδών πρανών (Hudson 1992).

Τα δεδομένα που αξιολογήθηκαν, μέσα από την οπτική γωνία του θέματος πρόγνωσης της κατολισθησιμότητας πρανών (εδαφικών και βραχωδών) στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, συγκεντρώθηκαν από την κεντρική τράπεζα δεδομένων του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), του ΚΕΔΕ (Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων), ποικίλες επιστημονικές εργασίες δημοσιευμένες σε έγκυρα διεθνή τεχνικογεωλογικά περιοδικά, διδακτορικές - μεταπτυχιακές διατριβές και διπλωματικές εργασίες σχετικές με το ευρύτερο αντικείμενο του υπό μελέτη θέματος αλλά και την υπαίθρια εργασία στους χώρους μελέτης.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία συνδυάζει τα τεχνικογεωλογικά κλειδιά κάθε βραχώμαζας που μαζί με τις συνθήκες του περιβάλλοντος διαμορφώνουν την συμπεριφορά ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς και μπορούν να προγνώσουν την ευστάθειά του ή όχι, ελαχιστοποιώντας την προαναφερόμενη αβεβαιότητα του

εύρους των πμών, αφού βασίζεται στον υπολογισμό παραμέτρων που περιορίζουν τα ερωτηματικά για την συμπεριφορά της βραχώμαζας πριν, κατά και μετά την κατασκευή ενός γεωτεχνικού έργου που σχετίζεται με την παρουσία ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς.

Γενικά, είναι κοινά αποδεκτό ότι με μια συγκεκριμένη μεθοδολογία ενός σχεδιασμού απαιτείται να έχουν γίνει κατανοητά όλα τα στοιχεία των ιδιοτήτων ενός γεωλογικού υλικού σαν μια στοιχειώδη βάση δεδομένων. Επίσης, θα πρέπει να είναι γνωστό με ακρίβεια ποιος είναι ο αντικειμενικός σκοπός. Στη συνέχεια χρειάζεται μια διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που είναι περισσότερο σχετικές με το υπό μελέτη και κατασκευή έργο, πάντα μέσα από το πρίσμα του αντικειμενικού σκοπού και τέλος χρειάζεται η ικανότητα να συγκεντρωθούν σχετικές τεχνικές για τον παραπάνω σκοπό.

Η παραπάνω διαδικασία συνδέεται με τη μεθοδολογία RES, η βασική αρχή της οποίας είναι η πληροφορία που αποκτάται να αντιστοιχεί στον αντικειμενικό σκοπό του έργου και να βασίζεται στην επιλογή εκείνων των κρίσιμων παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με το συγκεκριμένο, κάθε φορά, έργο (Hudson, 1992).

Συνεπώς, μια γενική προσέγγιση για το RES, είναι να συγκεντρωθούν όλες οι σχετικές με το έργο και τη θέση γεωτεχνικές παράμετροι και στη συνέχεια να επικεντρωθεί η μελέτη στην αξιολόγηση των περισσότερο σημαντικών και κρίσιμων ή ακόμα να μπορούν να αξιολογηθούν εκείνες που συμβάλλουν στο 95% της διαδικασίας του σχεδιασμού (Hudson and Harrison, 1997). Το κρίσιμο σημείο είναι ότι η λίστα των περισσότερο σημαντικών παραμέτρων δεν θα είναι η ίδια για διαφορετικούς τύπους τεχνικών έργων.

Ως λογική συνέπεια των προαναφερθέντων πιστεύεται ότι μπορούν να προκύψουν οι κατευθύνσεις – συστάσεις, οι οποίες θα συνεισφέρουν στην πρόγνωση μιας πιθανής αστοχίας ενός πρανούς, μέσω της ερμηνείας των μηχανισμών της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Με βάση την θεωρία RES και εμπειρικά παραδείγματα εφαρμογής της σε διάφορα μέρη και γεωλογικές συνθήκες (περιγραφή και ανάλυση των οποίων θα γίνει σε επόμενη ενότητα), πιστεύεται ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτελεί καλύτερη πρόταση πρόγνωσης αστοχιών πρανών έναντι των ήδη γνωστών αντίστοιχων μεθοδολογιών. Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία RES με την τεκμηρίωση που στη συνέχεια θα ακολουθήσει μπορεί (Arnold, 1993):

1. Να βοηθήσει σε μια πρώτη γρήγορη ανάλυση για τον προσδιορισμό του δείκτη αστάθειας σε μια εξεταζόμενη περιοχή, χρησιμοποιώντας κάθε φορά παραμέτρους που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν εύκολα σε σχέση με εκείνες που είναι χρονοβόρες και οικονομικά ακριβές έως και ασύμφωρες.
2. Να διευκολύνει κάποιον να ξεφύγει από τη λογική χρήση μιας αριθμητικής τιμής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός γεωλογικού σχηματισμού, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά συστήματα ταξινόμησης.
3. Να γίνει, μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης, ανάλυση των σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος για το σύστημα κατολίθωση, κάτι το οποίο δεν καθίσταται δυνατόν με άλλες γνωστές μεθόδους. Με το μητρώο είναι δυνατόν να ξεπεραστεί το πρόβλημα του υποκειμενικού προσδιορισμού των βαρών των παραμέτρων με την προσεκτική συμπλήρωσή του, αξιοποιώντας με τον καλύτερο τρόπο την κρίση και την υφιστάμενη εμπειρία του ειδικού (γεωλόγου, γεωτεχνικού μηχανικού, ερευνητή). Επιπλέον, η ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας των τιμών των παραμέτρων για την εκτίμηση του δείκτη αστάθειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη συνδρομή περισσότερων του ενός ειδικών.
4. Να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο πρόγνωσης πιθανής αστοχίας σε μια περιοχή χωρίς να υπάρχει καταγεγραμμένο ήδη κάποιο ιστορικό κατολισθήσεων στην εξεταζόμενη περιοχή.
5. Να εφαρμοσθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιλεγμένων παραμέτρων και κατ' επέκταση τις διαστάσεις του μητρώου αλληλεπίδρασης.
6. Να εφαρμοσθεί όχι μόνο σε μικρής έως μεσαίας κλίμακας περιοχές (κλίμακας έως 1:50.000), όπως έως τώρα έχει εφαρμοσθεί από πολλούς ερευνητές παγκοσμίως αλλά και σε μεγάλης κλίμακας περιοχές (για παράδειγμα 1:5.000 ή 1:1000).
7. Να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο σε βραχώδη πρηνή (όπως πρωτοεισήγαγε ο Hudson) αλλά και σε πρηνή που δομούνται από εδαφικούς σχηματισμούς, μαλακούς βράχους και γενικά γεωλογικούς σχηματισμούς (φλύσχης), στους οποίους εναλλάσσονται λιθολογίες με διαφορετική δομή.
8. Να αποτελέσει ένα επιπρόσθετο πολύ χρήσιμο εργαλείο ικανό να «ανιχνεύει» πολλούς μηχανισμούς που ενδεχομένως ο ειδικός (μελετητής, ερευνητής) να μην μπορεί να αναγνωρίσει (χωρίς αυτό) κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού ενός έργου.

9. Να βοηθήσει, πρακτικά, έναν επαγγελματία γεωλόγο, μηχανικό ή και ερευνητή στο να προκρίνει τις κατάλληλες εκείνες παραμέτρους για ένα τεχνικό έργο καθώς και την προτεραιότητα αυτών, τις αλληλεπιδράσεις τους και τα όρια έκτασης της επίδρασής τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο, λοιπόν, παρουσιάζεται και αναλύεται η μεθοδολογία του Rock Engineering System περιγράφοντας όρους και έννοιες που συνδέονται με το προαναφερόμενο μητρώο αλληλεπίδρασης μέσα από την παράθεση παραδειγμάτων από το πεδίο της Τεχνικής Γεωλογίας και Γεωτεχνικής Μηχανικής.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RES

3.1 Εισαγωγή

Σε οποιοδήποτε πρόβλημα γεωτεχνικής μηχανικής υπάρχει ένα πλήθος από ιδιότητες εδαφικών σχηματισμών και βραχώμαζας, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν, καθώς και πλήθος από μηχανισμούς που μπορούν να εφαρμοσθούν, ώστε το τεχνικό έργο που πρόκειται να κατασκευασθεί, να σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορέσει να αντιμετωπίσει πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας. Επιπλέον, όλες οι προαναφερόμενες ιδιότητες και μηχανισμοί αλληλοεπηρεάζονται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό (Arnold, 1993).

Με δεδομένο ότι ο αντικειμενικός σκοπός ενός τεχνικού έργου γίνεται κατανοητός, είναι δυνατόν μέσω της χρήσης ενός μοντέλου να υπολογισθεί η επίδραση του έργου στο έδαφος και αντίστροφα, τόσο κατά το στάδιο κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Ωστόσο, για ακριβώς το ίδιο γεωλογικό καθεστώς, διαφορετικά τεχνικά έργα απαιτούν διαφορετικά ζητήματα να απαντηθούν, διαφορετικά μοντέλα να αναπτυχθούν και εν τέλει διαφορετικοί τύποι ερευνών να εκτελεσθούν, λόγω των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων και απαιτήσεων των ειδικών τεχνικών έργων και του εδάφους (Parry et al., 2014).

Επιπλέον, λόγω και της εξάρτησης από το είδος του έργου, συγκεκριμένα εδαφικά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι περισσότερο κρίσιμα από άλλα, οπότε κάποια έργα λόγω της φύσης ή του καθεστώτος, δύναται να εκτεθούν σε μεγαλύτερο γεωτεχνικό κίνδυνο. Είναι, όμως, γεγονός ότι δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί κάθε λεπτομέρεια του εδάφους. Κατά συνέπεια, ο αντικειμενικός σκοπός ενός τεχνικογεωλογικού μοντέλου σε όλες τις φάσεις ενός έργου θα πρέπει να παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη γνώση του εδάφους, βασισμένο σε διαθέσιμα δεδομένα κάθε φορά, ώστε να επιτευχθεί αποδεκτός βαθμός αξιοπιστίας (Parry et al., 2014).

Επιπρόσθετα, η συνεχής επέκταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και η ανάπτυξη έργων υποδομής σε περιοχές με δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες, τις οποίες απέφευγαν στο παρελθόν, έκαναν περισσότερο επιτακτική την ανάγκη για συστηματική έρευνα στην οριακή γραμμή μεταξύ εδάφους και βράχου αλλά και έρευνα των πτωχών από πλευράς γεωτεχνικών χαρακτηριστικών περιοχών (Μαρίνος Β., 2007). Καθώς η απαίτηση για την ανάπτυξη νέων κατασκευών

άσχετα με τις εδαφικές συνθήκες έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, η ασφάλεια και η θεώρηση για αποφυγή του ρίσκου έχουν γίνει πολύ σημαντικές (Benardos and Kaliambakos, 2004).

Τα τεχνικά έργα, πολλές φορές, κατασκευάζονται σε περιοχές όπου επικρατούν δυσμενείς εδαφικές συνθήκες, οι οποίες απειλούν το όλο εγχείρημα. Όμως, η χρήση προχωρημένων μεθόδων έρευνας έχει συνδράμει σε μια περισσότερο εμπειριστατωμένη ανάλυση του εδάφους και της βραχώμαζας. Ωστόσο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, τα έργα δεν είναι ικανά να αντιμετωπίσουν με απόλυτη επιτυχία απροσδόκητες καταστάσεις. Γι' αυτό, η βασική ερώτηση, σήμερα, δεν είναι εάν μπορεί ένα τεχνικό έργο να κατασκευασθεί αλλά ποια είναι η περισσότερο κατάλληλη μέθοδος μελέτης – κατασκευής που πρέπει να υιοθετηθεί και ποιες είναι οι συνέπειες μιας τέτοιας απόφασης (Benardos and Kaliambakos, 2004).

Σήμερα, όπου τα τεχνικά έργα κατασκευάζονται στο ευρύτερο και όχι μόνο αστικό περιβάλλον, εμφανίζονται νέες προκλήσεις για τους γεωλόγους και τους μηχανικούς. Αυτές δεν περιορίζονται μόνο στον υπερκερασμό περιορισμών που προκύπτουν από τις υπάρχουσες λειτουργίες του συγκεκριμένου περιβάλλοντος αλλά και στην αντιμετώπιση του γεγονότος ότι το περιθώριο λάθους είναι πάρα πολύ μικρό. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να μελετήσουν μεθόδους αντιμετώπισης των προαναφερθέντων και έχει δοθεί έμφαση στην ανάλυση των αρχικών σταδίων ενός έργου που είναι και τα πιο κρίσιμα για την επιτυχία του, καθώς οι κατασκευαστικές κατευθύνσεις αλλά και οι τελικές αποφάσεις τότε σχηματοποιούνται. Για τους λόγους αυτούς, είναι ουσιώδες να υπάρχει μια ξεκάθαρη εικόνα των επιτόπου γεωλογικών – γεωτεχνικών συνθηκών, έτσι ώστε να συγχρονιστούν με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις (Benardos and Kaliambakos, 2004).

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή μιας μεθοδολογίας - προσέγγισης προβλημάτων βραχομηχανικής (που αρχικά παρουσίασε ο Hudson, το 1992 με την ονομασία Rock Engineering System ή RES). Στη συνέχεια η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε από ορισμένους συγγραφείς και στην προσπάθεια αντιμετώπισης προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής γενικά υπολογίζοντας τους προαναφερόμενους κινδύνους μέσω της παρουσίασης του δείκτη αστάθειας (ο οποίος προκύπτει από την εφαρμογή της εν λόγω

μεθοδολογίας) και προσδιορίζοντας την βαρύτητα ορισμένων παραμέτρων που είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση επικίνδυνων καταστάσεων που αφορούν την αστοχία πρανών. Στην παρούσα έρευνα η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε σχετικά με την πρόγνωση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, σε περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

Συνεπώς, θα αναλυθεί η συμπεριφορά των (παραμέτρων) και θα εκτιμηθεί η σημασία καθεμιάς από αυτές που συμμετέχει στη συνολική δυναμική επιδεκτικότητα. Γιατί έχει σημασία όχι μόνο η κατανόηση της σχετικής συνεισφοράς κάθε παραμέτρου αλλά και ο υπολογισμός των μηχανισμών αλληλεπίδρασής της με τις υπόλοιπες, ο οποίος θα συμπεριληφθεί στην ανάλυση, αφού μελλοντικοί κίνδυνοι κατά την διάρκεια της κατασκευής μπορούν να εμφανισθούν λόγω της αλληλεπίδρασης των παραμέτρων μεταξύ τους.

Ειδικότερα, το RES προσδιορίζει τις κύριες επιδράσεις και τις αναμενόμενες επιπτώσεις των διαφόρων τύπων τεχνικών έργων στο γεωλογικό περιβάλλον, τόσο στο στενό (ζώνη θεμελίωσης επιφανειακών έργων) όσο και στο ευρύτερο. Με την έννοια γεωλογικό περιβάλλον ενός τεχνικού έργου εννοείται το έδαφος και το υπέδαφος που βρίσκονται σε άμεση σχέση με αυτό και αλληλεπιδρούν ή πιθανολογείται η αλληλεπίδρασή τους κατά τη διάρκεια της ζωής και της λειτουργίας του έργου (Κουμαντάκης, 1993).

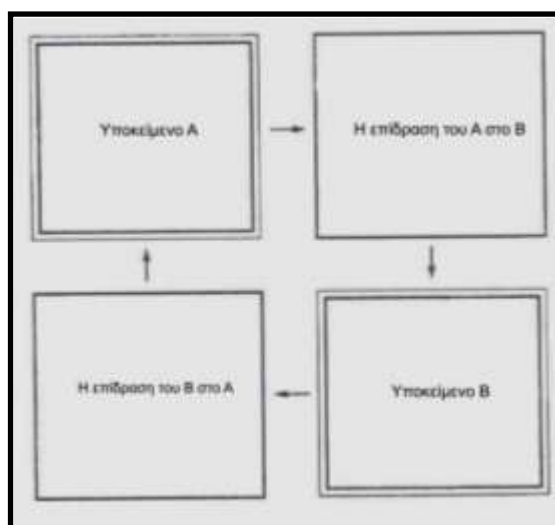
Ο υπεύθυνος, λοιπόν, της μελέτης κάθε τεχνικού έργου πρέπει από το αναγνωριστικό στάδιο μέχρι και το στάδιο της κατασκευής να αντιμετωπίζει το θέμα που μελετά από δύο σκοπιές: από τη σκοπιά των καθαρά τεχνικών αναγκών για την κατασκευή του «σώματος» του έργου και από τη σκοπιά των συνθηκών του χώρου που πρόκειται να το δεχθεί (Κουμαντάκης, 1984).

Θα πρέπει, λοιπόν, ο μελετητής του έργου, να συγκεντρώσει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες για τις συνθήκες του υπεδάφους, το οποίο θα υποδεχθεί το έργο και θα επηρεαστεί από την κατασκευή του. Αυτό, όμως, θα πρέπει να γίνει από την αρχή, ώστε η πορεία της μελέτης και ο σωστός προσανατολισμός της να βασίζονται στις διαπιστώσεις της έρευνας για τις συνθήκες του υπεδάφους (Κουμαντάκης, 1984). Δηλαδή, η μελέτη των ιδιομορφιών που αρχίζει από το στάδιο της προκαταρκτικής αναγνώρισης, πρέπει να κλιμακώνεται μέχρι και την περάτωση της κατασκευής.

Σε μεγάλης σημασίας τεχνικά έργα, όπου απαιτούνται λεπτομερείς γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες και κατά συνέπεια πάρα πολύ μεγάλες δαπάνες, πολλές φορές η έρευνα περιορίζεται με αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών αβεβαιοτήτων σχετικά με τις συνθήκες του υπεδάφους (Κουμαντάκης, 1984). Η χρήση του RES, πιστεύεται ότι μπορεί να υπερκεράσει τα ανωτέρω προβλήματα, ώστε να καταστούν εκ των προτέρων γνωστές όλες οι παράμετροι και οι τυχόν αλληλεπιδράσεις τους με το σχεδιαζόμενο έργο.

Για να γίνει κατανοητή η χρησιμότητα της ανάπτυξης αυτού του συστήματος, δίνεται ένα παράδειγμα μεγάλης ολίσθησης από ένα υπαίθριο ορυχείο στην Δυτική Αυστραλία. Συγκεκριμένα η κατάρρευση προγνώσθηκε, έγκαιρα, από όργανα γεωτεχνικής παρακολούθησης αλλά όχι κατά την διαδικασία της μελέτης και του σχεδιασμού του. Η πιθανότητα αυτού του τύπου αστοχίας και γενικά κάθε είδους αστοχίας μπορεί να εντοπιστεί και να υπολογισθεί με την εν λόγω μεθοδολογία (Hudson, 1992).

Αναπτύχθηκε, λοιπόν, ένα μητρώο αλληλεπίδρασης (interaction matrix), το οποίο αποτελεί ένα εργαλείο για ταυτόχρονη παρουσίαση των κύριων παραμέτρων του συστήματος (που στο μητρώο αποτυπώνονται σαν κύριοι διαγώνιοι όροι) καθώς και των μηχανισμών αλληλεπίδρασης των κύριων παραμέτρων (που στο μητρώο αποτυπώνονται σαν όροι εκτός της κύριας διαγωνίου). Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο μητρώο είναι ένας μηχανισμός που συνδέει δύο ή και περισσότερες παραμέτρους (Σχήμα 3.1).

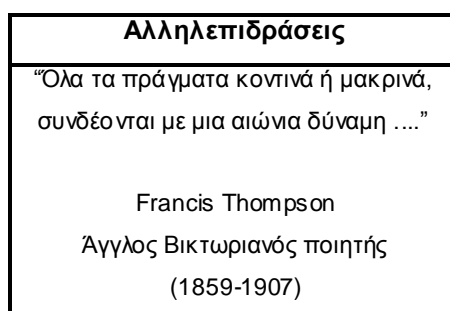


Σχήμα 3.1. Μητρώο αλληλεπίδρασης που προσδιορίζει και συσχετίζει όλους τους μηχανισμούς της γεωτεχνικής μηχανικής (Hudson, 1992).

3.2. Μητρώο αλληλεπίδρασης RES

3.2.1. Η φύση του μητρώου και η έννοια της συμμετρίας - ασυμμετρίας

Βασιζόμενοι στο γεγονός ότι όλα τα πράγματα στη ζωή αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (Σχήμα 3.2), θα είχε μεγάλη αξία αν μπορούσε να υιοθετηθεί μια μεθοδολογία πρόγνωσης αστοχιών πρανών που να είχε εφαρμογή για κάθε περίπτωση αστοχίας και για κάθε έργο σχετικό με κατολισθητική επικινδυνότητα (Hudson, 1992). Το μητρώο αλληλεπίδρασης πιστεύεται ότι μπορεί να αποτελέσει το βασικό εργαλείο για την παρουσίαση των σχετικών παραμέτρων, των αλληλεπιδράσεων τους καθώς και της συμπεριφοράς των γεωλογικών υλικών (έδαφος, βράχος) με την κατασκευή.



Σχήμα 3.2. Απόσπασμα από ένα ποίημα που υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχει σχέση μεταξύ όλων των πραγμάτων (Hudson, 1992).

Στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών του μητρώου αλληλεπίδρασης ο Hudson τονίζει ιδιαίτερα, το χώρο της βραχομηχανικής που περιλαμβάνει φυσικές αλληλεπιδράσεις στη βραχώμαζα, καθώς και αλληλεπιδράσεις που προέρχονται από την κατασκευή.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των προαναφερθέντων αλληλεπιδράσεων είναι αυτό από μια βραχώμαζα με ασυνέχειες γύρω από μια υπόγεια εκσκαφή (Σχήμα 3.3). Πρόκειται για ένα αναλυτικό μοντέλο, στο οποίο λαμβάνουν χώρα έξι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε κύριες παραμέτρους όπως: α) η δομή της βραχώμαζας (με ασυνέχειες – διακλάσεις), β) η τάση και γ) η ροή του νερού σε μια περιοχή - ζώνη γύρω από μια υπόγεια εκσκαφή. Οι παράμετροι αυτές τοποθετούνται διαγώνια σε ένα μητρώο και με βάση αυτές δημιουργούνται έξι αλληλεπιδράσεις (Hudson, 1992):



Σχήμα 3.3. Παρουσίαση έξι αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στη βραχώδη δομή, την τάση και την ροή του νερού σε περιβάλλον μιας υπόγειας εκσκαφής (Hudson, 1992).

1. Στην πρώτη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων **βραχώδης δομή με ασυνέχειες** και **τάση**, οι ασυνέχειες επηρεάζουν το τοπικό τασικό πεδίο γιατί οι κύριες τάσεις (principal stresses) περιστρέφονται και μεταβάλλονται σε μέγεθος.
2. Μεταξύ των παραμέτρων **δομή** και **ροή νερού**, απεικονίζεται πως η δομή επηρεάζει τη ροή του νερού. Η πρωτογενής περατότητα είναι ένα χαρακτηριστικό του αέριου (χωρίς ασυνέχειες) πετρώματος. Η δευτερογενής περατότητα είναι χαρακτηριστικό των διακλάσεων. Οπότε στη φάση της διάρκειας κατασκευής ενός έργου, η δευτερογενής περατότητα είναι συνήθως πολύ πιο σημαντική από την πρωτογενή περατότητα. Συνεπώς, οι ασυνέχειες είναι που καθορίζουν την περατότητα και άρα τη ροή του νερού που λαμβάνει χώρα σε μια βραχώδη εκσκαφή.

3. Στην τρίτη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων **τάση** και **ροή νερού**, φαίνεται πως οι τάσεις επηρεάζουν τη ροή του νερού. Επειδή το νερό παροχετεύεται μέσω των ασυνεχειών, οποιοδήποτε κλείσιμο των ασυνεχειών που οφείλεται σε υψηλή τάση, είναι πιθανό να έχει σημαντική επιρροή στο καθεστώς κίνησης της ροής του νερού. Πραγματικά αυτό πιστεύεται ότι συμβαίνει γιατί η ροή του νερού συχνά θεωρείται ότι είναι ανάλογη (στην τρίτη δύναμη) του ανοίγματος της ασυνέχειας και συνεπώς ακόμα και μικρή τάση είναι αρκετή να αλλάξει το άνοιγμα της ασυνέχειας όταν τα τοιχώματά της απέχουν αρκετά.
4. Η πίεση του νερού μέσα στις ασυνέχειες απομειώνει την κανονική τάση, μεταξύ των παραμέτρων **ροή νερού** και **τάση** (τέταρτη αλληλεπίδραση).
5. Στην πέμπτη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων **ροή νερού** και **δομή**, η συνεχής ροή του νερού κατά μήκος μιας ασυνέχειας μπορεί να αλλάξει τις μηχανικές και υδρογεωλογικές ιδιότητες της βραχώμαζας.
6. Τέλος, στην έκτη αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων **τάση** και **δομή**, υψηλές τάσεις μπορούν να αλλάξουν τη δομή της βραχώμαζας. Οι υψηλές τάσεις έχουν προκύψει από την ορογένεση και άλλες γεωλογικές διεργασίες κατά την διάρκεια του γεωλογικού χρόνου.

Με βάση τα προηγούμενα, είναι σαφές ότι απαιτείται κάποια μεθοδολογία για να γίνουν αντιληπτές οι αλληλεπιδράσεις που μπορεί να συμβούν. Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο οι φυσικές διαδικασίες που εμπλέκονται στις αλληλεπιδράσεις που σχετίζονται με την βραχώμαζα αλλά και οι συνέπειες που έχουν οι διάφορες κατασκευές με την πιθανή όχληση που προκαλούν στο περιβάλλον με την ευρύτερη παρουσία τους. Για παράδειγμα, είναι πιθανό η κατασκευή μιας υπόγειας εκσκαφής να μεταβάλλει το πεδίο των τάσεων με συνέπεια να μεταβληθεί το άνοιγμα των ασυνεχειών προκαλώντας, αρχικά, ολίσθηση σε υπάρχουσες ασυνέχειες και δευτερευόντως σχηματισμό νέων ασυνεχειών (Hudson, 1992).

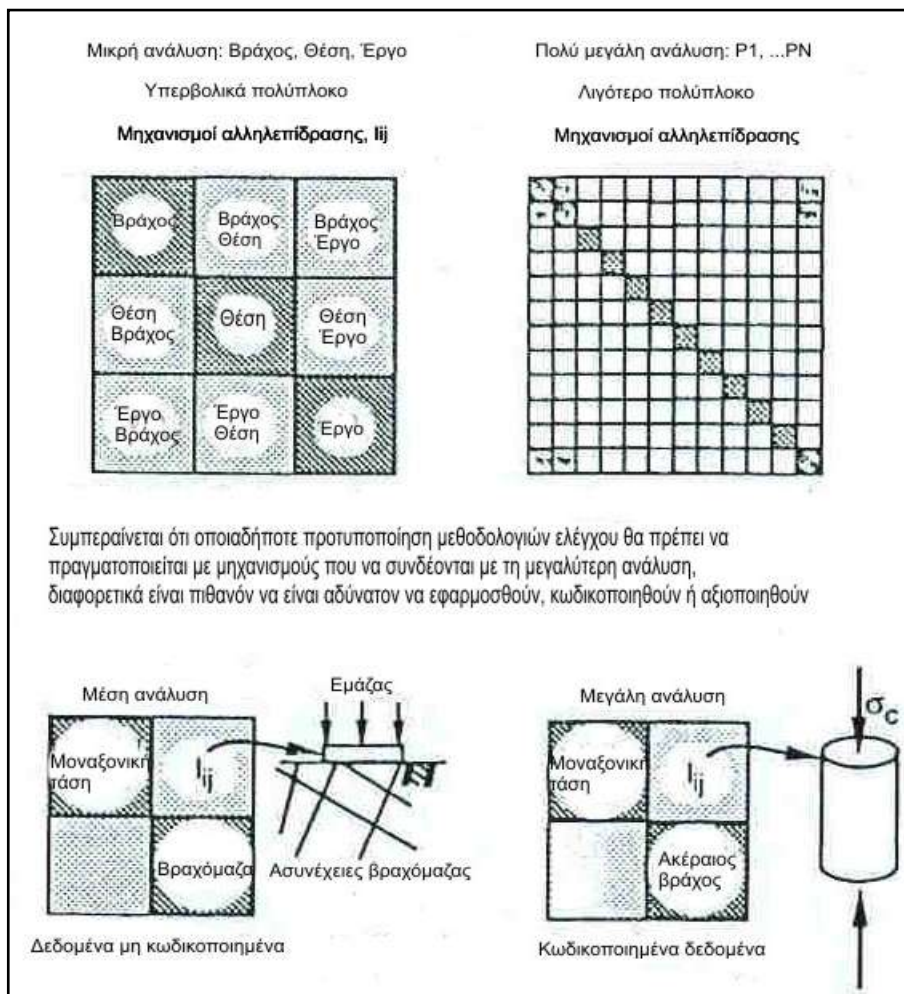
Η μεθοδολογία που αναφέρθηκε προηγουμένως, βασίζεται στο μητρώο αλληλεπίδρασης. Έτσι, η βασική αρχή του συγκεκριμένου μητρώου είναι να τοποθετηθούν οι κύριες παράμετροι ενός συστήματος κατά μήκος μιας διαγωνίου και να μελετηθούν οι αλληλεπιδράσεις των συγκεκριμένων παραμέτρων εκτός της κύριας διαγωνίου. Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ένα μητρώο αλληλεπίδρασης που

βασίζεται σε δύο κύριες παραμέτρους, τότε δημιουργείται ένα μητρώο 2×2 όπου στην κύρια διαγώνιο και πάνω αριστερά τοποθετείται η πρώτη κύρια παράμετρος (π.χ. A) και κάτω δεξιά βρίσκεται η δεύτερη αντίστοιχη κύρια παράμετρος (π.χ. B). Οι αλληλεπιδράσεις στο μητρώο αντιστοιχούν στο πάνω δεξιό τμήμα όπου εντοπίζεται η επίδραση της A στη B και στο κάτω αριστερό τμήμα όπου εντοπίζεται η επίδραση της B στην A (Σχήμα 3.1).

Συνεπώς, σε ένα 2×2 μητρώο υπάρχουν δύο κύριοι διαγώνιοι όροι και δύο μη κύριοι διαγώνιοι όροι. Σε ένα 3×3 μητρώο υπάρχουν τρεις κύριοι διαγώνιοι όροι και έξι μη κύριοι διαγώνιοι όροι. Σε ένα 12×12 μητρώο υπάρχουν δώδεκα κύριοι διαγώνιοι όροι και εκατόν τριάντα δύο μη κύριοι διαγώνιοι όροι. Με αυτόν τον τρόπο όλες οι παράμετροι μπορούν να ληφθούν υπόψη και δεν υπάρχει κίνδυνος να αγνοηθεί η αλληλεπίδραση της μιας ή της άλλης παραμέτρου (Hudson, 1992).

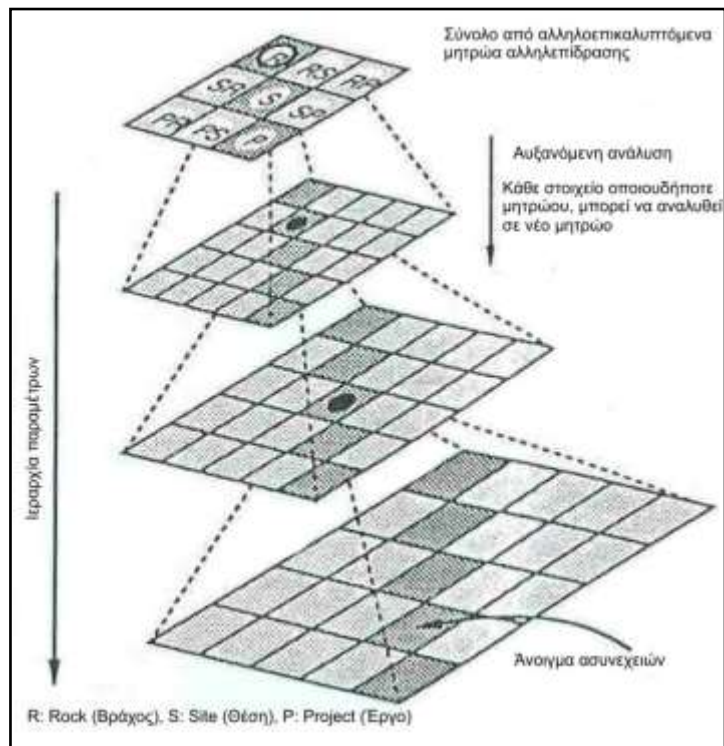
Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση της μιας παραμέτρου στην άλλη δεν έχει την ίδια σημασία και αξία. Για παράδειγμα σε ένα μητρώο 2×2 με κύριες παραμέτρους τις ασυνέχειες και τις τάσεις, ο τρόπος με τον οποίο οι ασυνέχειες επηρεάζουν τις τάσεις δεν είναι ο ίδιος με τον τρόπο με τον οποίο οι τάσεις επηρεάζουν τις ασυνέχειες της βραχώμαζας.

Επιπλέον, είναι ξεκάθαρο ότι μπορεί να υπάρξει μεγαλύτερη ανάλυση όσον αφορά την δομή ενός μητρώου αλληλεπίδρασης, αν χρειαστεί να εξειδικευθεί με περισσότερη λεπτομέρεια μια κύρια παράμετρος. Έτσι, όσο πιο πολλές παράμετροι στην κύρια διαγώνιο είναι παρούσες, τόσο πιο λεπτομερής ανάλυση γίνεται και συνεπώς τόσο πιο κοντά θα βρεθεί κάποιος στον σκοπό της ανάλυσής του και κατά συνέπεια στους λόγους που συνέταξε το μητρώο (Σχήματα 3.4, 3.5).



Σχήμα 3.4. Το μέγεθος της ανάλυσης σε ένα μητρώο καθορίζει και την κωδικοποίηση των μετρήσεων των ιδιοτήτων της βραχώμαζας (Hudson, 1992).

Εάν στο (προηγούμενο) Σχήμα 3.3 προστεθεί μια ακόμα παράμετρος (ο όρος «κατασκευή») τότε η αρχιτεκτονική του μητρώου αλληλεπίδρασης παρουσιάζεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Δηλαδή, τα στοιχεία της τελευταίας στήλης αντιπροσωπεύουν την επίδραση των τριών παραμέτρων (δομή βράχου, τάση βράχου, ροή νερού) της βραχομηχανικής στην κατασκευή, κάτι το οποίο αποδεικνύει την αξία τους στο σχεδιασμό. Η τελευταία γραμμή του μητρώου δείχνει τρεις τρόπους που η κατασκευή επηρεάζει τις παραμέτρους του βράχου. Από την παράθεση των παραπάνω, φαίνεται ότι οι αλληλεπιδράσεις των παραμέτρων είναι διαφορετικές και κατά συνέπεια το μητρώο είναι μη συμμετρικό (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.5. Απεικόνιση του τρόπου αύξησης της ανάλυσης σε ένα μητρώο αλληλεπίδρασης (Hudson, 1992).

Πίνακας 3.1. Μητρώο αλληλεπίδρασης με τέσσερις κύριες παραμέτρους στη διαγώνιο.

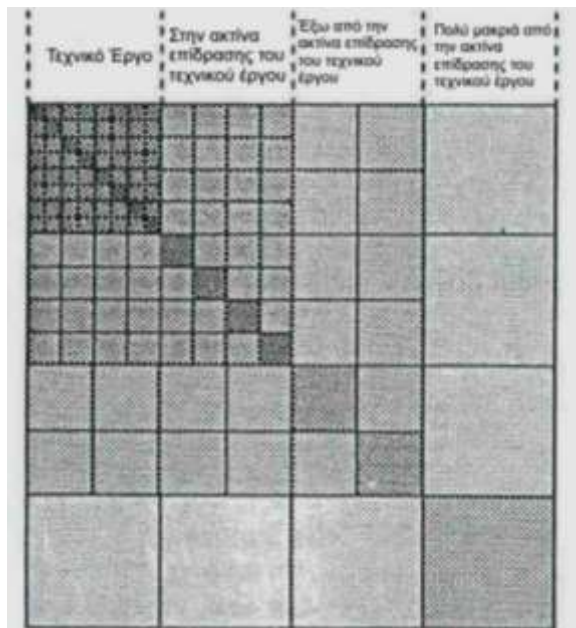
Δομή βράχου	Οι διακλάσεις επηρεάζουν την τιμή και τον προσανατολισμό των τάσεων	Το δίκτυο των διακλάσεων επηρεάζει την δευτερογενή περατότητα	Οι διακλάσεις επηρεάζουν το μέγεθος και τον προσανατολισμό των εκσκαφών
Οι τάσεις μπορούν να ανοίξουν, να κλείσουν ή να δημιουργήσουν διακλάσεις	Τάση βράχου	Γενικά, υψηλότερες κανονικές τάσεις οδηγούν σε μείωση της περατότητας	Υψηλές τάσεις βράχου οδηγούν σε κατασκευαστικές αστοχίες
Συνεχόμενη ροή νερού στις διακλάσεις επηρεάζει τις ιδιότητές των	Οι κανονικές τάσεις μειώνονται από την πίεση του νερού	Ροή νερού	Τσιμεντενέσεις και αποστράγγιση μπορεί να απαιτηθούν κατά την κατασκευή
Τα εκρηκτικά κατά την διάρκεια μιας κατασκευής μπορούν να καταστρέψουν παλιές διακλάσεις και να δημιουργήσουν νέες.	Στην εμφάνιση της εκσκαφής μιας κατασκευής οι κύριες τάσεις επηρεάζονται	Μια κατασκευή πάντα θα αποτελεί μια καταβόθρα για την ροή του νερού	Κατασκευή

Ένα μητρώο χαρακτηρίζεται από συμμετρία όταν τα συμπληρωματικά στοιχεία εκτός κύριας διαγωνίου είναι ισάξιας σημασίας, δηλαδή όταν η επίδραση της

παραμέτρου A στην παράμετρο B είναι ίση με την επίδραση της παραμέτρου B στην A. Αντίθετα, ένα μητρώο χαρακτηρίζεται από ασυμμετρία όταν η επίδραση μιας παραμέτρου χ σε μια παράμετρο ψ δεν είναι γενικά η ίδια με την συμπληρωματική αλληλεπίδραση της παραμέτρου ψ στην παράμετρο χ . Η τελευταία περίπτωση, συνήθως, είναι αυτή που βρίσκει εφαρμογή στις εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής. Τα περισσότερα συστήματα βραχομηχανικής και εδαφομηχανικής είναι μη συμμετρικά. Η θεώρηση αυτή αποτελεί πρωτότυπη ιδέα του Hudson, η οποία έχει πολλές προεκτάσεις και εφαρμογές καθώς προσφέρεται για τη χρήση σύγχρονων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης (Φερεντίνου, 2004).

3.2.2. Το μέγεθος και η έννοια της ανάλυσης του μητρώου

Όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, σε ένα μητρώο με N παραμέτρους στην κύρια διαγώνιο, θα υπάρχουν $N^2 - N = N(N-1)$ αλληλεπιδράσεις στην περιοχή που βρίσκεται εκτός κύριας διαγωνίου. Ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων εξαρτάται από το πόσες κύριες παράμετροι θα αποφασισθεί να αποτελέσουν το μητρώο αλληλεπίδρασης. Έτσι, όσο περισσότερες κύριες παράμετροι υπάρχουν, τόσο μεγαλύτερη είναι η εικόνα (ανάλυση) που μπορεί να αποκομίσει κανείς για ένα υπό μελέτη έργο και αυτό με τη σειρά του συσχετίζεται με τον σκοπό της ανάλυσης και κατ' επέκταση με την αιτία σύνταξης του μητρώου. Επιπρόσθετα, το εύρος της ανάλυσης ενός μητρώου μπορεί να συσχετισθεί με το επίπεδο της ανάλυσης, δηλαδή να είναι με περισσότερη λεπτομέρεια πλησίον της περιοχής του υπό μελέτη έργου και πολύ λιγότερο αναλυτικό όσο απομακρύνεται η έρευνα από αυτό. Χαρακτηριστική περίπτωση των παραπάνω αποτελεί το Σχήμα 3.6. Στο συγκεκριμένο σχήμα το υπο – μητρώο (Engineering project) περιέχει τόσες κύριες παραμέτρους όσες είναι άμεσα σχετικές με το έργο. Το μητρώο «near field» αναφέρεται στη ζώνη του γεωλογικού σχηματισμού που ωστόσο δεν είναι μέρος του υπό μελέτη έργου αλλά επηρεάζεται από την κατασκευή (engineering). Η αμέσως επόμενη περιοχή (far field) είναι η εικόνα του σχηματισμού που δεν επηρεάζεται από την κατασκευή (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.6. Το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να συσχετισθεί με το επίπεδο της ανάλυσης (Hudson, 1992).

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί να γίνει κατανοητό ότι το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να σχεδιασθεί ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας που απαιτείται. Το ερώτημα που προκύπτει, όμως, είναι ποιο επίπεδο ανάλυσης για την κατασκευή ενός μητρώου απαιτείται προκειμένου να μελετηθεί ένα τεχνικό έργο. Για παράδειγμα, η απλούστερη μορφή μητρώου αλληλεπίδρασης που εμπλέκει τη διάκριση μεταξύ γεωλογικού σχηματισμού (και ιδιαίτερα εάν είναι βραχώδης σχηματισμός τότε συμπεριλαμβάνεται η έννοια των μηχανισμών της βραχώμαζας – **Rock Mass**), τοποθεσίας – **Site conditions** (συμπεριλαμβανομένων των εννοιών της υδρογεωλογίας – γεωμορφολογίας - τοπογραφίας) και ενός έργου πολιτικού μηχανικού – **Project engineering** είναι αυτό που παρατίθεται στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί (Hudson, 1992).

Πίνακας 3.2. Μορφή μητρώου.

R	RS	RP
SR	S	SP
PR	PS	P

όπου: R= Rock Mass, S= Site conditions, P= Project engineering

Αυτή η γενική μορφή μητρώου μπορεί να γίνει κατανοητή με την παράθεση ενός απλού παραδείγματος. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται μια προδιατμημένη (presplitting) ασβεστολιθική βραχώμαζα σε πρανές της Αττικής Οδού (Σταθμός Διοδίων Κατεχάκη).



Εικόνα 3.1. Άποψη από ένα προδιατμημένο βραχώδες μέτωπο πρανούς στην Αττική Οδό (Σταθμός Διοδίων Κατεχάκη).

Τα ερωτήματα που προκύπτουν με βάση την Εικόνα 3.1 σχετικά με τις αρχές του μητρώου και του βαθμού της ανάλυσής του είναι (Hudson, 1992):

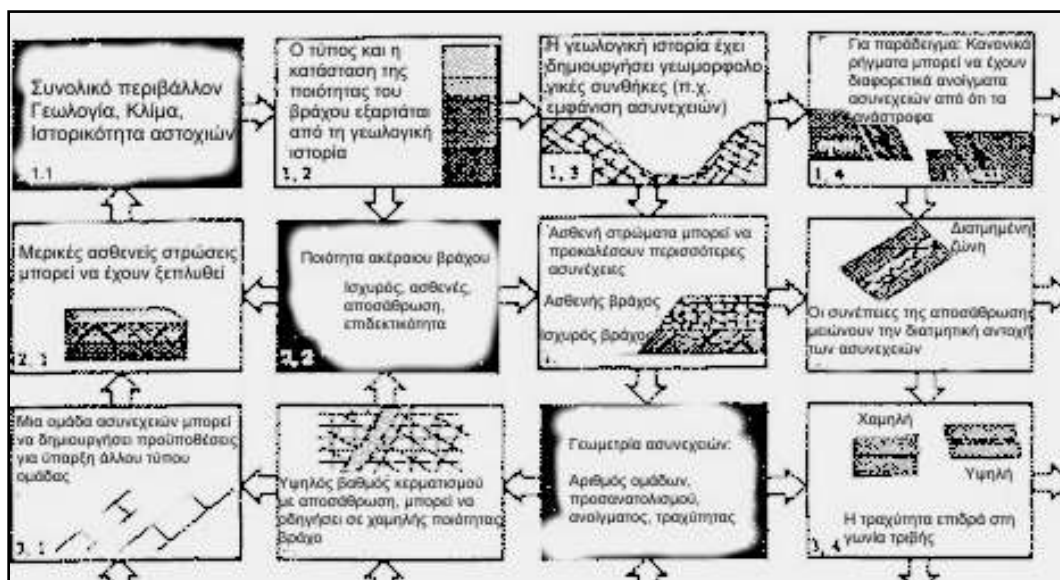
1. Ποιές είναι οι αλληλοεξαρτήσεις ανάμεσα στους τρεις προαναφερθέντες παράγοντες (R, S, P);
2. Πως έχει η βραχώμαζα επηρεάσει την έκρηξη;
3. Πως έχει επηρεάσει η έκρηξη τη βραχώμαζα;
4. Πως έχει επηρεάσει η διάτρηση την έκρηξη;
5. Πως έχει επηρεάσει η βραχώμαζα τη διάτρηση;
6. Σε ποιο επίπεδο ανάλυσης είναι οι μηχανισμοί του μητρώου;
7. Σε τι επίπεδο ανάλυσης θα έπρεπε να μελετηθεί το όλο σύστημα;
8. Ποιος είναι ο σκοπός του έργου;
9. Έχει επιτευχθεί αυτός ο συγκεκριμένος σκοπός;

3.3. Άτλαντας μηχανισμών γεωτεχνικής μηχανικής

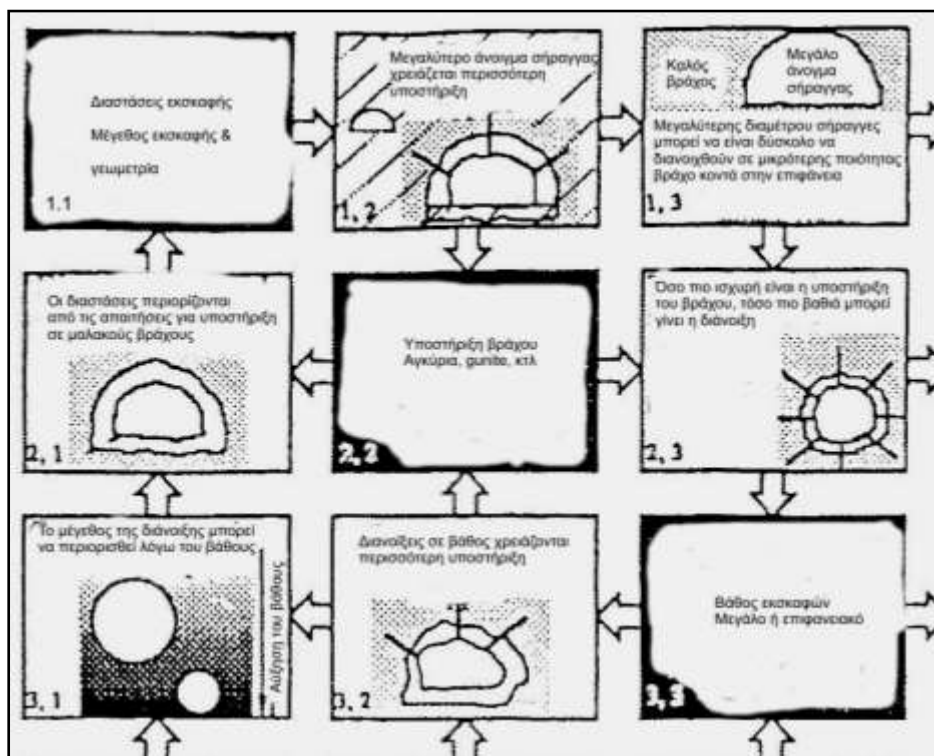
Στο πλαίσιο ανάπτυξης της μεθοδολογίας RES, ο Hudson και η ομάδα του στο Τμήμα Rock Engineering του Imperial College του Λονδίνου τη χρονική περίοδο 1991-1993, μελέτησαν και συγκέντρωσαν στοιχεία – παραμέτρους, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή μητρώου για πρανή και υπόγειες εκσκαφές. Δημιουργήθηκαν, λοιπόν, δύο άτλαντες επιλέγοντας τις κατάλληλες κύριες

διαγώνιες παραμέτρους για δεδομένες καταστάσεις γεωτεχνικού τύπου και έπειτα προσδιορίζοντας τις αλληλεπιδράσεις τους. Μητρώα που δεν χαρακτηρίζονται από λεπτομερή ανάλυση περιέχουν συγκεχυμένες πληροφορίες. Έτσι, για να ερευνηθεί ένα έργο με περισσότερη λεπτομέρεια, είναι απαραίτητο να αυξηθεί το μέγεθος του μητρώου και να γίνει επιλογή των κατάλληλων κύριων διαγώνιων παραμέτρων σύμφωνα με το τι καθορίζει η βραχώμαζα, το υπό κατασκευή έργο καθώς και η περιοχή στην οποία θα κατασκευασθεί αυτό (με γεωλογικά, τοπογραφικά κριτήρια και τις επί τόπου γεωμηχανικές συνθήκες).

Με βάση τα προαναφερθέντα ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να δημιουργηθεί ένα μητρώο (για πρανή), τέτοιο ώστε να συμπεριλάβει εκείνες τις βαθμονομημένες παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με κατολίσθηση, οι οποίες θα βοηθήσουν να γίνουν κατανοητοί οι μεταξύ τους μηχανισμοί αλληλεπίδρασης και κατ' επέκταση να συνδράμουν σημαντικά στην προσπάθεια της πρόγνωσης των αστοχιών των εδαφικών και βραχωδών πρανών, μέσω της δημιουργίας χαρτών - ζωνών κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility maps) και του προσδιορισμού του δείκτη αστάθειας. Το υπό μελέτη μητρώο θα μπορούσε να έχει την δομή που φαίνεται στα ακόλουθα αποσπάσματα (Σχήματα 3.7, 3.8) από δύο μητρώα διαστάσεων 12 X 12 (παραμέτρων) που η θεματολογία τους σχετίζεται με πρανές και υπόγεια εκσκαφή αντίστοιχα (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.7. Απόσπασμα από μητρώο διαστάσεων 12 X 12 αλληλεπιδράσεων ενός πρανούς (Hudson, 1992).



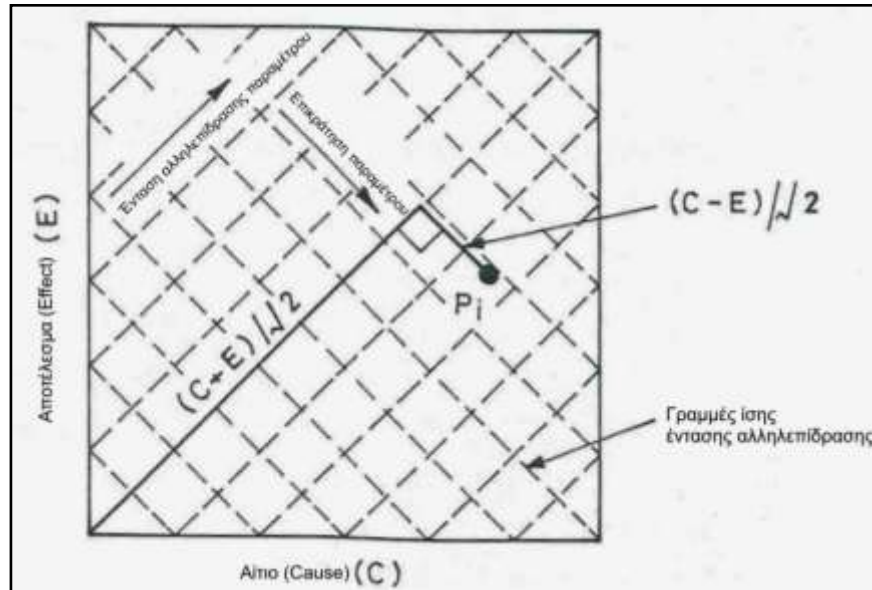
Σχήμα 3.8. Απόσπασμα από μητρώο διαστάσεων 12 X 12 αλληλεπιδράσεων μιας υπόγειας εκσκαφής (Hudson, 1992).

3.4. Παράμετροι αλληλεπίδρασης – Ένταση και επικράτηση

Μελετώντας την επιλογή των παραμέτρων της κύριας διαγωνίου καθώς και των σχετιζόμενων με αυτές μηχανισμών αλληλεπίδρασης προκύπτουν ερωτήματα σχετικά με το: α) αν όλες οι παράμετροι της κύριας διαγωνίου είναι της ίδιας σημασίας, β) πως επιλέγονται αυτές οι παράμετροι γνωρίζοντας το σκοπό τον οποίο εξυπηρετούν, γ) πως αναγνωρίζονται οι περισσότερο σημαντικές κύριες παράμετροι και δ) αν κάποια πληροφορία από το μητρώο κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας – ανάλυσης του μητρώου μπορεί να αγνοηθεί. Τα ερωτήματα αυτά μπορούν να απαντηθούν με την εισαγωγή μιας μεθοδολογίας που εξετάζει πόσο ισχυρή είναι μια επιλεγμένη παράμετρος και πόσο επηρεάζει ή όχι το σύστημα μέσα στο οποίο εξετάζεται (Hudson, 1992).

Κωδικοποιώντας τα επιμέρους στοιχεία του μητρώου αλληλεπίδρασης και αθροίζοντας τις τιμές (όπως περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω) σε κάθε γραμμή και κάθε στήλη για κάθε παράμετρο, δημιουργούνται συντεταγμένες αιτίου (Cause) και αποτελέσματος (Effect) που υποδηλώνουν το βαθμό της έντασης αλληλεπίδρασης (interaction intensity) και της επικράτησης (dominance) για κάθε

παράμετρο στο μητρώο (Σχήμα 3.9). Οι δύο αυτές χαρακτηριστικές έννοιες (ένταση, επικράτηση) θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης (Hudson, 1992).



Εικόνα 3.2. Άποψη από ορυχείο, σε πρανές του οποίου οι διακλάσεις του επηρεάζουν τη διαδικασία της έκρηξης (www.usgs.gov – Γεωλογική Υπηρεσία Η.Π.Α).

Θα πρέπει να τονισθεί ότι κάποιες παράμετροι θα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο σύστημα από ότι άλλες και παρόμοια με τη σειρά του το σύστημα θα έχει

μεγαλύτερη επίδραση σε κάποιες παραμέτρους από ότι σε άλλες. Για παράδειγμα, από την προηγούμενη Εικόνα 3.2 φαίνεται ότι οποιαδήποτε δραστηριότητα έργων πολιτικού μηχανικού συμβεί στη βραχώμαζα θα επηρεαστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό από το σύστημα των ασυνεχειών της αλλά και αντίστροφα το συγκεκριμένο σύστημα των ασυνεχειών θα επηρεαστεί από αυτή την ίδια την δραστηριότητα - κατασκευή. Επειδή, λοιπόν, κατά την διαδικασία επίλυσης ποικίλων προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής υπεισέρχονται ποιοτικές και το πιο σημαντικό υποκειμενικές παρατηρήσεις από τον εκάστοτε μελετητή, για να αντιμετωπισθεί αυτό το ζήτημα θα πρέπει να υπάρξει μια μέθοδος που να μεταφράζει αυτές τις παρατηρήσεις σε ποσοτική πληροφορία και αυτό επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση του μητρώου αλληλεπίδρασης καθώς και με τη μελέτη των εννοιών «ένταση αλληλεπίδρασης» και «επικράτησης».

3.4.1. Κωδικοποίηση του μητρώου αλληλεπίδρασης

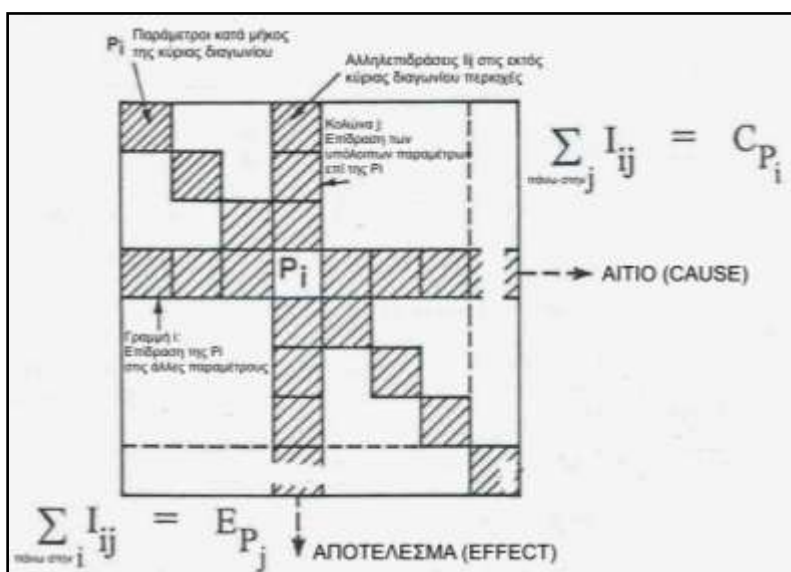
Το επόμενο βήμα μετά την κατασκευή του μοντέλου είναι η κωδικοποίηση των εκτός της κύριας διαγωνίου αλληλεπιδράσεων ώστε να εκφρασθεί η σημασία τους αλλά και να επιτρέψει τον μαθηματικό χειρισμό του μητρώου. Υπάρχουν πέντε κύριες μέθοδοι για να επιτευχθεί αυτή η κωδικοποίηση:

- α) η δυαδική (on – off ή 1 – 0): είτε ο μηχανισμός είναι ανοιχτός και λαμβάνει την τιμή ένα (1), είτε ο μηχανισμός είναι κλειστός και λαμβάνει την τιμή μηδέν (0).
- β) η ημι-ποσοτική (με αρίθμηση από 0 έως και 4: (i) 0 → καμία αλληλεπίδραση, (ii) 1 → αδύνατη αλληλεπίδραση, (iii) 2 → μέτρια αλληλεπίδραση, (iv) 3 → ισχυρή αλληλεπίδραση, (v) 4 → κρίσιμη αλληλεπίδραση.
- γ) η γραμμική συσχέτιση.
- δ) μερική διαφορική εξίσωση.
- ε) αριθμητική ανάλυση του μηχανισμού.

Με μεγάλη διαφορά, η περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση είναι η (β). Η πρώτη δεν οδηγεί σε διαφοροποίηση των παραμέτρων μεταξύ τους ενώ οι (γ), (δ) και (ε) σπάνια χρησιμοποιούνται. Με τη (β) παρέχεται μεγαλύτερος βαθμός ευαισθησίας και η βαθμονόμηση από μηδέν (0) έως και τέσσερα (4) μπορεί να προσδιορισθεί από ένα ή περισσότερα άτομα που σχετίζονται με το υπό εξέταση έργο, κατά προτίμηση μετά από απόφαση ομάδας πολλών ατόμων (Hudson, 1992).

3.4.2 Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος

Όπως προαναφέρθηκε, το άθροισμα των τιμών κωδικοποίησης σε κάθε γραμμή και κάθε στήλη για κάθε παράμετρο δημιουργεί τις συντεταγμένες του αιτίου και του αποτελέσματος. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται ότι η γραμμή που διαπερνά την παράμετρο P_i , αντιπροσωπεύει την επιρροή της συγκεκριμένης παραμέτρου σε όλες τις άλλες παραμέτρους του συστήματος. Αντίστροφα, η στήλη που διαπερνά την παράμετρο P_i αντιπροσωπεύει την επιρροή όλων των υπόλοιπων παραμέτρων στην παράμετρο P_i .

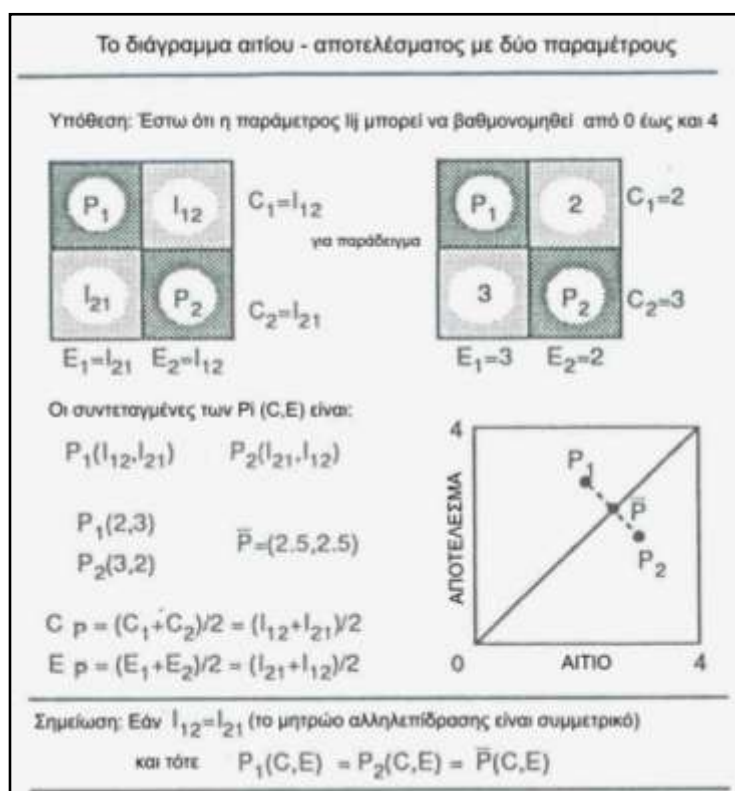


Σχήμα 3.10. Απεικόνιση του αθροίσματος των κωδικοποιημένων τιμών σε κάθε γραμμή και στήλη για τον υπολογισμό των τιμών αιτίου και αποτελέσματος (Hudson, 1992).

Από την στιγμή που το μητρώο αλληλεπίδρασης έχει κωδικοποιηθεί με την συγκεκριμένη διαβαθμισμένη κλίμακα (από 0 έως και 4), υπολογίζεται το άθροισμα της κάθε γραμμής και της κάθε στήλης αντίστοιχα και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να φανεί η επίδραση που έχει η παράμετρος P_i στο σύστημα με το να απεικονισθούν οι συντεταγμένες της παραμέτρου σε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων όπου στον άξονα των χ βρίσκονται οι τιμές που αντιστοιχούν στο αίτιο (cause) και στον άξονα των ψ κείτονται οι τιμές που αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα (effect). Να σημειωθεί ότι δεν κωδικοποιούνται με τιμές οι παράμετροι που βρίσκονται στην κύρια διαγώνιο, υποθέτοντας ότι η εκάστοτε παράμετρος δεν επηρεάζει τον εαυτό της, παρά μόνο επηρεάζεται μέσω άλλης παραμέτρου.

Ας θεωρηθεί ένα μητρώο με δύο παραμέτρους: α) η δράση του νερού και β) η κατασκευή μιας σήραγγας και το ακόλουθο Σχήμα 3.11. Οι αλληλεπιδράσεις που

προκύπτουν είναι ο τυχόν επηρεασμός της παρουσίας του νερού για την κατασκευή της σήραγγας (η κατασκευή δυσχεραίνεται πολύ όταν εμφανίζεται νερό) και η πιθανή επίδραση που έχει η σήραγγα στο υδρογεωλογικό καθεστώς του ευρύτερου περιβάλλοντός της. Αν το μητρώο αλληλεπίδρασης είναι συμμετρικό, οι παράμετροι θα βρίσκονται πάνω σε μια γραμμή όπου $C=E$ (όπως και γίνεται για το συγκεκριμένο παράδειγμα). Αν αντίθετα, το μητρώο δεν ήταν συμμετρικό, τότε οι παράμετροι δεν θα βρίσκονταν πάνω στη συγκεκριμένη γραμμή.



Σχήμα 3.11. Παράδειγμα διαγράμματος αίτιου – αποτελέσματος για δύο παραμέτρους (Hudson, 1992).

Με βάση τα παραπάνω:

- η παράμετρος με την μέγιστη ένταση αλληλεπίδρασης είναι αυτή στην οποία το άθροισμα C (Cause) + E (Effect) λαμβάνει την υψηλότερη τιμή,
- η παράμετρος με την ελάχιστη ένταση αλληλεπίδρασης είναι αυτή στην οποία το άθροισμα C+E λαμβάνει την ελάχιστη τιμή,
- η περισσότερο κυρίαρχη (επικρατέστερη) παράμετρος είναι αυτή στην οποία η διαφορά C-E λαμβάνει την υψηλότερη τιμή,

- η λιγότερο κυρίαρχη παράμετρος (δηλαδή εκείνη με την μικρότερη επίδραση για το όλο σύστημα) είναι αυτή στην οποία η διαφορά C-E λαμβάνει την ελάχιστη τιμή.

Στο παράδειγμα της Εικόνας 3.3 φαίνεται τμήμα από ένα μηχάνημα ολομέτωπης προσβολής (για την κατασκευή υπόγειου έργου), για την εύρυθμη λειτουργία του οποίου θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο να γνώριζε κανείς ποιες παράμετροι βραχομηχανικής και ποιες παράμετροι του μηχανήματος θα ήταν οι επικρατέστερες και μεγαλύτερης έντασης αλληλεπίδρασης. Θα ήταν, για παράδειγμα, σημαντικότερες οι συμπιεστικές δυνάμεις της βραχώμαζας, παρουσία των ασυνεχειών ή η ύπαρξη του νερού οι επικρατέστερες παράμετροι;



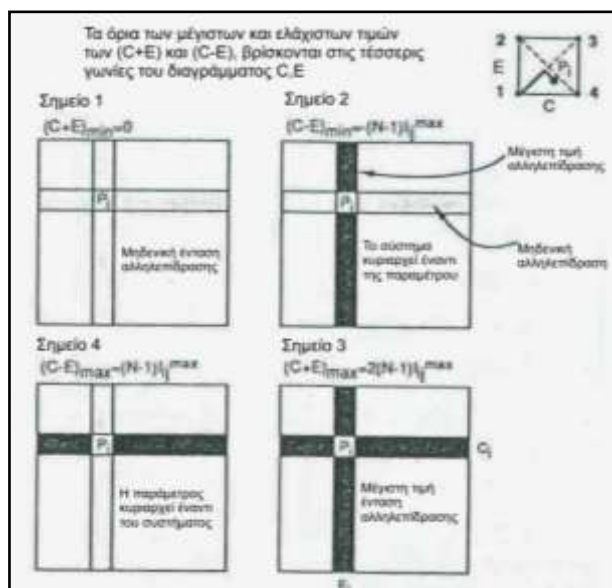
Εικόνα 3.3. Άποψη από μηχάνημα ολομέτωπης προσβολής (Μαρίνος, 2005).

Συνεπώς, δημιουργώντας ένα μητρώο αλληλεπίδρασης που συνδέεται με ένα συγκεκριμένο έργο, γεωλογικό σχηματισμό/ούς και τοποθεσία και κωδικοποιώντας το (δίνοντάς του, δηλαδή, τιμές από 0 έως και 4), έχει σχηματισθεί ένα σύνολο παραμέτρων από το οποίο διακρίνονται χαρακτηριστικά ποιές είναι οι περισσότερο επικρατέστερες και μεγαλύτερης έντασης. Από τη στιγμή, λοιπόν, που υπάρχει η διαθέσιμη πληροφορία, μπορεί να σχεδιασθεί πιο εύκολα το υπό εξέταση γεωτεχνικό πρόβλημα (για παράδειγμα, ο σχεδιασμός ενός πρσανούς) και συνεπώς ο μελετητής θα είναι σε καλύτερη θέση να γνωρίζει πώς η αλλαγή μιας παραμέτρου επηρεάζει τις υπόλοιπες.

Το διάγραμμα αίτιου – αποτελέσματος βοηθάει στην κατανόηση του ρόλου κάθε παράγοντα μέσα σε ένα έργο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ώστε να αποφασισθεί ποιες αλληλεπιδράσεις είναι ευεργετικές για το έργο και άρα μπορούν να ενισχυθούν και αντίθετα ποιές είναι επιζήμιες για το έργο ώστε να ελαχιστοποιηθεί

η δράση τους. Σε αυτή την περίπτωση, ο υπολογισμός του βαθμού της έντασης αλληλεπίδρασης, μέσω του αθροίσματος τιμών αιτίου και αποτελέσματος (C+E) είναι μια ένδειξη για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που μπορούν να ελεγχθούν, καθώς η διαφοροποίησή τους είναι πιθανόν να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο σύστημα (Mazzoccola and Hudson, 1996).

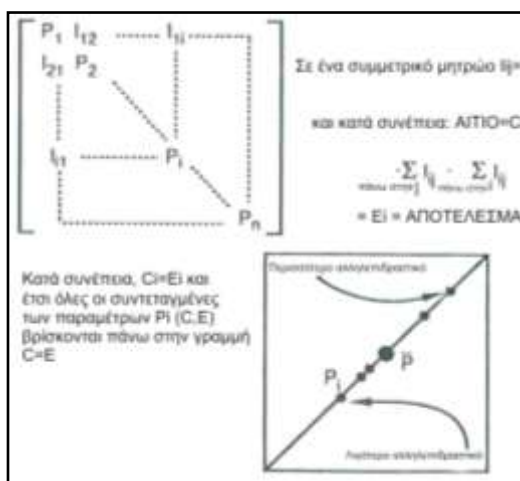
Στον προηγούμενο συλλογισμό μπορεί να προστεθεί, για να δειχθεί ακριβώς αυτή η αλληλοσυσχέτιση, το παράδειγμα του Σχήματος 3.12, στο οποίο απεικονίζονται οι ακραίες τιμές έντασης και επικράτησης που μπορεί να πάρει ένα έργο μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένα, στο πάνω αριστερά μητρώο, φαίνεται η περίπτωση όπου μια παράμετρος δεν έχει καθόλου αλληλεπίδραση, αφού η σχετική γραμμή και στήλη που την περιλαμβάνουν είναι κενές (δεν έχουν τιμές καθόλου). Αντίθετα, εκεί όπου υπάρχει μέγιστη αλληλεπίδραση είναι (στο κάτω δεξιά μητρώο) όταν οι σχετικές με την παράμετρο γραμμή και στήλη είναι συμπληρωμένες και μάλιστα έχουν και τη μέγιστη τιμή. Στην περίπτωση της έννοιας της επικράτησης, είτε το σύστημα θα επηρεάζει μια παράμετρο (πάνω δεξιά μητρώο), είτε η παράμετρος θα επηρεάζει το σύστημα (κάτω αριστερά μητρώο).



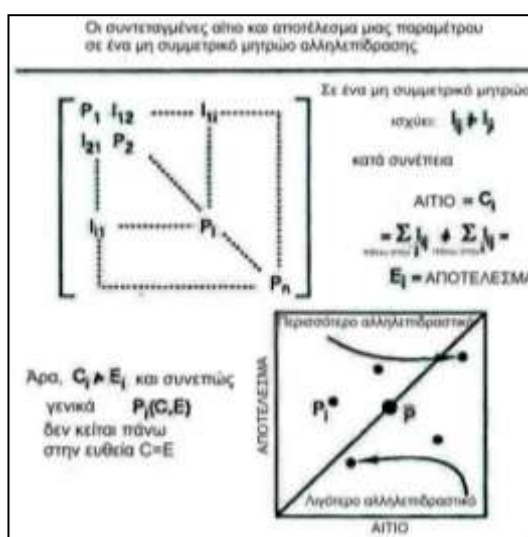
Σχήμα 3.12. Απεικόνιση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών των παραμέτρων ενός μητρώου και συσχέτισή τους με την ένταση αλληλεπίδρασης και κυριαρχίας (Hudson, 1992).

3.4.3. Η συμμετρία του μητρώου

Όταν όλες οι παράμετροι κείτονται πάνω στην γραμμή όπου $C=E$, τότε λαμβάνει χώρα η έννοια της έντασης αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση αυτή, η έννοια της επικράτησης δεν υπάρχει. Υπάρχει, μόνο, η έννοια της ισοδύναμης επίδρασης του αποτελέσματος των παραμέτρων στο σύστημα και της αντίστοιχης ίσης επίδρασης του αποτελέσματος του συστήματος στις παραμέτρους που το αποτελούν και αυτό συμβαίνει γιατί σε όλες τις περιπτώσεις οι συντεταγμένες (C, E) των παραμέτρων είναι ίσες (Σχήμα 3.13). Αντίθετα, στην περίπτωση ενός μη συμμετρικού μητρώου, οι συντεταγμένες των παραμέτρων (αίτιο, αποτέλεσμα) γενικά δεν θα βρίσκονται πάνω στη γραμμή όπου $C=E$, κάτι που κυρίως συμβαίνει στο χώρο της γεωτεχνικής μηχανικής (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.13. Απεικόνιση της έννοιας του συμμετρικού μητρώου (Hudson, 1992).

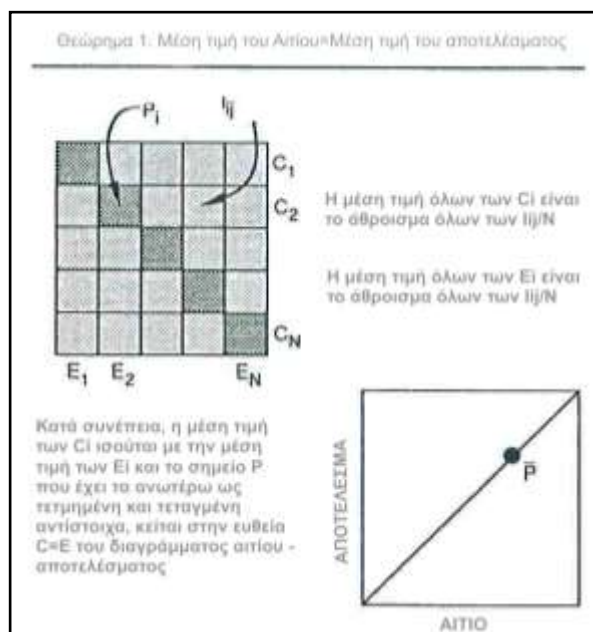


Σχήμα 3.14. Απεικόνιση της έννοιας του μη συμμετρικού μητρώου (Hudson, 1992).

3.4.4 Παρουσίαση του διαγράμματος αίτιου - αποτελέσματος

Η ένταση αλληλεπίδρασης μιας παραμέτρου μπορεί να μετρηθεί κατά μήκος της γραμμής όπου $C=E$ και αντίστοιχα το μέγεθος της επικράτησης μιας παραμέτρου μπορεί να υπολογισθεί από την κάθετη απόσταση του σημείου (με συντεταγμένες αίτιο – αποτέλεσμα) της εκάστοτε παραμέτρου από την γραμμή που αντιστοιχεί στο $C=E$. Ιδιαίτερα, είναι αξιοσημείωτο να επισημανθεί ότι ενώ η ένταση αλληλεπίδρασης μιας παραμέτρου αυξάνει μονότονα από το μηδέν έως τη μέγιστη τιμή της, η σχετιζόμενη μέγιστη τιμή της επικράτησης μιας παραμέτρου εκτείνεται από την τιμή μηδέν έως μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο 50% της πηγής έντασης αλληλεπίδρασης μιας παραμέτρου και μετά μειώνεται πάλι στο μηδέν όταν η τιμή της έντασης αλληλεπίδρασης παίρνει την μέγιστη τιμή. Οι παραπάνω έννοιες αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές τιμές $C+E/\sqrt{2}$ (τιμή που αντιστοιχεί στην ένταση αλληλεπίδρασης), $C-E/\sqrt{2}$ (τιμή που αντιστοιχεί στην επικράτηση). Τα προαναφερθέντα εκφράζονται αναλυτικά μέσω των ακόλουθων δύο θεωρημάτων.

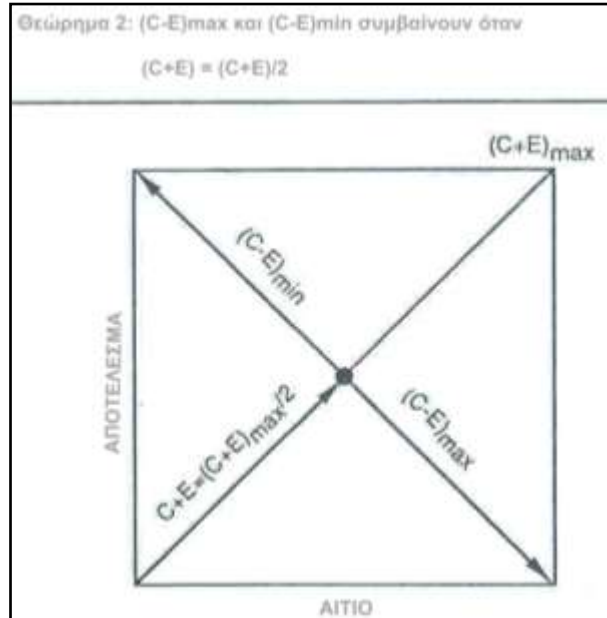
Θεώρημα 1: η μέση τιμή των αιτίων είναι ίση με τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων και συνεπώς η μέση τιμή όλων των παραμέτρων βρίσκεται πάνω στη γραμμή όπου $C=E$. Αυτό σημαίνει ότι αν κάτι επιχειρήσει να αλλάξει τη θέση μιας παραμέτρου στο διάγραμμα, τότε κάποια σημεία θα επηρεαστούν αλλά η μέση τιμή θα συνεχίσει να βρίσκεται πάνω στη γραμμή όπου $C=E$ (Σχήμα 3.15).



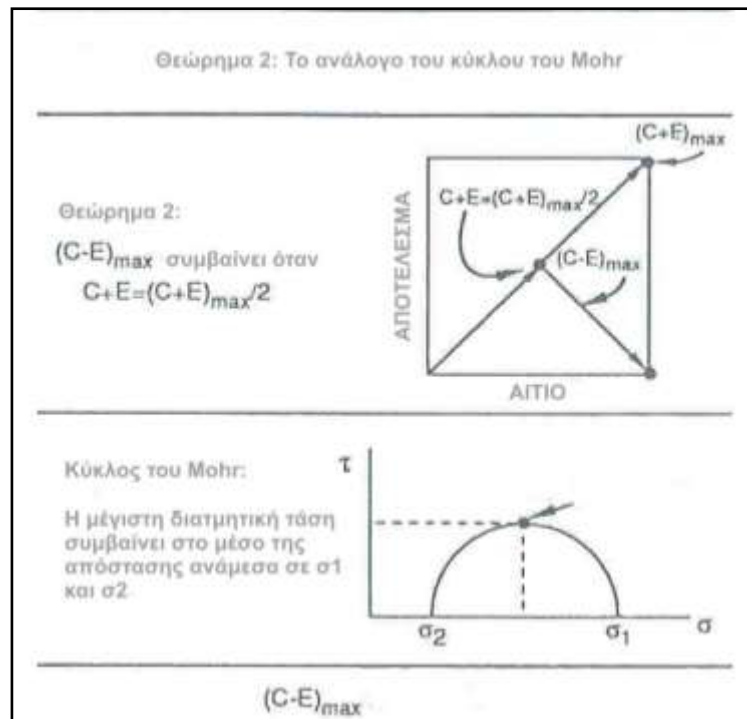
Σχήμα 3.15. Διάγραμμα θεωρήματος 1 (Hudson, 1992).

Θεώρημα 2: Η μέγιστη τιμή επικράτησης μιας παραμέτρου συμβαίνει όταν η συγκεκριμένη παράμετρος είναι 50% αλληλεπιδραστική (σχήμα 3.16).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα που εκφράζει το Θεώρημα 2 είναι αυτό της ανάλυσης των τάσεων όπου η μέγιστη διατμητική τάση συμβαίνει όταν βρίσκεται σε διεύθυνση 45° σε σχέση με τις δύο κύριες τάσεις σ_1 και σ_2 (Σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.16. Διάγραμμα θεωρήματος 2.



Σχήμα 3.17.

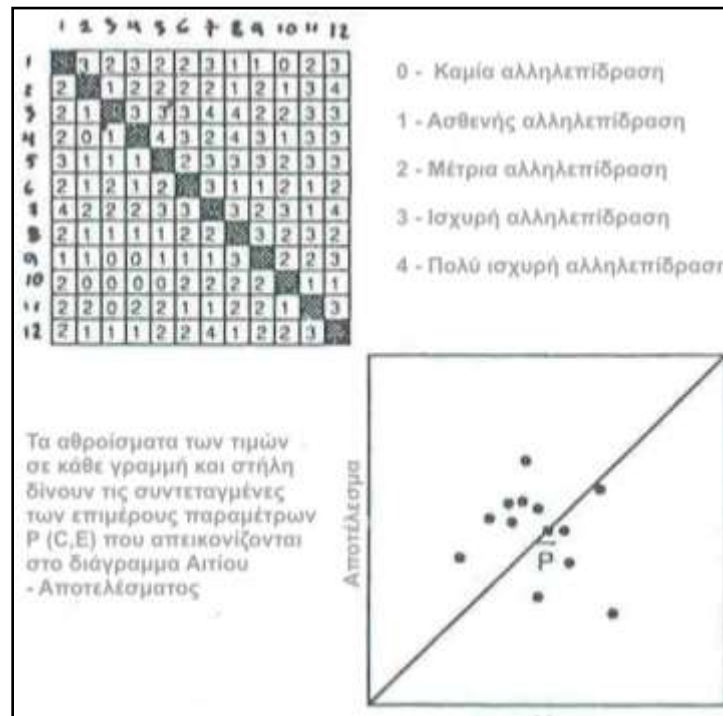
Μηχανικό ανάλογο του θεωρήματος 2 με τον κύκλο του Mohr, στο οποίο η διατμητική τάση μεγιστοποιείται στο μισό της απόστασης των σ_1 και σ_2 (Hudson, 1992).

Η διατμητική τάση αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στις κύριες τάσεις και παίρνει την μέγιστη τιμή όταν βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και μέγιστη κύρια τάση (σ_1 και σ_2).

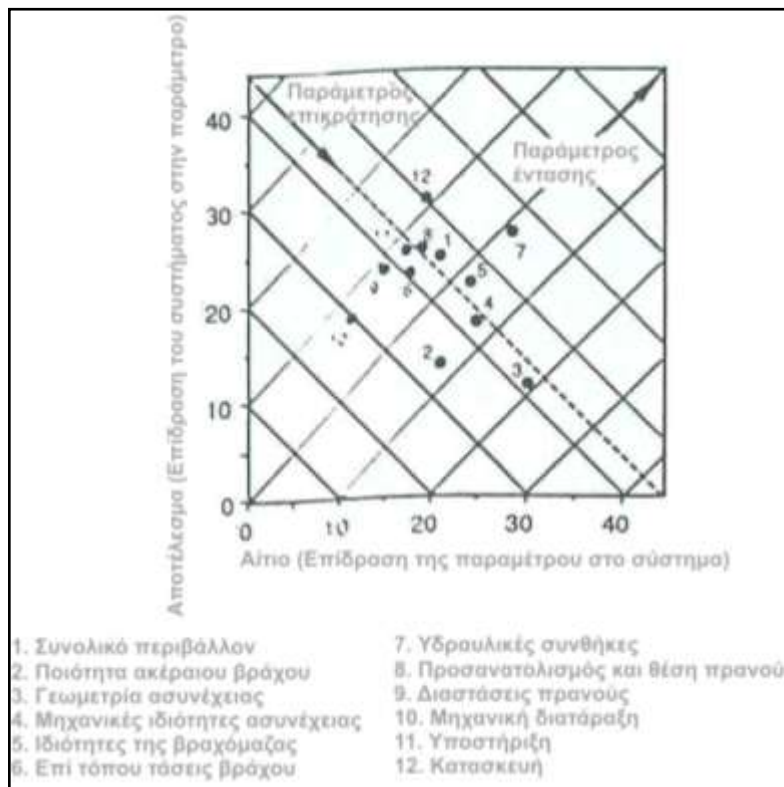
Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί με βάση τα δύο θεωρήματα, ότι κατά την κατασκευή ενός μητρώου αλληλεπίδρασης μπορεί να γίνει μια συγκέντρωση σημείων στο διάγραμμα αιτίου - αποτελέσματος κατά μήκος της γραμμής όπου $C=E$ ή μια συγκέντρωση σημείων κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης σε αυτήν όπου $C=E$. Έτσι, αν τα σημεία είναι διασκορπισμένα κατά μήκος της γραμμής $C=E$ αλλά πολύ κοντά σε αυτήν, τότε μπορούν να αξιολογηθούν σύμφωνα με την έννοια της έντασης αλληλεπίδρασης. Αν τα σημεία είναι διασκορπισμένα κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης σε αυτήν όπου $C=E$, τότε θα έχουν παρόμοιες τιμές έντασης αλληλεπίδρασης αλλά μεγάλες διαφορές στις τιμές επικράτησης.

3.5. Παραδείγματα εφαρμογής του μητρώου αλληλεπίδρασης

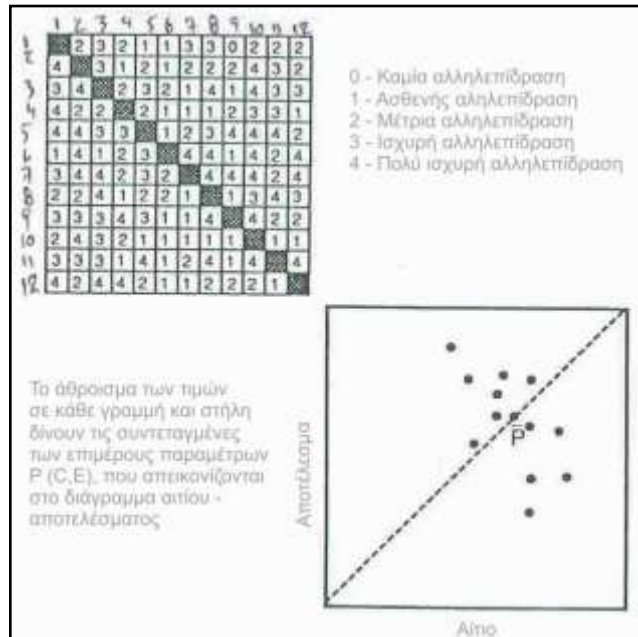
Με βάση το απόσπασμα από τον άτλαντα του Σχήματος 3.7 (για πρηνές) και το απόσπασμα από τον άτλαντα του Σχήματος 3.8 (για υπόγεια εκσκαφή), στα Σχήματα 3.18 και 3.20 απεικονίζονται αντίστοιχα (για 12 X 12 μητρώο) στο πάνω αριστερά τμήμα η κωδικοποίηση που έχει δοθεί (για αυτά τα έργα) με τιμές από 0 έως και 4 και στο κάτω δεξιά τμήμα φαίνεται ότι στο μεν Σχήμα 3.18, η μέση τιμή των παραμέτρων βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο του διαγράμματος, που υποδηλώνει ότι το μητρώο αλληλεπίδρασης (για βραχύδη πρηνή) αντιπροσωπεύει ένα σύστημα που είναι κατά 50% αλληλεπιδραστικό, στο δε Σχήμα 3.20, η μέση τιμή της έντασης αλληλεπίδρασης είναι υψηλότερη και η τιμή της παραμέτρου της επικράτησης έχει γίνει μεγαλύτερη. Στα Σχήματα 3.19 και 3.21 αναλύονται διεξοδικότερα τα σημεία του κάτω δεξιά τμήματος των Σχημάτων 3.18 και 3.20 αντίστοιχα με βάση τις έννοιες έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης.



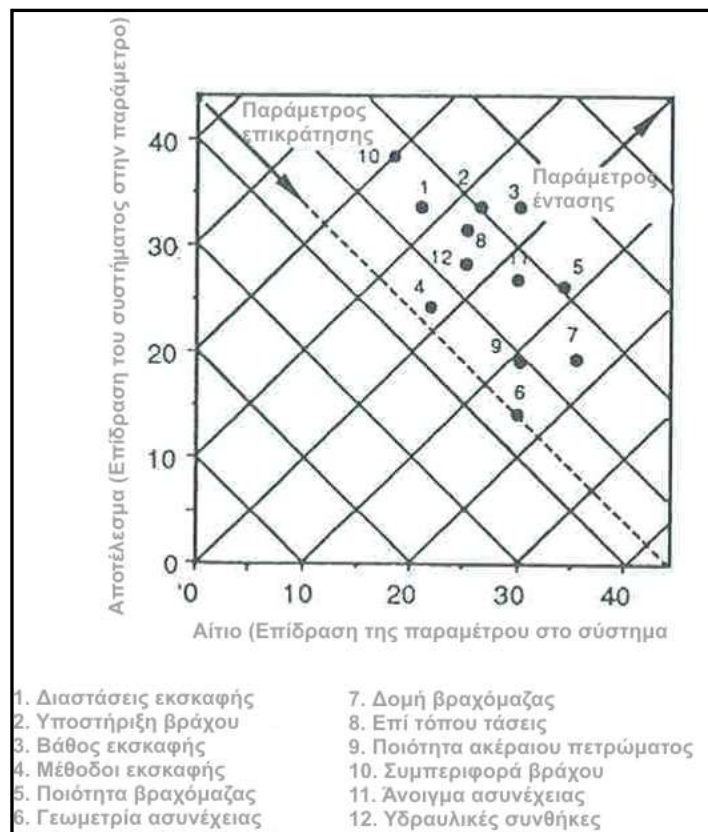
Σχήμα 3.18. Κωδικοποίηση τιμών για πρανές (πάνω αριστερά) και το αντίστοιχο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (κάτω δεξιά) (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.19. Αναλυτικό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος του σχήματος 3.18 (Hudson, 1992).



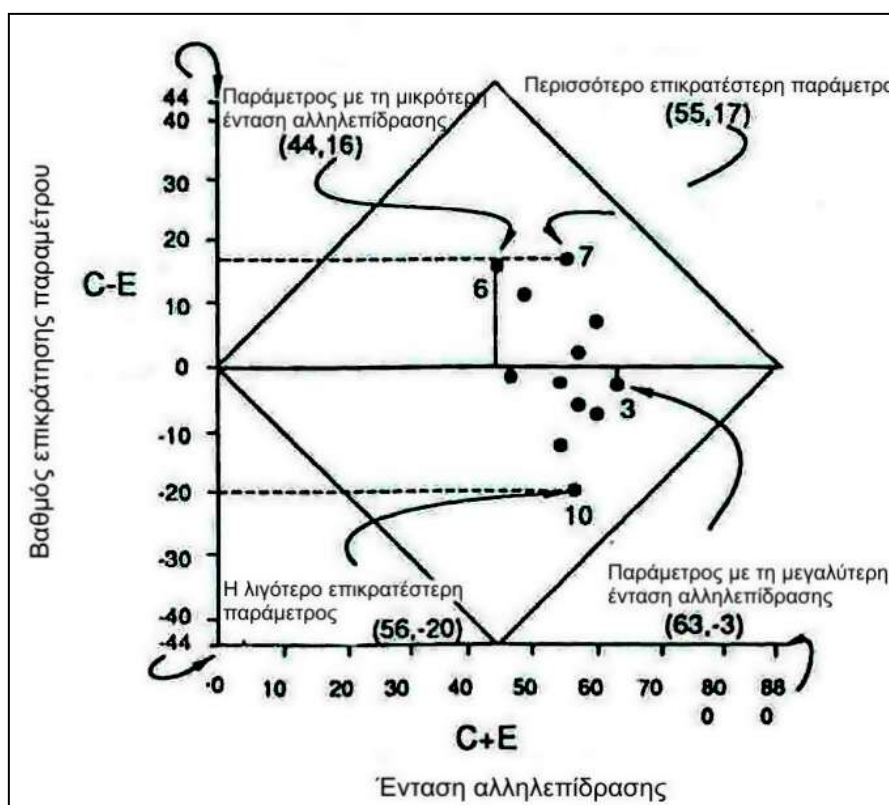
Σχήμα 3.20. Κωδικοποίηση τιμών για υπόγεια εκσκαφή (πάνω αριστερά) και το αντίστοιχο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (κάτω δεξιά) (Hudson, 1992).



Σχήμα 3.21. Αναλυτικό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος του σχήματος 3.20 (Hudson, 1992).

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζονται οι ίδιες πληροφορίες με το Σχήμα 3.21 μόνο που υπάρχει καλύτερη εικόνα αποτύπωσης της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επικράτηση. Οι τιμές C+E αντιπροσωπεύουν πόσο ενεργές είναι οι συγκεκριμένες παράμετροι μέσα στο μητρώο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή, τόσο πιο ενεργή είναι η παράμετρος.

Οι τιμές C-E αντιπροσωπεύουν το βαθμό επικράτησης μια παραμέτρου μέσα στο σύστημα. Έτσι, η μέγιστη θετική τιμή στο C-E αντιπροσωπεύει την επικρατέστερη παράμετρο, δηλαδή η παράμετρος επηρεάζει το σύστημα σε βαθμό μεγαλύτερο από ότι το σύστημα επηρεάζει την παράμετρο, ενώ η μέγιστη αρνητική τιμή αντιστοιχεί σε ήσσονος σημασίας παράμετρο. Δηλαδή το σύστημα επηρεάζει την παράμετρο περισσότερο από ότι η παράμετρος επηρεάζει το σύστημα.



Σχήμα 3.22. Αναλυτικότερη αποτύπωση των τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης του σχήματος 3.19β (Hudson, 1992).

Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αστάθειας πρυνών για να τονισθεί πώς ο γενικός άτλας για πρυνή μπορεί να κωδικοποιηθεί ανάλογα και με τον ή τους συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς, την συγκεκριμένη τοπογραφία καθώς και το συγκεκριμένο έργο όπου βρίσκεται το πρυνές και με αυτόν τον τρόπο να διευκολυνθεί η θεώρηση των μηχανισμών που μπορεί να ενεργοποιηθούν.

Έτσι, είτε άμεσα μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης είτε έμμεσα μέσω του διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος, μπορεί να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με την στρατηγική αντιμετώπισης των ζητημάτων που σχετίζονται με την αστάθεια των πρανών.

Σε όρυγμα του αυτοκινητόδρομου A-7 στη Βαλένθια της Ισπανίας δεν ενδιαφέρεται κανείς μόνο για την πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών των πρανών αλλά και για την μακρόχρονη διάρκεια ευστάθειάς των, δεδομένου ότι στην συγκεκριμένη περιοχή εμφανίζεται ένα ευκολοαποσάθρωτο ασβεστολιθικό υλικό (Hudson, 1992). Συνεπώς, η παράμετρος του είδους του βραχώδους υλικού, στο μητρώο αλληλεπίδρασης, θα πρέπει να έχει την επικρατέστερη θέση λόγω της παρουσίας καρστικών χαρακτηριστικών της ασβεστολιθικής βραχώμαζας και των υψηλής αποσαθρωσιμότητας χαρακτηριστικών της (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4. Άποψη από χαρακτηριστικό αμφίπλευρο όρυγμα κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου A-7 στα νότιο τμήμα της πόλης Βαλένθια (Ισπανία), (από www.geoengineer.org).

Στο παράδειγμα της επόμενης φωτογραφίας (Εικόνα 3.5) απεικονίζεται μια έκρηξη για την βελτίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός ορύγματος σε ένα ασταθή βραχώδη σχηματισμό (Hudson, 1992). Η επίδραση της κατασκευής στην ευστάθεια του ορύγματος είναι εξαιρετικής σημασίας και μάλιστα η δυνατότητα ευστάθειας εξαρτάται περισσότερο από τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας που λαμβάνουν χώρα μετά την κατασκευή παρά πριν από αυτή. Με αυτόν τον τρόπο εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι δύσκολο να καθοριστούν εξ' ολοκλήρου τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας πριν την έναρξη κατασκευής του τεχνικού έργου

για τον απλό λόγο ότι αυτά ενδεχομένως θα επηρεαστούν και από την κατασκευαστική διαδικασία.



Εικόνα 3.5. Στο βραχώδες πρανές της εικόνας, ο παράγοντας «έκρηξη - blasting» προκαλεί αλλαγές στην συμπεριφορά του βραχώδους υλικού του πρανούς και πιθανόν αστάθεια (από www.geoengineer.org).

Στις αστοχίες πρανών στη θέση Cucaracha, στο κανάλι του Παναμά αποδεικνύεται χαρακτηριστικότερα η έννοια της αλληλεπίδρασης (Εικόνα 3.6). Αυτό συμβαίνει γιατί η γεωμορφολογία – γεωλογία της περιοχής είναι έντονα πολύπλοκη δηλαδή εμφανίζονται βασαλτικοί σχηματισμοί υγιείς έως και εντελώς αποσαθρωμένοι (εδαφοποιημένοι). Επίσης, υπάρχει κυμαινόμενη στάθμη του νερού του καναλιού και έντονο το στοιχείο της βροχόπτωσης όπου το μετεωρικό νερό κατεισδύει μέσω των προϋπαρχουσών είτε των εν δυνάμει επιφανειών ολίσθησης της προαναφερθείσας βραχώμαζας. Επιπρόσθετα, η βραχώμαζα είναι ανομοιογενής και ανισότροπη έτσι ώστε οι μετρήσεις μετακινήσεων και πιεζομετρικής στάθμης να είναι δύσκολο να προσδιορισθούν. Συμπερασματικά, όλα τα παραπάνω υποδηλώνουν την, εξαιρετικά, ισχυρής φύσης αλληλεπίδραση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης περιοχής (Hudson, 1992).

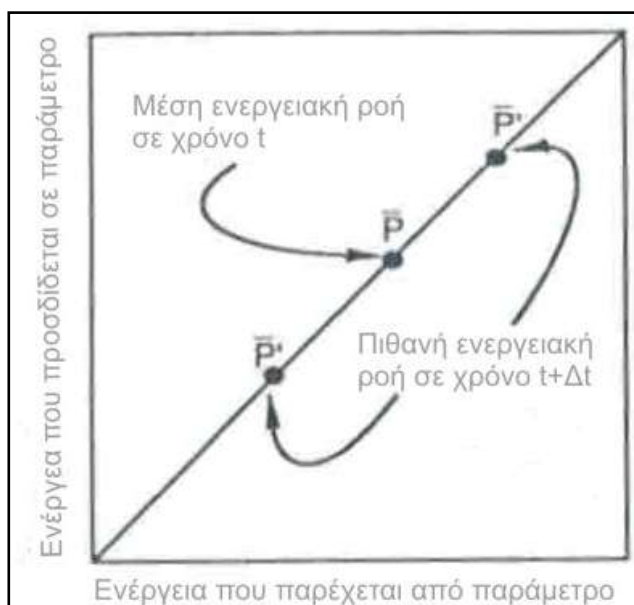


Εικόνα 3.6. Κατολίσθηση στην τοποθεσία Cucaracha στις όχθες του καναλιού του Παναμά το 1986 (προς το αριστερό τμήμα της φωτογραφίας βρίσκεται ο Ατλαντικός Ωκεανός και προς το δεξιό τμήμα είναι ο Ειρηνικός Ωκεανός), (από www.geoengineer.org).

Τα προηγούμενα τρία (3) παραδείγματα έχουν περιγραφεί με αυξανόμενο βαθμό αλληλεπίδρασης. Κάθε ένα από τα τρία παραδείγματα απεικονίζεται στο διάγραμμα αιτίου - αποτελέσματος με ένα σύνολο (νεφέλωμα) σημείων που αντιστοιχούν στην βαθμονόμηση των παραμέτρων του μητρώου αλληλεπίδρασης.

3.6. Ενέργεια και εντροπία

Εκφράζοντας όλους τους όρους της κύριας διαγωνίου του μητρώου αλληλεπίδρασης αλλά και αυτούς που δεν βρίσκονται σε αυτήν σε μονάδες ενέργειας, οι συντεταγμένες του αιτίου – αποτελέσματος μπορούν να υποδηλώσουν εάν μια παράμετρος παρέχει ή απορροφά ενέργεια (Σχήμα 3.23).

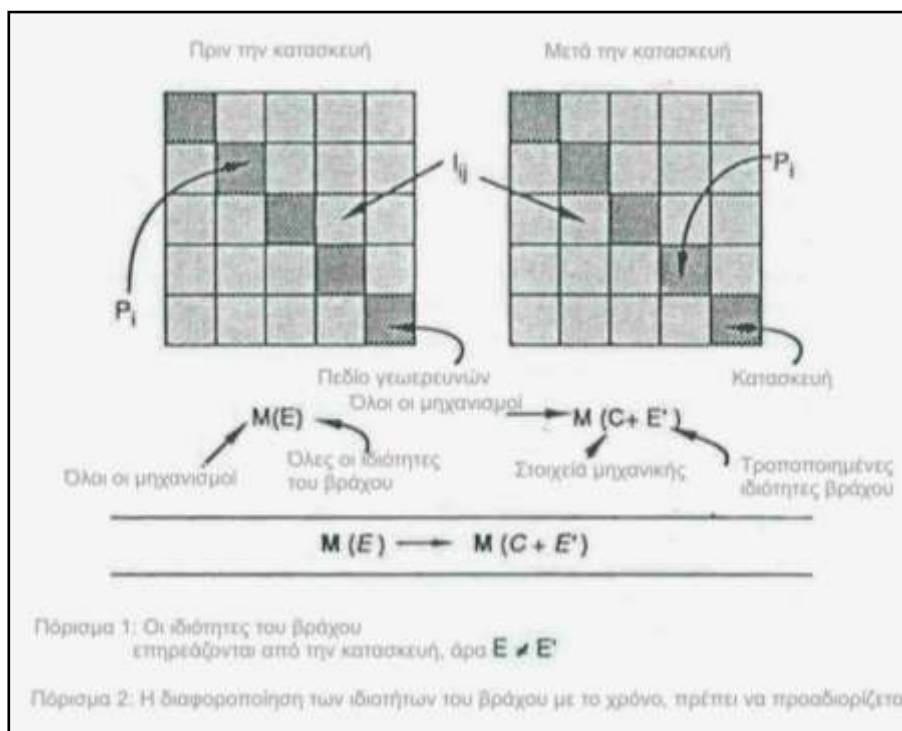


Σχήμα 3.23. Απεικόνιση ενέργειας – εντροπίας στο μητρώο αλληλεπίδρασης (Hudson, 1992).

Για παράδειγμα, η θεωρία του Griffith (η οποία τονίζει ότι λόγω της παρουσίας μικρορωγμών σε τεμάχιο άρρηκτου βράχου, αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κατά διεύθυνση κάθετη προς τον διαμήκη άξονα των ρωγμών αυτών) εξετάζει πως μια προϋπάρχουσα ρωγμή μπορεί επηρεάζοντας, όταν η απελευθερωμένη ενέργεια παραμόρφωσης είναι κατάλληλη, να παρέχει την ικανή ποσότητα ενέργειας σε μια βραχόμαζα για το ακόμα μεγαλύτερο άνοιγμα της ρωγμής.

3.6.1. Κωδικοποίηση του μητρώου αλληλεπίδρασης ενεργειακά

Το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να εξετασθεί και από την ενεργειακή σκοπιά. Δηλαδή, οι παράμετροι του μητρώου εκφράζονται με όρους ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιορισθεί ποιες παράμετροι θα αποτελέσουν πηγές ενέργειας και ποιες υποδοχείς ενέργειας. Το άθροισμα των τιμών των παραμέτρων σε μια γραμμή αντιστοιχεί στην ενέργεια που παρέχεται από μια κύρια παράμετρο του συστήματος. Παρόμοια, το άθροισμα των τιμών των παραμέτρων σε μια στήλη αντιπροσωπεύει την ενέργεια που προσδίδεται σε μια κύρια παράμετρο του συστήματος. Το παραπάνω θα μπορούσε να περιγραφεί σαν την ποσότητα ενέργειας που εκλύεται από μια βραχόμαζα και αντίστοιχα το ποσό της ενέργειας που διοχετεύεται στη βραχόμαζα. Η ουσιαστική ερμηνεία των προαναφερθέντων είναι ότι οι ιδιότητες μιας βραχόμαζας που ερευνώνται κατά την διάρκεια των εργασιών γεωτεχνικού πεδίου για την κατασκευή ενός έργου δεν είναι οι ίδιες με αυτές που χαρακτηρίζουν τη βραχόμαζα μετά την κατασκευή του εν λόγω έργου (Σχήμα 3.24).



Σχήμα 3.24. Σε ένα σύστημα, η ενέργεια πριν και μετά την κατασκευή ενός έργου (λόγω της έλευσης νέων παραμέτρων στο υπό μελέτη μητρώο) πρέπει να είναι η ίδια, όχι όμως και οι ιδιότητες της βραχόμαζας πριν και μετά την κατασκευή του συγκεκριμένου έργου (Hudson, 1992).

Πιθανόν, η διαπίστωση αυτή αποτελεί και μια από τις ερμηνείες που μπορούν να αποδοθούν, γενικά, για τις απρόβλεπτες γεωτεχνικές συνθήκες μιας περιοχής. Αυτό, βέβαια, δηλώνει την ανάγκη συνέχισης των εργασιών πεδίου (γεωτεχνικής – ενόργανης παρακολούθησης) κατά την διάρκεια κατασκευής αλλά και ύστερα από την ολοκλήρωση ενός έργου. Ειδικότερα, η ύπαρξη ενός ρήγματος κοντά σε ένα υπό μελέτη έργο θα πρέπει να συνεκτιμηθεί από τον μελετητή για να συμπεριλάβει στην κατασκευαστική διαδικασία και τις ιδιαιτερότητες που προσδίδει, ενδεχομένως, η παρουσία του ρήγματος στους γεωλογικούς σχηματισμούς που περιβάλλουν το υπό κατασκευή έργο και να μην χρησιμοποιήσει για την μελέτη - κατασκευή μόνο εκείνες τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στις ιδιότητες των γεωλογικών υλικών πριν την έναρξη των διαδικασιών της κατασκευής.

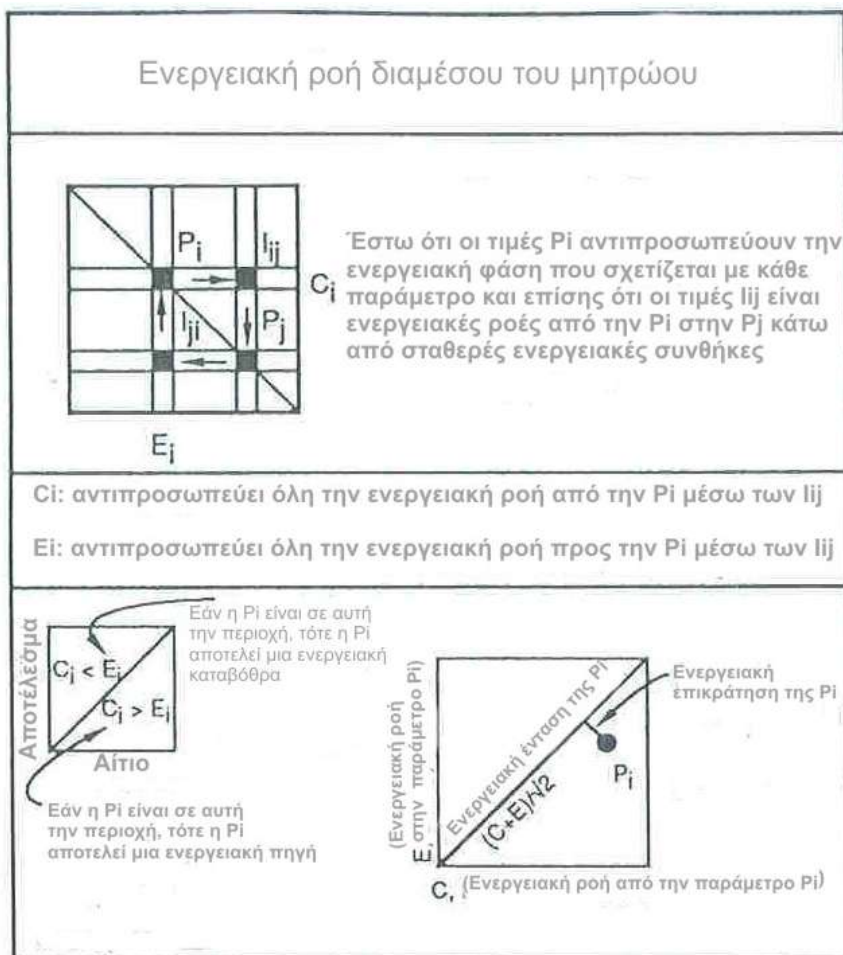
Ένα παράδειγμα για τα προηγούμενα αποτελεί η δράση ενός μηχανήματος ολομέτωπης προσβολής σε σήραγγα (στην περιοχή Demag) διαμέτρου πέντε μέτρων που κατασκευάστηκε για να συνδέσει δύο ποτάμια (Tyne και Tees) στην Μεγάλη Βρετανία (Hudson, 1992). Η διαδικασία αυτής της εκσκαφής ήταν να αλλάξει η κατανομή των προϋπαρχόντων μπλόκ (αυτών που είχαν προκύψει από τις φυσικές ασυνέχειες) της βραχόμαζας σε μικρότερου μεγέθους τεμάχια που σχηματίστηκαν από την διαδικασία της εκσκαφής. Ήταν γνωστό ότι οι ιδιότητες της υπό εκσκαφής βραχόμαζας είχαν αλλάξει λόγω της αλλαγής του μεγέθους της κατανομής αλλά προέκυψαν ερωτήματα όπως εάν η βραχόμαζα διατηρούσε τις ίδιες ιδιότητες και μετά την εκσκαφή, αν η αντοχή της βραχόμαζας παρέμεινε η ίδια ή αν η περατότητά της επίσης ήταν η ίδια. Όλα τα παραπάνω ερωτήματα προκύπτουν αν εξετάσει κανείς το μητρώο αλληλεπίδρασης μέσα από το πρίσμα της ενέργειας και της εντροπίας.

3.6.2 Ενεργειακές πηγές και καταβόθρες

Το ενεργειακό μοντέλο ανάλογο με αυτό που το μητρώο αλληλεπίδρασης παρουσιάζει, είναι εκείνο όπου οι τιμές ενέργειας σχετίζονται με τις παραμέτρους στην κύρια διαγώνιο και τα ενεργειακά κανάλια μέσω των οποίων αλλάζουν οι τιμές των παραμέτρων. Να σημειωθεί ότι το άθροισμα των όρων των γραμμών αντιπροσωπεύει όλη την ροή ενέργειας που παρέχει κάποια παράμετρος της κύριας διαγωνίου στο σύστημα και παρόμοια το άθροισμα των όρων των στηλών αντιπροσωπεύει τη ροή ενέργειας από το σύστημα σε μια παράμετρο της κύριας

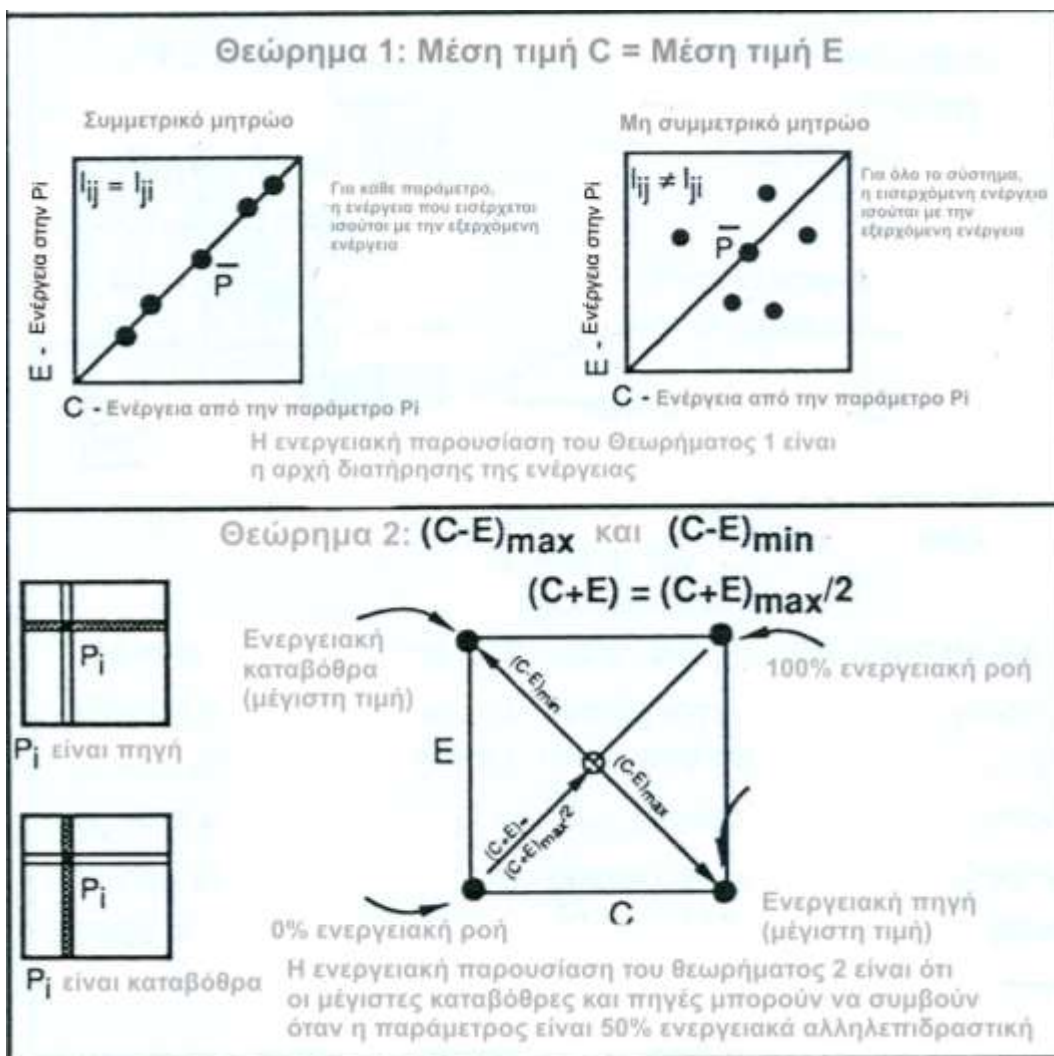
διαγωνίου. Στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος, τα παραπάνω ερμηνεύονται ως ακολούθως: αν $C > E$, τότε η παράμετρος ενεργεί σαν πηγή ενέργειας. Αν $C < E$, τότε η παράμετρος ενεργεί σαν καταβόθρα (Σχήμα 3.25).

Η ενεργειακή ερμηνεία των θεωρημάτων 1 & 2 (που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα) είναι η εξής: Για ένα συμμετρικό μητρώο για κάθε παράμετρο όση ενέργεια εισέρχεται ίση ενέργεια εξέρχεται. Προκύπτει, δηλαδή, η έννοια της διατήρησης της ενέργειας, όπου η μέση τιμή που προκύπτει από την πηγή ισούται με την μέση τιμή που προκύπτει από την καταβόθρα. Σε ένα μη συμμετρικό μητρώο για κάθε παράμετρο δεν ισχύει ότι όση ενέργεια εισέρχεται ισούται με όση ενέργεια εξέρχεται αλλά αθροίζοντας όλες τις παραμέτρους, το άθροισμα των τιμών της ενέργειας που παράγονται ισούται με το άθροισμα των τιμών της ενέργειας που απορροφώνται.



Σχήμα 3.25. Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για ένα κωδικοποιημένο μητρώο που υποδηλώνει, ενεργειακά, την ένταση αλληλεπίδρασης και επικράτησης (Hudson, 1992).

Τέλος, η μέση τιμή των παραμέτρων πρέπει να βρίσκεται πάνω στη γραμμή $C=E$ (θεώρημα 1). Το, δε, θεώρημα 2 από ενεργειακή σκοπιά αναφέρει ότι οι μέγιστες πηγές και καταβόθρες συμβαίνουν όταν μια παράμετρος είναι 50% ενεργειακά αλληλεπιδραστική (Σχήμα 3.26).



Σχήμα 3.26. Προσέγγιση των θεωρημάτων 1 και 2 από ενεργειακή σκοπιά (Hudson, 1992).

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι υπολογίζοντας τις συντεταγμένες των αιτίων – αποτελεσμάτων, ουσιαστικά, ισοδυναμεί με το να υπολογίζονται οι ενεργειακές ροές στο μητρώο. Ο τύπος της δραστηριότητας που θα λάβει χώρα στο πεδίο της γεωτεχνικής μηχανικής θα καθορίσει αν η βραχώμαζα θα απορροφήσει ή θα απελευθερώσει ενέργεια. Παράδειγμα κατασκευής που παρέχει ενέργεια είναι η σήραγγα που προαναφέρθηκε (περιοχή Demag), όπου η ενέργεια που απορροφάται στο στάδιο της κατασκευής είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που απελευθερώνεται.

Παράδειγμα κατασκευής που απορροφά ενέργεια θα μπορούσε να είναι αυτό που συμβαίνει κατά τη διαδικασία εξόρυξης, όπου το υπό διάνοιξη γεωλογικό υλικό διατρύεται και η βραχόμαζα επάνω από το υπό διάνοιξη υλικό υποχωρεί. Η ενέργεια που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση της βραχόμαζας χρησιμοποιείται για να σχηματισθούν ρωγμές και να αλλάξει η προϋπάρχουσα κατανομή των προϋπαρχόντων φυσικών βραχωδών μπλόκ σε μια κατανομή με μικρότερα μεγέθη βράχου. Με βάση αυτά, προκύπτει ότι η ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται από το βράχο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μιας υπόγειας εκσκαφής.

3.6.3. Διαδρομές ενεργειακών ροών

Για την περιγραφή των διαδρομών των ενεργειακών ροών χρησιμοποιείται από τον Hudson (1992) ένα παράδειγμα από ένα βραχώδες πρανές. Τι θα συνέβαινε αν ένα τέμαχος βραχόμαζας ενός πρανούς αποχωριζόταν από αυτό; Τρεις πιθανές περιπτώσεις θα μπορούσαν να προκύψουν: α) δεν θα συνέβαινε τίποτα, β) η μετακίνηση του συγκεκριμένου μπλόκ θα προκαλούσε περαιτέρω αστοχία, γ) ολόκληρο το πρανές θα κατέρρεε. Το ποιο από τα παραπάνω σενάρια θα αντιστοιχούσε στην έννοια της σταθερότητας εξαρτάται από την σκοπιά που το εξετάζει κανείς. Το πρώτο σενάριο είναι μια παρουσίαση της σταθερότητας από την σκοπιά της μηχανικής. Το τρίτο σενάριο είναι μια παρουσίαση της σταθερότητας από ενεργειακή σκοπιά, που θα οδηγούσε σε επανακαθορισμό της βραχόμαζας σε ένα περισσότερο σταθερό καθεστώς.

3.7. Η εφαρμογή της προσέγγισης του συστήματος RES

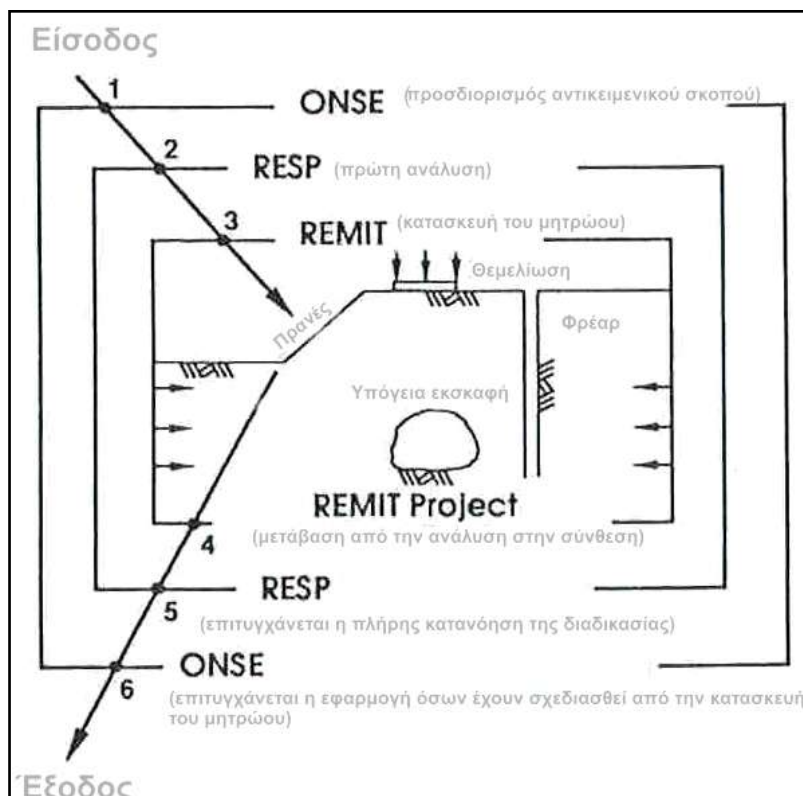
Κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας RES, υπάρχουν τρία αναλυτικά βήματα «από πάνω προς τα κάτω» και τρία βήματα σύνθεσης «από κάτω προς τα πάνω». Ωστόσο, το κρισιμότερο σημείο της εφαρμογής, είναι ο καθορισμός του αντικειμενικού σκοπού του έργου. Στο Σχήμα 3.27, απεικονίζονται τα τρία βήματα ανάλυσης και τα τρία βήματα σύνθεσης.

3.7.1. Η στρατηγική

Το πρώτο βασικό στοιχείο προσέγγισης της μεθοδολογίας είναι να προσδιορισθεί ο αντικειμενικός σκοπός της (**ONSE: objective – based network sequence evaluation**), έτσι ώστε να γνωρίζει κάποιος τι πρέπει να κάνει για να πετύχει

αυτόν τον σκοπό. Αυτό αποτελεί το πρώτο από τα έξι βήματα που πρέπει να γίνουν για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Το δεύτερο βήμα (**RESP: Rock engineering system performance**) είναι να γίνει μια πρώτη ανάλυση της συμπεριφοράς του Rock Engineering System και τι θα πρέπει αυτή να περιλαμβάνει. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μελέτης του μητρώου (generic matrix) που θα περιέχει τις περισσότερο σημαντικές παραμέτρους της κύριας διαγωνίου.



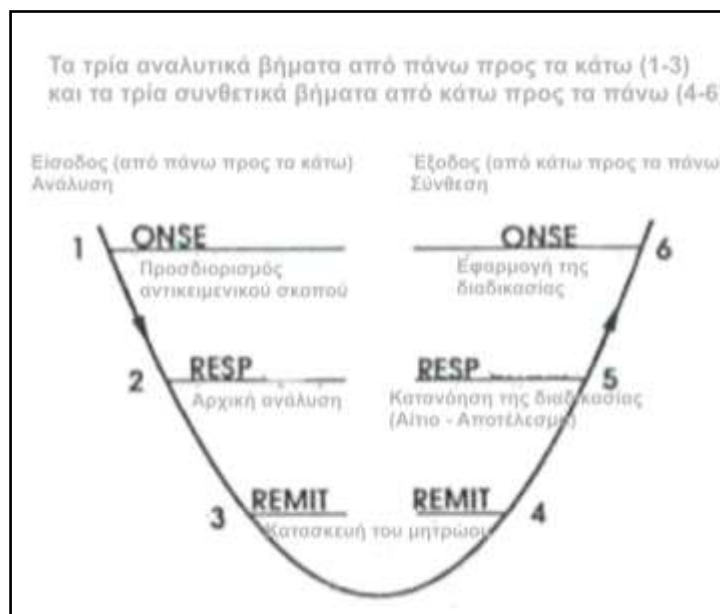
Σχήμα 3.27. Απεικόνιση εφαρμογής της μεθοδολογίας RES (Hudson, 1992).

Το τρίτο στάδιο (**REMIT: Rock engineering mechanisms information technology**) είναι το τελευταίο αναλυτικό βήμα και το πιο σημαντικό γιατί εδώ «κτίζεται» το μητρώο. Για παράδειγμα, αν είναι να μελετηθεί μια ανάλυση τάσεων, θα πρέπει να ερευνηθεί μέχρι ποιου σημείου θα χρειασθεί πληροφορία (από βιβλιογραφία, από συζητήσεις με ειδικούς) για την διαθεσιμότητα παραμέτρων σχετικά με την συμπλήρωση της κύριας διαγωνίου.

Αφού γίνουν τα τρία πρώτα βήματα, έχει γίνει εμβάθυνση στο πρόβλημα γιατί: α) έχει καθορισθεί ο αντικειμενικός σκοπός του θέματος, β) έχει κατ' αρχήν κατανοηθεί η διαδικασία του συστήματος και γ) έχουν αποφασισθεί και εκτελεσθεί

κάποιες από τις αναλύσεις που απαιτούνται για τις ανάγκες του έργου. Όπως φαίνεται, χαρακτηριστικά και στο προηγούμενο σχήμα (Σχήμα 3.27), η μέθοδος που περιγράφεται έως τώρα είναι εξ' ολοκλήρου γενική και συνεπώς η έννοια του έργου στο οποίο γενικά αναφερόμαστε συμπεριλαμβάνει μια θεμελίωση, ένα πρανές, ένα όρυγμα, μια υπόγεια εκσκαφή ή ακόμα και ένα συνδυασμό των προαναφερθέντων.

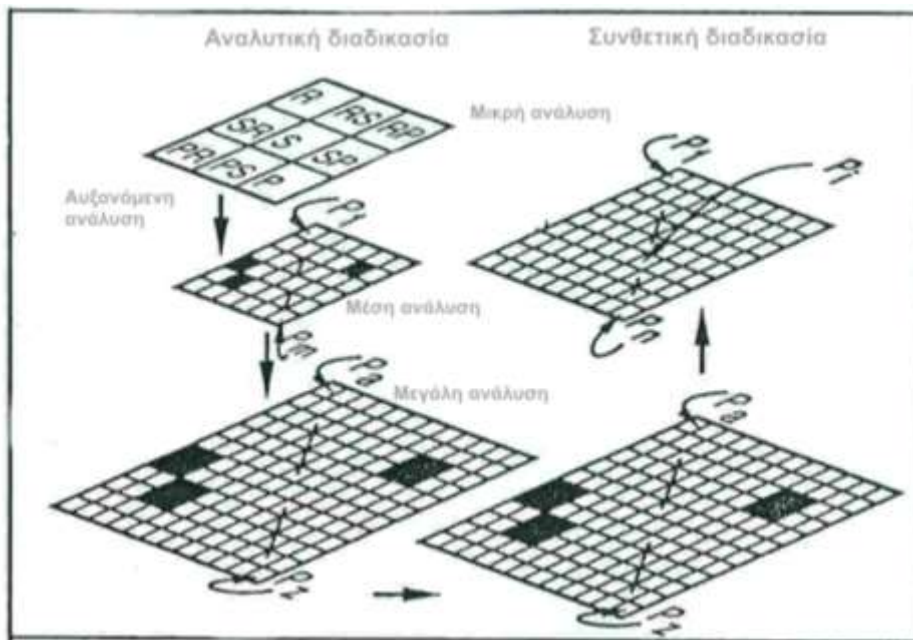
Μετά το τρίτο βήμα και σύμφωνα με το Σχήμα 3.27, το σκεπτικό της μεθοδολογίας διαφοροποιείται. Αφού, λοιπόν, οι παράμετροι του έργου έχουν προσδιορισθεί και το μητρώο που έχει κατασκευασθεί είναι προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις του έργου, η διαδικασία που έπεται είναι να γίνει μετάβαση από την ανάλυση στην σύνθεση, μέσω των βημάτων 4 (**REMIT**), 5 (**RESP**) και 6 (**ONSE**) [Σχήμα 3.28]. Στο 4^ο βήμα κατασκευάζεται η δομή της βάσης των στοιχείων που πρόκειται να υποστούν επεξεργασία στο μητρώο ενώ στο 5^ο βήμα επιτυγχάνεται η πλήρης κατανόηση της διαδικασίας (αίτιο – αποτέλεσμα), πάντα σχετιζόμενη και προσαρμοζόμενη με το έργο και τον σκοπό του, λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψη την πιθανότητα μη αποδεκτών διαδρομών (δυσμενών σεναρίων) μέσα στο μητρώο. Τέλος, το 6^ο βήμα είναι η εφαρμογή όσων έχουν μελετηθεί και σχεδιασθεί από την κατασκευή του μητρώου.



Σχήμα 3.28. Συνδυασμός ανάλυσης και σύνθεσης για την εφαρμογή της μεθοδολογίας RES (Hudson, 1992).

3.7.2. Η τακτική

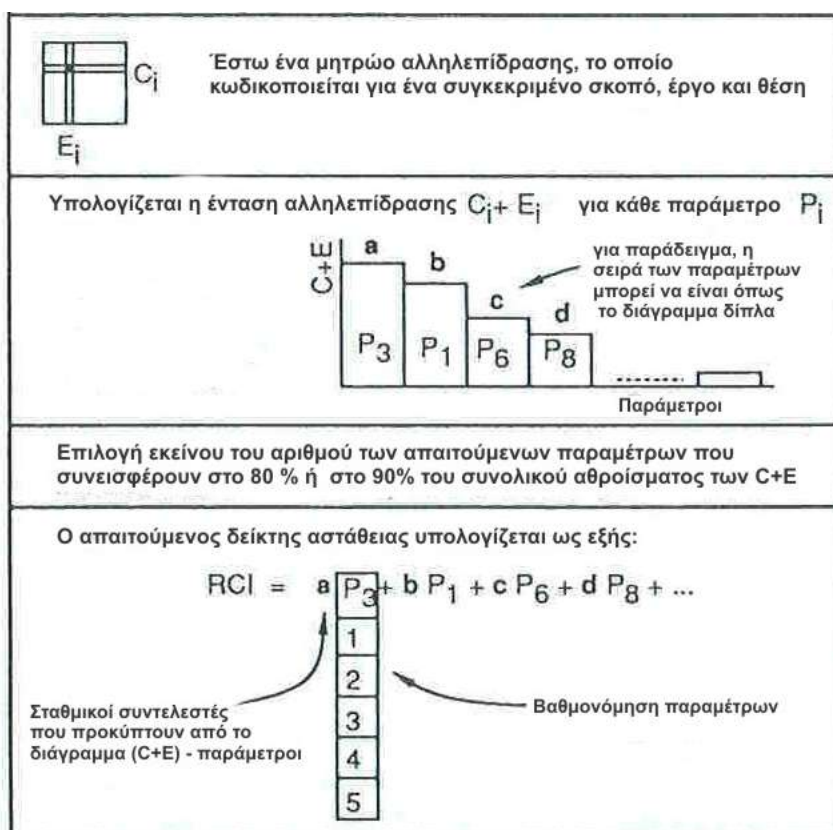
Το ερώτημα που προκύπτει είναι πως θα γνωρίζει ένας μελετητής ποιες παραμέτρους να χρησιμοποιήσει στην κύρια διαγώνιο του μητρώου αλληλεπίδρασης. Η διαδικασία για την επιλογή του κατάλληλου μητρώου για κάθε έργο είναι να επιλεχθούν εκείνες οι συγκεκριμένες παράμετροι που είναι οι σχετικές με τις ιδιότητες και τους μηχανισμούς του έργου και τους γεωλογικούς σχηματισμούς που το περιβάλλουν. Έτσι, ένα γενικού τύπου μητρώο που βασίζεται στις έννοιες γεωλογικός σχηματισμός, τοποθεσία και έργο, θα μετατραπεί σε ένα συγκεκριμένου τύπου μητρώο μέσω της διαδικασίας της επιλογής – διαλογής με αυστηρά κριτήρια εκείνων των παραμέτρων, οι οποίες θα συνθέσουν την εικόνα ενός μητρώου προσαρμοσμένου πλέον στις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου. Θα γίνει, δηλαδή, αύξηση της ανάλυσης των τριών προαναφερθέντων κύριων παραμέτρων σε επιμέρους χαρακτηριστικά (βλέπε το ενδιάμεσο στάδιο ανάλυσης από το P_1 στο P_m (Σχήμα 3.29) από τα οποία άλλα θα επιλεγούν και άλλα θα απορριφθούν (επειδή δεν θα σχετίζονται άμεσα με τον σκοπό του έργου), έτσι ώστε να προκύψει το καταλληλότερο για την περίπτωση μητρώο.



Σχήμα 3.29. Διαδικασία ιεράρχησης επί μέρους μητρώων από το γενικό στο ειδικό (Hudson, 1992).

Από αυτή την ανασύνθεση, θα προκύψει η δημιουργία ενός δείκτη αστάθειας (στα πλαίσια της λογικής των υπολοίπων γνωστών συστημάτων ταξινόμησης της

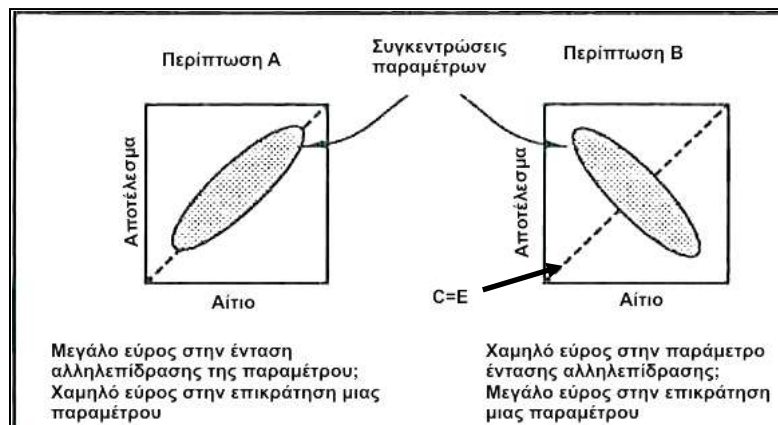
βραχώμαζας: Q, RMR, GSI) που θα συνδέεται με το συγκεκριμένο υπό μελέτη έργο (Σχήμα 3.30). Με την ανάπτυξη της μεθοδολογίας RES, προκύπτουν δύο ερωτήματα: α) πως προσαρμόζεται η συγκεκριμένη μεθοδολογία στις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου έργου, γεωλογικών υλικών και τοποθεσίας και β) κατά την ανάπτυξή της, πόσες παράμετροι θα απαιτηθούν (Σχήμα 3.31).



Σχήμα 3.30. Μεθοδολογία ανάπτυξης δείκτη αστάθειας που λαμβάνει υπόψη τον σκοπό του έργου και την ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων του μητρώου (Hudson, 1992).

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.30, ξεκινώντας από το γενικού τύπου μητρώο αρχίζει η κωδικοποίησή του σύμφωνα με τις απαιτήσεις – σκοπό του υπό μελέτη έργου. Η κωδικοποίηση θα γίνει με βάση την ένταση των αλληλεπιδράσεων των μηχανισμών ή με περισσότερο υποκειμενικά κριτήρια όπως αν η ενεργοποίηση των παραμέτρων εκτός της κύριας διαγωνίου είναι υπέρ ή κατά του έργου. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα ιστόγραμμα όπου απεικονίζεται το άθροισμα του αιτίου – αποτελέσματος σύμφωνα με την ένταση αλληλεπίδρασης της κάθε παραμέτρου και τελικά υπολογίζεται ο δείκτης αστάθειας (Instability Index), στον οποίο φαίνεται ότι οι συντελεστές που προηγούνται κάθε παραμέτρου προκύπτουν από τον υπολογισμό των επιμέρους αθροισμάτων για κάθε παράμετρο (C+E) και

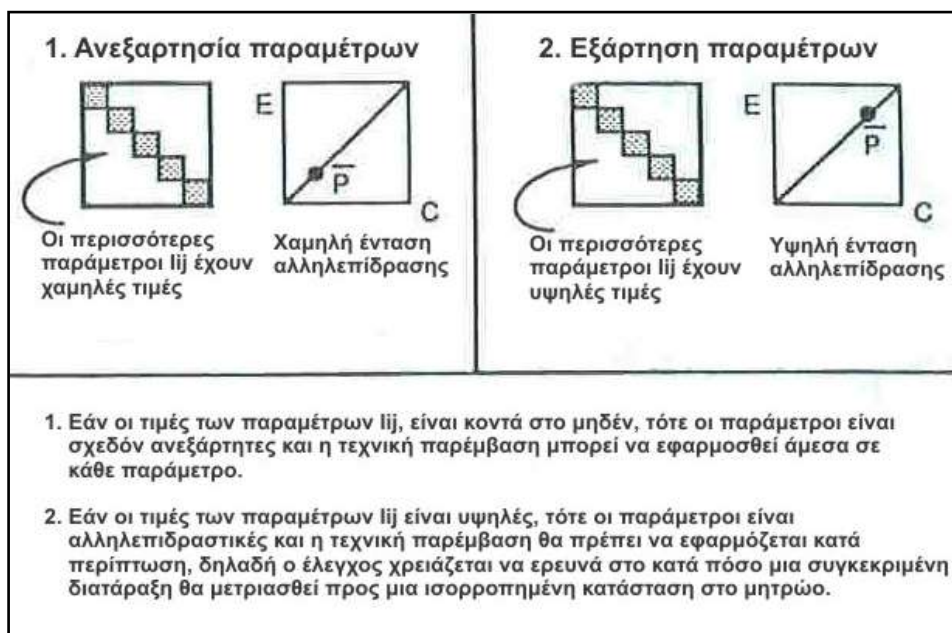
αυτό σημαίνει ότι κάθε παράμετρος είναι υπολογισμένη βάσει της έντασης αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 3.31. Ο αριθμός των παραμέτρων που απαιτούνται για μια ταξινόμηση εξαρτάται από τη συγκέντρωση του νέφους των συντεταγμένων των αιτίων – αποτελεσμάτων (Hudson, 1992).

Στο Σχήμα 3.31 απεικονίζεται πως ο αριθμός των παραμέτρων που θα απαιτηθούν για τη δημιουργία του υπό μελέτη συστήματος κατάταξης της βραχόμαζας θα εξαρτηθεί από το σχήμα του νέφους των συντεταγμένων του αιτίου – αποτελέσματος της κάθε παραμέτρου. Έτσι, στην περίπτωση Α του συγκεκριμένου σχήματος φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλο εύρος στην ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων, άρα λίγες κύριες παράμετροι θα είναι αρκετές για το σχηματισμό του μητρώου. Αντίθετα, στην περίπτωση Β, απεικονίζεται μικρό εύρος στην ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων, κάτι που σημαίνει ότι όλες οι παράμετροι πιθανόν να απαιτηθούν.

Τέλος, σύμφωνα και με τα προηγούμενα, αξίζει να παρατηρηθεί ότι από το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να καθορισθεί εάν ένα έργο θα ελέγχει τα γεωλογικά υλικά στα οποία εδράζεται ή αυτά θα ελέγχουν το έργο (Hudson, 1992). Αν, λοιπόν, η ένταση αλληλεπίδρασης του συστήματος είναι χαμηλή, τότε οι παράμετροι έχουν μεγάλο βαθμό ανεξαρτησίας και η τεχνική παρέμβαση μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε παράμετρο. Αντίθετα, όσο περισσότερο αλληλεπιδραστικό είναι το σύστημα, δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή (C+E), τόσο πιο μεγάλος ο δείκτης αστάθειας, δηλαδή τόσο πιο χαμηλή είναι, για παράδειγμα, η ευστάθεια ενός πρανούς γιατί υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα μια μικρή διαφοροποίηση σε μια παράμετρο να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος (Σχήμα 3.32).



Σχήμα 3.32. Τεχνική ενεργειακού ελέγχου και συσχέτισμός με την ένταση αλληλεπίδρασης των παραμέτρων ενός μητρώου (Hudson, 1992).

3.7.3. Μερικά επιπλέον σχόλια για την προτίμηση της μεθοδολογίας RES για την πρόγνωση αστοχιών πρανών

Επειδή οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις πρέπει να προσαρμόζονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς, στη θέση του έργου και στις επί τόπου γεωμηχανικές συνθήκες και πρακτικά αυτό δεν επιτυγχάνεται στο 100%, χρειάζεται να βρεθεί μια μεθοδολογία, στην οποία οι επιλεγμένες παράμετροι να μπορούν να ταιριάζουν κάθε φορά στις ανάγκες του υπό εξέταση τεχνικού έργου. Το μητρώο αλληλεπίδρασης, στο οποίο βασίζεται η μεθοδολογία RES, βοηθά στο να μην αγνοηθεί καμιά αλληλεπίδραση μεταξύ των επιλεγμένων κάθε φορά παραμέτρων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των πιών των παραμέτρων με ακρίβεια που απαιτεί μια ενδελεχή κατανόηση όλων των μηχανισμών αλληλεπιδράσεων. Αν και το RES δεν έχει εμπειρική βάση [παρ' όλο που κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι τριών ετών (1993-2016) επιχειρείται να αποκτηθεί μέσω δημοσιευμένων εργασιών], θα επιδιωχθεί με την παρούσα διατριβή να διαπιστωθεί με μια εμπειρική παρουσίαση της μεθοδολογίας από μελέτες περιπτώσεων σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, θέσεις και γεωμηχανικές συνθήκες, ότι η εν λόγω μεθοδολογία έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των ήδη υπάρχοντων συστημάτων, όπως τα ακόλουθα (Arnold, 1993):

- Βοηθά σε μια πρώτη γρήγορη ανάλυση για τον προσδιορισμό δείκτη αστάθειας σε μια εξεταζόμενη περιοχή.
- Το μητρώο παρέχει ένα βάρος για κάθε αλληλεπίδραση που προσδιορίζει την έντασή της για κάθε εξεταζόμενο πρρανές.
- Σε κάθε πρρανές υπολογίζονται το αίτιο και το αποτέλεσμα σαν το συνολικό άθροισμα των βαθμονομήσεων των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιλεγμένων, κάθε φορά, παραμέτρων. Αυτά οδηγούν στον υπολογισμό της έντασης και επικράτησης, οι οποίες επιτρέπουν, ουσιαστικά, μια αρχική εκτίμηση των κρίσιμων παραμέτρων ευστάθειας ενός πρρανούς και κατ' επέκταση των κύριων μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.
- Η βαθμονόμηση των πρρατών καθορίζεται από τον μέσο όρο των εντάσεων του διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος, το οποίο είναι ουσιαστικά συνάρτηση όλων των εντάσεων αλληλεπίδρασης και όχι μόνο το άθροισμα των ανεξάρτητων παραμέτρων, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά συστήματα ταξινόμησης.
- Είναι σημαντικό να ξεφύγει κάποιος από τη λογική χρήσης μιας αριθμητικής τιμής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός γεωλογικού σχηματισμού, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά συστήματα ταξινόμησης. Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως του ότι δείχνει την επίδραση μιας παραμέτρου στις άλλες παραμέτρους του συστήματος και επιπλέον την επίδραση του συστήματος στη συγκεκριμένη παράμετρο. Αυτό, δηλαδή, σημαίνει αλληλεπίδραση των επιλεγμένων παραμέτρων σε δύο διαστάσεις και επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό των παραμέτρων με την μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και επικράτησης.
- Μέσω του μητρώου αλληλεπίδρασης, γίνεται ανάλυση των σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος για το σύστημα κατολισθησης κάτι το οποίο δεν καθίσταται δυνατόν με άλλες γνωστές μεθόδους. Με το μητρώο ξεπερνιέται το πρόβλημα του υποκειμενικού προσδιορισμού των βαρών των παραμέτρων. Όπως είναι γνωστό μια κατολισθηση σπάνια συνδέεται με μια και μόνο αιτία. Το μεγάλο εμπόδιο στη μελέτη των κατολισθήσεων είναι η αναγνώριση όλων των παραγόντων που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου και κυρίως ο προσδιορισμός των μεταξύ τους σχέσεων, το οποίο σύμφωνα με τον Hudson (1992) επιλύεται μέσω της μεθοδολογίας

RES (Φερεντίνου, 2004). Κατά συνέπεια, προσεκτική συμπλήρωση του μητρώου αλληλεπίδρασης, αξιοποιεί με τον καλύτερο τρόπο την κρίση του ειδικού και τελικώς οι προκύπτοντες σταθμικοί συντελεστές εκφράζουν την μέγιστη δυνατή αντικειμενικότητα, η οποία μπορεί να αποκαλυφθεί από την υφιστάμενη εμπειρία (Tsangaratos and Rozos, 2013).

- Το μητρώο επεξεργάζεται τη συνδυασμένη επιρροή όλων των παραγόντων στο σύστημα και τη μεταξύ τους συσχέτιση, ξεπερνώντας τους περιορισμούς της στατιστικής ανάλυσης ανά δύο. Οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης προϋποθέτουν την σύνταξη χάρτη απογραφής υφιστάμενων κατολισθήσεων. Συνεπώς, έχουν εφαρμογή κατ' αρχήν σε περιοχές επιρρεπείς σε κατολισθήσεις. Η συνήθης τεχνική που ακολουθείται για επέκταση του μοντέλου και σε δυνητικά ασταθείς περιοχές είναι η μέθοδος της επέκτασης. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι εφικτός ο προσδιορισμός του κινδύνου ακόμα και σε περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει ιστορικό κατολισθήσεων (Φερεντίνου, 2004).
- Να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιλεγμένων παραμέτρων και κατ' επέκταση τις διαστάσεις του μητρώου αλληλεπίδρασης (Hudson, 2013).
- Επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας των τιμών των παραμέτρων με χρήση του μητρώου για μια εξεταζόμενη περιοχή από περισσότερους ειδικούς.
- Αναπτύσσεται μια διαδικασία που βοηθά τους γεωλόγους, μηχανικούς και ερευνητές να αποφασίζουν για ένα τεχνικό έργο τις κατάλληλες ιδιότητες των γεωλογικών υλικών που το περιβάλλουν, ποιές είναι σε προτεραιότητα, τις σχετικές οριακές συνθήκες και μηχανισμούς που ταιριάζουν σε αυτές, τις αλληλεπιδράσεις τους, ώστε η ακόλουθη διαδικασία των ερευνών υπαίθρου, της ανάλυσης των αποτελεσμάτων τους, του σχεδιασμού, της κατασκευής και της ενόργανης παρακολούθησης του τεχνικού έργου να πραγματοποιηθεί με τον βέλτιστο επιστημονικά και οικονομικά τρόπο.
- Η μεθοδολογία RES, είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα εργαλείο που να προειδοποιεί τον μελετητή για πιθανούς μηχανισμούς, τους οποίους ενδεχομένως (χωρίς το RES) να μην είναι δυνατόν να τους αντιληφθεί. Έτσι, η διατριβή διατυπώνει τη γνώμη ότι η μεθοδολογία του μητρώου

αλληλεπίδρασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αναρίθμητων παραμέτρων διαφορετικών γεωλογικών συνθηκών που συμμετέχουν σε μια αστοχία πρανούς. Σύμφωνα με τον Hudson (1992), ένα μητρώο μπορεί να αναλυθεί σε πολλά μικρότερα υπο – μητρώα, που σημαίνει ότι η μελέτη μιας περιοχής εξαρτάται από τον βαθμό ανάλυσης που θέλει ο μελετητής να ερευνήσει.

- Συνεπώς, το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος που προκύπτει από τη χρήση του μητρώου αλληλεπίδρασης μέσω του RES παρέχει την δυνατότητα στον μελετητή να καταλάβει τον ρόλο κάθε μιας επιλεγμένης παραμέτρου σε ένα τεχνικό έργο και μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη πηγή πληροφόρησης κατά το στάδιο λήψης απόφασης. Όσο, λοιπόν, περισσότερο αλληλεπιδραστικό είναι το εξεταζόμενο σύστημα, τόσο μικρότερη θα είναι η ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς, γιατί θα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα μια μικρή αλλαγή σε μια παράμετρο να επηρεάσει σημαντικά την συμπεριφορά του όλου συστήματος (Hudson, 1992).

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι: *«είναι προφανές ότι το περιγραφόμενο έως εδώ πλαίσιο, δεν μπορεί να αντικαταστήσει την ανάγκη έρευνας των επί τόπου συνθηκών, επιτρέπει όμως την πολύ χρήσιμη προσέγγιση του σχεδιασμού από τα πρώτα στάδια και οδηγεί την γεωέρευνα στις σωστές κατευθύνσεις για τη συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών»* (Μαρίνος Β., 2007).

Η αναλυτικότερη παρουσίαση και ανάλυση των προαναφερθέντων (με βάση την μεθοδολογία RES) καθώς και η επεξήγηση του τρόπου υπολογισμού του δείκτη αστάθειας (ή δείκτη επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση), θα επιχειρηθεί να εφαρμοσθεί σε τέσσερα χαρακτηριστικά και ιστορικά κατολισθητικά συμβάντα από τον Ελληνικό χώρο, η παρουσίαση των οποίων δίνεται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ RES

4.1. Εισαγωγή

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της Γεωτεχνικής Μηχανικής που έχει να αντιμετωπίσει τόσο ο γεωλόγος όσο και ο γεωτεχνικός μηχανικός, ιδιαίτερα σε μεγάλα τεχνικά έργα, είναι να εξασφαλίσουν ότι φυσικά ή τεχνητά πρηνή δεν θα αστοχήσουν μερικώς ή ολικώς από τυχόν εξωτερικές φυσικές ή ανθρώπινες επιδράσεις.

Για την εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου σπάνια είναι ικανή η παρουσία ενός και μόνου παράγοντα. Συνήθως, απαιτείται η συνύπαρξη πολλών παραγόντων που έχουν σχέση τόσο με τις γεωλογικές, γεωτεχνικές, γεωμορφολογικές και περιβαλλοντολογικές συνθήκες όσο και με τις ανθρώπινες παρεμβάσεις και δραστηριότητες. Η παρουσία των παραγόντων αυτών έχει σαν επακόλουθο τη δραστική μείωση της ευστάθειας των πρηνών. Κατά συνέπεια, η γνώση των παραγόντων που δημιουργούν οριακές συνθήκες για την κατάσταση ισορροπίας στα πρηνή είναι πρωταρχικής σημασίας.

4.2. Επιλογή παραμέτρων

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει και επεξηγεί αναλυτικά εκείνες τις παραμέτρους με τις οποίες γίνεται η επεξεργασία του μητρώου αλληλεπίδρασης, το οποίο στηρίζεται στη μεθοδολογία του Rock Engineering System (Hudson, 1992). Οι παράμετροι έχουν προκύψει μετά από εξαντλητική αναζήτηση και αξιολόγηση τεράστιου όγκου δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από:

- άρθρα – έρευνες που παρουσιάστηκαν σε Πανελλήνια συνέδρια Γεωτεχνικής Μηχανικής, σε αντίστοιχα συνέδρια της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας και σε επιστημονικά περιοδικά [για παράδειγμα, Ορυκτός Πλούτος, περιοδικό Τεχνικής Γεωλογίας (Bulletin of Engineering Geology and the Environment) της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG), Engineering Geology, Landslides, Natural Hazards, κ.α.],
- το Διαδίκτυο, μέσω του οποίου έχουν αναζητηθεί και μελετηθεί πολλά δημοσιευμένα άρθρα της Ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με γεωλογικά – γεωτεχνικά θέματα στο ευρύτερο αντικείμενο της αστάθειας πρηνών,

- το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ Αθήνας και Παράρτημα ΙΓΜΕ Τρίπολης),
- τη Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιΐας καθώς και το Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) του πρώην Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (νυν Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών),
- την Κοινοπραξία ALPINE – ΤΕΡΝΑ (υπεύθυνη για την αποκατάσταση της Νέας Εθνικής Οδού Κόρινθος – Τρίπολη – Καλαμάτα στο ύψος της Τσακώνας).

Επιπρόσθετα, έχουν μελετηθεί τα παραδοτέα δύο, ήδη, ολοκληρωμένων σημαντικών ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων, τα οποία σχετίζονται με την κατολισθητική επικινδυνότητα και είναι τα ακόλουθα:

α) **SAFELAND (2009-2012)**, στα πλαίσια του 7^{ου} Προγράμματος – Πλαισίου για την έρευνα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και ειδικότερα για τους Φυσικούς Κινδύνους με θέμα: “ Living with landslide risk in Europe”. Πρόκειται για ένα μεγάλο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα στο οποίο συμμετείχαν είκοσι επτά φορείς (πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα) από δώδεκα ευρωπαϊκές χώρες και τις Κίνα, Ινδία, Η.Π.Α., Ιαπωνία και Hong Kong.

β) **LESSLOSS (2004-2007)**, στα πλαίσια του 6^{ου} Προγράμματος – Πλαισίου για την έρευνα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και ειδικότερο θέμα: “Risk mitigation for earthquakes and landslides”. Πρόκειται για ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα που βασίσθηκε στην ενεργή συμμετοχή 46 Ευρωπαϊκών φορέων από τον ακαδημαϊκό χώρο και τον τομέα των επιχειρήσεων.

Αξίζει να επισημανθεί ότι, όσον αφορά το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα SAFELAND, ο γράφων (στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής) συμμετείχε σε σεμινάρια – διαλέξεις και παρουσιάσεις που έλαβαν χώρα σε Διεθνές Σχολείο με την επωνυμία LARAM School (**L**andslide **R**isk **A**ssessment and **M**itigation) για υποψήφιους διδάκτορες από διάφορα διεθνή Πανεπιστήμια – Πολυτεχνεία. Οι δραστηριότητες αυτές πραγματοποιήθηκαν στην πόλη Salerno της Ιταλίας υπό την εποπτεία του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου της ομώνυμης πόλης και είχαν ως βασική θεματολογία την εκτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας και τα μέτρα αντιμετώπισής της (ένα μέρος των διαλέξεων αφορούσε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα SAFELAND).

Για την επιλογή των παραμέτρων, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων, γίνεται με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών γενικά, δεν υπάρχουν ούτε πρότυπα (αποδεκτά παγκοσμίως) κριτήρια, ούτε οδηγίες – κατευθύνσεις για τον τρόπο επιλογής ανεξάρτητων κατολισθητικών παραμέτρων. Η πλειοψηφία των ερευνών – μελετών συναξιολογεί τις παρακάτω διαπιστώσεις - παρατηρήσεις (Ayalew et al., 2004, Ayalew and Yamagishi, 2005, Μποτσιαλάς, 2007) σχετικά με τον τρόπο επιλογής των παραμέτρων κατολισθησιμότητας:

- Την ποιότητα και ποσότητα των δεδομένων που είναι διαθέσιμα.
- Την λειτουργικότητα της παραμέτρου. Το χαρακτηριστικό αυτό απορρέει από την «συγγένεια» της παραμέτρου με την εκδήλωση των αστοχιών.
- Την χωρική συνέχεια της κάθε παραμέτρου. Το κριτήριο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό από την στιγμή που επιχειρείται να διευκρινισθεί η επίδραση της κάθε παραμέτρου στην εκδήλωση αστοχιών σε κλίμακα περιοχής. Επιπρόσθετα, τα τοπικά γεωλογικά – γεωμηχανικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής παίζουν σημαντικό ρόλο για την επιλογή των παραμέτρων. Εάν, μια εν δυνάμει παράμετρος (για παράδειγμα η σεισμική επικινδυνότητα ή η βροχόπτωση) που επρόκειτο να ληφθεί υπόψη, είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος, είναι σκόπιμο να μην θεωρηθεί κρίσιμος παράγοντας για την ζωνοποίηση.
- Την χωρική ανομοιογένεια της παραμέτρου. Η αξιόπιστη χωρική αποτύπωση κάθε παραμέτρου, απαιτεί εκτός από την χωρική της συνέχεια και τον απαιτούμενο βαθμό ανομοιογένειας. Η ορθή μοντελοποίηση των φυσικών παραμέτρων, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συλλογή δεδομένων, των οποίων οι αριθμητικές τιμές πρέπει να καλύπτουν το μεγαλύτερο δυνατό φάσμα μέσα στο οποίο κυμαίνεται η κάθε παράμετρος. Σε περίπτωση που αυτό δεν επιτυγχάνεται, τότε το συνεπαγόμενο σφάλμα μεταφέρεται και στο τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης.
- Την μετρησιμότητα της κάθε παραμέτρου, δηλαδή τη δυνατότητα απόδοσης αριθμητικών τιμών (έμμεσα ή άμεσα) σε κάθε παράμετρο.
- Την ποιοτική υφή της επίδρασης της παραμέτρου, δηλαδή την «ουσιαστική» επίδραση της κάθε παραμέτρου στην εκδήλωση των αστοχιών.

- Τα αποτελέσματα μιας ανεξάρτητης παραμέτρου δεν θα πρέπει να υπολογίζονται διπλά στο τελικό αποτέλεσμα.
- Μια παράμετρος θα πρέπει να αντιπροσωπεύει όλη την περιοχή ενδιαφέροντος,
- Η επιλεγμένη ανεξάρτητη παράμετρος θα πρέπει να έχει συγκεκριμένο βαθμό προτίμησης με την εξαρτημένη μεταβλητή (παρουσία ή απουσία αστοχιών πρηνών).

Με βάση τις προηγούμενες παρατηρήσεις θα πρέπει να επισημανθούν ακόμα και τα ακόλουθα:

Η παράμετρος της σεισμικότητας αν και είναι σημαντική για την κάθε εξεταζόμενη περιοχή μελέτης και γενικά κρίσιμη για την κατολισθητική επικινδυνότητα δεν λήφθηκε υπόψη στην παρούσα έρευνα γιατί για την κάθε μελετούμενη περιοχή δεν διαφοροποιούταν η τιμή της αλλά παρέμενε σταθερή σε όλη την περιοχή που επηρεαζόταν από την αστοχία και συνεπώς η κάθε κατολίσθηση δεν χαρακτηριζόταν από διαφορετικές τιμές / κλάσεις σχετικά με την σεισμικότητα.

Επίσης, δεν λήφθηκε υπόψη η παράμετρος της ιστορικότητας αν και υπάρχουν παλαιότερα κατολισθητικά φαινόμενα από αυτά που θα περιγραφούν στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους (1971, 1995, 2003) για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιοχές (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα, Νεμέα). Ο λόγος για τον οποίο δεν θα χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη παράμετρος στα αντίστοιχα μητρώα αλληλεπίδρασης είναι ότι δεν προέκυψαν αναφορές για την ιστορικότητα αστοχιών πρηνών για αρκετές από τις θέσεις του Γεωλογικού φύλλου “Μεγαλόπολη” που θα χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Επίσης, η ιστορικότητα δεν ελήφθη υπόψη γιατί άλλωστε, αυτή είναι τελικά και πρακτικά η χρησιμότητα του RES. Να μπορεί να προγνώσει δυνητική αστοχία σε ένα μέρος, στο οποίο ποτέ στο παρελθόν δεν έχει εκδηλωθεί κατολίσθηση.

Παρ’ όλα αυτά, αξίζει να επισημανθούν κάποια σημεία περί της ιστορικότητας των κατολισθήσεων. Η παράμετρος αυτή (με ήδη υπάρχουσες – καταγεγραμμένες αστοχίες) σε μια εξεταζόμενη περιοχή ενδιαφέροντος είναι πολύ σημαντική γιατί όταν συμβαίνει επαναδραστηριοποίηση ενός ήδη διαταραγμένου γεωλογικού υλικού σε προκαθορισμένες ή μη επιφάνειες επηρεάζεται η ευστάθεια των πρηνών και η έναρξη των κατολισθήσεων μειώνοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά των

μαζών με κάτω όριο τις τιμές που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή (Zaruba and Mencl, 1969).

Εξ' άλλου, σύμφωνα με τον Varnes (1984), τα πιο σημαντικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη στην ζωνοποίηση κατολισθήσεων είναι η παρουσία ή η απουσία προηγούμενων κατολισθήσεων. Και αυτό γιατί οι ενδείξεις προηγούμενων αστοχιών είναι συχνά ο καλύτερος οδηγός για την μελλοντική συμπεριφορά μιας ζώνης σε πιθανή κατολίσθηση. Παραδείγματα ενδείξεων προηγούμενων αστοχιών αποτελούν:

- η χαμηλή αντοχή,
- η μικρή κλίση της επιφάνειας του εδάφους,
- η παρουσία αργών αλλά σταθερών μετακινήσεων,
- η μεγάλη έκταση χαλαρών υλικών και η εμφάνιση νησίδων από έντονα σχιστοποιημένους και αποσαθρωμένους, τοπικά αργιλοποιημένους, σχιστόλιθους,
- η μεγάλη διασπορά των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των επιφανειών σχιστότητας που προσδιορίζονται μέσα στις «νησίδες βράχου» και αυτών που προσδιορίζονται στην περιβάλλουσα, μη μετακινημένη βραχομάζα,
- η παρουσία φαινομένων κάμψης στους κορμούς των δένδρων.

Επιπλέον, η παρουσία προηγούμενων ασταθειών σε μια εξεταζόμενη περιοχή από τη μια πλευρά δηλώνει ότι η ιστορικότητα παλαιότερων αστοχιών θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για την ανάλυση της κατολισθητικής επικινδυνότητας και από την άλλη προσδιορίζει ότι ένας κρίσιμος συνδυασμός παραγόντων που οδήγησε σε αστοχίες πρηνών είναι πιθανόν να συνδυασθεί ξανά για την πρόκληση νέων κατολισθήσεων (Mazzoccola and Hudson 1996).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και μικρής κλίμακας αστοχίες μπορεί να λειτουργήσουν ως μάρτυρες – ενδείξεις πιθανών αστοχιών σε μεγαλύτερες κλίμακες, οπότε η ανάλυσή τους είναι πάντα χρήσιμη για την κατανόηση της διαδικασίας. Από την σκοπιά της γεωτεχνικής μηχανικής, προηγούμενες αστοχίες μπορούν να επηρεάσουν τη βραχομάζα καθώς συντελούν στον σχηματισμό ήδη διατμημένων επιφανειών στα όρια της παραμένουσας αντοχής (Mazzoccola and Hudson 1996). Οι διαταράξεις, δε, που προκαλούνται από μια αστοχία πρηνούς, συχνά οδηγούν σε εξασθένηση γειτονικών περιοχών, ιδιαίτερα στην περιοχή της

στέψης με τη δημιουργία ρωγμών που μειώνουν την διατμητική ή την εφελκυστική αντοχή και επιτρέπουν την είσοδο του νερού (Varnes, 1984).

Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό σε όλες τις μελέτες ευστάθειας πρανών, να διερευνάται η τυχόν διάκριση μεταξύ πρώτης φοράς εκδήλωσης αστοχίας σε προηγουμένως σταθερό έδαφος και αστοχιών σε ήδη προϋπάρχουσες διατμητικές επιφάνειες (Skempton and Hutchinson 1969).

Στις επιλεγμένες παραμέτρους των μητρώων αλληλεπίδρασης των τεσσάρων περιοχών της διατριβής, λαμβάνεται έμμεσα υπόψη ο παράγοντας της ιστορικότητας με την έννοια ότι γίνεται απομείωση των πιμών των αλληλεπιδράσεων κάποιων επιλεγμένων παραμέτρων λόγω της ύπαρξης παλαιού κατολισθαίνοντος υλικού (που λαμβάνεται υπόψη στην παράμετρο της λιθολογίας), το οποίο αλληλεπιδρά με αυτές.

Επίσης, δεν λήφθηκε υπόψη για την εφαρμογή της μεθοδολογίας RES, η παράμετρος χρήσεις γης/κάλυψης γης (land use/land cover) με το σκεπτικό ότι γενικά δεν θεωρείται στατικός παράγοντας. Τα δεδομένα για τις χρήσεις γης θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες εκείνες που επικρατούν όταν συμβαίνει μια κατολίσθηση και όχι εκείνες που προκύπτουν μετά την αστοχία. Συχνά, συμβαίνει, πρόσφατοι χάρτες χρήσεων γης να συνδυάζονται με χάρτες απογραφής κατολισθήσεων ιστορικών περιόδων, δηλαδή να λαμβάνονται υπόψη όλες οι κατολισθήσεις που έχουν συμβεί στην εξεταζόμενη περιοχή ανεξαρτήτως χρονολογίας εκδήλωσής τους (Corominas and Mavrouli, 2011). Καθώς, λοιπόν, για πολλές από τις κατολισθήσεις που έχουν συμβεί στην περιοχή επικύρωσης της μεθοδολογίας RES (Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη”), η χρονική συσχέτιση των αστοχιών και των δεδομένων χρήσεων γης της αντίστοιχης χρονικής περιόδου δεν είναι γνωστή, αποφασίσθηκε να μην ληφθεί υπόψη η παράμετρος αυτή (χρήσεις γης) στην εκτίμηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας.

Με βάση, λοιπόν, τα προαναφερθέντα, η επιλογή των συγκεκριμένων παραμέτρων βασίσθηκε στη διαθεσιμότητα επαρκών δεδομένων για την κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης και την πολύτιμη εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων στον Ελληνικό χώρο.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι με βάση τα αποτελέσματα ερευνών που συνδέονται με την ζωνοποίηση της κατολισθητικής επικινδυνότητας από διάφορους ερευνητές (Uromehy and MahdaviFar, 1999) ανάλογα με την κλίμακα

ζωνοποίησης και τα δεδομένα της εκάστοτε υπό μελέτη περιοχής (σε επίπεδο μικρής κλίμακας) ή πρανούς (σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας), οι παράγοντες-παράμετροι μπορεί να είναι διαφορετικοί και να δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο ένα μητρώο προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις της κατά περίπτωση μελετούμενης περιοχής. Πάνω σε αυτό, συμπληρωματικά, ο Hudson (1992) επισημαίνει ότι ένα μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί σε πολλά μικρότερα υπο – μητρώα, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η μελέτη μιας υπό εξέταση περιοχής εξαρτάται από τον βαθμό ανάλυσης που μπορεί κάθε φορά να πραγματοποιηθεί. Από την έρευνα, λοιπόν, συγκέντρωση, μελέτη, ανάλυση και αξιολόγηση των συγκεντρωθέντων στοιχείων, εκτιμήθηκε ότι οι σημαντικότερες γεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι που συντελούν στη διαμόρφωση του συγκεκριμένου μητρώου για το θέμα της διατριβής είναι οι ακόλουθες:

- ανθρώπινη δραστηριότητα (με ειδική αναφορά στην έννοια «απόσταση από δρόμους»)
- τεκτονικό καθεστώς
- κλίση πρανών
- προσανατολισμός πρανών
- λιθολογία
- υδρογεωλογικές συνθήκες
- υδρομετεωρολογικές συνθήκες (κυρίως βροχόπτωση)
- πάχος μανδύα αποσάθρωσης
- απόσταση από ποτάμια
- απόσταση από τεκτονικά στοιχεία

Στη συνέχεια περιγράφονται (όχι όμως με αυξανόμενη ή μειούμενη σειρά σπουδαιότητας) και αναλύονται οι ανωτέρω προαναφερθέντες παράγοντες - παράμετροι που κρίνεται ότι αποτελούν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο γίνεται η κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης της διδακτορικής διατριβής.

4.2.1. Ανθρώπινη δραστηριότητα

Η γρήγορη και εκτεταμένη αστικοποίηση των τελευταίων δεκαετιών, η έλλειψη χώρου και κατάλληλης γνώσης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωλογικών υλικών, έχουν οδηγήσει την ανθρώπινη δραστηριότητα να λαμβάνει χώρα και σε περιοχές όπου έστω και οριακή ευστάθεια πρανών να υπάρχει, μια

μικρή μόνο ανθρώπινη διεργασία είναι δυνατό να προκαλέσει αστοχία (Pedrozzì, 2004).

Η δραστηριότητα που συνδέεται με τον άνθρωπο μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως τις φυσικές διεργασίες με ένα τεχνητό ισοδύναμο, μεγεθυμένο κατά μερικές τάξεις μεγέθους συγκρινόμενο με τη χρονοκλίμακα της φύσης όπως για παράδειγμα στην περίπτωση κατασκευής μεγάλων έργων υποδομής. Για παράδειγμα, η ανθρώπινη δραστηριότητα μπορεί να τροποποιήσει την επίδραση των φυσικών διεργασιών (βροχόπτωση, διάβρωση στον πόδα) στην ευστάθεια των πρανών, επισπεύδοντας διεργασίες σε τέτοια κλίμακα και ένταση που υπό άλλες συνθήκες δεν θα συνέβαιναν με φυσικό τρόπο ή εάν συνέβαιναν θα λάμβαναν χώρα σε διαφορετικό χρόνο και με διαφορετική ένταση λόγω φυσικών αιτίων (Crosta et al., 2012).

Οι κατολισθήσεις που προκαλούνται από την ανθρώπινη δράση, είναι αποτέλεσμα αλλαγών στα πρανή λόγω: α) δημιουργίας αναβαθμιδών με σκοπό την επιβράδυνση της διάβρωσης και για λόγους που συνδέονται με την αύξηση της αγροτικής παραγωγής, β) κατασκευής επιχωμάτων ή/και ορυγμάτων για αυτοκινητόδρομους και σιδηροδρομικά δίκτυα, γ) κατασκευαστικής δραστηριότητας (άναρχη επέκταση των μεγαλουπόλεων), δ) ανεξέλεγκτων υπόγειων εξορύξεων, ε) γρήγορης πτώσης στάθμης του νερού σε φράγματα που μπορεί να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση των πρανών του ταμιευτήρα, στ) αλλαγών χρήσεων γης (καταστροφή δασών), ζ) αλλαγών στην επιφανειακή απορροή, στην κατείσδυση και στην αποστράγγιση (πρόκληση διαρροής στο δίκτυο ύδρευσης που μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακές κατολισθήσεις σε αστικές περιοχές), η) γεωμετρικής τροποποίησης του πρανού, θ) αλλαγών στην συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών, ι) αλλαγών των ενεργών τάσεων.

Η περισσότερο κοινή ανθρώπινη δραστηριότητα που οδηγεί σε αστάθεια πρανών είναι η κατασκευή επιχωμάτων ή/και ορυγμάτων που μειώνουν τον συντελεστή ευστάθειας. Για παράδειγμα, με την κατασκευή κάποιου έργου υποδομής, μπορεί να συμβεί επιτάχυνση της κατείσδυσης των υδάτων στο υπέδαφος. Συγκεκριμένα, μελετώντας την κατολίθιση στο τμήμα Κ. Σολωμού – Είσοδο Σήραγγας Αρτεμισίου του αυτοκινητόδρομου Κορίνθου – Τρίπολης (2003), διαπιστώθηκε η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή εκδήλωσης των φαινομένων αστάθειας. Η τροφοδοσία του προερχόταν, κυρίως, από την απ' ευθείας

κατείδυση των ομβρίων υδάτων, η οποία εκπιμάται όπι αυξήθηκε μετά την κατασκευή της κύριας οδοποιΐας αλλά και του παράπλευρου δρόμου (ΥΠΕΧΩΔΕ/ΔΜΕΟ, 1999).

Επίσης, η κατασκευή ή η καταστροφή ενός τεχνικού έργου τροποποιεί τα στατικά και δυναμικά φορτία που εφαρμόζονται στα πρανή. Τέτοιες τροποποιήσεις μπορούν να κάνουν τα πρανή περισσότερο ασταθή και μπορεί αυτό να συνδυασθεί με προκαλούμενες δονήσεις από την κυκλοφορία ή από εξορυκτικές δραστηριότητες. Οι τελευταίες, μπορούν να μεταβάλλουν την γεωμετρία και την κατανομή των τάσεων στα πρανή και να προκαλέσουν διατάραξη της ισορροπίας των. Οι δονήσεις από εκρήξεις και από μεγάλα μηχανήματα είναι ικανές να διαταράξουν τη δομή του σχηματισμού, προκαλώντας ανεπιθύμητες ασυνέχειες. Ωστόσο, όλες οι προαναφερόμενες επιδράσεις, ενδεχομένως να μην επιδρούν άμεσα για να προκαλέσουν αστάθεια. Θα πρέπει να υπάρχουν προαπαιτούμενες συνθήκες που θα μπορούσαν να χειροτερέψουν μελλοντικά, όπως για παράδειγμα κατά την διάρκεια μιας μελλοντικής έντονης βροχόπτωσης (Baills et al., 2012). Η πλειοψηφία των κατολισθήσεων που προκαλούνται από τον ανθρώπινο παράγοντα προκύπτει σε συνδυασμό είτε με υψηλής έντασης, είτε με μακράς διάρκειας βροχόπτωση (Nadim et al., 2011). Στη συνέχεια, σχολιάζονται οι περισσότερο σημαντικές ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν κατολισθήσεις.

4.2.1.1. Ανθρωπογενής επίδραση στη βλάστηση

Η βλάστηση που καλύπτει μια περιοχή είναι ένας από τους σημαντικότερους εξωτερικούς παράγοντες που συσχετίζονται με την ευστάθεια των πρανών αφού είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές που μπορούν να συμβούν λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Αναλυτικότερα, η αποψίλωση των δασών με σκοπό την αύξηση της αγροτικής παραγωγής λόγω πυρκαγιών, υλοτόμησης, ή και υπερβόσκησης, μειώνει την εξατμισοδιαπνοή, επιτρέποντας αυξημένη επιφανειακή απορροή και αυξημένη επιφανειακή διάβρωση, μέσω της απώλειας της ενίσχυσης που προέρχεται από το ριζικό σύστημα. Οι ρίζες των φυτών έχουν την τάση να συγκρατούν το έδαφος και κατά συνέπεια βοηθούν στη μείωση της κατείδυσης και στην καθυστέρηση της αστάθειας ενός πρανούς, εκτός και εάν το επίπεδο ολίσθησης είναι πολύ βαθιά, δηλαδή βαθύτερα από τη ριζική ζώνη.

Συνεπώς, η απώλεια του καλύμματος της βλάστησης όχι μόνο μεταβάλλει τις υδρολογικές συνθήκες ενός πρσανούς αλλά προκαλείται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με συνέπεια την σημαντική αύξηση της τρωτότητας του εδάφους στις διαβρωτικές διεργασίες, την αλλοίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους (De Bano et al., 1998), καθώς και την απομάκρυνση του εδαφικού καλύμματος, οδηγώντας στην αύξηση της πιθανότητας ολισθήσεων και ροών γαιών, γεγονός τα οποία επιταχύνονται κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου που ακολουθεί (Varnes, 1984).

Όσον αφορά στην καλλιέργεια των αποψιλωμένων περιοχών με σκοπό την αύξηση του ποσοστού γης για αγροτική χρήση, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εδαφική διάβρωση και σχηματισμό κατολισθήσεων σε λοφώδεις, κυρίως, περιοχές. Η κυριότερη αιτία για τις αστοχίες είναι η παρατεταμένη άρδευση και η αποστράγγιση (πολλά εδάφη χρειάζονται αποστράγγιση για να βελτιωθεί η παραγωγή), διεργασίες που μπορούν να μεταβάλλουν τα φυσικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά (Crosta et al., 2012).

4.2.1.2. Αστικοποίηση

Η αστικοποίηση εκτός από την άναρχη επέκταση των μεγαλουπόλεων συνδέεται και με την ανεξέλεγκτη απόρριψη απορριμμάτων (για παράδειγμα η απόθεση απορριμμάτων σε χαράδρες, οι οποίες δρουν σαν φυσικά κανάλια), μια συνέπεια της οποίας είναι και η κατείσδυση στραγγισμάτων σε πρσανή όπως και η πιθανή εδαφική διάβρωση σε σημεία όπου είναι συγκεντρωμένα εδαφικά απορρίμματα (Crosta et al., 2012).

Μια ακόμη σχετική παράμετρος με την αστικοποίηση και την πρόκληση κατολισθήσεων, σχετίζεται τόσο με την έλλειψη έργων αποστράγγισης αλλά (ακόμα και όταν υπάρχουν) και με την αστοχία των δικτύων υδροδότησης και των καναλιών αποστράγγισης με αποτέλεσμα να ευνοούνται οι εσωτερικές διαβρώσεις και υποσκαφές (Κουμαντάκης, 2012). Επειδή αυτές οι υποδομές είναι συχνά υπόγειες, δύσκολα συντηρούνται. Επίσης, είναι γνωστό ότι τα δίκτυα της υδροδότησης παρουσιάζουν, συχνά, μεγάλες διαρροές της τάξης του 30% ή και μεγαλύτερες και είναι πιθανό αυτό το ποσοστό να είναι υψηλότερο για τα αποστραγγιστικά κανάλια (Nadim et al., 2011).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διαρροών αποτελούν οι περιπτώσεις: α) στο χωριό Luztenberg της βορειοανατολικής Ελβετίας, β) στην πόλη του Quebec

στον Καναδά (Nadim et al., 2011) και γ) στο Μέτσοβο της Ηπείρου (Κουμαντάκης, 2011). Και στις τρεις περιπτώσεις, παρατηρήθηκε διαρροή στο σύστημα υδροδότησης που οδήγησε στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και σε απώλεια μέρους της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Σε συνδυασμό, δε, με τις τοπικές γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες και την έντονη και παρατεταμένη βροχόπτωση, προκλήθηκε κατολισθήση και στις τρεις τοποθεσίες.

4.2.1.3. Παρεμβάσεις του ανθρώπου με την κατασκευή γραμμικών έργων

Φαινόμενα αστοχιών σε πρηνή μπορεί να προκληθούν εξ' αιτίας της κατασκευής οδικών και σιδηροδρομικών αξόνων με τη δημιουργία κατά θέσεις ορυγμάτων και επιχωμάτων. Αυτές οι ανθρώπινες διεργασίες προκαλούν αλλαγές στην τοπογραφία, επηρεάζουν την κυκλοφορία του επιφανειακού και υπόγειου νερού προκαλώντας αλλαγή των υδρογεωλογικών συνθηκών, δίνοντας χαμηλότερες τιμές στην υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους (στις επιχωματώσεις), συγκρινόμενες με αυτές των γειτονικών περιοχών (Nadim et al., 2011).

Κατά μήκος των ορυγμάτων, το βρόχινο νερό προκαλεί επιφανειακή απορροή και διάβρωση, οι οποίες συχνά δημιουργούν χαντάκια και ανοίγματα και επιπλέον εφ' όσον οι διανοιχθέντες δρόμοι (για παράδειγμα σε βουνά) δεν προστατεύονται από τη δράση του επιφανειακού νερού, επηρεάζουν την πίεση των πόρων του υπεδάφους και κάνουν επιδεκτικότερα τα πρηνή σε κατολισθήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κατολισθητικά γεγονότα που έλαβαν χώρα τον Μάιο του 1998, στην περιοχή Campania της νότιας Ιταλίας και συγκεκριμένα στις τοποθεσίες Sarno – Quindici (Nadim, 2011).

Επίσης, η διάνοιξη οδών (κυρίως με την έννοια της απρογραμματίστης διατάραξης του καθεστώτος φυσικής ισορροπίας), όταν δημιουργεί περισσότερο απότομες κλίσεις πρηνών σε σχέση με τις όποιες υπάρχουσες κλίσεις του φυσικού αναγλύφου, μεταβάλλει την γεωμετρία και την κατανομή των τάσεων σε αυτά, ενώ επηρεάζει την πίεση των πόρων του υπεδάφους με συνέπεια την πρόκληση αστοχιών.

Έτσι, μια αύξηση του υδάτινου στοιχείου (λόγω βροχόπτωσης) και κατά συνέπεια μια αύξηση του βάρους των γεωλογικών υλικών των σχηματισμών στα μεγαλύτερα υψομετρικά σημεία ενός διανοιχθέντος πρηνούς, είναι από μόνο του αρκετό να προκαλέσει αστοχία υλικού με την επιφόρτιση του κατάντη πρηνούς από τα υλικά επιχωμάτωσης. Το, δε, υλικό που δημιουργείται από την αστοχία

κατά την πτώση του, αυξάνει το φορτίο με την απόθεση των υλικών στα χαμηλότερα υψόμετρα του πρानού, προκαλώντας παραμόρφωση της υφιστάμενης εκεί δομής (σε συνδυασμό με την ανάπτυξη αυξημένης πίεσης πόρων) και κατά συνέπεια κατολίσθηση (Prete et al., 1998).

Η Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών, έχει επισημάνει ότι τα επιχώματα είναι μια από τις σημαντικότερες αιτίες κατολισθήσεων, επηρεάζοντας σε πολύ μεγάλο βαθμό την συγκοινωνία με τις αστοχίες που παρουσιάζονται σε οδικούς και σιδηροδρομικούς άξονες όταν η θεμελίωσή τους γίνεται στη ζώνη αποσάθρωσης και όχι στο υγιές υπόβαθρο (Nadim et al., 2011). Στα πρानή ορυγμάτων με την απομάκρυνση υλικών, η αντίσταση του εδάφους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και επομένως η πρόβλεψη της συμπεριφοράς για αστοχία σε βάθος χρόνου (παραμένουσα διατμητική αντοχή) είναι το ζητούμενο. Τέλος, οι αστοχίες σε ορύγματα – επιχώματα μπορούν επιπρόσθετα να οφείλονται σε: α) προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνεχειών όπως ρήγματα ή μεγάλες προϋπάρχουσες ανεργές κατολισθήσεις και β) σε εναυσματικούς παράγοντες που συνδέονται με σεισμούς ή με έντονες βροχοπτώσεις.

4.2.1.4. Διαφορική θεμελίωση κατασκευών

Η θεμελίωση κτιρίων σε δύο σχηματισμούς με διαφορετική διατμητική αντοχή, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ανθρωπογενούς παρέμβασης στην ισορροπία των πρανών. Αρχικά, παρατηρούνται ερπυστικές κινήσεις στο σχηματισμό με τη μικρότερη φέρουσα ικανότητα, μικρορωγμές στο έδαφος (που μπορεί να επεκταθούν και στην κατασκευή) και στη συνέχεια προκαλείται η θραύση του πρανού με τη συνεπίδραση και άλλων παραγόντων.

Η εφαρμογή της παραμέτρου της ανθρώπινης δραστηριότητας στο μητρώο αλληλεπίδρασης απεικονίζεται στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας με την έννοια «απόσταση από το οδικό δίκτυο». Η ερμηνεία της έννοιας αυτής είναι ότι όσο πιο μικρή εμφανίζεται η απόσταση του υπό μελέτη πρανού από έναν γραμμικό άξονα, τόσο περισσότερο πιθανή (υπό προϋποθέσεις) είναι η περίπτωση να αστοχήσει το συγκεκριμένο πρανές. Τα τεχνητά και φυσικά πρανή των γραμμικών αξόνων (τοπικοί δρόμοι, εθνικοί οδοί, αυτοκινητόδρομοι, πρανή σιδηροδρομικών γραμμών) είναι περισσότερο ευαίσθητα σε κατολισθήσεις, λόγω της διατάραξης της φυσικής ισορροπίας με την διάνοιξη ορυγμάτων και κατασκευή

επιχωμάτων με συνέπεια η φύση να «αντιδρά» σε αυτό (σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες) με την εκδήλωση αστοχιών. Ένα τμήμα δρόμου, για παράδειγμα, μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο ή διάδρομο για τη ροή του νερού ή μια ασυνέχεια στην κλίση του πρανούς (Mancini et al., 2010). Η επιλογή, λοιπόν, της παραμέτρου «ανθρώπινη δραστηριότητα (απόσταση από δρόμους)», είναι κρίσιμη για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας και κατ' επέκταση της ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, η οποία επιτυγχάνεται με την ακόλουθη βαθμονόμηση (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1. Βαθμονόμηση της ανθρώπινης δραστηριότητας με βάση την απόσταση πρανών από δρόμους.

Ανθρώπινη δραστηριότητα (Απόσταση από δρόμους*)	Βαθμονόμηση
Μακρινή (>200m)	0
Μέτρια μακρινή (151-200 m)	1
Κοντινή (101 - 150 m)	2
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3
Άμεση (0-50m)	4

* Η βαθμονόμηση βασίζεται σε εργασία των Rozos et al. (2011)

4.2.2. Τεκτονικό καθεστώς

Η παρουσία ρηξιγενούς ζώνης στους γεωλογικούς σχηματισμούς που οφείλεται στη δράση των τεκτονικών δυνάμεων, ανεξάρτητα από το εάν είναι ενεργή ή ανενεργή, τις περισσότερες φορές επηρεάζει τη γεωλογική δομή, προκαλώντας διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης. Μάλιστα, σε μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες με σημαντικά κατακόρυφη συνιστώσα μετακίνησης, παρατηρείται αφαίρεση της υποστήριξης, η οποία λαμβάνει χώρα στις βραχώδεις ή εδαφικές μάζες του ρηξιτεμάχους που σχετικά ανυψώθηκε σε σχέση με το άλλο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης. Οι δε ασυνέχειες εκτός από τη μείωση της συνολικής αντοχής, διευκολύνουν την διαδικασία της αποσάθρωσης αφού αυξάνουν την επιφάνεια, στην οποία οι διαβρωτικοί και αποσαθρωτικοί παράγοντες δρουν (Λέκκας και Κράνης, 2001).

Επειδή, λοιπόν, η τεκτονική εξέλιξη αφ' ενός προκαλεί μεταβολές των γεωμετρικών στοιχείων των φυσικών πρανών (ύψος, κλίση), αφ' ετέρου επηρεάζει την δευτερογενή δομή ενός γεωλογικού σχηματισμού καθώς και την ποιότητα των ασυνεχειών σε συνδυασμό με τις διεργασίες της συνεχιζόμενης διάβρωσης, η παράμετρος του τεκτονικού καθεστώτος στα πλαίσια της διατριβής παίζει πολύ

σημαντικό ρόλο και συμβάλλει αποφασιστικά στην διαμόρφωση του μητρώου αλληλεπίδρασης και κατ' επέκταση στη σύνταξη του χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

Για την καλύτερη κατανόηση της σημασίας της έννοιας της τεκτονικής στην κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης, παρατίθενται μερικές σημαντικές παρατηρήσεις που αξίζει να καταγραφούν στα πλαίσια της συνδρομής της στην επιδεκτικότητα των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών σε αστοχία.

1. Η μεγάλη συσχέτιση της μορφολογίας και γενικότερα του αναγλύφου της επιφάνειας της γης με τις ενδογενείς τεκτονικές διεργασίες, υποδεικνύει τις περιοχές όπου πρόσφατα ή και σήμερα υφίστανται διαφορικές κινήσεις στην ανώτερη λιθόσφαιρα, σαν τις περιοχές απότομων υψομετρικών διαφορών και μεγάλων μορφολογικών κλίσεων. Η συνηθέστερη μορφή της σχέσης αυτής στη νεοτεκτονική και τη σύγχρονη δυναμική αφορά πεδινές εκτάσεις που περιβάλλονται από ορεινούς όγκους οι οποίες αντιστοιχούν σε μορφές τεκτονικής τάφρου (Παπανικολάου κ.α., 1986). Τέτοιες περιοχές περιγράφονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Συνεπώς, η σημασία της τεκτονικής στην ερμηνεία του υδρογραφικού δικτύου, των υφιστάμενων μορφολογικών κλίσεων και της σύνδεσής τους με τις αστοχίες πρανών στις εξεταζόμενες θέσεις της παρούσας έρευνας είναι πολύ μεγάλης αξίας.

2. Είναι γνωστό ότι η έννοια της βραχώμαζας είναι συνδεδεμένη με την παρουσία ασυνεχειών. Ο τύπος, δε, της βραχώμαζας εξαρτάται από τη συνολική γεωλογική ιστορία. Έτσι, οι συνθήκες γένεσης διαμορφώνουν την ποιότητα των άρρηκτων βράχων και των πρωτογενών δομών του, η τεκτονική εξέλιξη οδηγεί στη δευτερογενή δομή της βραχώμαζας και την ποιότητα των ασυνεχειών και η παλαιογεωγραφική εξέλιξη είναι υπεύθυνη για την αποσάθρωση και την τελική μορφή της δομής της βραχώμαζας (Μαρίνος, 2005).

3. Η πλευρική πίεση είναι δυνατόν να παίξει καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση μιας κατολίθησης. Συγκεκριμένα, οι πλευρικές τάσεις, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, προστίθενται στις τυχόν υπάρχουσες διατμητικές τάσεις και μπορεί να αποκτήσουν συνολική τιμή μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή των σχηματισμών ενός πρανού με συνέπεια να αρχίσει με αυτόν τον τρόπο η μετακίνηση της μάζας. Συγκεντρωτικά, η πλευρική πίεση μπορεί να προέρχεται από (Κούκης και Σαμπτακάκης, 2007): α) την παρουσία του νερού σε ρωγμές και

κοιλότητες των πετρωμάτων, οι οποίες οφείλονται είτε σε πρωτογενή αίτια (στρώση, πορώδες) είτε σε δευτερογενή (ρήγματα, διάβρωση). Σε συνδυασμό με την ψύξη του νερού στις κοιλότητες και στις ρωγμές και τη συνεπακόλουθη αύξηση του όγκου του κατά τη στερεοποίηση το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η εξάσκηση ικανών πλευρικών δυνάμεων στα τοιχώματα. β) την διόγκωση των πετρωμάτων λόγω του εμποτισμού τους από το κατεισδύον νερό. Τέτοιες περιπτώσεις είναι συνήθεις σε περιοχές όπου εμφανίζονται εβαπορίτες, οι οποίοι παρουσιάζουν το φαινόμενο του διαπυρισμού. γ) την κινητοποίηση των παραμενουσών τάσεων μέσα σε μάζες γεωλογικών σχηματισμών, η οποία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες.

4. Γενικά θεωρείται ότι γεωλογικοί σχηματισμοί με στρωσιγένεια, οι οποίοι περιλαμβάνουν ενστρώσεις εδαφικών υλικών με πλαστικότητα (π.χ. ιλυόλιθοι), που έχουν πτυχωθεί και άρα διατμηθεί από τεκτονικές κινήσεις, χάνουν συνήθως κατά μήκος των πλαστικών ενστρώσεών τους την συνοχή τους αλλά και συχνά σημαντικό μέρος της διατμητικής τους αντοχής που οφείλεται στη γωνία τριβής. Αποτέλεσμα των παραπάνω λόγων είναι η διαθέσιμη διατμητική αντοχή να βρίσκεται πολύ κοντά, αν όχι τελείως, στην παραμένουσα (residual strength), η οποία είναι και η ελάχιστη αντοχή τους (Καβουνίδης κ.α., 1997).

5. Σε όλες τις ασβεστολιθικές εμφανίσεις που εξετάστηκαν στην περιοχή μελέτης των Αλκυονίδων κατά τους σεισμούς του 1981, παρατηρήθηκε ένα δίκτυο διαρρήξεων που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη προοδευτική αποσταθεροποίηση των πρανών, διευκολύνοντας έτσι την εκδήλωση των καταπτώσεων: α) ανοικτές ασυνέχειες με μεγάλο μήκος ανάπτυξης που αποτελούσαν επιφάνειες μειωμένης έως σχεδόν μηδενικής διατμητικής αντοχής που διαχώρισαν τις ασβεστολιθικές εμφανίσεις σε μεγάλους όγκους και β) ασυνέχειες σχετικά μικρές και κλειστές που διαμόρφωσαν την γεωμετρία των παραπάνω όγκων (Μαρίνος κ.α., 1984). Η ισχυρή κλίση των πρανών σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό και την πυκνότητα του δικτύου των ασυνεχειών κάθε μορφής βραχόμαζας, επέτρεψαν στην ισχυρή σεισμική φόρτιση να ανατρέψει το καθεστώς μειωμένης ευστάθειας που προϋπήρχε, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο την εκδήλωση καταπτώσεων μεγάλων, σχετικά, μαζών ή και μεμονωμένων βράχων κατά περίπτωση. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε φυσιολογικές (συμβατικές) συνθήκες η συνδυασμένη

δράση των άλλων παραγόντων αποσταθεροποίησης, πλην της σεισμικής φόρτισης, δεν θα ήταν ικανή να προκαλέσει τη μαζική εμφάνιση καταπτώσεων.

Με βάση το σκεπτικό όλων των προαναφερθέντων, η βαθμονόμηση της παραμέτρου «τεκτονικό καθεστώς» δίνεται από τον ακόλουθο Πίνακα 4.2 λαμβάνοντας υπόψη και την έρευνα των Rozos et al. (2008).

Πίνακας 4.2. Βαθμονόμηση της παραμέτρου «τεκτονικό καθεστώς».

Τεκτονικό καθεστώς	Βαθμονόμηση
Ασθενές: συνδέεται με την σχεδόν απουσία σημαντικών τεκτονικών γεγονότων.	0
Μέτριο: συνδέεται με την παρουσία φολίδωσης, σχιστότητας και σχισμού.	1
Ισχυρό: συνδέεται με την παρουσία πτυχών, ρηγμάτων και ασυνεχειών.	2
Πολύ ισχυρό: συνδέεται με την παρουσία κατακερματισμένων ζωνών.	3
Εντατικό: ανιππροσωπεύει επιπτώσεις και επωθήσεις.	4

4.2.3. Μορφολογία

Η μορφολογική εικόνα που παρουσιάζει ο Ελληνικός χώρος είναι σύνθετη και είναι αποτέλεσμα (Ζιούρκας, 1989):

α) του οριζόντιου και κατακόρυφου διαμελισμού που έχει υποστεί από τις συνεχόμενες ορογενετικές κινήσεις, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας με συνέπεια την εξάρτηση του αναγλύφου από τη λιθολογική σύσταση και την τεκτονική καταπόνηση των γεωλογικών σχηματισμών, β) των εξωγενών παραγόντων που έλαβαν χώρα κατά το παρελθόν, όπως οι κλιματικές διεργασίες, η δράση των παγετώνων κατά το Πλειστόκαινο, η διαβρωτική ενέργεια των επιφανειακών νερών και η συνεχής δράση των κυμάτων της θάλασσας με συνέπεια το ανάγλυφο να εξαρτάται από το βροχομετρικό ύψος, την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων και τη σχέση διάβρωσης προς αποσάθρωση.

Για τους παραπάνω λόγους, ο Ελληνικός χώρος παρουσιάζει έντονο ορεινό χαρακτήρα και εξ' αιτίας αυτού του μορφολογικού χαρακτηριστικού (ανάμεσα σε άλλους παράγοντες), παρατηρούνται πολλές κατολισθήσεις διαχρονικά στην Ελληνική επικράτεια.

Στη συνέχεια θα σχολιασθούν δύο σημαντικές παράμετροι που συνδέονται με τη μορφολογία, αφού αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας και οι οποίες είναι η κλίση και ο προσανατολισμός

των πρηνών. Οι δύο αυτές παράμετροι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση αστοχιών. Εκφράζουν το αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης διαφόρων άλλων παραγόντων, όπως της έντασης των κλιματικών συνθηκών, των αποσασθρωτικών διεργασιών, του τύπου και της πυκνότητας της βλάστησης, καθώς και της γεωμετρίας των γεωλογικών σχηματισμών.

4.2.3.1. Κλίση πρηνών

Η κλίση των πρηνών αποτελεί σημαντική παράμετρο στη θεώρηση έναρξης μιας κατολισθήσεως και στις περισσότερες μελέτες κατολισθήσεων, λαμβάνεται υπόψη ως κύριος γενεσιουργός παράγοντας ή παράμετρος εναύσεως. Η, δε, κατανομή των διαφόρων κατηγοριών πρηνών που εξαρτάται από τη γεωμορφολογική ιστορία της περιοχής, βασίζεται στην εμφάνιση της γωνίας κλίσης.

Η προοδευτική αύξηση της κλίσης ενός πρηνούς είναι δυνατό να προκαλέσει αύξηση των διατμητικών τάσεων και σε οριακές περιπτώσεις θραύση και μετακίνηση των μαζών. Η μεταβολή στην κλίση του πρηνούς μπορεί να οφείλεται τόσο στη διαδικασία εξέλιξης του αναγλύφου της γης, το οποίο συνεχώς μεταβάλλεται και υπόκειται σε αλλοιώσεις όσο και στην ανθρώπινη παρέμβαση. Αναλυτικότερα, η μεταβολή στην κλίση του πρηνούς είναι δυνατό να οφείλεται:

- Σε ενδογενείς διεργασίες, οι οποίες τείνουν να μεταβάλλουν την επιφάνεια της γης και συνδέονται, κυρίως, με κινήσεις σε τεκτονικά ενεργές περιοχές. Οι διεργασίες αυτές είναι φυσικά πολύ αργές αλλά, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατόν να αποτελέσουν το αίτιο για κατολισθήσεις.
- Σε διάβρωση, λόγω της δράσης του νερού, το οποίο προκαλεί συνεχή αλλοίωση της μορφολογίας είτε με μείωση της μορφολογικής κλίσης είτε με αύξησή της. Στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα η κατά βάθος διάβρωση που προκαλεί αφαίρεση υλικών από τη βάση που υποστηρίζει μια ασταθή μάζα, με αποτέλεσμα να υφίσταται αυξημένη πιθανότητα καταπτώσεων. Επιπρόσθετα, η μεταβολή στην κλίση του πρηνούς οφείλεται και στη δράση του ανέμου, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τα πετρώματα είναι ψαθυρά, με τη διαδικασία της “αμμοβολής”.
- Σε ρηξιγενείς ζώνες με αποτέλεσμα ολόκληρες μάζες κοντά στις επιφάνειες να βρεθούν σε αστάθεια.
- Σε εκσκαφή για την κατασκευή τεχνικών έργων ή σε περιοχές λατομείων.

- Σε αποψίλωση της βλάστησης σε ένα πρανές που έχει σαν αποτέλεσμα την εντονότερη διάβρωση.

Η γωνία κλίσης ενός πρανούς είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα μιας σειράς τοπικών διαδικασιών, οι οποίες έχουν επιβληθεί στο πρανές και λόγω της διαθεσιμότητας των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρου (Digital Elevation Model), μπορεί να υπολογισθεί αριθμητικά και να απεικονισθεί χωρικά (Manoj and Anbalagan, 2010).

Με την προοδευτική αύξηση της κλίσης, τα αντίστοιχα πρανή είναι περισσότερο επιδεκτικά σε κατολισθήσεις. Επίσης, η επιφανειακή απορροή είναι μεγαλύτερη και η κατείσδυση μικρότερη στα πρανή με περισσότερο απότομη κλίση, στα οποία επιπροσθέτως η οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής εδαφικής κίνησης είναι 1,2 έως 1,5 μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε μια πεδιάδα με συνέπεια διαφορετικές συνθήκες τάσεων να συνδέονται με τα πρανή (Nagarajan et al., 1999).

Σύμφωνα με τους Jaedicke et al. (2010), τα φυσικά χαλαρά γεωλογικά υλικά είναι συνήθως σταθερά μέχρι την κλίση των 27°. Σε πρανή με κλίση μεγαλύτερη των 30°, ημίβραχοι και άλλα χαλαρά υλικά είναι επιρρεπή σε κατολισθήσεις και δεν σχηματίζουν αποθέσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν μεγαλύτερες κατολισθήσεις. Σε πρανή με κλίση πάνω από 45°, συνήθως μόνο βραχοπτώσεις λαμβάνουν χώρα.

Γενικά παρατηρείται ότι αποσαθρωμένοι βράχοι και υλικά αποσάθρωσης που εμφανίζονται σε απότομα πρανή είναι περισσότερο πιθανό να είναι επιδεκτικά σε αστοχίες από ότι αν τα ίδια υλικά συνθέτουν πρανή τα οποία χαρακτηρίζονται από μέτρια έως ήπια κλίση (Miller et al., 2007). Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς η κλίση του πρανούς αυξάνει, το βάρος και κατά συνέπεια ο όγκος του γεωλογικού υλικού που επηρεάζεται θα αυξηθεί (Varnes, 1984). Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση, τόσο πιο μεγάλη είναι η διατμητική παραμόρφωση και τόσο πιο πιθανή είναι η αστοχία ενός πρανούς (Crozier, 1986).

Μάλιστα, στα βραχώδη πρανή η ύπαρξη δομικών ασυνεχειών (στρώσεις, διακλάσεις) και ο δυσμενής προσανατολισμός τους σε σχέση με εκείνον του πρανούς είναι κρίσιμος παράγοντας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθήσεις εκδηλώνονται σε ορεινές περιοχές του Ελλαδικού χώρου, όπως για παράδειγμα κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου.

Το πόσο απόκρημνο είναι ένα πρηνές σε συνδυασμό με την αντοχή και την εσωτερική γεωμετρία των γεωλογικών υλικών που το συνθέτουν έχει μεγάλη σημασία. Για τους σκοπούς μιας ζωνοποίησης, η κλίση ενός πρηνούς συχνά κατηγοριοποιείται σε εύρη βαθμών ή ποσοστών, έτσι ώστε να κατασκευασθούν ειδικοί χάρτες που θα απεικονίζουν αυτά τα εύρη. Τα αριθμητικά όρια που επιλέγονται για τον καθορισμό του εύρους πμών εξαρτώνται από το πεδίο ερευνών. Θα πρέπει, ωστόσο, να τονισθεί ότι η συσχέτιση μεταξύ της κλίσης του πρηνούς και της ευστάθειας δεν είναι απλή και απόκρημνα πρηνή δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι θα αστοχήσουν, γιατί έχει παρατηρηθεί να υπάρχουν σταθερότερα μεγάλης κλίσης πρηνή συμπαγών βράχων, από ότι συγκριτικά ηπιότερων κλίσεων πρηνή αποτελούμενα από ασθενέστερα υλικά (Ζιούρκας, 1989). Με βάση τα παραπάνω και την έρευνα των Rozos et al. (2011), δίνεται στον Πίνακα 4.3 η βαθμονόμηση της παραμέτρου «κλίσης πρηνών», ως εξής:

Πίνακας 4.3. Βαθμονόμηση της κλίσης πρηνών.

Κλίση Πρηνών	Βαθμονόμηση
0° -5°	0
6° -15°	1
16° -30°	2
31° -45°	3
>45°	4

Παρατήρηση: Αν και σύμφωνα με την έρευνα του Ζιούρκα (1989), το μεγαλύτερο ποσοστό κατολισθήσεων συμβαίνει σε πρηνή με κλίση 16° - 30°, στην παρούσα διατριβή θεωρήθηκε η μεγαλύτερη βαθμονόμηση να δοθεί στην κατηγορία >45° και αυτό γιατί στη φύση πρηνή που συνίστανται από εδαφικά υλικά ή ημίσκληρα πετρώματα και έχουν υψηλή τιμή κλίσης αστοχούν σχεδόν αμέσως μετά τον σχηματισμό τους, δίνοντας χαμηλότερες από τις αρχικές τιμές γωνίες κλίσης (Rozos et al., 2011).

4.2.3.2. Προσανατολισμός πρηνών

Επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία, τον άνεμο και την βροχόπτωση και κατ' επέκταση επηρεάζει ισχυρά τις υδρολογικές διαδικασίες μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Συνεπώς επιδρά στις αποσαθρωτικές διαδικασίες (δημιουργία μανδύα αποσάθρωσης), στο ποσοστό υγρασίας στο έδαφος, στη βλάστηση και στην ανάπτυξη των ριζών. Ο προσανατολισμός του πρηνούς ως προς τον ήλιο

επιηρεάζει την κατανομή της θερμότητας στο έδαφος και δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας και συστολή-διαστολή μεταξύ επιφανειακών και εσωτερικών στρωμάτων. Η διαδικασία επιτείνεται από τις διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα των στρωμάτων του εδάφους. Όλα αυτά συνεπάγονται την αποσάθρωση και μείωση της αντοχής του (Ξειδάκης, 2006). Ιδιαίτερα, συγκεκριμένης κατεύθυνσης προσανατολισμοί συσχετίζονται με αυξημένες συγκεντρώσεις χιονιού και κατά συνέπεια μεγαλύτερες περιόδους ψύξης – θέρμανσης.

Με βάση τα παραπάνω και την έρευνα των Rozos et al. (2008), δίνεται στον Πίνακα 4.4 η βαθμονόμηση της παραμέτρου «προσανατολισμός των πρανών».

β) Προσανατολισμός πρανών

Πίνακας 4.4. Βαθμονόμηση του προσανατολισμού των πρανών.

Προσανατολισμός Πρανών	Βαθμονόμηση
225° - 275°	0
45° - 90°	1
90° - 135°, 275° - 315°	2
315° - 0°	3
0° - 45°, 135° - 225°	4

4.2.4. Λιθολογία

Από τις περισσότερο καθοριστικές παραμέτρους που ελέγχουν την εκδήλωση των κατολισθήσεων είναι η λιθολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών. Ιδιαίτερα, από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην ελληνική επικράτεια, αποδεικνύεται ότι η λιθολογική σύσταση αλλά και η έντονη διαφοροποίηση στη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση που έχει ως αποτέλεσμα την αλληλουχία σχηματισμών με τελείως διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ασκούν σημαντική επίδραση στην εκδήλωση κατολισθήσεων.

Αυτό συμβαίνει, γιατί διαφορετικές λιθολογίες παρουσιάζουν διαφορετική επιδεκτικότητα στις διεργασίες της αποσάθρωσης και διάβρωσης και παράγουν διαφορετικούς τύπους προϊόντων αποσάθρωσης με συνέπεια την πιθανότητα διαφορετικών τύπων αστοχιών πρανών (Uromeihiy and MahdaviFar, 1999). Για παράδειγμα, αποσαθρωμένοι βραχώδεις σχηματισμοί και παραμένοντα εδάφη (τελείως αποσαθρωμένος – εδαφοποιημένος βράχος), συνήθως περιέχουν μοντμοριλονίτη και καολινίτη, τα οποία είναι ορυκτά που ευνοούν την ανάπτυξη διογκώσεων στα εδαφικά υλικά (Nagarajan et al., 1999).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τα οποία μαρτυρούν τη σημασία της λιθολογίας (η οποία είναι κρίσιμη παράμετρος καθώς, ουσιαστικά, αποτελεί το βασικό δομικό χαρακτηριστικό ενός πρσανούς) στην εκδήλωση κατολισθήσεων είναι τα ακόλουθα:

- Τα αργιλικά πετρώματα είναι επιρρεπή στις κατολισθήσεις γιατί η άργιλος όταν διαποτίζεται από το νερό, μετατρέπεται σε πλαστική έως πυκνόρρευστη μάζα. Όταν οι άργιλοι βρίσκονται κάτω από υδροπερατούς ή ημιπερατούς σχηματισμούς, όπως π.χ. τα πλευρικά κορήματα, ο ελουβιακός μανδύας, τα ασβεστολιθικά λέπτη, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή κ.α. δημιουργείται μετά τη διήθηση του νερού μια επιφάνεια ολίσθησης που σε συνδυασμό με την ύπαρξη ευνοϊκής κλίσης διευκολύνει την ολίσθηση των υπερκείμενων σχηματισμών (Ελευθερίου, 1982).

Ιδιαίτερα, ο μοντμοριλλονίτης απορροφά το νερό, ανάμεσα στα μεμονωμένα στρωματίδια πυριτίου με αποτέλεσμα τη μεγάλη διόγκωση και τη μείωση του συντελεστή τριβής, συμβάλλοντας καθοριστικά στην εκδήλωση των κατολισθήσεων. Τα διογκώσιμα αργιλικά ορυκτά συμβάλλουν, επίσης, στην αύξηση της αποσάθρωσης του πετρώματος και στη μείωση της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση (Vacondiios et al., 2007). Επίσης, τα ιδιαίτερα υψηλής πλαστικότητας και αργιλικής σύστασης υλικά συρρικνούνται κατά τις ξηρές περιόδους εμφανίζοντας εφελκυστικές ρωγμές σε δυσμενείς διευθύνσεις για την ευστάθεια του πρσανούς. Η δημιουργία ρωγμών συρρίκνωσης και η πλήρωση αυτών με ρέοντα επιφανειακά βρόχινα νερά, καθώς επίσης και η ευαισθησία σε διόγκωση έχει ως αποτέλεσμα την βαθμιαία υποβάθμιση της αντοχής του εδάφους, τη χαλάρωση των επιφανειακών στρωμάτων και την αστοχία τους (Παπακυριακόπουλος κ.α., 2006).

- Στον φλύσχη, λόγω της ετερογένειας στη μηχανική συμπεριφορά (εναλλαγές μαλακών και σκληρών οριζόντων), στην παρουσία αργιλικών ορυκτών και στην τεκτονική καταπόνηση (διατμημένες ασυνέχειες, οι οποίες συχνά οδηγούν σε εδαφοποιημένα υλικά) παρουσιάζονται τα περισσότερα και σημαντικότερα προβλήματα αστοχιών στον Ελληνικό χώρο όπως επικρεμάμενοι ορίζοντες υπόγειου νερού, υπόγεια φράγματα, διάχυτες και σημειακές πηγές και φαινόμενα αρτεσιανισμού. Είναι γνωστό για το περιβάλλον του φλύσχη ότι ανάλογα με τη λιθολογία που επικρατεί, την αναλογία συμμετοχής κάθε μέλους της στρωματογραφικής ακολουθίας στην περιοχή του έργου (ψαμμίτης,

ιλυόλιθος κλπ) και το βαθμό τεκτονισμού και αποσάθρωσης, ο φλύσχης παρουσιάζει διαφορετική τεχνικογεωλογική – υδρογεωλογική συμπεριφορά (Καραπαντελάκης κ.α., 2001).

- Κατά μήκος της Εγνατίας Οδού οι γεωλογικοί σχηματισμοί που έχουν παρουσιάσει τα περισσότερα προβλήματα ευστάθειας, είναι ο τεκτονισμένος φλύσχης και ο διατμημένος, σχιστοποιημένος και βαθιά αποσαθρωμένος γνεύσιος. Ωστόσο και σε θέσεις με οφιολιθικό υπόβαθρο (στις περιοχές Μέτσοβο και Μαλακάσι) παρουσιάζονται προβλήματα όταν υπάρχουν ρηξιγενείς ζώνες που συνοδεύονται από αποσάθρωση σε βάθος αλλά και όταν εμφανίζεται ο τεκτονικός σχηματισμός που σχετίζεται με τις επωθήσεις (θέση Μαλακάσι). Στο γεωλογικό περιβάλλον της μολάσσας, όπου ο τεκτονισμός είναι περιορισμένος, προβλήματα παρουσιάζονται κυρίως όταν επικρατεί η μαργαϊκή φάση ενώ ο χαρακτηριστικός τύπος αστάθειας αφορά την κατάρρευση μεγάλων πάγκων ψαμμίτη ή κροκαλοπαγούς λόγω της προοδευτικής διάβρωσης από τη ροή του υπόγειου νερού στην επαφή με την υποκείμενη μάργα (Παπατόλιος, 2005).
- Τις περισσότερες φορές, κατά μήκος και εκατέρωθεν των ρηγμάτων, παρατηρείται διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής (Λέκκας και Κράνης, 2001). Συγκεκριμένα:
 - α) τα ρήγματα δημιουργούν ρηξιγενή μέτωπα ή κρημούς που συνήθως καλύπτονται από λιγότερο ή περισσότερο χαλαρά, γωνιώδη, αδρομερή ή λεπτομερή υλικά, τα πλευρικά κορήματα. Τα προβλήματα που ανακύπτουν είναι συνάρτηση του βαθμού συνεκτικότητας των κορημάτων.
 - β) από τον κατακερματισμό των γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διάρρηξη, λόγω τριβής των εκατέρωθεν ρηξιτεμαχών, δημιουργούνται σχηματισμοί που αποκαλούνται τεκτονισμένα πετρώματα (μυλονίτες). Το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται είναι η έντονη ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών, που οδηγεί σε σειρά επιμέρους προβλημάτων όπως: (i) απώλεια στήριξης εξ' αιτίας πλήρωσης των δημιουργούμενων κενών από πιθανές υπερκείμενες μάζες, (ii) κυκλοφορία υπογείων υδάτων και συνεπαγόμενη υπόγεια διάβρωση, (iii) στατική και δυναμική καθίζηση εξ' αιτίας συμπίεσης των χαλαρών τεκτονικών πετρωμάτων στη ζώνη του ρήγματος και

(iv) διαφοροποίηση ή/και ενίσχυση αναμενόμενων μετακινήσεων και επιταχύνσεων σε σεισμική διέγερση.

Με βάση τα παραπάνω και την έρευνα των Koukis and Ziourkas (1991) για την χρονική περίοδο (1949-1991), δίνεται στον Πίνακα 4.5 η βαθμονόμηση της παραμέτρου «λιθολογία».

Πίνακας 4.5. Βαθμονόμηση της λιθολογίας.

Λιθολογία	Βαθμονόμηση
Ηφαιστειακά πετρώματα.	0
Στρώματα σειράς μετάβασης προς τον Φλύσχη, Ανθρακικά πετρώματα (Ασβεστόλιθοι, Μάρμαρα).	1
Μεταμορφωμένα σχιστώδη πετρώματα.	2
Νεογενή - Μολασσικά ιζήματα / Τεταρτογενείς αποθέσεις / Διαταραγμένα γεωλογικά υλικά (από παλαιότερες κατολισθήσεις).	3
Φλύσχης.	4

Παρατήρηση:

Στην παράμετρο αυτή και στον λιθολογικό τύπο των Νεογενών – Μολασσικών ιζημάτων/Τεταρτογενών αποθέσεων, συμπεριλαμβάνεται και η έννοια των γεωλογικών υλικών που έχουν προκύψει από παλαιότερες κατολισθήσεις (old landslide material/disturbed material) σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Επειδή τα φυσικομηχανικά τους χαρακτηριστικά είναι διαταραγμένα και κατά συνέπεια υποβαθμισμένα, η κωδικοποίηση των αλληλεπιδράσεων της παραμέτρου λιθολογίας με τις υπόλοιπες παραμέτρους κατά τη συμπλήρωση – κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης εκτιμάται με απομειούμενες τιμές (δηλαδή προς το χειρότερο) με βάση την κλίμακα 0 έως και 4 σε σχέση με τις τιμές που θα λαμβάνονταν υπόψη εάν δεν υπήρχε ιστορικό αστοχιών πρηνών.

4.2.5. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η παρουσία του νερού είναι τις περισσότερες φορές καθοριστική για την τελική συμπεριφορά (αστοχία ή όχι) των γεωλογικών υλικών πάνω στα οποία εδράζεται ένα τεχνικό έργο και αυτό συμβαίνει γιατί η δράση του νερού επηρεάζει το πρηνές με τρεις τρόπους (Tsangaratos et al., 2005):

- α) συμβάλει στον σχηματισμό χαλαρών επιφανειακών γεωλογικών υλικών, τα οποία καλύπτουν τα πρηνή με τη μορφή του αποσαθρωμένου μανδύα,
- β) προκαλεί υψηλή πίεση πόρων στους εδαφικούς σχηματισμούς και στις διακλάσεις της βραχώμαζας, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το βάρος των

γεωλογικών υλικών ενώ συμβάλλει στην λίπανση των ασυνεχειών με συνέπεια την μείωση της τριβής,

γ) βοηθά στην κίνηση των χαλαρών υλικών προς τα κατάντη, αυξάνοντας τα φορτία στην περιοχή απόθεσης και κάνοντας ευκολότερη τη δράση της διάβρωσης και αποσάθρωσης, χωρίς πλέον εδαφικό μανδύα, ώστε να προκληθούν πιθανά αστοχίες.

Ο προσδιορισμός, λοιπόν, της πηγής, της ποσότητας του νερού, της πίεσης του νερού των πόρων είναι τόσο σημαντικά όσο και ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας των γεωλογικών σχηματισμών (Varnes, 1984). Σύμφωνα με την Γεωργιάννου (2001), η παρουσία του νερού μέσα στο έδαφος αφ' ενός επηρεάζει τον τρόπο που διατάσσονται οι κόκκοι (και συνεπώς τη γεωμετρία του εδαφικού ιστού), αφ' ετέρου το μέγεθος των φορτίων που μεταφέρονται στον εδαφικό ιστό. Ο Καββαδάς (2002) αναφέρει ότι ο ρόλος του νερού στην παραμόρφωση του εδάφους είναι τριπλός:

α) αλληλεπιδρώντας χημικά: τα μόρια του νερού των πόρων (ηλεκτρικά δίπολα) έλκονται από τα αργιλικά πλακίδια και προσκολλώνται σε αυτά (προσροφημένο νερό ή διπλή στρώση νερού). Με την αύξηση της υγρασίας, αυξάνει το πάχος των διπλών στρώσεων, οι άργιλοι διογκώνονται και μειώνεται η αντοχή τους.

β) αλληλεπιδρώντας με φυσικό τρόπο: κατά τη ροή νερού διαμέσου του εδάφους, τροποποιούνται οι υδροστατικές πιέσεις των πόρων και συνεπώς αλλάζουν οι ενεργές τάσεις.

γ) αλληλεπιδρώντας μηχανικά: τα φορτία που επιβάλλονται στο έδαφος αναλαμβάνονται εν μέρει από τον εδαφικό σκελετό (κόκκοι) και εν μέρει από το νερό των πόρων.

Από τις σημαντικότερες, λοιπόν, φυσικές ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρσανούς είναι εκείνες που ρυθμίζουν την συχνότητα της κίνησης του νερού προς το πρσανές, όπως επίσης και εκείνες που προσδιορίζουν την ικανότητα κατακράτησης του νερού. Η συχνότητα της εισόδου του νερού στο έδαφος επηρεάζεται ισχυρά από το πορώδες, την υδραυλική αγωγιμότητα, την κατανομή του μεγέθους των πόρων, τα προτιμητέα δίκτυα ροής, το κάλυμμα βλάστησης, την μικρο- και μακρο- τοπογραφία καθώς και από τα φαινόμενα ψύξης.

Για παράδειγμα, αν σε μια περιοχή η στάθμη του φρεάτιου ορίζοντα είναι σε μικρό βάθος, κατά την περίοδο του χειμώνα ανεβαίνει ακόμα πιο ψηλά και με την τριχοειδή ανύψωση το νερό φθάνει σε πολύ μικρό βάθος, επηρεαζόμενο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Έτσι, μια πτώση της θερμοκρασίας κάτω από το μηδέν έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του σε πάγο με αύξηση κατά 9% περίπου του όγκου και εξάσκηση πιέσεων, οι οποίες μπορούν εάν πάνω από αυτό το έδαφος περνά δρόμος (ο οποίος έχει κατασκευασθεί χωρίς να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας), να προκαλέσουν ανωμαλίες στο οδόστρωμα και ρωγματώσεις που εμποδίζουν την κυκλοφορία και προκαλούν κρούσεις, επιτείνοντας έτσι την καταστροφή του. Εξ' άλλου με το λιώσιμο του πάγου προκαλείται υπερβολική αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους με αποτέλεσμα να καθίσταται αυτό πλαστικό, να μειώνεται η αντοχή του και να παραμορφώνεται εύκολα, μη αντέχοντας στο βάρος των οχημάτων. Εκτός από αυτές τις ζημιές, η δημιουργία παγοκρυστάλλων μέσα στο έδαφος μπορεί να προκαλέσει μετακινήσεις σε τοίχους αντιστήριξης, ανυψώσεις αβαθών θεμελίων κ.α. (Κουμαντάκης, 1984).

Με αφορμή το προηγούμενο παράδειγμα, η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού σε ένα πρανές προκαλεί μείωση της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού ενώ επιτείνει τις διεργασίες εσωτερικής και εξωτερικής αποσάθρωσης και διάβρωσης, ιδιαίτερα σε ευπαθή λεπτόκοκκα υλικά. Κατά κύριο λόγο, ο αρνητικός ρόλος του υπόγειου νερού βασίζεται στη μείωση των δυνάμεων που δρουν σταθεροποιητικά για το πρανές και στην αύξηση των δυνάμεων που το αποσταθεροποιούν. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις το υπόγειο νερό δημιουργεί σοβαρά και συνήθως αναπάντεχα προβλήματα είτε επειδή δεν αναγνωρίζεται η παρουσία του είτε επειδή είναι δύσκολο να προβλεφθεί η συμπεριφορά του στο γεωλογικό περιβάλλον όπου εμφανίζεται.

Σε πρανή επιχωμάτων ή/και ορυγμάτων, το υπόγειο νερό είναι κύρια αιτία αστοχιών αφού μπορεί: (α) να λειτουργήσει σαν λιπαντικό, στην περίπτωση διεπιφάνειας σκληρού αδιαπέρατου εδαφικού σχηματισμού με άλλο υπερκείμενο εδαφικό ορίζοντα με συνέπεια τη δημιουργία επιφανειών μειωμένης διατμητικής αντοχής, (β) να υποβιβάσει τη διατμητική αντοχή (συνοχή) σε ένα αργιλικό στρώμα με την αύξηση της υγρασίας, (γ) να διαβρώσει ένα αμμώδη ορίζοντα (Ρόζος, 2007) και τέλος δ) η πίεση του νερού των πόρων είναι σημαντική, αφού κινήσεις του

υπόγειου νερού σημειώνονται συχνά σε μεγάλα επιχώματα όπως για παράδειγμα αυτά των φραγμάτων ή και σε ορύγματα που τέμνουν τον υδροφόρο ορίζοντα (Ρόζος, 2007).

Επιπλέον, η αστάθεια σε ένα πρανές μπορεί να προκληθεί από έναν συμπιεσμένο υδροφορέα εξ' αιτίας μιας εδαφικής στρώσης ή μιας τοπικά αυξανόμενης πίεσης του νερού των πόρων (Crosta et al., 2012). Αυτή η υδραυλική ετερογένεια επηρεάζει την ροή του νερού στο πρανές και μπορεί να παρεμποδίσει την υπόγεια ροή, προκαλώντας την ανάπτυξη παραπάνω πίεσης του νερού κάτι που ενδεχομένως θα οδηγήσει σε αστοχία. Εάν, όμως, ο μηχανισμός αστοχίας καθυστερήσει να δημιουργηθεί, είναι πιθανόν η παραπάνω πίεση του νερού των πόρων να διοχετευθεί σε άλλες προτιμητέες αποστραγγιστικές διαδρομές.

Τέλος, πολύ συχνά σε περιπτώσεις κατολισθήσεων αλλά και βραχολισθήσεων παίζει πολύ μεγάλο ρόλο ο βαθμός κορεσμού των εδαφικών υλικών που αποτελούν τα υλικά κατολίσθησης ή το υλικό πλήρωσης ασυνεχειών μιας βραχώμαζας. Η μεταβολή του βαθμού κορεσμού σε αυτά τα φαινόμενα μεταβάλλει την διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών και συμβάλλει σε μετακινήσεις αφού όλα τα εδαφικά υλικά επιδεικνύουν μεταβολές όγκου (Γκαζέτας κ.α., 2010).

4.2.5.1. Χαρακτηριστικά παραδείγματα κατολισθήσεων που συμβαίνουν όταν κύριο αίτιο πρόκλησης είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες

1. Σε κατολίσθηση του Αγίου Κήρυκου της νήσου Ικαρίας, το υπόγειο νερό έδρασε διαβρωτικά επί των πετρωμάτων μέσω των οποίων διερχόταν, διαποτίζοντας και μετατρέποντας ασυνέχειες και διακλάσεις σε πλαστικά και ολισθηρά επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο προετοιμάστηκαν, πλήρως, τα υπερκείμενα των αδιαπέρατων μαρμαρυγιακών σχιστολίθων κατακερματισμένα μάρμαρα (λόγω της τεκτονικής δράσης και της καρστικής διάβρωσης) σε κατολίσθηση με το ίδιο τους το βάρος όπου κινήθηκαν επί του ολισθηρού επιπέδου της επιφάνειας επαφής προς τα τοπογραφικά χαμηλότερα σημεία (Καραγεωργίου, 1972).

2. Σύμφωνα με τον Παπατόλιο (2005), ο αποσταθεροποιητικός ρόλος του υπόγειου νερού στα πρανή ασκείται εκεί όπου οι γεωλογικές συνθήκες το επιτρέπουν (δυσμενείς γεωλογικές δομές, ασθενείς ζώνες, διαφοροποιήσεις διαπερατότητας κλπ). Ιδιαίτερα δυσμενής στην ευστάθεια είναι η επίδραση του εγκλωβισμένου υπόγειου νερού. Το υπόγειο νερό είναι ένας χρονικά μεταβαλλόμενος παράγοντας με άμεση εξάρτηση από τη βροχόπτωση, ενώ το

μέγεθος της αρνητικής του επίδρασης στην ευστάθεια των πρानών καθορίζεται από το γεωλογικό περιβάλλον.

Για παράδειγμα, λόγω της διαφοροποίησης του γεωλογικού περιβάλλοντος κατά μήκος της χάραξης της Εγνατίας Οδού, έχουν παρουσιασθεί όλοι οι δυνατοί τύποι αστάθειας πρानών (καταπτώσεις, αβαθείς ερπυσμοί, εδαφοροές, κατολισθήσεις σε έδαφος και βράχο, κλπ). Μάλιστα, οι διαφοροποιήσεις της διαπερατότητας με το βάθος μπορεί να οδηγήσουν σε δυσμενείς υπό πίεση υδραυλικές συνθήκες και αποσταθεροποίηση του πρανούς.

3. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών που δομούν τον οικιστικό χώρο του Παλαιού Μικρού Χωριού στον Ν. Ευρυτανίας σε συνδυασμό με τα πολύ υψηλά μεγέθη χιονοπτώσεων - βροχοπτώσεων που παρατηρούνται, έχουν σαν αποτέλεσμα τη διαμόρφωση εποχιακών υδροφόρων οριζόντων στα μεγάλα πάχους κορήματα και αποσαθρώματα, αλλά και στους ψαμμίτες του φλύσχη, που εκφορτίζονται με τη μορφή εκροών ή και πηγών νερού (Ρόζος κ.α., 2004). Η παρουσία του μεταβαλλόμενου αυτού υδροφόρου ορίζοντα βοηθά στην απόπλυση των λεπτομερών υλικών, αλλά και στη μείωση των διατμητικών αντοχών, με την αύξηση εποχιακά της πίεσης του νερού των πόρων, συμβάλλοντας στην αστάθεια συγκεκριμένων τμημάτων των πρανών, ιδιαίτερα κάτω από δυναμική φόρτιση.

4. Παλαιοκατολισθήσεις μεγάλου μεγέθους με σημαντικές μετακινήσεις από τον χρόνο εκδήλωσής τους οδηγούν ορισμένες φορές στην κάλυψη διαπερατών σχηματισμών από τα υλικά κατολίσθησης. Αυτοί μπορεί να είναι σχηματισμοί διαπερατών πετρωμάτων ευρισκόμενοι κατόπιν των κατολισθήσεων κατά τον χρόνο της εκδήλωσής τους ή συχνότερα κοίτες ποταμών που θάβονται από τα υλικά κατολίσθησης με τον ρου των ποταμών να εκτρέπεται από αυτά. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα υλικά κατολίσθησης στην περιοχή του πόδα του πρανούς αποστραγγίζονται λόγω της παρουσίας του θαμμένου διαπερατού σχηματισμού που βρίσκεται υπό χαμηλότερη πίεση πόρων από την αντιστοιχούσα στην υδροστατική κατανομή της πίεσης πόρων σε εκείνο το βάθος (Μπαρδάνης κ.α., 2006).

5. Σε αρκετές περιοχές έχει παρατηρηθεί ότι μεγάλο μέρος της επιφάνειας ολίσθησης εκδηλώνεται λίγο πάνω από ή κατά μήκος της διεπιφάνειας του υγιούς υποβάθρου με την αποσαθρωμένη ζώνη ή με τα υπερκείμενα υλικά (Παπατόλιος, 2005). Η επιφάνεια αυτή διαχωρίζει σχηματισμούς με διαφορετική αντοχή και

παραμορφωσιμότητα αλλά αποτελεί και επιφάνεια ασυνέχειας στη διαπερατότητα του υπεδάφους όπου αναπτύσσονται αυξημένες υδροστατικές πιέσεις.

Το φαινόμενο είναι πιο έντονο όταν πρόκειται για παλιές κατολισθήσεις. Οι έντονες διαφοροποιήσεις στη διαπερατότητα περιορίζουν την υδραυλική επικοινωνία με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σχεδόν ανεξάρτητων πιεζομετρικών συνθηκών στους επιμέρους σχηματισμούς (κατολίσθηση Νεμέας, 2003). Στα αμιγώς βραχώδη πρηνή, όπου οι δομικές ασυνέχειες με δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο του πρηνούς είναι καθοριστικές για την ευστάθειά του, το υπόγειο νερό εκτός από την άνωση στην επιφάνεια της ασυνέχειας ασκεί και οριζόντια αποσταθεροποιητική δύναμη μέσα από τις ρωγμές εφελκυσμού που συνήθως εμφανίζονται στο ανάντη τμήμα.

6. Τα πρηνή τα παρακείμενα σε ταμιευτήρες και ποτάμια, συχνά, υπόκεινται σε κατολισθήσεις εξ' αιτίας των διακυμάνσεων του επιπέδου του νερού (Crosta et al., 2012). Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να προκληθούν από: α) πτώση στάθμης του ταμιευτήρα, β) αλλαγές στη στάθμη του επιπέδου του νερού σε ποτάμια λόγω πλημμυρών και πτώση στάθμης του υπόγειου νερού όταν πέσει το επίπεδο της στάθμης του ποταμού ή της λίμνης, γ) διαρροή σε μια λίμνη, δ) άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ε) ισχυρή καταιγίδα (Crosta et al., 2012).

Μάλιστα, σε ταμιευτήρες όπου τα πρηνή αποτελούνται από υψηλής περατότητας σχηματισμούς, σε περίπτωση ξαφνικής ανόδου της στάθμης του νερού σε συγκεκριμένο χρόνο, θα προκαλέσει γρήγορα προοδευτική διαρροή προς τα πρηνή και πιέσεις στη βάση τους. Αυτή η διαδικασία μειώνει τις ενεργές τάσεις των σχηματισμών που δομούν την κοίτη του ταμιευτήρα και κατά συνέπεια προκαλεί την αστάθεια των εκεί απαντώμενων πρηνών ή και την πρόκληση κατολισθήσεων. Με βάση τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το ότι η ποσοτικοποίηση της παραμέτρου «υδρογεωλογικές συνθήκες» έλαβε υπόψη της το διαχειριστικό σχέδιο του Υδατικού Διαμερίσματος της Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ01) που συντάχθηκε από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος (2013), δίνεται στη συνέχεια η ακόλουθη βαθμονόμηση της παραμέτρου των υδρογεωλογικών συνθηκών (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6. Βαθμονόμηση των υδρογεωλογικών συνθηκών.

Υδροπερατότητα	Βαθμονόμηση
α) Μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής – πολύ μικρής περατότητας, β) Ρωγματώδεις σχηματισμοί μικρής – πολύ μικρής περατότητας (φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι, φλύσχης, σχιστοκερατόλιθοι, νεογενή ιζήματα)	1
α) Προσχωματικές, κυρίως, αποθέσεις κυμαινόμενης περατότητας β) Ανθρακικοί σχηματισμοί μικρής – μέτριας περατότητας.	2
Κορήματα κυμαινόμενης περατότητας.	3
Ανθρακικοί σχηματισμοί μέτριας – υψηλής περατότητας.	4

4.2.6. Υδρομετεωρολογικές συνθήκες

Για την έναρξη μιας κατολισθήσης ο ρόλος των υδρομετεωρολογικών συνθηκών (όπως η βροχόπτωση κυρίως, το λιώσιμο του χιονιού, οι εναλλαγές ψύξης-θέρμανσης, ο άνεμος και η θερμοκρασία του αέρα) είναι πολύ κρίσιμος, αφού αποτελούν τους περισσότερο σημαντικούς γενεσιουργούς ατμοσφαιρικούς παράγοντες που προκαλούν κατολισθήσεις. Αναλυτικότερα οι προαναφερόμενοι ατμοσφαιρικοί παράγοντες περιγράφονται στη συνέχεια.

4.2.6.1. Βροχόπτωση

Οι βροχοπτώσεις αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους εξωτερικούς παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων και προκαλούν, κυρίως, το έναυσμα της κίνησης. Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιόδους αυξημένων βροχοπτώσεων, η συχνότητα των κατολισθήσεων είναι μεγάλη, δεδομένου ότι προκαλείται μεταβολή στο νερό των πόρων και αυξημένες υδροστατικές πιέσεις (Ζιούρκας, 1989). Επιπλέον, ενεργοποιούνται οι διαδικασίες αποσάθρωσης (χημικές και μηχανικές) και παράλληλα η διάβρωση που προκαλείται σε ένα πρηνές από τα επιφανειακά νερά. Η παράμετρος της βροχόπτωσης στο πρόβλημα των κατολισθήσεων έχει ποικίλο ρόλο.

Μετά από απότομες και μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις, το νερό που απορρέει επιφανειακά, διαβρώνει και υποσκάπτει τον πόδα των πρηνών ενώ αυτό που κατεισδύει, αυξάνει την πίεση των πόρων, μειώνει τις ενεργές τάσεις και την διατμητική αντοχή, προκαλεί εσωτερικές διαβρώσεις (ή και διογκώσεις αργιλικών ορυκτών), φορτίζει με το βάρος του την ασταθή μάζα και επιπλέον μειώνει την εσωτερική τριβή των σχηματισμών λιπαίνοντας τις επιφάνειες ασυνεχειών τους

(Ζιούρκας, 1989). Στην περίπτωση παρατεταμένων ισχυρών βροχοπτώσεων, οι τάσεις στο εσωτερικό των πρανών μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό. Η παρατεταμένη βροχή προκαλεί στην αρχή κορεσμό και στη συνέχεια κατάσταση βύθισης (Σταματόπουλος κ.α., 2006).

Με βάση τα ανωτέρω, οι κυριότερες παράμετροι της βροχόπτωσης που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι: α) η συνολική βροχόπτωση, β) η διάρκεια της προηγηθείσας βροχόπτωσης, γ) η ένταση και δ) η διάρκεια της βροχόπτωσης.

Όσον αφορά την ένταση, μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή καθώς επίσης και για την ίδια περιοχή κατά τη διάρκεια του έτους. Τα τελευταία χρόνια η παρουσία των έντονων καιρικών φαινομένων, έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης των φαινομένων αυτών.

Η καμπύλη έντασης-διάρκειας είναι ευαίσθητη στην περατότητα του εδάφους (καθώς και στο βαθμό της υφιστάμενης υγρασίας που υπάρχει εκείνη τη στιγμή στο υπέδαφος μέσω της προηγούμενης κατείσδυσης του νερού) πριν από ένα επερχόμενο σημαντικό γεγονός βροχόπτωσης. Η επιδεκτικότητα ενός πρανούς να αστοχήσει κάτω από μια δεδομένη βροχόπτωση συγκεκριμένης έντασης και διάρκειας εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες που υπάρχουν πριν από ένα σημαντικό γεγονός βροχόπτωσης. Έτσι, εδαφικά πρανά με χαμηλές τιμές περατότητας, έχουν μικρή ικανότητα για διάχυση της πίεσης των πόρων και κατά συνέπεια φέρουν ένα είδος «μνήμης» για βροχοπτώσεις που συμβαίνουν πριν από ένα σημαντικό γεγονός κατακρήμνισης που προκαλεί αστοχία.

Η επιδεκτικότητα ενός πρανούς να αστοχήσει λόγω ενός ακραίου καιρικού φαινομένου εξαρτάται (εκτός των άλλων) και από τον αρχικό βαθμό κορεσμού που αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο. Στην Καλιφόρνια, για παράδειγμα, βρέθηκε ότι πέντε έως έξι χιλιοστά την ώρα, ήταν απαραίτητα για την πρόκληση ρωών γαιών από τη στιγμή που είχε κορεσθεί το έδαφος της περιοχής (Nagarajan et al., 1999).

Σε ένα άλλο παράδειγμα στην επαρχία (καντόνιο) Ticino της Ελβετίας, η βροχόπτωση χαρακτηριζόταν από μια περίοδο επαναληψιμότητας διάρκειας μεγαλύτερης των δύο ετών. Ωστόσο, υπήρχαν βροχοπτώσεις που ήταν έντονες και πάνω από το κρίσιμο (για την περιοχή) όριο – κατώφλιο που δεν προκάλεσαν κάποια κατολίσθηση. Ένας από τους λόγους που εξηγεί αυτή τη διαφορά είναι το επίπεδο της υγρασίας στο έδαφος πριν από τη βροχόπτωση. Το έδαφος που είναι

ξηρό, είναι ικανό να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες νερού. Παρόμοια, κατολισθήσεις είναι δυνατόν να συμβούν με σχετικά μικρές βροχοπτώσεις εάν το έδαφος είναι ήδη κορεσμένο από προηγούμενη βροχόπτωση (Pedrozzi, 2004).

Οι κατολισθήσεις που συνέβησαν σε αρκετά μέρη της Ελλάδας τον χειμώνα του 2003 με αφορμή τα έντονα καιρικά φαινόμενα (ισχυρές παρατεταμένες βροχοπτώσεις), οφείλονται ανάμεσα σε άλλα, στην αρνητική επίδραση του νερού αφού λόγω του ότι δεν υπήρχε κατάλληλη υποδομή αποστράγγισης, ανέβαινε η στάθμη του φρεάτιου ορίζοντα στα πρανή αλλά και στο έδαφος κάτω από το οδόστρωμα. Αυτό συνεπαγόταν αύξηση της πίεσης του νερού που μείωνε μέχρι αστοχίας την ευστάθεια των τεχνικών έργων. Μάλιστα σε ανάλυση ευστάθειας πρανών στους νομούς Ευρυτανίας και Αχαΐας, βρέθηκε ότι όσο αυξάνεται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα (h), οι συντελεστές ασφαλείας μειώνονται με αποτέλεσμα να παίρνουν τις ελάχιστες τιμές τους για ύψος υδροφόρου ορίζοντα ίσο με $75\% \cdot h$ (Σακελλαρίου Μ. κ.α., 2005). Κατά συνέπεια, η ευστάθεια του πρανούς κινδυνεύει όσο ανεβαίνει ο υδροφόρος ορίζοντας.

Η σχέση μεταξύ της έντασης και της διάρκειας στην κατείσδυση της βροχής έχει πολλαπλή ερμηνεία. Προηγούμενη βροχόπτωση (ή λιώσιμο του χιονιού) αυξάνει το περιεχόμενο του νερού στο έδαφος πριν από ένα μεγάλο γεγονός βροχόπτωσης. Μικρές, δε, αλλαγές στην πίεση του νερού των πόρων (για παράδειγμα με μια επόμενη βροχόπτωση έστω και μικρότερου ύψους σε χιλιοστά) μπορούν να προκαλέσουν το έναυσμα για ολίσθηση. Ωστόσο, από την σκοπιά της υδραυλικής σημασίας, η επιδεκτικότητα ενός πρανούς να αστοχήσει δεν οφείλεται μόνο στη δράση του περιεχομένου του εδάφους σε νερό αλλά επίσης και στο βαθμό περατότητας του πορώδους εδάφους. Συγκρινόμενο με το αρχικά ξηρό έδαφος, οι πιέσεις των πόρων διαχέονται περισσότερο γρήγορα μέσα σε ένα πιο περατό κορεσμένο έδαφος.

Με το παραπάνω εννοείται ότι για ένα πρανές που έχει υποστεί την κατείσδυση μιας προηγούμενης βροχόπτωσης, οι ενεργές τάσεις μειώνονται συνεχώς και κατά κάποιο τρόπο ταυτόχρονα στο υψηλότερο και στο χαμηλότερο τμήμα του πρανούς κατά τη διάρκεια του επόμενου γεγονότος βροχόπτωσης. Χωρίς την ύπαρξη προηγούμενης βροχόπτωσης, η μείωση των ενεργών τάσεων λαμβάνει χώρα μόνο στο υψηλότερο τμήμα του πρανούς και κατά συνέπεια ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται σε μικρότερη περιοχή (Picarelli et al., 2010).

Σύμφωνα με τους Baroň et al (2012), η βροχόπτωση μπορεί να αντιπροσωπεύει έναν γενεσιουργό εναυσματικό παράγοντα για διαφορετικούς τύπους κατολισθήσεων:

- α) βαθιές κατολισθήσεις με επίπεδα ολίσθησης σε βάθος μεγαλύτερα των δέκα μέτρων,
- β) ρηχές κατολισθήσεις με επίπεδα ολίσθησης σε βάθος από ένα έως και δέκα μέτρων,
- γ) κατολισθήσεις με επιφανειακά επίπεδα ολίσθησης (ροές γαιών).

Για αυτές τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις, διαφορετικά υδρολογικά συστήματα και κατά συνέπεια βροχομετρικά χαρακτηριστικά μπορούν να θεωρηθούν ως εναυσματικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, οι ροές γαιών έχουν μια ισχυρή συσχέτιση με τα μικρής διάρκειας αλλά μεγάλης έντασης φαινόμενα βροχόπτωσης (διάρκεια λίγων ωρών και περισσότερο συχνά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινόπωρου) ενώ οι βαθιές κατολισθήσεις συνδέονται με μηνιαία ή ετήσιας διάρκειας βροχόπτωση. Η ετήσια βροχόπτωση μπορεί να συσχεπισθεί μόνο με βαθιές κινήσεις. Η συχνότητα των ρηχών κατολισθήσεων είναι ανεξάρτητη από την ετήσια βροχόπτωση αλλά περισσότερο εξαρτημένη από τη βροχόπτωση που λαμβάνει χώρα σε συντομότερες χρονικές περιόδους.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι πρηνή που μέχρι τώρα έχουν «αντέξει» σε προηγούμενα έντονα καιρικά φαινόμενα (καταιγίδες) δεν είναι απαραίτητο ότι θα μπορέσουν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά κάτω από περισσότερο ακραία γεγονότα βροχόπτωσης καθώς η βροχόπτωση θα ξεπερνά το ιστορικό σημείο του έως τότε ύψους βροχής που τα πρηνή είχαν υποστεί. Η δυνατότητα αύξησης της συχνότητας και της έντασης των ακραίων βροχομετρικών γεγονότων, λόγω της κλιματικής αλλαγής, είναι δυνατόν να αυξήσει την πιθανότητα κατολισθητικής επικινδυνότητας και να προκαλέσει σημαντικές επιδράσεις στη διαχείριση της ασφάλειας των πρηνών, ιδιαίτερος στα φυσικά πρηνή που είναι περισσότερα ευαίσθητα στην κλιματική αλλαγή από ότι τα τεχνητά πρηνή (Van Westen, et al., 2010).

Σε μια συγκεκριμένη περιοχή του Hong Kong και συγκεκριμένα στον δρόμο Ching Cheung, παρατηρήθηκε ότι τα πρηνή των ορυγμάτων κατά μήκος του δρόμου, είχαν υποστεί αρκετά σημαντικές ολισθήσεις από την εποχή της κατασκευής του τη δεκαετία του 1960 (Hencher et al., 2008). Σημαντικό στοιχείο των

συγκεκριμένων κατολισθήσεων ήταν ότι η επιφάνεια ολίσθησης ήταν βαθιά και συνέβησαν αρκετές ημέρες μετά από πολύ έντονη βροχόπτωση. Για να γίνουν γνωστοί οι λόγοι αυτής της βαθιάς επιφάνειας αστοχίας αλλά και καθυστερημένης έναρξης των ολισθήσεων, πραγματοποιήθηκε ανάδρομη ανάλυση, κατά την οποία έγινε γνωστό ότι οι ολισθήσεις αυτές συνδέονταν με προηγούμενες αστοχίες από τη δεκαετία του 1940.

4.2.6.2. Άνεμος – θερμοκρασία του αέρα

Άλλοι σημαντικοί γενεσιουργοί ατμοσφαιρικοί παράγοντες για πρόκληση κατολισθήσεων είναι η θερμοκρασία του αέρα και ο άνεμος, οι οποίοι συνδέονται με την εξατμισοδιαπνοή. Η εξατμισοδιαπνοή καθορίζει την απώλεια νερού στο όριο εδάφους – αέρας και αυτή η απώλεια επιδρά στην ισορροπία του εδάφους – νερού, από την οποία εξαρτάται η ευστάθεια του εδάφους (Baroň et al, 2012). Εάν η βροχόπτωση είναι έντονη για μικρή χρονική περίοδο, η εξατμισοδιαπνοή θα είναι μικρή και μεγάλη ποσότητα νερού θα χαθεί υπό τη μορφή επιφανειακής απορροής.

Αντίθετα, εάν η βροχόπτωση είναι σταθερή για μια σειρά ημερών, τότε ακόμα και εάν η συνολική βροχόπτωση είναι αρκετά υψηλή, τους καλοκαιρινούς μήνες η εξατμισοδιαπνοή μπορεί σημαντικά να μειώσει την ποσότητα που μπορεί να κατεισδύσει στο υπέδαφος. Κατά συνέπεια, δεν είναι η συνολική βροχόπτωση αλλά η ένταση και το αποτέλεσμα της εξατμισοδιαπνοής που ελέγχουν την ενεργή κατείσδυση του νερού στο έδαφος, η οποία κατ' επέκταση μπορεί να προκαλέσει ένα κατολισθητικό γεγονός (Pedrozzì, 2004).

4.2.6.3. Εναλλαγές ψύξης – θέρμανσης

Οι εναλλαγές ψύξης-θέρμανσης, οι οποίες συνήθως συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου αλλά και κατά τη διάρκεια των θερμότερων χειμώνων, μπορούν να αυξήσουν τη δυναμική για αστοχία με την αύξηση και τη συρρίκνωση του περιεχόμενου νερού στο έδαφος. Οι μεγάλοι εύρους διακυμάνσεις (ημερήσιες και εποχιακές) της θερμοκρασίας του αέρα, οδηγούν στη διαδοχική διαστολή και συστολή των πετρωμάτων και την ανάπτυξη διαφορετικών εσωτερικών τάσεων (κύρια σε πετρώματα με ετερογενή σύσταση) που προκαλούν καταστροφή του ιστού τους και ρωγμάτωση.

Η δημιουργία αυτή των ρωγμών στα πετρώματα διευκολύνει την είσοδο και κυκλοφορία των μετεωρικών νερών. Στο νερό που διέρχεται μέσω των ρωγμών μεταβάλλεται το pH και αυξάνεται η διαλυτική του ικανότητα, προκαλώντας έτσι τη χημική αποσάθρωση των σχηματισμών. Επιπλέον, η δράση του παγετού με την πήξη και τη διαστολή του περιεχόμενου νερού στους πόρους, τις διακλάσεις και τις τριχοειδείς ρωγμές των πετρωμάτων, οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων και προοδευτικά στην καταστροφή αυτών με τη δημιουργία άλλων λιγότερο ανθεκτικών σε φορτίσεις. Ανάλογος είναι και ο ρόλος των μεταβολών της υγρασίας του εδάφους. Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι στις αργίλους και τα αργιλοαμμώδη εδάφη, η πήξη των πάγων δημιουργεί αύξηση του νερού στην επιφάνεια, η πήξη του οποίου εμποδίζει την αποστράγγιση του πρανούς, έτσι ώστε έχουμε ανύψωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η ισορροπία τελικά διαταράσσεται.

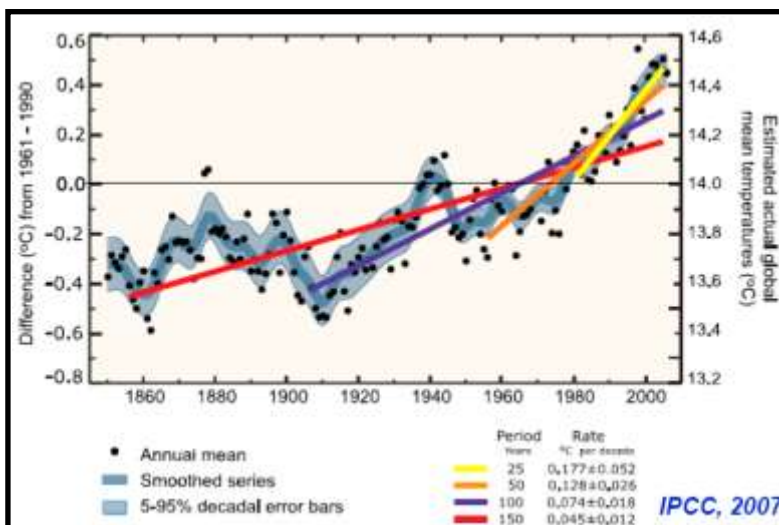
4.2.6.4. Λιώσιμο του χιονιού

Όσον αφορά το λιώσιμο του χιονιού, το οποίο είναι περισσότερο συχνό την εποχή της άνοιξης, μπορεί να αυξήσει την πίεση των πόρων στο έδαφος και κατά συνέπεια να αυξήσει τον κίνδυνο της αστοχίας ενός πρανούς.

Ειδικότερα, το γρήγορο λιώσιμο του χιονιού προκαλείται, συνήθως, από διαλείμματα ηλιοφάνειας και αύξηση της θερμοκρασίας ή από βροχοπτώσεις που ακολουθούν τις χιονοπτώσεις. Το νερό από το λιώσιμο του πάγου τροφοδοτεί πολύ γρήγορα τη ζώνη αποσάθρωσης των πετρωμάτων ή τους εδαφικούς σχηματισμούς με αποτέλεσμα την εκδήλωση μετακινήσεων.

Τα περισσότερο πρόσφατα δεδομένα από την ενόργανη παρατήρηση των μέσων τιμών των παραμέτρων της ατμόσφαιρας στη γη (θερμοκρασία, βροχόπτωση, υγρασία, κ.α), έχουν δείξει ότι ο εικοστός αιώνας έχει χαρακτηριστεί από σημαντικές κλιματικές αλλαγές. Ένας διεθνής φορέας για την κλιματική αλλαγή (I.P.C.C – Intergovernmental Panel on Climate Change) αναφέρει ότι τα τελευταία τριάντα χρόνια η θερμοκρασία στον γήινο πλανήτη έχει αυξηθεί περίπου 0.6°C , η οποία είναι αρκετά υψηλή συγκρινόμενη με την αύξηση 1°C που εκτιμήθηκε ότι συνέβη τα τελευταία 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια (Σχήμα 4.1). Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας έχει ανέβει κατά 15 cm λόγω κυρίως της υποχώρησης των παγετώνων. Μάλιστα, από τη δεκαετία του 1970, η επιφάνεια των ωκεανών παγκοσμίως έχει υποστεί μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.55°C .

Σύμφωνα με κλιματικά σενάρια που βασίζονται σε παγκόσμια μοντέλα, στο κοντινό μέλλον οι τροποποιήσεις του καιρού θα επηρεάσουν ισχυρά τον υδρολογικό κύκλο. Για παράδειγμα, ο αριθμός των βροχερών ημερών στη Μεσόγειο θα μειωθεί, αλλά οι βροχοπτώσεις όταν θα συμβαίνουν θα είναι περισσότερο έντονες αφού θα συγκεντρώνονται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Τέτοια γεγονότα θα έχουν επίδραση στην ευστάθεια των πρηνών αφού θα επηρεάζονται από το βροχομετρικό καθεστώς (Picarelli et al., 2010).



Σχήμα 4.1. Αύξηση της θερμοκρασίας παγκοσμίως από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα έως και τις αρχές του εικοστού πρώτου (IPCC, 2007).

Τέλος, αξίζει να καταγραφεί ότι οι κατολισθήσεις είναι δυνατόν να αποτελέσουν ενδείξεις της κλιματικής αλλαγής (Borgatti et al., 2008). Συγκεκριμένα:

- Τροποποιήσεις της κατολισθητικής συχνότητας μπορούν να ερμηνευθούν σαν αλλαγές στις υδρολογικές συνθήκες των πρηνών, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται από το κλίμα.
- Τα πρηνή μπορούν να θεωρηθούν ως γεωμορφολογικοί δείκτες της κλιματικής αλλαγής, αφού από την εποχή των παγετώνων (Late Glacial) έως σήμερα, έχουν επηρεασθεί άμεσα ή έμμεσα.
- Το κλίμα ουσιαστικά καθορίζει μια μεγάλης χρονικής διάρκειας εξελικτική διαδικασία στην οποία αποδίδονται περισσότερο οι, για πρώτη φορά, αστοχίες (σε μεγάλα κατολισθητικά γεγονότα) και λιγότερο σε κάποιον άλλο παράγοντα εναύσματος (Corominas and Mavrouli, 2011).

- Η επίδραση της υγρασίας είναι ένδειξη στην περίπτωση της επανεργοποίησης ανενεργών κατολισθήσεων, στην επιτάχυνση ενεργών ολισθήσεων και στην πρόκληση του εναύσματος της αστοχίας προκειμένου για ρηχές κατολισθήσεις.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι, εκτός από τις γεωμορφολογικές και τις γεωλογικές, οι κλιματικές - υδρομετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, υγρασία αέρα, κλπ) αποτελούν βασική παράμετρο του φυσικού περιβάλλοντος που επηρεάζει τους τεχνικογεωλογικούς χαρακτήρες των γεωλογικών ενοτήτων μιας περιοχής, αλλά και παρεμβαίνει στη γενική γεωμηχανική συμπεριφορά του εδάφους θεμελίωσης. Ιδιαίτερα, σε ορισμένα σημεία του Ελληνικού χώρου (οροσειρά της Πίνδου), οι έντονες κλιματολογικές διαφοροποιήσεις οδηγούν στην αλλαγή του καθεστώτος ισορροπίας των πρηνών. Για την κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης σημαντικό, λοιπόν, ρόλο κατέχει η παράμετρος «βροχόπτωση», η βαθμονόμηση της οποίας δίνεται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7. Βαθμονόμηση της βροχόπτωσης.

Ύψος βροχής (βροχόπτωση)*	Βαθμονόμηση
<1000mm	1
1000-1200mm	2
1200-1400mm	3
>1400mm	4

* Με βάση τον Κλιματικό Άτλαντα της Ελλάδας (Φαρμακάκη, 2012) και τα κλιματικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης, τα οποία λήφθηκαν από την πτυχιακή εργασία της Ν. Μπουτίνα του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου (2012).

4.2.7. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

Η αναγνώριση της αποσάθρωσης σαν μια πρωταρχική διαδικασία στη διαμόρφωση του εδάφους, ιστορικά, αρχίζει να προσδιορίζεται από το τέλος του 19^{ου} έως και τις αρχές του εικοστού αιώνα (Calcaterra and Parise, 2010). Ως αποσάθρωση ορίζεται η τροποποίηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ορυκτών και κατ' επέκταση των πετρωμάτων.

Οι αποσαθρωτικές διεργασίες δημιουργούν μανδύα αποσάθρωσης, στον οποίο είναι δυνατόν να εκδηλωθούν κατολισθητικά φαινόμενα μικρής κλίμακας και επιφανειακού χαρακτήρα ακόμα και σε πρηνή με μικρή σχετικά κλίση που κατά τα άλλα μπορεί να δομούνται από συνεκτικά πετρώματα. Το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της μειωμένης διατμητικής

αντοχής και της υδροπερατότητάς του. Αυτό συνεπάγεται υποβαθμισμένες τιμές μηχανικών παραμέτρων σε σχέση με το μητρικό πέτρωμα από το οποίο προέρχεται και συμπεριφέρεται σαν εδαφοποιημένος σχηματισμός (Ζιούρκας, 1989).

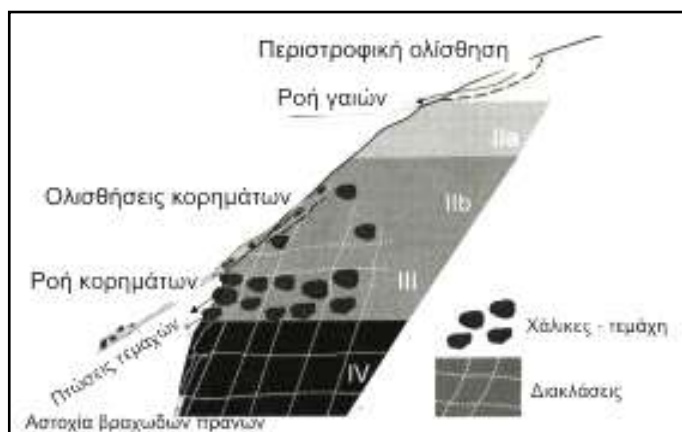
Συχνά, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο μανδύας αποσάθρωσης, παρατηρούνται θεμελιώσεις πάνω σε αυτόν με αποτέλεσμα την αρχή ερπυστικών κινήσεων ή καθιζήσεων που οδηγούν σε αστοχία των κατασκευών (Ζιούρκας, 1986). Για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να προσδιορίζεται το βάθος και ο βαθμός αποσάθρωσης, τα οποία συνδέονται με την εκτόνωση των τάσεων και τη διάβρωση, ελέγχοντας ουσιαστικά τους ακόλουθους παράγοντες (Crosta et al., 2012): α) πάχος του μετακινούμενου υλικού, β) γεωμετρία του πρανούς (ύψος και κλίση), γ) χαρακτηριστικά των γεωλογικών υλικών που δομούν το πρανές, δ) υπερκείμενες πρόσφατες αποθέσεις, οι οποίες καθυστερούν τις διαδικασίες αποσάθρωσης και ε) ρυθμός διάχυσης υπερπίεσης πόρων.

Το πάχος του μανδύα ποικίλει από μέρος σε μέρος και εξαρτάται από τη λιθολογία (σύσταση των μητρικών πετρωμάτων), τη δράση των κλιματικών παραγόντων (βροχόπτωση, θερμοκρασία), την παρουσία χημικών-οργανικών ουσιών, την έκταση στην οποία η διαδικασία της αποσάθρωσης έχει προχωρήσει καθώς και τη σχέση επιφανειακής διάβρωσης προς αποσάθρωση. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι σε μια εξεταζόμενη περιοχή, μπορεί να υπάρχουν διαφορετικοί βαθμοί αποσάθρωσης για συγκεκριμένο λιθολογικό σχηματισμό (Yalcin and Buluf, 2007).

Το πάχος του εδάφους επηρεάζει τη συχνότητα της κατείσδυσης, το είδος της ολίσθησης καθώς και την επιφανειακή απορροή. Επίσης, κάποια πετρώματα αποσαθρώνονται περισσότερο εύκολα σε σχέση με άλλα λόγω της ορυκτολογικής τους σύστασης, της δομής τους και της έκθεσής τους σε εξωγενείς γεωμορφολογικές διεργασίες, οι οποίες τα κάνουν να είναι περισσότερο επιδεκτικά σε αστοχίες πρανών.

Όπως περιγράφεται από τους Migon και Lidmar-Bergstrom (2001), το είδος της αστοχίας εξαρτάται από την τοπική εκτόνωση και τον βαθμό αποσάθρωσης. Ρηχές ολισθήσεις κορημάτων και πτώσεις ογκόλιθων είναι συχνές σε λιγότερο αποσαθρωμένα πετρώματα και απότομα πρανή. Αντίθετα, περιστροφικές ολισθήσεις εμφανίζονται να κυριαρχούν σε πολύ αποσαθρωμένα πετρώματα και σε περισσότερο χαμηλή υψομετρικά τοπογραφία (Σχήμα 4.2).

Η επιστημονική κοινότητα έχει επιδείξει μεγάλη προσοχή στην επί τόπου διάλυση των πετρωμάτων είτε μέσω χημικών είτε μέσω φυσικών είτε μέσω βιολογικών διαδικασιών. Ωστόσο, παρ' όλη την υψηλή συχνότητα των κατολισθήσεων, των διαβρωτικών φαινομένων στα αποσαθρωμένα γεωλογικά υλικά και τις απώλειες που επανειλημμένα προκαλούν, λίγα στοιχεία είναι γνωστά σχετικά με την άμεση και την έμμεση σχέση μεταξύ της αποσάθρωσης και των ολισθήσεων. Το πρόβλημα περαιτέρω περιπλέκεται λόγω του εύρους των χαρακτηριστικών μιας κατολίσθησης.



Σχήμα 4.2. Σχέση βαθμού αποσάθρωσης και τύπου κατολίσθησης (Migon and Lidmar-Bergstrom, 2001).

Σε μια προσπάθεια να ταξινομηθούν οι ολισθήσεις σε φυσικά πρηνή που περιλαμβάνουν παραμένοντα εδάφη, ο Durgin (1977), περιέγραψε τη σχέση μεταξύ αποσάθρωσης και κατολισθήσεων (Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.8. Σχέση αποσάθρωσης και είδους κατολίσθησης.

Στάδιο αποσάθρωσης	Ολίσθηση μαζών
Σαπρόλιθος (ολικώς αποσαθρωμένος βράχος)	Περιστροφικές ολισθήσεις, καθιζήσεις
Αποσαθρωμένος γρανίτης (<15% υγιής βράχος)	Ροές γαιών, ροές κορημάτων
15 – 85% υγιής βράχος	Καταπτώσεις βράχων
Υγιής βράχος (<15% αποσαθρωμένου υλικού ανάμεσα στις ασυνέχειες)	Πτώσεις βράχων, ολισθήσεις βράχων

4.2.7.1. Ποσοτικός προσδιορισμός του πάχους μανδύα αποσάθρωσης

Ο υπολογισμός του πάχους μανδύα αποσάθρωσης είναι κρίσιμη παράμετρος για την εκτίμηση της ευστάθειας ενός πρηνούς. Αναφέρθηκε, προηγουμένως, ότι η χωρική κατανομή του βάθους του εδάφους ελέγχεται από την αλληλεπίδραση πολλών παραγόντων όπως της τοπογραφίας, του μητρικού πετρώματος, των

κλιματικών, βιολογικών, χημικών και φυσικών διαδικασιών. Ως εκ τούτου, το βάθος του εδάφους ποικίλει ευρέως χωρικά και η πρόβλεψή του σε ένα σημείο είναι δύσκολη. Επιπλέον, η έρευνα για το βάθος του εδάφους είναι χρονοβόρα και είναι δύσκολο να μετρηθεί ακόμα και σε μικρές λεκάνες (Dietrich and Reiss, 1995).

Για τους παραπάνω λόγους, διάφορες μέθοδοι έχουν ανακαλυφθεί για τον υπολογισμό του βάθους του εδάφους, όπως οι ακόλουθοι (Segoni et al., 2012):
α) λήψη μιας σταθερής, χωρικά, τιμής για ολόκληρη την υπο μελέτη περιοχή,
β) χρήση κλάσεων πάχους εδάφους με απόδοση σταθερής τιμής για κάθε έναν γεωλογικό σχηματισμό της εκάστοτε εξεταζόμενης περιοχής, γ) εξαγωγή ενός χάρτη πάχους εδάφους είτε από το υψόμετρο, είτε από την κλίση του πρσανούς. Περισσότερο πολύπλοκες μέθοδοι, οι οποίες κάνουν χρήση πολυμεταβλητών στατιστικών αναλύσεων ή προσεγγιστικών μοντέλων είναι λιγότερο συχνά προτιμητέες για να εφαρμοσθούν ως δεδομένα εισόδου σε μεγάλης κλίμακας αναλύσεις ευστάθειας πρανών, γιατί στοχεύουν σε κατά περίπτωση εξεταζόμενα πρανή και απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για να διορθωθούν και επικυρωθούν σε μεγαλύτερες εξεταζόμενες περιοχές.

Με βάση δημοσιευμένες εργασίες των Rozos et al. (2006) και Rozos et al. (2008) αλλά και από την συνεκτίμηση σχετικών στοιχείων από την Ελληνική και Διεθνή βιβλιογραφία, προκύπτει ότι το υψηλότερο ποσοστό κατολισθήσεων συνδέεται με περιοχές όπου το πάχος τους υπερβαίνει τα τρία (3) μέτρα. Η βαθμονόμηση, λοιπόν, της συγκεκριμένης παραμέτρου δίνεται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9. Βαθμονόμηση πάχους μανδύα αποσάθρωσης.

Πάχος Μανδύα Αποσάθρωσης*	Βαθμονόμηση
<0,5m	1
0,5 - 1,5m	2
1,6 - 3,0m	3
>3,0m	4

* Η βαθμονόμηση βασίζεται σε εργασίες των Rozos et al. (2006) και Rozos et al. (2008)

4.2.8. Απόσταση από ποτάμια

Έρευνες έχουν δείξει μια στενή χωρική σχέση μεταξύ της εμφάνισης κατολισθήσεων και της παρουσίας ρεμάτων, τεχνητών καναλιών ή πυκνών γραμμών απορροής (Mancini et al., 2010). Μια από τις αιτίες δυνητικών αλλαγών της γεωμετρίας ενός πρσανούς ρέματος είναι η διάβρωση που το ρέμα συντελεί στην αφαίρεση της υποστήριξης του παρακείμενου πρσανούς. Η αφαίρεση αυτή

είναι ένας από τους συνηθέστερους παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων. Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στον πόδα της ασταθούς μάζας είτε πλευρικά με αποτέλεσμα να προκαλούνται υποσκαφές, κατάπτωση των υπερκείμενων όγκων και στη συνέχεια μετακινήσεις των ασταθών μαζών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Ο ρυθμός της πλευρικής διάβρωσης ενός ποταμού σχετίζεται με το βάθος του, την διαβρωσιμότητα του γεωλογικού του υλικού καθώς και της ταχύτητας της ροής του (Crosta et al., 2012).

Η γεινίαση των πρηνών, όμως, με τις κοίτες των ρεμάτων συντελεί επιπλέον στην απομείωση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών υλικών που αποτελούν τα πρηνή. Συγκεκριμένα, όταν η στάθμη του νερού είναι υψηλή, οι υδροστατικές πιέσεις βοηθούν στην σταθεροποίηση του πρηνούς. Μια μείωση, όμως, της στάθμης έχει δύο επιπτώσεις: α) μείωση της υδροστατικής πίεσης και β) διαφοροποίηση στην πίεση των πόρων. Η δεύτερη επίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε κρίσιμες συνθήκες ένα πρηνές. Συγκεκριμένα, η απότομη πτώση της στάθμης του νερού των ποταμών που διαβρέχουν ένα πρηνές προκαλεί αύξηση της διατμητικής τάσης και πιθανή εκδήλωση αστάθειας (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται συχνά στους ταμιευτήρες φραγμάτων, όταν οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι άργιλοι χαμηλής διαπερατότητας ή πετρώματα αργιλικής σύστασης (Εικόνα 4.1). Επίσης, μεγάλη κατείσδυση παρατηρείται, συχνά, σε πρηνή που είναι παρακείμενα ρεμάτων, όπου τα γεωλογικά υλικά των πρηνών χαρακτηρίζονται μερικές φορές από μεγάλη περατότητα όπως για παράδειγμα κερματισμένα υλικά βράχων.



Εικόνα 4.1. Οι αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης στον ταμιευτήρα Ασωμάτων (Αλιάκμονας, Βέροια) και η στενή κοιλάδα με τις απότομες κλίσεις που παρουσιάζει, έχουν ενεργοποιήσει την αστάθεια των πρηνών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Η απότομη άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρηνή λόγω βροχοπτώσεων ή λόγω της ανόδου της στάθμης των ποταμών και των λιμνών έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, τη μείωση της διαμητρικής αντοχής των εδαφικών σχηματισμών των πρηνών και την πιθανή εκδήλωση νέων κατολισθήσεων, την ενεργοποίηση παλιών ή και την επιτάχυνση της κίνησης κάποιων εξαιρετικά αργών κατολισθήσεων που δεν έχουν εντοπισθεί στο παρελθόν (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Δεν υπάρχει κοινή παραδοχή ως προς το ποιά διαστήματα ζωνοποίησης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μελέτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Μάλιστα, διάφοροι ερευνητές έχουν λάβει υπόψη τους διαφορετικές προσεγγίσεις. Θα πρέπει, όμως, να τονισθεί ότι η προσθήκη της συγκεκριμένης παραμέτρου για την κατασκευή ενός χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι πολύ χρήσιμη γιατί τα ρέματα καθορίζουν μια πιθανή διαδρομή από τις ανάντη ενδεχομένως αρχικά επιδεκτικές σε ολισθήσεις περιοχές έως τα κατόντη δυνητικά σε αστοχία πρηνή.

Έχει διαπιστωθεί ότι καθώς η απόσταση από τα ρέματα αυξάνεται, η συχνότητα των κατολισθήσεων γενικά μειώνεται (Pradhan et al., 2010). Στον Πίνακα 4.10, δίνεται η βαθμονόμηση της απόστασης από ρέματα.

Πίνακας 4.10. Βαθμονόμηση της απόστασης από ρέματα.

Απόσταση από ρέματα*	Βαθμονόμηση
Μακρινή (>200m)	0
Μέτρια μακρινή (151-200 m)	1
Κοντινή (101 - 150 m)	2
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3
Άμεση (0-50m)	4

* Η βαθμονόμηση βασίζεται σε εργασία των Rozos et al. (2011)

4.2.9. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία

Η παράμετρος «απόσταση από τεκτονικά στοιχεία», είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στην κατασκευή και ερμηνεία του μητρώου αλληλεπίδρασης και αυτό γιατί συνδέεται άμεσα με την τεκτονική εξέλιξη που διαμορφώνει την δευτερογενή δομή ενός γεωλογικού σχηματισμού και την ποιότητα των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Επίσης, είναι γενικά γνωστό ότι η παρουσία μιας ρηξιγενούς ζώνης που οφείλεται στη δράση τεκτονικών δυνάμεων από γεωμηχανική άποψη: α) μειώνει δραστικά την συνοχή του πετρώματος σε ζώνη κατά μήκος του ρήγματος λόγω κερματισμού (Κουμαντάκης, 1978) δημιουργώντας ένα τεκτονικό λατυπτοπαγές ή θρυμματισμού

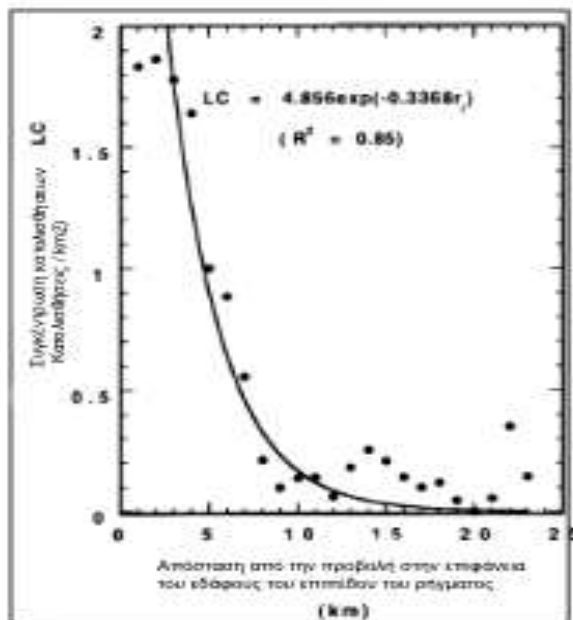
του (δημιουργία μυλονίτη) και συνεπώς συντελείται αλλαγή της μηχανικής συμπεριφοράς του μέχρι αστάθειας (όχι πάντα, γιατί είναι δυνατό είτε ο θρυμματισμός να είναι ασήμαντος είτε να έχει ακολουθήσει ισχυρή συγκόλληση του ρήγματος), β) επηρεάζει το υδρογεωλογικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής είτε με αύξηση της περατότητας στην προαναφερθείσα ζώνη και δημιουργία εκλεκτικού άξονα αποστράγγισης των υπόγειων νερών, είτε με μείωση της περατότητας, κάτι που οδηγεί σε επηρεασμό της γεωμηχανικής συμπεριφοράς των σχηματισμών που επηρεάζονται από τα προαναφερόμενα ρηξιγενή στοιχεία (Μαρίνος, 2005).

Κατά συνέπεια, ανεξάρτητα από το εάν το ρήγμα είναι ενεργό ή ανενεργό, προκαλούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις σε μια σειρά παραμέτρους που είτε αυτοτελώς ή σε συνδυασμό, προκαλούν έμμεσα προβλήματα σε κατασκευές και τεχνικά έργα. Βέβαια, ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα αυξημένος όταν το ρήγμα ή η ρηξιγενής ζώνη στην οποία ανήκει το ρήγμα είναι ενεργή (Λέκκας και Κράνης, 2001) και ιδιαίτερα, ο παραπάνω κίνδυνος επηρεάζει επιπρόσθετα την ευστάθεια ενός πρσανούς με βάση την απόσταση της εγγύτητας από ένα τεκτονικό γεγονός. Έτσι, όσο πιο μικρή είναι η απόσταση πρσανών από τεκτονικά στοιχεία τόσο πιο μεγάλη είναι η κατολισθητική επικινδυνότητα.

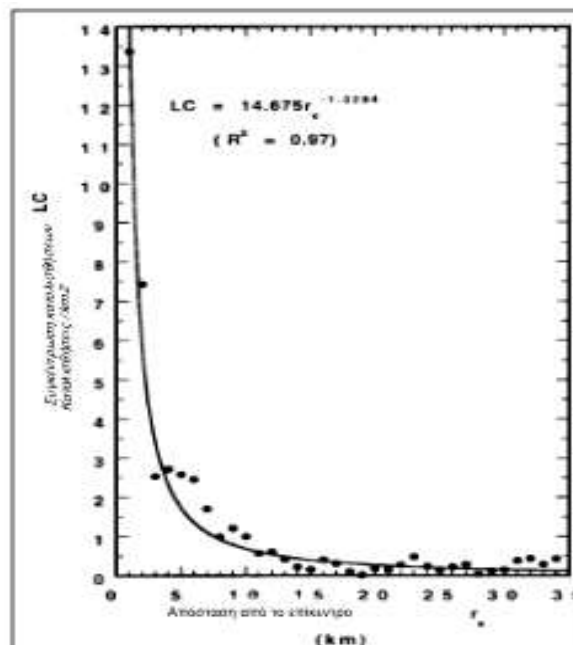
Η απόσταση από τεκτονικά στοιχεία συνδέεται και με το μοντέλο σεισμικής επικινδυνότητας (σημειακό ή γραμμικό). Τα σημειακά μοντέλα θεωρούν ότι η σεισμική ενέργεια εκλύεται μόνο από ένα σημείο, το υπόκεντρο και η υπόθεση αυτή φαίνεται να είναι αποδεκτή στην περίπτωση μικρών σεισμών. Όμως, στην περίπτωση μεγάλων σεισμών αντιστοιχεί η υπόθεση της κινητής «σεισμικής πηγής», δηλαδή η σεισμική ενέργεια εκλύεται από μια ζώνη διάρρηξης και συνεπώς περιοχές που βρίσκονται κοντά σε αυτή θα παρουσιάζουν αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα σε αντίθεση με την περίπτωση του σημειακού μοντέλου όπου η επικινδυνότητα υπολογίζεται μικρότερη, δηλαδή υποεκτιμημένη (Σταυρακάκης, 2003). Ο όρος «διάρρηξη» αναφέρεται σε ένα τμήμα του ρήγματος, το οποίο «σπάει» κατά τη διάρκεια του σεισμού. Το ρήγμα, επομένως, θεωρείται ότι αποτελείται από ένα άθροισμα στοιχειωδών τεμαχίων και ο σεισμός μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε θέση του.

Στατιστικές αναλύσεις κατανομής κατολισθήσεων έχουν δείξει μια ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στην συγκέντρωση των κατολισθήσεων από τη μια πλευρά και

στην απόσταση από το επίκεντρο, στην απόσταση από την επιφάνεια διάρρηξης και την κλίση του πρηνούς από την άλλη (Keefe, 2000). Παρατηρείται, λοιπόν, εκθετική μείωση του πλήθους της εμφάνισης κατολισθήσεων με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια διάρρηξης – ρήγμα (Σχήμα 4.3) καθώς επίσης και με την αύξηση της επικεντρικής απόστασης (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3. Γραφική παράσταση της συγκέντρωσης των κατολισθήσεων σε σχέση με την απόσταση από την προβολή στην επιφάνεια του εδάφους του επιπέδου του ρήγματος (Keefe, 2000).



Σχήμα 4.4. Γραφική παράσταση της συγκέντρωσης των κατολισθήσεων σε σχέση με την επικεντρική απόσταση στην περιοχή νοτίως της οροσειράς της Santa Cruz που προκλήθηκαν από τον σεισμό του 1989 στην Καλιφόρνια (Loma Prieta) των ΗΠΑ (Keefe, 2000).

Το ρόλο που παίζει το εύρος της απόστασης από τεκτονικά στοιχεία στην αστοχία ή όχι ενός πρανούς, ενισχύει ισχυρά και η παράμετρος της σεισμικότητας και αυτό γιατί αλλαγές στην κατολισθαίνουσα μάζα που μπορεί να οδηγήσει τελικά σε ενεργοποίηση της κατολίσθησης μπορεί να προκληθούν έμμεσα από σεισμικά γεγονότα. Τέτοιες αλλαγές είναι η εμφάνιση, η επέκταση και ο πολλαπλασιασμός των εφελκυστικών ρωγμών και των ζωνών διάτμησης. Αυτό μπορεί να αυξήσει την κατείσδυση του νερού στην κατολισθαίνουσα μάζα και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην αύξηση της πίεσης των πόρων και στην ταυτόχρονη μείωση της συνοχής του κατολισθαίνοντος υλικού. Στα σκληρά πετρώματα, η εμφάνιση νέων ρωγμών και η διεύρυνση των ήδη υπαρχόντων μπορεί να υποβάλει το πέτρωμα σε ακόμα μεγαλύτερα φαινόμενα εναλλαγών ψύξης και θέρμανσης με συνέπεια την αυξημένη πιθανότητα της μελλοντικής αστοχίας. Παρατηρήσεις, λοιπόν, δείχνουν ότι η εμφάνιση κατολισθήσεων λόγω σεισμικότητας είναι ισχυρά εξαρτημένη από την εγγύτητα ενός ρήγματος ή μιας ρηξιγενούς ζώνης (Sassa, 1996).

Για τις ανάγκες κατασκευής του μητρώου αλληλεπίδρασης, λοιπόν, η βαθμονόμηση της έννοιας «απόσταση από τεκτονικά στοιχεία», δίνεται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11. Βαθμονόμηση της απόστασης από τεκτονικά στοιχεία.

Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία*	Βαθμονόμηση
Μακρινή (>200m)	0
Μέτρια μακρινή (151-200 m)	1
Κοντινή (101 - 150 m)	2
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3
Άμεση (0-50m)	4

* Με βάση έρευνα των Rozos et al. (2011)

Παρατήρηση: Η μέγιστη απόσταση των 200m δόθηκε με βάση την ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων. Συγκεκριμένα, στα ενεργά ρήγματα (ακολουθεί συνοπτική ερμηνεία) που είναι ένδειξη συνεχιζόμενης σεισμικής δραστηριότητας, αποδίδεται μεγαλύτερο εύρος ζωνοποίησης από ότι στα μη ενεργά που εκφράζουν ασθενείς ζώνες περισσότερο κερματισμένων σχηματισμών, οπότε το εύρος της ζωνοποίησής τους είναι μικρότερο (ΔΕΣΦΑ, 2010 & Corominas and Mavrouli, 2011).

4.2.9.1. Επιστημάνσεις σχετικές με την έννοια του ενεργού ρήγματος

Ένα ενεργό ρήγμα, μπορεί να δημιουργήσει απαιτήσεις ειδικού σχεδιασμού των έργων ή να εγείρει κανονιστικά θέματα. Διεθνώς, υπάρχει μεγάλη ποικιλία στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να θεωρηθεί ένα ρήγμα ως ενεργό. Σύμφωνα με διάφορους ερευνητές και αρμόδιους οργανισμούς, ο ορισμός ενός ενεργού ρήγματος έχει ως ακολούθως (Μαρίνος, 2005):

1. Για τον ελλαδικό χώρο ένα ρήγμα μπορεί να θεωρηθεί ενεργό όταν αποδεδειγμένα έχει δράσει τα τελευταία 500.000 χρόνια (από το Μέσο Πλειστόκαινο έως σήμερα). Στο διάστημα αυτό, δεν έχει σημειωθεί μεγάλη αλλαγή στο τεκτονικό μοντέλο, δηλαδή στο είδος και τον προσανατολισμό των τεκτονικών τάσεων που επηρεάζουν πολλές από τις ενεργές περιοχές της χώρας (οπότε αναμένεται να είναι ανάλογος και ο τρόπος της μελλοντικής κίνησης ενός ρήγματος).
2. Έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
 - Έχει επιφανειακή διάρρηξη με ιστορικό ή σύγχρονο σεισμό (στην περίπτωση αυτή ονομάζεται και σεισμικό ρήγμα).
 - Μετακινεί πρόσφατους γεωλογικούς σχηματισμούς.
 - Εμφανίζει κατά θέσεις κατοπτρικές επιφάνειες που δεν έχουν διαβρωθεί.
 - Εμφανίζει χαρακτηριστικούς κρημνούς.
 - Στη βάση του αναπτύσσονται πλευρικά κορήματα.
 - Εμφανίζει χαρακτηριστικές νέες γεωμορφολογικές δομές.
 - Έχει άλλα τεκμήρια κίνησης κατά το πρόσφατο Τεταρτογενές (για παράδειγμα μετατόπιση υδρογραφικού δικτύου).
 - Συνδέεται με σεισμικά επίκεντρα.
 - Έχει δομική σχέση με άλλο γνωστό ενεργό ρήγμα.
 - Συνδέεται με πρόσφατη ηφαιστειότητα ή θερμές πηγές.
 - Οι τεκτονικές τάσεις που ευθύνονται για την τελευταία ανάδρασή του, είναι ίδιες με τις τάσεις που δίνουν οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών στην περιοχή.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RES – ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ

5.1. Εισαγωγή

Για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, σχετικά με την εφαρμογή τους στη μεθοδολογία RES, μελετήθηκαν χαρακτηριστικά ιστορικά κατολισθητικά συμβάντα από τον Ελληνικό χώρο, όπως αυτά που έλαβαν χώρα στην Παναγοπούλα (1971), Μαλακάσα (1995), Τσακώνα (2003) και Νεμέα (2003) και τα οποία προκάλεσαν για μεγάλο χρονικό διάστημα σημαντικά προβλήματα στην ομαλή λειτουργία των κεντρικών συγκοινωνιακών αξόνων της χώρας (εθνικό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο).

Να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία RES, επιχειρείται να εφαρμοσθεί σε γνωστά συμβάντα αστοχιών πρηνών από τον Ελληνικό χώρο που δεν συνδέονται με περιπτώσεις βραχωδών πρηνών και αυτό γιατί το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αρχικά σαν εργαλείο πρόγνωσης αστοχιών βραχωδών πρηνών. Ο σκοπός, λοιπόν, της παρούσας έρευνας είναι η μεθοδολογία RES να εφαρμοσθεί και σε άλλους τύπους αστοχιών, όπως σε αυτούς που συνέβησαν στα προαναφερόμενα μέρη και να μην αναλυθεί καθόλου, για παράδειγμα, η περίπτωση της αστοχίας των Τεμπών που είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό ιστορικό συμβάν αστοχίας αλλά αφορά βραχώδη πρηνή. Μέσα από την εφαρμογή της θεωρίας του RES με την ανάλυση των σημαντικότερων παραμέτρων για την κάθε ανωτέρω περιοχή μελέτης, την συμβολή τους στην κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης και την ερμηνεία των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων μέσω διαγραμμάτων και πινάκων, επιχειρείται να επιβεβαιωθεί η κατολισθητική επιδεκτικότητα με βάση την τιμή του δείκτη αστάθειας.

Διεθνώς, δεν υπάρχει ένα αποδεκτό σύστημα ταξινόμησης για χάρτες χωρικής και χωρο – χρονικής καταγραφής συμβάντων κατολισθήσεων. Ένα κοινό πρότυπο θα ήταν εξαιρετικά πολύτιμο για σύγκριση χαρτών και κατηγοριοποίηση κατολισθαινουσών περιοχών σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης όπως συμβαίνει για παράδειγμα με την κατηγοριοποίηση των σεισμικών περιοχών (Chacon et al., 2006). Μια απλή κατηγοριοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι ο μέσος όρος του ποσοστού της περιοχής που βρίσκεται σε αστοχία προς την

συνολική περιοχή ενδιαφέροντος, μέσω λιθολογικών ή γεωλογικών μονάδων σαν αυτή που έχει προταθεί από τον Brabb et al (1972) με τον όρο «Σχετική επιδεκτικότητα ή Relative Susceptibility Numbers (RSN). Στην συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση έχει βασισθεί η παρούσα έρευνα και είναι η ακόλουθη (Πίνακας 5.1):

Πίνακας 5.1. Κατηγοριοποίηση σχετικής (κατολισθητικής) επιδεκτικότητας προτεινόμενη από τους Brabb et al (1972).

% περιοχής που αστοχεί	0 - 1	2 - 8	9 - 25	26 - 42	43 - 53	54 - 70	100
RSN	I	II	III	IV	V	VI	L
Περιγραφή	Ασήμαντη	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Κατολίσθηση

Ο σκοπός χρήσης του ανωτέρω πίνακα είναι να βοηθήσει επικουρικά τον ειδικό (μελετητή, ερευνητή) μετά την εύρεση του δείκτη αστάθειας μέσω του RES, ώστε να εντάξει την εκάστοτε εξεταζόμενη περιοχή σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Το ενδιαφέρον, προφανώς, εστιάζεται ειδικά στις δύο τελευταίες κατηγορίες «Εξαιρετικά υψηλή σχετική επιδεκτικότητα (54-70%)» και «Κατολίσθηση (100%)», οι οποίες υποδεικνύουν ότι εάν ο δείκτης αστάθειας μιας υπό εξέταση περιοχής βρίσκεται μέσα στη ζώνη είτε της μιας είτε της άλλης κατηγορίας, τότε η μελετούμενη περιοχή κινδυνεύει να αστοχήσει και μάλιστα όσο το ποσοστό της αστοχείσας περιοχής μεγαλώνει, τόσο περισσότερο κοντά στο κατολισθητικό γεγονός βρίσκεται.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όσο το δυνατόν πιο συνοπτικά, σημαντικά γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προαναφερόμενων περιοχών (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα, Νεμέα), «μεταφράζοντας» τόσο τα ποσοτικά όσο και τα ποιοτικά στοιχεία της αλληλεξάρτησης των παραμέτρων που προκύπτουν, σε αριθμητικές τιμές κατηγοριοποίησης από 0 (ασήμαντη επίδραση) έως και 4 (πολύ δυσμενής επίδραση). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος ένα μητρώο (matrix), στο οποίο καταγράφεται η αστοχία με βάση τους σταθμικούς συντελεστές που προκύπτουν, υπολογίζεται ο αντίστοιχος δείκτης αστάθειας και εντοπίζονται ποιές παράμετροι είναι οι περισσότερο αλληλεπιδραστικές και ποιές είναι οι περισσότερο σημαντικές στο εξεταζόμενο κάθε φορά σύστημα (έδαφος/βραχώμαζα, θέση, τεχνικό έργο).

5.2. Βαθμονόμηση παραμέτρων

Η αποκωδικοποίηση των στοιχείων που κρίνονται ως σημαντικά για την κατασκευή του μητρώου αλληλεπίδρασης, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει με βάση τις έρευνες που έγιναν κυρίως από τους Ζιούρκα (1989), Koukis and Ziourkas (1991) για το σύνολο του Ελληνικού χώρου κατά την περίοδο 1949 – 1991. Σημαντικά στοιχεία υπάρχουν καταγεγραμμένα και κατά τα επόμενα έτη (δηλαδή από το 1991 και μετά) από άλλους ερευνητές μόνο που δεν αντιστοιχούν πλήρως στις επιλεγμένες παραμέτρους της παρούσας διατριβής. Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση που αντιστοιχεί στη χρονική περίοδο (1949 – 1991), θεωρείται ως η πλέον έγκυρη και πάνω σε αυτή βασίσθηκε και η ανάπτυξη της μεθοδολογίας της παρούσας έρευνας. Επίσης, λήφθηκε υπόψη η κατηγοριοποίηση κάποιων παραμέτρων με βάση βιβλιογραφικές αναφορές όπως: α) Rozos et al., 2006, β) Rozos et al., 2008, β) Rozos et al., 2011, γ) Μπουτίνα 2012, δ), Φαρμακάκη 2012. Με βάση τα προαναφερθέντα, στον Πίνακα 5.2 δίνεται η βαθμονόμηση κάθε επιλεγμένης παραμέτρου της παρούσας έρευνας.

Πίνακας 5.2. Βαθμονόμηση επιλεγμένων παραμέτρων αστοχίας πρηνών.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1. Ανθρωπ. Δραστ. (Απόσταση από δρόμους)		
Μακρινή (>200m)	0	Κατά Rozos et al., (2011).
Μέτρια μακρινή (151-200 m)	1	
Κοντινή (101 - 150 m)	2	
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3	
Άμεση (0-50m)	4	
2. Τεκτονικό καθεστώς		
Ασθενές	0	Κατά Rozos et al., (2008). συν δέεται με την σχεδόν απουσία σημαντικών τεκτονικών γεγονότων συν δέεται με την παρουσία φολιδώσης, σχιστότητας και σχισμού συν δέεται με την παρουσία πτυχών, ρηγμάτων και ασυνεχειών συν δέεται με την παρουσία κατακερματισμένων ζωνών αντίπροσωπεύει επιπτώσεις και επωθήσεις
Μέτριο	1	
Ισχυρό	2	
Πολύ ισχυρό	3	
Εντατικό	4	
3. Κλίση πρηνών		
0° - 5°	0	Αν και σύμφωνα με την έρευνα του Ζιούρκα (1989), το μεγαλύτερο ποσοστό κατολισθήσεων έλαβε χώρα σε πρηνή με κλίση 16° - 30°, στην παρούσα διατριβή θεωρήθηκε η μεγαλύτερη βαθμονόμηση να δοθεί στην κατηγορία >45° και αυτό γιατί στη φύση, πρηνή που συνίστανται από εδαφικά υλικά ή ημίσκληρα πετρώματα και έχουν υψηλή τιμή κλίσης, αστοχούν σχεδόν αμέσως μετά τον σχηματισμό τους, δίνοντας χαμηλότερες από τις αρχικές τιμές γωνίες κλίσης (Rozos et al. 2011).
6° - 15°	1	
16° - 30°	2	
31° - 45°	3	
> 45°	4	
4. Προσανατολισμός πρηνών		
225° - 275°	0	Κατά Rozos et al., (2008).
45° - 90°	1	
90° - 135°, 275° - 315°	2	
315° - 0°	3	
0° - 45°, 135° - 225°	4	
5. Λιθολογία		
Ηφαιστειακά πετρώματα	0	Με βάση την έρευνα των Koukis and Ziourkas για την χρονική περίοδο (1949-1991).
Κερατόλιθοι, σχιστόλιθοι, Ασβεστόλιθοι, μάρμαρα	1	
Μεταμορφωμένα πετρώματα	2	
Παλαιό (διαταραγμένο) γεωλικό κατολισθησης / Νεογενείς – Τεταρτογενείς αποθέσεις	3	
Φλύσχης	4	
6. Υδρογεωλογικές συνθήκες		
	0	Βασισμένες στο Διαχειριστικό Σχέδιο Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερισμάτος Δυτ. Πελοποννήσου της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος (2013) και των Rozos et al., (2008). Καμία γεωμηχανική δράση του νερού Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού: αν αφέρται σε διάλυση και έκπλυση εδαφικών υλικών όπως επίσης σε αποδόμηση λεπτόκοκκων και χονδροκοκκων υλικών. Μέτρια γεωμηχανική δράση του νερού: συν δέεται με πάγωμα του νερού στις ασυνέχεις, σε διαστολή του αργιλικού υλικού καθώς επίσης και στη δράση του νερού στις ασυνέχεις και στα έγκοιλα. Αυξημένη γεωμηχανική δράση του νερού: αν αφέρται στη διάβρωση από το νερό Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού: συν δέεται με το φορτίο από το χιόνι, το νερό της βροχής και των πηγών αλλά επίσης και από την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων Κατά Koukis and Ziourkas (1991), Μπουτίνια (2012), Φαρμακάκη (2012).
Κερματισμένοι σχηματισμοί χαρακτηριζόμενοι από σχεδόν μηδενική έως χαμηλή περατότητα (Φλύσχης, σχιστόλιθοι)	1	
Αλλουβιακές αποθέσεις, ανθρακικοί σχηματισμοί χαμηλής έως μέτριας περατότητας	2	
Κορήματα μέσης περατότητας	3	
Ανθρακικοί σχηματισμοί μέσης έως υψηλής περατότητας	4	
7. Βροχόπτωση		
< 1000mm	1	
1000 - 1200mm	2	
1200 - 1400mm	3	
> 1400	4	
8. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης		
Ασήμαντο	0	Κατά Rozos et al., (2006) και Rozos et al., (2008)
Πολύ μικρό (0,00 - 0,50m)	1	
Μικρό (0.50 - 1.50m)	2	
Μέτριο (1,5 - 3,0m)	3	
Σημαντικό (> 3.00m)	4	
9. Απόσταση από ρέματα		
Μακρινή (> 200m)	0	Κατά Rozos et al., (2011).
Μέτρια μακρινή (151 - 200 m)	1	
Κοντινή (101 - 150 m)	2	
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3	
Άμεση (0 - 50m)	4	
10. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία		
Μακρινή (> 200m)	0	Κατά Rozos et al., (2011).
Μέτρια μακρινή (151 - 200 m)	1	
Κοντινή (101 - 150 m)	2	
Πολύ κοντινή (51 - 100m)	3	
Άμεση (0 - 50m)	4	

5.3. Μερικές επισημάνσεις ως προς τον τρόπο μελέτης και κατανόησης των πινάκων και διαγραμμάτων που συνοδεύουν το μητρώο αλληλεπίδρασης και συνδέονται με τον υπολογιζόμενο δείκτη αστάθειας

Πριν παρουσιασθούν οι παράμετροι για κάθε εξεταζόμενη περιοχή και αιτιολογηθεί το σκεπτικό ένταξής τους στο αντίστοιχο μητρώο αλληλεπίδρασης, κρίνεται σκόπιμο να τονισθούν για την ευκολότερη κατανόηση της ερμηνείας των πινάκων και γραφικών παραστάσεων που θα προκύψουν για κάθε μελετούμενη περιοχή (αλλά και για να γίνει μια υπενθύμιση από προηγούμενη ενότητα), τα ακόλουθα:

- Ο βαθμός επίδρασης κάθε μιας παραμέτρου στο σύστημα (στην προκειμένη περίπτωση στην αστοχία ενός πρανούς) που μεταφράζεται με την εύρεση του σταθμικού συντελεστή, αναγνωρίζεται από το διάγραμμα αιτίου (Cause ή C) – αποτελέσματος (Effect ή E) ενώ ο ρόλος της αλληλεπίδρασης του συστήματος εκφράζεται από το ιστόγραμμα της έντασης αλληλεπίδρασης των παραμέτρων. Το άθροισμα των πμών C, E μετατρέπεται σε ένα ποσοστό που παίζει το ρόλο του σταθμικού συντελεστή, εκφράζοντας δηλαδή το ποσοστό συμμετοχής κάθε παραμέτρου στην αστοχία ενός πρανούς και κανονικοποιείται διαιρούμενο με το μέγιστο της βαθμονόμησης που είναι η τιμή (4) «τέσσερα» (Rozos et al., 2008).
- Σημαντικό χαρακτηριστικό του μητρώου είναι ότι παρέχει την ευελιξία και την δυνατότητα στον χρήστη, μια παράμετρος της κύριας διαγωνίου να μπορέσει να αναλυθεί σε επιμέρους παραμέτρους, κάτι που σημαίνει ότι ο συνολικός μηχανισμός (για παράδειγμα μιας δυνητικής αστοχίας πρανούς) που μελετάται, μέσω του μητρώου, να διερευνηθεί ακόμα περισσότερο και εκτενέστερα (Hudson, 1992).
- Η συγκέντρωση των κύριων παραμέτρων σε μια διαγώνιο και η μελέτη των αλληλεπιδράσεών τους μέσω του μητρώου καθιστά τον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου ευκολότερο. Αυτό συμβαίνει γιατί όλες οι αιτίες και τα αποτελέσματα της επίδρασης του έργου στο περιβάλλον και το αντίστροφο μελετώνται μέσω του μητρώου κάτι που βοηθάει πολύ τον μελετητή να συναξιολογήσει όλα τα υπάρχοντα δεδομένα, να μην αγνοηθεί καμία αλληλεπίδραση κάποιας παραμέτρου έναντι μιας άλλης και τελικά να είναι ενήμερος για πιθανόν δυνητικούς μηχανισμούς που χωρίς την ύπαρξη του μητρώου, ενδεχομένως, να μην τους λάμβανε υπόψη (Hudson, 1992).

- Η μελέτη της επιλογής των παραμέτρων της κύριας διαγωνίου δημιουργεί πλήθος ερωτημάτων, ένα εκ των οποίων είναι το πως μπορεί να προσδιορισθούν οι περισσότερο σημαντικές κύριες παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας και εάν μπορεί να αγνοηθεί κάποια πληροφορία. Οι απαντήσεις δίνονται μέσω των εννοιών έντασης αλληλεπίδρασης (interaction intensity) και επικράτησης (dominance), όπου ουσιαστικά ποσοτικοποιούν τη σημασία κάθε επιλεγμένης παραμέτρου (η κάθε επιλεγμένη παράμετρος μπορεί να συνδέεται είτε με ποσοτική είτε με ποιοτική πληροφορία) και με αυτή τη μεθοδολογία δίνεται η δυνατότητα της επιλογής κάποιων παραμέτρων ως περισσότερο σημαντικών έναντι κάποιων άλλων λιγότερο κρίσιμων για τη μελέτη μιας εν δυνάμει αστοχίας (Hudson, 1992).
- Η θεώρηση της θέσης του σημείου (τετμημένη χ : αίτιο, τεταγμένη ψ : αποτέλεσμα) κάποιας παραμέτρου στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος είναι κρίσιμη και δηλώνει την διαβάθμιση της αλληλεπίδρασης κάθε παραμέτρου μέσα στο υπό μελέτη σύστημα, δηλαδή (Hudson, 1992):
 - ✓ η παράμετρος με την μέγιστη ένταση αλληλεπίδρασης είναι αυτή στην οποία το άθροισμα C+E λαμβάνει την υψηλότερη τιμή,
 - ✓ η παράμετρος με την ελάχιστη ένταση αλληλεπίδρασης είναι αυτή στην οποία το άθροισμα C+E λαμβάνει την ελάχιστη τιμή,
 - ✓ η επικρατέστερη παράμετρος είναι αυτή στην οποία η διαφορά C-E λαμβάνει την υψηλότερη τιμή (δηλαδή η παράμετρος επηρεάζει το σύστημα πολύ περισσότερο από ότι το σύστημα επηρεάζει την συγκεκριμένη παράμετρο),
 - ✓ η ήσσονος σημασίας παράμετρος είναι αυτή στην οποία η διαφορά C-E λαμβάνει την ελάχιστη τιμή.
- Ο αριθμός των παραμέτρων που θα απαιτηθούν για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας, εξαρτάται από το σχήμα του «νέφους» – συγκέντρωσης των σημείων (θέσεων) των συντεταγμένων των παραμέτρων που θα εμφανισθεί μέσα στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος. Υπάρχουν πολλές θεωρητικές συγκεντρώσεις σημείων που μπορούν να τύχουν, οι κυριότερες όμως από αυτές είναι δύο: η μια αφορά τη τοποθέτηση των σημείων κυρίως κατά μήκος της νοητής γραμμής C=E ή αυτή που είναι κάθετη στη γραμμή C=E. Εάν οι παράμετροι είναι συγκεντρωμένες κατά μήκος της εν λόγω γραμμής αλλά πολύ

κοντά σε αυτήν, τότε μπορούν να βαθμονομηθούν σύμφωνα με την ένταση αλληλεπίδρασης και θα είναι απαραίτητες, για παράδειγμα, πέντε ή έξι παράμετροι προς επιλογή. Εάν, όμως, οι παράμετροι είναι τοποθετημένες σε μια γραμμή κάθετη στη ευθεία $C=E$, τότε θα έχουν παρόμοιες τιμές έντασης αλληλεπίδρασης αλλά θα διαφέρουν πολύ στις τιμές της επικράτησης και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι επιλεγμένες παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας (Hudson, 1992).

- Στο διάγραμμα $(C+E)/(C-E)$, γίνεται καλύτερα κατανοητή η έννοια της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου (δηλαδή αυτής που έχει τη μέγιστη τιμή $C+E$) και αντίστοιχα της επικρατέστερης (αυτής που έχει τη μεγαλύτερη τιμή $C-E$) σε ένα εξεταζόμενο σύστημα [για παράδειγμα σε ένα υπό μελέτη πρανές ή σε μια επιδεκτική σε κατολίσθηση περιοχή, (Hudson, 1992)]. Το διάγραμμα αυτό, δηλαδή, δίνει την ίδια ακριβώς πληροφορία με το διάγραμμα $(C-E)$, αλλά υπάρχει αμεσότερος προσδιορισμός της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και αντίστοιχα της επικρατέστερης (Hudson, 1992).
- Ένα τεχνικό έργο μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες της μάζας των γεωλογικών υλικών που εδράζεται, έτσι ώστε οι τιμές πριν από την κατασκευή να είναι διαφορετικές σε σχέση με αυτές μετά την ολοκλήρωση του έργου. Επίσης, σε ένα περιβάλλον όπου έχουν συμβεί αστοχίες στο παρελθόν και σε αυτό έχει αποφασισθεί να γίνει ένα τεχνικό έργο (π.χ. ένας δρόμος), οι γεωλογικές συνθήκες και ειδικότερα οι τιμές των φυσικομηχανικών παραμέτρων των επί τόπου γεωλογικών υλικών (ήδη διαταραγμένων υλικών) θα είναι επηρεασμένες εξ' αρχής από αυτά τα ιστορικά συμβάντα με συνέπεια να είναι ευκολότερο να συμβεί μια νέα αστοχία αφού θα έχουν μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά (Hudson, 1992). Ο σκοπός, λοιπόν, της εξεταζόμενης μεθοδολογίας RES είναι να εντοπίσει – προγνώσει τις παραμέτρους με τα ήδη μειωμένα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, ώστε να βρεθούν τρόποι έγκαιρης αντιμετώπισής τους.
- Από το μητρώο αλληλεπίδρασης μπορεί να καθορισθεί εάν ένα έργο θα ελέγχει τους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους εδράζεται ή αυτοί θα ελέγχουν το έργο. Αν, λοιπόν, η ένταση αλληλεπίδρασης του συστήματος είναι χαμηλή, τότε οι παράμετροι έχουν μεγάλο βαθμό ανεξαρτησίας και η τεχνική παρέμβαση μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε παράμετρο. Αντίθετα, όσο

περισσότερο αλληλεπιδραστικό είναι το σύστημα [πιο μεγάλη πιμή (C+E)], τόσο πιο μεγάλος ο δείκτης αστάθειας και συμπερασματικά τόσο πιο χαμηλή είναι η ευστάθεια ενός πρανούς γιατί υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα μια μικρή διαφοροποίηση σε μια παράμετρο να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος (Hudson, 1992).

Στη συνέχεια καταγράφονται συνοπτικά τα γεωλογικά-γεωτεχνικά χαρακτηριστικά από την κάθε εξεταζόμενη περιοχή μαζί με τα διαγράμματα και τους πίνακες που συνδέονται με την έννοια του μητρώου αλληλεπίδρασης.

Η σειρά που ακολουθείται για την επιλογή των παραμέτρων αρχίζει με τον προσδιορισμό του έργου, την περιγραφή της συνολικής γεωλογικής εικόνας της περιοχής του εξεταζόμενου έργου, την καταγραφή ενδεχομένως προηγούμενων κατολισθήσεων και καταλήγει με τις επιλεγμένες παραμέτρους που σχετίζονται με τους γεωλογικούς σχηματισμούς, τις επί τόπου συνθήκες που συνδέονται με ποσοτικές ή ποιοτικές περιγραφές και είναι σχετικές με την εξεταζόμενη αστάθεια. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των απαντώμενων γεωλογικών σχηματισμών και των επί τόπου χαρακτηριστικών των μελετούμενων πρανών προστίθενται στην ανάλυση, ώστε να ολοκληρωθεί η συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων βάσει των οποίων κατασκευάζεται το μητρώο αλληλεπίδρασης και βαθμονομούνται οι επιμέρους παράμετροι. Στην επιλογή των παραμέτρων δεν λαμβάνονται υπόψη παράμετροι που δεν διαφοροποιούνται στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα η σεισμικότητα.

5.4. Κατολίσθηση Παναγοπούλας, Ν. Αχαΐας

Η περιοχή της Παναγοπούλας βρίσκεται στις νότιες ακτές του Δυτικού Κορινθιακού Κόλπου μεταξύ των χωριών Ψαθόπυργος δυτικά και Λαμπήρη ανατολικά. Στην περιοχή αυτή, στο χερσαίο πρηνές που βρίσκεται ανάντη της ακτογραμμής, έχουν συμβεί κατ' επανάληψη έντονα κατολισθητικά φαινόμενα με αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικών καταστροφών στα υφιστάμενα δίκτυα (οδικό και σιδηροδρομικό άξονα) που διέρχονται από το σημείο αυτό και την διακοπή της κυκλοφορίας (Σακελλαρίου Α. κ.α., 2001).

Το κυριότερο και σοβαρότερο κατολισθητικό γεγονός έλαβε χώρα στις 25-26 Απριλίου και 3 Μαΐου του 1971 (αμέσως μετά την κατασκευή του νέου δρόμου) στο 193^ο χιλιόμετρο της Εθνικής Οδού Κορίνθου – Πατρών (Εικόνα 5.1), σε μια ζώνη περίπου 350 μέτρων και 250 μέτρων αντίστοιχα και μετακινούμενου όγκου άνω του 1.000.000m³, αποτέλεσμα του οποίου ήταν ο αποκλεισμός των συγκοινωνιακών αξόνων (Νέα Εθνική Οδός, Παλαιά Εθνική Οδός και Σιδηροδρομική Γραμμή) για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (η Ν.Ε.Ο. παρέμεινε κλειστή για τρία χρόνια) και η συνέχιση της συγκοινωνίας μέσω μικρής θαλάσσιας παράκαμψης με τη χρήση πλωτών μέσων από μώλους που κατασκευάστηκαν για τον σκοπό αυτό.



Εικόνα 5.1. Η κατολίσθηση της Παναγοπούλας (λήψη από ελικόπτερο), στις 28/4/1971, για τους σκοπούς της γεωτεχνικής μελέτης που εκπονήθηκε εκείνη την περίοδο από την ΓΕΩΕΡΕΥΝΑ ΑΕ. Πρόκειται περί κατολίσθησης κυκλοειδούς μορφής χωρίς να προϋπάρχει επιφάνεια ολίσθησης. Αν και δεν πρόκειται περί εδαφικού υλικού αλλά βραχώδους, ο κατακερματισμός του βράχου του προσέδωσε πολύ χαμηλή αντοχή (Μαρίνος, 2005).

Για την αποκατάσταση και τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας της περιοχής λήφθηκαν μέτρα προστασίας (Εικόνα 5.2), τα οποία συνετέλεσαν (κατά κάποιο τρόπο) στην σταθεροποίηση της όλης κατάστασης, ειδικότερα στην ανάντη της

N.E.O. περιοχής, χωρίς όμως να επιλύσουν μόνιμα και ριζικά το πρόβλημα, όπως τουλάχιστον φάνηκε τα επόμενα χρόνια, αφού ακόμα και μετά τα μέτρα αποκατάστασης της χρονικής περιόδου 1971-1972 συνέβαιναν συνεχείς καθιζήσεις του οδοστρώματος της Παλαιάς και Νέας Εθνικής Οδού, μικροολισθήσεις στα ανάντη της N.E.O. πρηνή, κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (Φεβρουάριος 1983, Νοέμβριος 1993, Φεβρουάριος 1994, Σεπτέμβριος 1997) λάμβαναν χώρα σοβαρές ενδείξεις κατολισθητικών φαινομένων. Μάλιστα, τον Φεβρουάριο του 1994 εκδηλώθηκαν επιφανειακές ολισθήσεις στα ανάντη πρηνή (τόσο ολισθήσεις, όσο και διαβρώσεις με μεταφορά χαλαρών υλικών στο οδόστρωμα της N.E.O., λόγω πολλών επιφανειακών νερών) και τοξοειδείς θραύσεις του οδοστρώματος, ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα την προσωρινή διακοπή της συγκοινωνίας. Ήταν χαρακτηριστικό το γεγονός της ροής επιφανειακού νερού με σημαντική παροχή στα πρηνή της N.E.O., σαν καταρράκτης.



Εικόνα 5.2. Γενική άποψη της θέσης αστοχίας στην Παναγοπούλα από το Ανατολικό άκρο της περιοχής (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2002).

Τον Ιούλιο του 1999 έγινε αυτοψία και έκθεση των Τεχνικών Συμβούλων της Δ/σης Μελετών Έργων Οδοποιίας (ΔΜΕΟ) του (τότε) Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, τα βασικά συμπεράσματα της οποίας ήταν η διαπίστωση μιας «βαθιάς» και μιας «μικρής» επιφάνειας ολίσθησης με πολύ διαφορετικούς ρυθμούς εξέλιξης. Η «μικρή» είναι αυτή που γενικά εκτιμήθηκε και αντιμετωπίστηκε στην Οριστική Μελέτη αντιστήριξης της N.E.O. του Μαΐου 1998, ενώ η «βαθιά», αρχικά θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνει μέρος του ανάντη ορεινού όγκου, το σύνολο των επιχωμάτων οδοποιίας και της σιδηροδρομικής γραμμής και καταλήγει στη θάλασσα (πιθανώς αρκετά μέτρα

κάτω από την επιφάνεια). Αργότερα, όμως, το πιθανολογούμενο εύρος της περιορίστηκε στην κατάντη περιοχή της Ν.Ε.Ο. σαν βαθύτερα επεκτεινόμενη της «μικρής» κατολίσθησης. Η μετακίνηση, δε, της κατάντη περιοχής της Ν.Ε.Ο. οφείλεται στο είδος των εδαφικών υλικών που είναι κυρίως τα προϊόντα της μεγάλης κατολίσθησης πάνω στα οποία κατασκευάστηκαν επιχώματα και τοίχοι αντιστήριξης. Αναφερόμενοι στις γεωλογικές συνθήκες που συνετέλεσαν στην κατολισθητική επικινδυνότητα της περιοχής ενδιαφέροντος μπορούν να σημειωθούν τα ακόλουθα στοιχεία που βασίζονται στην αναγνωριστική γεωλογική μελέτη της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων του πρώην Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2002).

5.4.1. Γεωμορφολογία

Η κατολίσθηση στη θέση «Παναγοπούλα» έλαβε χώρα επί ενός αντερείσματος (ενός ήπιου σχετικά αναγλύφου με μέση κλίση πλαγιάς της τάξης των 30° μέχρι υψόμετρο 300m περίπου), το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ δύο χειμάρρων, του ανατολικού και του δυτικού.

Ο δυτικός χείμαρρος χαρακτηρίζεται από την διαμόρφωση απότομων κλιτύων κοίτης και την έντονη κατά βάθος διάβρωση. Στην περιοχή μελέτης η διέλευση του ρέματος γίνεται στο αλπικό υπόβαθρο. Ο ανατολικός χείμαρρος χαρακτηρίζεται από ηπιότερες σχετικά κλίσεις κλιτύων και λιγότερο έντονα φαινόμενα κατά βάθους διάβρωσης. Από τα ρέματα αυτά που δεν έχουν μόνιμη απορροή κατά την διάρκεια του έτους, το δυτικό ρέμα διατηρεί σχετικά περισσότερο χρόνο την απορροή του.

5.4.2. Γεωλογία

Στην περιοχή της Παναγοπούλας, το αλπικό υπόβαθρο συνίσταται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στην γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου, είναι έντονα τεκτονισμένοι και παρουσιάζουν την δομή κατά λέπτη με επάλληλες επιππεύσεις. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί από τους αρχαιότερους προς τους νεότερους είναι οι ακόλουθοι:

α) Πολύχρωμοι κερατόλιθοι: Στο σύνολό του ο σχηματισμός αυτός έχει καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων και παρουσιάζει πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Έχει περιορισμένες εμφανίσεις διάσπαρτες στο ανατολικό, κεντρικό και νότιο τμήμα.

β) Ασβεστόλιθοι και κερατόλιθοι: Παρουσιάζουν στο σύνολό τους μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά και έχουν πολύ περιορισμένη εμφάνιση στο ανατολικό τμήμα της περιοχής.

γ) Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι: Αποτελούν την σημαντικότερη εμφάνιση του αλπικού υπόβαθρου στην περιοχή μελέτης και αναπτύσσονται, κυρίως, στο δυτικό τμήμα της περιοχής.

δ) Μεταβατικοί ασβεστόλιθοι: Στο σύνολό του ο σχηματισμός αυτός έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων. Αποτελούν τη μεταβατική φάση ασβεστόλιθων – φλύσχη και αποτελείται από εναλλαγές πλακωδών ασβεστόλιθων με ιλυόλιθους, αργιλώδεις σχιστόλιθους, κερατόλιθους και ψαμμίτες. Οι μεταβατικοί ασβεστόλιθοι συναντώνται επιφανειακά κυρίως στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της περιοχής υπερκείμενοι στους κρητιδικούς ασβεστόλιθους. Το κύριο χαρακτηριστικό της βραχώμαζας λόγω των ποικίλων λιθολογικών φάσεων με μεγάλο εύρος εναλλαγών και το σημαντικό αριθμό δομικών ασυνεχειών είναι η δομική πολυπλοκότητα. Ο έντονος τεκτονισμός έχει ως αποτέλεσμα τον ισχυρό κερματισμό των πετρωμάτων και τη χαλάρωση της δομής τους που αυξήθηκε με τη δράση των αποσαθρωτικών παραγόντων. Όλα αυτά συνετέλεσαν καθοριστικά στη διαμόρφωση ευνοϊκών συνθηκών αστάθειας ακόμα και σε χαμηλού σχετικά ύψους πρηνή. Στην ενότητα των μεταβατικών ασβεστόλιθων έγινε η μεγάλη ολίσθηση των ανάντη της Ν.Ε.Ο. πρηνών το 1971.

ε) Φλύσχης: Στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται επιφανειακά σε πολύ περιορισμένη έκταση, ανατολικά και ανάντη της κατολίσθησης, συνίσταται κυρίως από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων ενώ τοπικά μπορεί να απαντηθούν και αραιές ασβεστολιθικές ενστρώσεις.

Ασύμφωνα στους αλπικούς σχηματισμούς τοποθετούνται τα πρόσφατα μεταλπητικά ιζήματα του Πλειοπλειστόκαινου και του Τεταρτογενούς. Τα Πλειοπλειστόκαινα ιζήματα αντιπροσωπεύονται αποκλειστικά από τα ισχυρά συγκολλημένα πολύμικτα κροκαλοπαγή πάχους έως και 300m, τα οποία καλύπτουν μεγάλη έκταση προς το Νότιο (κυρίως) αλλά και στις υψηλότερα μορφολογικά θέσεις του Ανατολικού τμήματος, όπου επιφανειακά παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση.

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις συνιστούν κατά το μεγαλύτερο μέρος τους εδαφικά υλικά παλαιών και πρόσφατων κατολισθήσεων (το πάχος των οποίων αυξάνει σημαντικά στο κατάντη τμήμα της Ν.Ε.Ο.) καθώς και πλευρικά κορήματα, αργιλικά

κορήματα, αποθέσεις κοίτης χειμάρρων και αποθέσεις αλλουβιακού ριπιδίου. Μεγάλη έκταση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, κατόντη της στέψης της κατολίσθησης καταλαμβάνουν τα βραχώδη διαταραγμένα – ολισθημένα υλικά.

5.4.3. Τεκτονική

Σύμφωνα με τους Σακελλαρίου Α. κ.α. (2001), η τάφρος του Κορινθιακού Κόλπου αποτελεί μια ασύμμετρη μεταλπική λεκάνη, η εξέλιξη της οποίας από το Ανώτερο Μειόκαινο – Πλειόκαινο μέχρι σήμερα ελέγχεται κατά κύριο λόγο από χερσαίες και θαλάσσιες ρηξιγενείς ζώνες που εντοπίζονται κυρίως στο νότιο περιθώριο της τάφρου. Αποτέλεσμα της δράσης των ρηξιγενών αυτών ζωνών είναι η σημαντική ανύψωση των ακτών της Βόρειας Πελοποννήσου, η βύθιση του υποθαλάσσιου τμήματος της τάφρου και η επακόλουθη δημιουργία απότομων πρανών κατά μήκος της νότιας πλευράς του Κόλπου. Η περιοχή της Παναγοπούλας αποτελεί τμήμα του πρανούς που αναπτύσσεται κατά μήκος δύο παράλληλων ενεργών ρηξιγενών δομών, του ρήγματος του Ψαθόπυργου στη βάση του χερσαίου τμήματος του πρανούς και της υποθαλάσσιας νότιας ρηξιγενούς ζώνης του κόλπου που εντοπίζεται στη βάση του υποθαλάσσιου πρανούς (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3. Κατάπτωση των εδαφικών σχηματισμών στην επιφάνεια του πρανούς στην Ν.Ε.Ο. Το πρανές της Ε.Ο ταυτίζεται με την ρηξιγενή επιφάνεια της Παναγοπούλας ή αντίστοιχη παράλληλη η οποία ανήκει στην ίδια ρηξιγενή ζώνη (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2002).

Από την περιοχή της Παναγοπούλας διέρχεται μια από τις έξι κύριες ενεργές ρηξιγενείς ζώνες, διεύθυνσης Α-Δ, οι οποίες έχουν συμβάλει στην διάνοιξη του Κορινθιακού κόλπου (Σχήμα 5.1). Το ίχνος της ζώνης αυτής εκτιμάται ότι διέρχεται στη βάση του ασβεστολιθικού πρανούς πάνω στην Ν.Ε.Ο. Στο δυτικό τμήμα της περιοχής η διεύθυνση της ζώνης αυτής γίνεται ΒΑ-ΝΔ. Η ενεργός αυτή ρηξιγενής ζώνη έχει κλίση περίπου 60° - 65° προς Β, δηλαδή διεύθυνση κλίσης σχεδόν

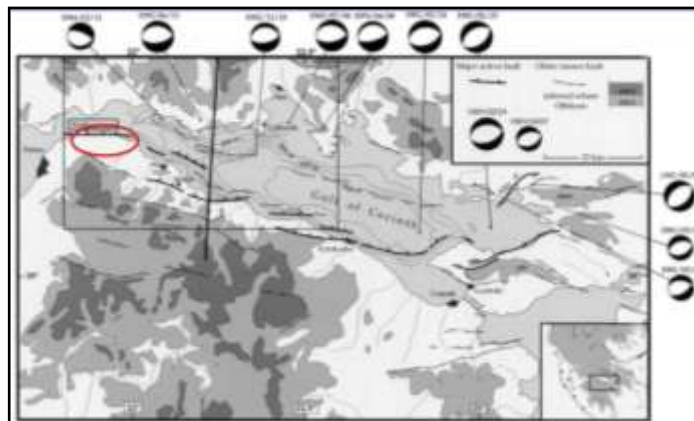
κάθετα προς τον άξονα της Ε.Ο. και εκτιμάται ότι παρουσιάζει σημαντικού πάχους ζώνη κατακερματισμού (αργιλώδη αμμοχάλικα, τεκτονικό λατυποπαγές κλπ.). Εκτιμάται ότι η πρόσφατη αυτή νεοτεκτονική δομή έχει διακόψει κάθε άλλη προϋπάρχουσα αλπική δομή, έχει δε ένα άλμα, σύμφωνα με την αξιολόγηση των στοιχείων των γεωτρήσεων της τάξης των 100 έως 130m περίπου. Ανάντη της ρηξιγενούς ζώνης της Παναγοπούλας το αλπικό υπόβαθρο της ενότητας της Πίνδου (όπως προαναφέρθηκε) έχει υποστεί την επίδραση ρηματογόνου και πτυχογόνου τεκτονισμού κατά την φάση της ορογένεσης για αυτό και όλα τα στρώματα είναι έντονα τεκτονισμένα. Υπολογιζόμενες, δε, όλες οι κατοπτρικές επιφάνειες από το όριο του Ψαθόπυργου έως την έξοδο της πόλης του Αιγίου έχει βρεθεί ότι η κλίση των ρηγμάτων καθώς και η γενική κλίση των στρωμάτων είναι ομόρροπα προς τη φυσική κλίση του εδάφους και προς τη κλίση του τεχνητού πρானούς της Ε.Ο. Τα, δε, ρήγματα είναι περισσότερο ή λιγότερο παράλληλα προς τον άξονα της οδού (Φυτρολάκης, Αντωνιάδης, 1974).



Σχήμα 5.1. Χάρτης των κυριότερων ρηγμάτων και γεωλογικών σχηματισμών του δυτικού τμήματος του Κορινθιακού κόλπου (Μαρίνος, 2005).

5.4.4. Σεισμικότητα

Η ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου και ιδιαίτερα το δυτικό τμήμα του, συμπεριλαμβάνεται στις πλέον ενεργές περιοχές του Ελλαδικού χώρου με βάση τις νεοτεκτονικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και την σεισμικότητα που παρατηρείται (Σχήμα 5.2). Πέντε σεισμοί μεγέθους $M > 6$ έχουν λάβει χώρα κατά τα τελευταία τριάντα χρόνια (η παρατήρηση αυτή έχει καταγραφεί το 2001) ενώ σημαντικός αριθμός καταστροφικών σεισμών μεγέθους $M > 7$ αναφέρονται κατά την ιστορική περίοδο (Σακελλαρίου Α. κ.α., 2001). Η περιοχή ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III με σεισμική επιτάχυνση $\alpha = 0,24g$.



Σχήμα 5.2. Τα ενεργά ρήγματα (από Armijo et al. (1996)) και οι κυριότεροι σεισμοί από το 1965 (1965, 1970: Baker et al., (1997); 1981, 1984: Taymaz (1990), Μηχανισμοί κατά Hatzfeld et al., (1996). Πηγή: (Μαρίνος, 2005).

5.4.5. Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή της κατολίσθησης της Παναγοπούλας παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαχρονική εκδήλωση των φαινομένων αστάθειας. Οι συνθήκες αυτές διαμορφώνονται από την υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών σε συνδυασμό με την στρωματογραφική και τεκτονική τους τοποθέτηση (επαφή διαπερατών – αδιαπέρατων σχηματισμών) καθώς επίσης και από τις συνθήκες τροφοδοσίας τους. Από υδρολιθολογική πλευρά, οι σχηματισμοί κατατάσσονται (στοιχεία από την αναγνωριστική γεωλογική μελέτη της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων του πρώην Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2002):

- Στους σχηματισμούς υψηλής έως μέτριας διαπερατότητας, όπου ανήκουν οι λεπτοπλακώδεις κρητιδικοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι αποτελούν την κύρια μάζα στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω των ασυνεχειών της βραχώμαζας λόγω πλήρους κερματισμού και παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή κατείσδυσης.
- Στους σχηματισμούς μέτριας έως χαμηλής διαπερατότητας με δυνατότητα σχηματισμού επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, όπου ανήκουν οι μεταβατικοί ασβεστόλιθοι με τις εναλλαγές ασβεστολιθικών και ιλυολιθικών φάσεων. Αυτοί στο κεντρικό τμήμα της Παναγοπούλας, όπου εκδηλώθηκε η κατολίσθηση, είναι υπερκείμενοι στους κρητιδικούς ασβεστόλιθους. Παρουσιάζουν, γενικά, ανομοιογενή υδραυλική συμπεριφορά με ισχυρά κυμαινόμενη υδροπερατότητα ανάλογα με το πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες. Μέτρια έως χαμηλή

διαπερατότητα παρουσιάζουν τα κροκαλοπαγή, τα οποία εμφανίζουν την κύρια ανάπτυξή τους στο νότιο και ανατολικό τμήμα.

• Στους σχηματισμούς χαμηλής έως ασήμαντης διαπερατότητας, όπου ανήκουν οι ασβεστόλιθοι και κερατόλιθοι, οι πολύχρωμοι κερατόλιθοι, ο ηωκαινικός φλύσχης καθώς και οι μεταλλικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή μελέτης, δηλαδή τα υλικά παλαιών και νέων κατολισθήσεων, τα κορηματικά υλικά, οι αλλουβιακές αποθέσεις και οι τεχνητές επιχώσεις που καλύπτουν σημαντική έκταση στο κεντρικό και νότιο παράλιο τμήμα.

Η θέση των σχηματισμών αυτών είναι καθοριστική στην εκδήλωση φαινομένων ασταθειών, όταν επικάθονται σε αυτούς σχετικά πιο διαπερατά υλικά, βραχώδη και εδαφικά. Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι από την αξιολόγηση στοιχείων προκύπτει ότι στην περιοχή της Παναγοπούλας αναπτύσσονται διαφορετικοί υδροφόροι ορίζοντες, στο ανατολικό, κεντρικό και νότιο τμήμα της περιοχής.

5.4.6. Μηχανισμός λειτουργίας της κατολίσθησης

Σύμφωνα με αναγνωριστική γεωλογική μελέτη (2002) του (πρώην πλέον) Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.), όλες οι μετακινήσεις, οι οποίες είχαν ενόργανα καταγραφεί εντοπίστηκαν στην περιοχή της Ν.Ε.Ο. και στην κατάντη ζώνη αυτής, μέχρι (τουλάχιστον) την παραλία. Τα βάθη μετακίνησης κυμάνθηκαν στην περιοχή της Ν.Ε.Ο. από 7m (περιοχή κάτω διάβασης) μέχρι 16m (περιοχή δυτικής εισόδου κάτω αποστραγγιστικής σήραγγας) ενώ στην παραλιακή ζώνη ήταν της τάξης των 23m μέχρι 26m. Να σημειωθεί ότι για την αποστράγγιση του πρανούς ανάντη του δρόμου έγιναν δύο σήραγγες: η μια στο ύψος, σχεδόν, του δρόμου και η δεύτερη ανάντη αυτού.

Οι προαναφερόμενες μετακινήσεις περιλάμβαναν πρόσφατα σχετικά χαλαρά εδαφικά υλικά (υλικά επιχωματώσεων, παλαιότερων ολισθήσεων) καθώς επίσης και υλικά της ζώνης αποσάθρωσης – κερματισμού του γεωλογικού υποβάθρου.

Η ζώνη ολίσθησης εντοπίστηκε στην ευρεία ζώνη επαφής των υλικών αυτών με το γεωλογικό υπόβαθρο ενώ σε μερικές θέσεις συμμετείχαν και σχετικά χαλαρωμένα υλικά του υποβάθρου. Η παρουσία, δε, της κύριας ρηξιγενούς ζώνης, που διέρχεται κατά μήκος περίπου της Ν.Ε.Ο. φαίνεται ότι συνετέλεσε καθοριστικά στην αστάθεια και την εξέλιξη των μετακινήσεων της κατάντη περιοχής, λόγω κυρίως της χαλάρωσης των γεωλογικών υλικών.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περιοχή της Παναγοπούλας εντοπίζονται τρία κύρια επίπεδα ολισθήσεων, τα οποία εκτιμάται ότι έχουν λειτουργήσει ή λειτουργούν σε διαφορετικό χρόνο και επομένως έχουν διαφορετική σημασία το κάθε ένα για την κατασκευή των τεχνικών έργων. Συγκεκριμένα:

Στο ανατολικό τμήμα εκτός από τις επιφανειακές ολισθήσεις, εκτιμάται ότι υπάρχει επίπεδο βαθιάς παλαιάς γεωλογικής αποκόλλησης σε βάθος 100 m περίπου (η οποία θεωρείται η παλαιότερη στην περιοχή και είναι μεγάλης κλίμακας), ανενεργό σήμερα, πάνω από το οποίο τα υλικά είναι έντονα διαταραγμένα. Η βαθιά αυτή αποκόλληση και ολίσθηση οριοθετείται από τα δύο ρήγματα του ανατολικού τμήματος.

Στο κεντρικό τμήμα, όπου εκδηλώθηκε η γνωστή κατολίσθηση της Παναγοπούλας το 1971, εκτιμάται ότι ήδη κατά το παρελθόν είχε υποστεί παλαιές κατολισθητικές κινήσεις και βρίσκονταν πριν την κατολίσθηση του 1971 σε μια κατάσταση οριακής ισορροπίας. Αυτή διαταράχθηκε από τον συνδυασμό διάφορων “ευνοϊκών” παραγόντων όπως: α) ύπαρξη προδιατετημένων επιφανειών, β) υψηλές βροχοπτώσεις (πριν την περίοδο των αστοχιών Απριλίου/Μαΐου 1971) – υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα, γ) αφαίρεση υλικού για την (τότε) κατασκευή της Ν.Ε.Ο. Το επίπεδο κατολίσθησης της Παναγοπούλας συνδέεται με την ασθενή φάση των πολύχρωμων κερατόλιθων, το οποίο επανενεργοποιήθηκε. Σ’ αυτό γεωλογικά “υποβοήθησε” το ρήγμα ΒΔ-ΝΑ κατεύθυνσης που βρίσκεται στο δυτικό όριο της κατολίσθησης, καθώς επίσης και η υποκείμενη φάση των μεταβατικών ασβεστόλιθων με πτωχά επίσης μηχανικά χαρακτηριστικά (συχνή παρουσία ιλυολιθικών ενστρώσεων), πάνω στην οποία είναι επιπτευμένοι οι κερατόλιθοι με ομόρροπη κατεύθυνση και κλίση ως προς το πρηνές. Το βάθος του επιπέδου κατολίσθησης της Παναγοπούλας εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 20-25m. Η επανενεργοποίηση του επιπέδου αυτού δεν μπορεί να αποκλεισθεί σε μακροχρόνια βάση, εφόσον συνδράμουν ευνοϊκές συνθήκες όπως είναι τα υπόγεια νερά και οι σεισμοί, συνεπώς θεωρείται απαγορευτική η κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου. Επισημαίνεται ότι τρεις εβδομάδες πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης είχαν παρατηρηθεί στην κορυφή του πετάλου της κατολίσθησης ανοικτές ρωγμές, κάτι που σημαίνει ότι οι σεισμοί που σημειώθηκαν δύο ημέρες πριν από αυτήν, πιθανόν να επιτάχυναν το φαινόμενο (Φυτρολάκης, Αντωνιάδης, 1974).

Επίσης σε ότι αφορά την συμμετοχή των υπόγειων υδάτων στην εκδήλωση της κατολίσθησης μπορεί επιπλέον να αναφερθεί ότι (Φυτρολάκης, Αντωνιάδης, 1974): α) Σε περίοδο έντονων βροχοπτώσεων είναι δυνατή η ανύψωση της πιεζομετρικής στάθμης του νερού και η δημιουργία υψηλής πιεζομετρικής στάθμης (η στάθμη ήταν ψηλά, λόγω του ότι υπήρχε ανάμεσα στους ασβεστόλιθους και αργιλικό υλικό) με συνέπεια τον εμποτισμό των αργιλομαργαϊκών στρωμάτων και την άσκηση πίεσης στη βάση των αδιαπέρατων στρωμάτων αφού εμποδίζεται έστω και προσωρινά η ελεύθερη ροή, β) Οι αγρότες άρδευαν τους αμπελώνες τους από το νερό του δυτικού χειμάρρου. Το νερό αυτό διερχόταν μέσω ενός ανοικτού μη επενδεδυμένου αγωγού με ελεύθερη ροή τριάντα (30) μέτρα ψηλότερα από την κορυφή του πετάλου της κατολίσθησης. Συνεπώς, δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο να εμποτίστηκαν οι αργιλομαργαϊκοί σχηματισμοί από το νερό που διοχετεύθηκε μέσω του συγκεκριμένου αγωγού.

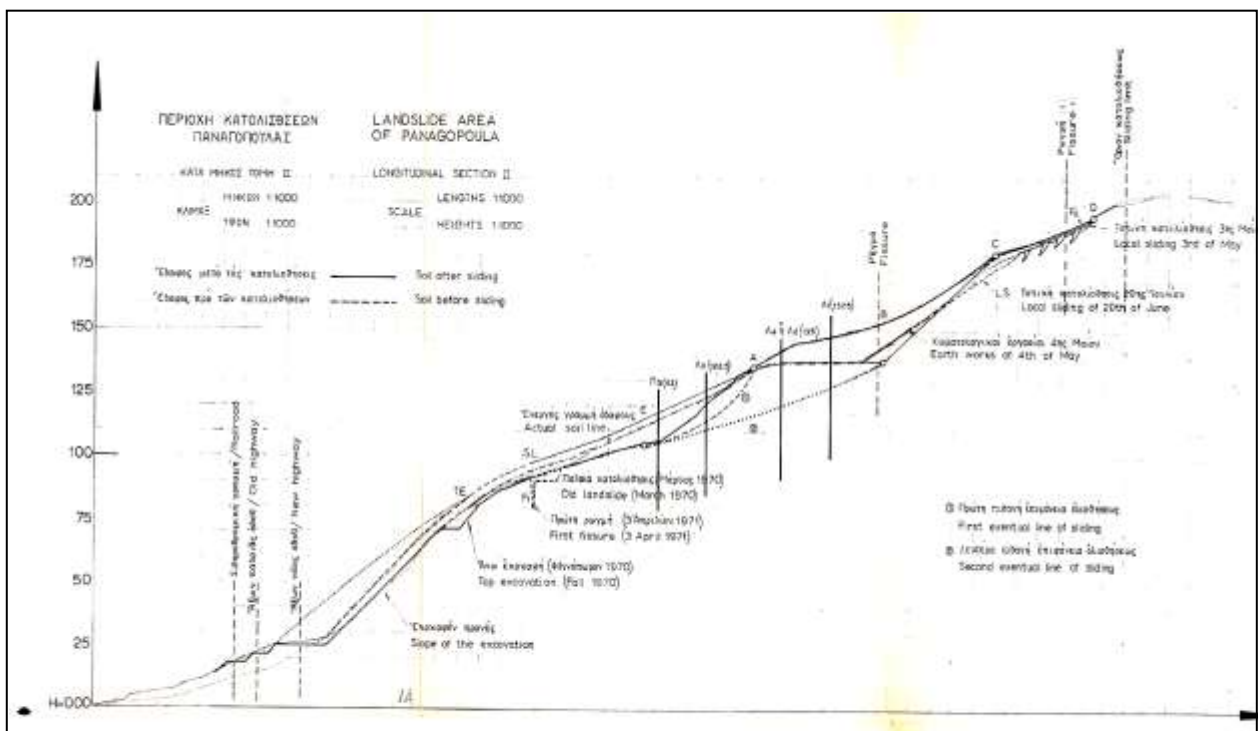
Τέλος, το νότιο τμήμα, από την Ν.Ε.Ο. έως την παραλία παρουσιάζει μια συνεχή σύγχρονη ερπυστική κίνηση (Sabatakakis et al., 2015), το οποίο συνδέεται με το ενεργό ρήγμα της Παναγοπούλας που διέρχεται κατά μήκος της Ν.Ε.Ο. Οι ερπυστικές αυτές κινήσεις είναι, με βάση τις αποκλισημετρικές μετρήσεις, συνεχιζόμενες και συνδέονται με αντίστοιχες ερπυστικές κινήσεις στον υποθαλάσσιο χώρο (Εικόνα 5.4).

Συμπερασματικά, η κατολίσθηση της Παναγοπούλας είναι μια μεγάλη αστοχία πρηνούς σχετιζόμενη με την ενεργό τεκτονική που σε συνδυασμό με τη δομή του αλπικού υποβάθρου, τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών στρωματογραφικών ενοτήτων και υπό την επίδραση του υπόγειου νερού είναι υπεύθυνα και για τις παλαιότερες από το 1971 κατολισθήσεις.



Εικόνα 5.4. Άποψη από την αστοχία στη θέση Παναγοπούλα την άνοιξη του 1971 (Μαρίνος, 2005).

Για την πλήρη ενημέρωση ως προς το καθεστώς της αστοχίας αυτής, δίνεται και η ακόλουθη χαρακτηριστική διατομή (Σχήμα 5.3) της αναγνωριστικής γεωλογικής μελέτης του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2002).



Σχήμα 5.3. Διατομή της αναγνωριστικής γεωλογικής μελέτης από ΓΕΩΠΕΡΕΥΝΑ Α.Ε. (1972).

Πηγή: [Γεν. Γραμ. Δημ. Έργων / Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2002)].

Με βάση, λοιπόν, την παράθεση και επεξήγηση των προηγούμενων τεχνικογεωλογικών πληροφοριών, παρατίθεται στη συνέχεια η αποκωδικοποίησή τους μέσω της θεωρίας RES. Ειδικότερα, ακολουθούν πίνακες και γραφικές παραστάσεις που «μεταφράζουν», δηλαδή ποσοτικοποιούν ό, τι πληροφορία έχει

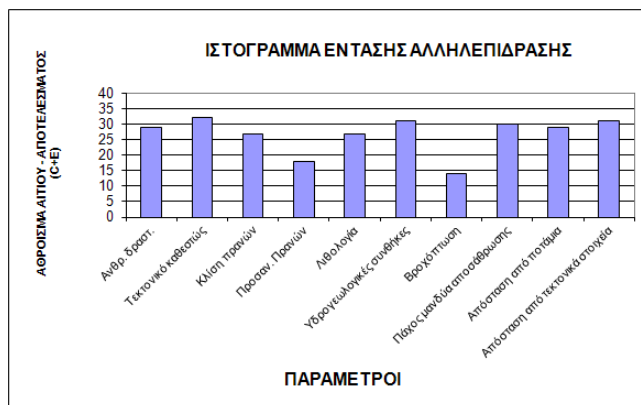
ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 5.3 δίνεται το μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Παναγοπούλα,

Πίνακας 5.3. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Παναγοπούλα.

Rock Engineering System (RES) - ΘΕΣΗ ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΑ													
α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Αίτιο (Cause - C)	C+E	C-E
1	Ανθρ. δραστ.	0	3	2	0	1	0	0	0	0	6	29	-17
2	4	Τεκτονικό καθεστώς	4	4	4	4	0	4	4	4	32	32	32
3	2	0	Κλίση πρανών	1	0	3	0	2	2	2	12	27	-3
4	2	0	1	Προσπν. Πρανών	0	1	0	2	1	1	6	18	-2
5	2	0	2	0	Λιθολογία	3	0	3	2	4	16	27	5
6	2	0	1	0	1	Υδρογεωλογικές συνθήκες	0	2	3	2	11	31	-9
7	1	0	0	0	3	4	Βροχόπτωση	3	3	0	14	14	14
8	4	0	1	1	0	1	0	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0	9	30	-12
9	3	0	1	1	1	1	0	1	Απόσπαση από ποτάμι	1	9	29	-11
10	3	0	2	1	2	2	0	4	3	Απόσπαση από τεκτονικά στοιχεία	17	31	3
Αποτέλεσμα (Effect - E)	23	0	15	10	11	20	0	21	20	14	134	268	

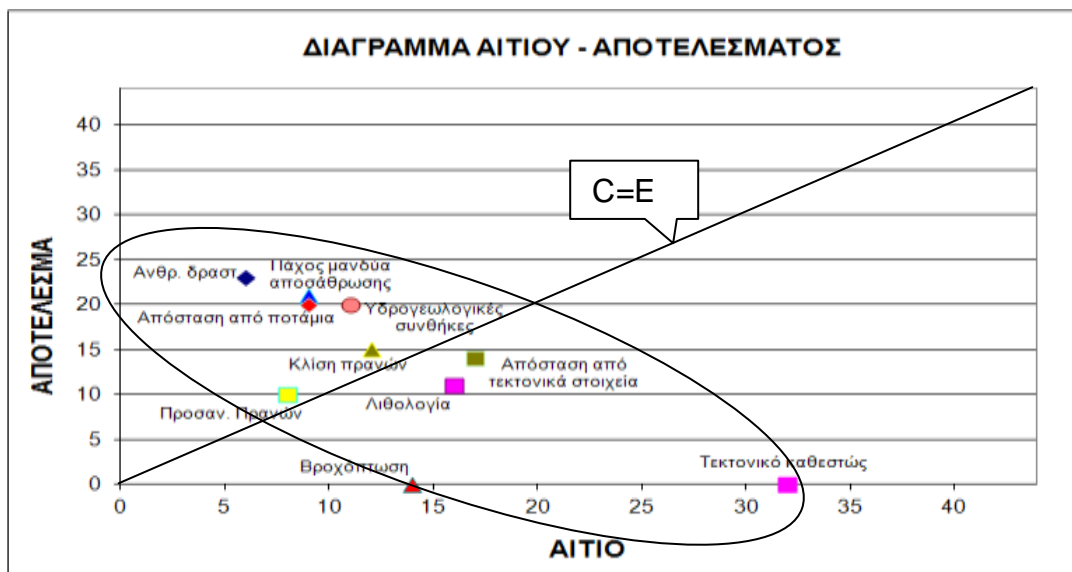
Παράμετροι	$ (C+E)/(C-E) \cdot 100\%$	Μέγιστη τιμή βαθμονόμησης	Σταθμικός Συντελεστής
Ανθρ. δραστ.	10.82	4	2.71
Τεκτονικό καθεστώς	11.94	4	2.99
Κλίση πρανών	10.07	4	2.52
Προσπν. Πρανών	6.72	4	1.68
Λιθολογία	10.07	4	2.52
Υδρογεωλογικές συνθήκες	11.57	4	2.89
Βροχόπτωση	5.22	4	1.31
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	11.19	4	2.80
Απόσπαση από ποτάμι	10.82	4	2.71
Απόσπαση από τεκτονικά στοιχεία	11.57	4	2.89
	100.00		

ενώ στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται το ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων.

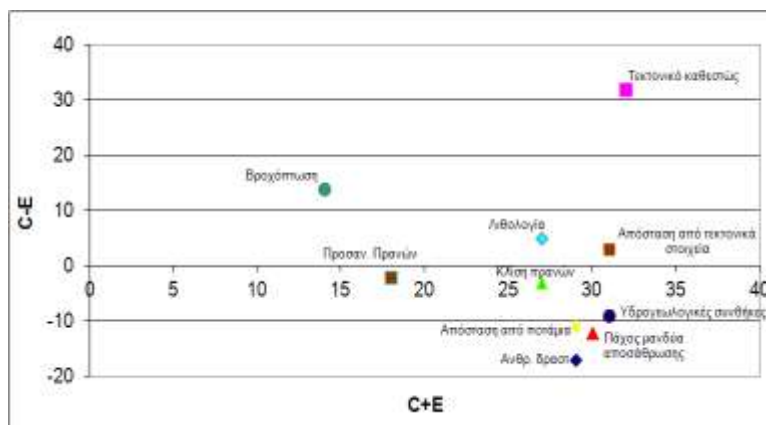


Σχήμα 5.4. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Παναγοπούλα.

Από τον Πίνακα 5.3, προκύπτουν τα ακόλουθα Σχήματα 5.5 και 5.6.



Σχήμα 5.5. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Παναγοπούλα.



Σχήμα 5.6. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση Παναγοπούλα.

Μελετώντας, αναλυτικότερα, τα δύο ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 5.5 & 5.6), προκύπτει ο Πίνακας 5.4 και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πίνακας 5.4. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Παναγοπούλα.

Παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{\max}$	32	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{\min}$	14	Βροχόπτωση
Παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{\max}$	32	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{\min}$	-17	Ανθρώπινη Δραστηριότητα

- ✓ Το τεκτονικό καθεστώς είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης που τεκμηριώνεται ως ακολούθως. Η περιοχή της αστοχίας στην Παναγοπούλα σχετίζεται με την γεωδυναμικά ενεργή τάφρο του Κορινθιακού Κόλπου, η οποία μέσω της πτυχογόνου και ρηγματογόνου τεκτονικής προκαλεί μείωση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών (Koukis et al., 2009). Συγκεκριμένα από την περιοχή της Παναγοπούλας διέρχεται μια από τις έξι κύριες ενεργές ρηξιγενείς ζώνες, διεύθυνσης Α-Δ, οι οποίες έχουν συμβάλει στην διάνοιξη του Κορινθιακού κόλπου. Το ίχνος της ζώνης αυτής εκτιμάται ότι διέρχεται στη βάση του ασβεστολιθικού πρανούς πάνω στην Νέα Εθνική Οδό και προφανώς (με την ύπαρξη πολλών αστοχιών πρανών) επηρεάζει όλες τις υπόλοιπες επιλεγμένες παραμέτρους του μητρώου.

Κατά τους Φυτρολάκη και Αντωνιάδη (1974), σχολιάζεται η αντίθετη άποψη τους σε σχέση με μια εργασία για την αστοχία της θέσης της Παναγοπούλας που δημοσιεύθηκε το 1974 από τους μηχανικούς Muller και Logters με τον τίτλο «Μια κατολίσθηση στην παρυφή μιας γεωλογικής τάφρου». Η εργασία αυτή εξέφραζε την άποψη ότι το πεδίο των τάσεων στις παρυφές και γενικά η αστάθεια των παρυφών της τεκτονικής τάφρου του Πατραϊκού Κόλπου αποτελούσε τον κύριο αίτιο της κατολίσθησης. Όμως, οι Φυτρολάκης και Αντωνιάδης αναφέρουν ότι (σημειώνεται ότι τα σχόλιά τους αφορούν τα δεδομένα που υπήρχαν έως και το 1974): «α) η κατολίσθηση περιορίστηκε μόνο στα ανώτερα αργιλομαργαϊκά στρώματα, β) δεν παρατηρήθηκαν πρόσφατες κινήσεις (ρήγματα) στα πρανά της δυτικής χαράδρας και του ορύγματος της οδού, γ) υπάρχουν σε όλο το μήκος του Πατραϊκού Κόλπου κλιθείς με μεγαλύτερη κλίση από εκείνη της Παναγοπούλας που βρίσκονται αμέσως πάνω από μεγάλα ρήγματα (σε αντίθεση με την Παναγοπούλα) και παρ' όλα αυτά δεν έχουν αστοχήσει».

Με νεότερες έρευνες, όπως για παράδειγμα αυτές των Lebourg et al. (2009) και Sabatakakis et al. (2015), επισημαίνεται ότι υπάρχει στενή σύνδεση μεταξύ της τεκτονικής και των κατολισθήσεων.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι η παράμετρος με τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή έντασης αλληλεπίδρασης αφού στην περιοχή της κατολίσθησης της

Παναγοπούλας παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαχρονική εκδήλωση των φαινομένων αστάθειας. Οι συνθήκες αυτές διαμορφώνονται από την υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών σε συνδυασμό με την στρωματογραφική και τεκτονική τους τοποθέτηση (επαφή διαπερατών – αδιαπέρατων σχηματισμών) καθώς επίσης και από τις συνθήκες τροφοδοσίας τους. Κατά τους Φυτρολάκη και Αντωνιάδη (1974), «ως πιθανότερο αίτιο της συγκεκριμένης εξεταζόμενης κατολίσθησης ήταν μια παροδική και ίσως τυχαία έντονη επίδραση του νερού».

- ✓ Η βροχόπτωση είναι η παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης, κάτι που σημαίνει ότι δεν επηρεάζεται άμεσα από την δυναμική των υπολοίπων παραμέτρων αλλά ουσιαστικά αποτελεί έναν ανεξάρτητο εξωτερικό (για το σύστημα του πρανούς) παράγοντα.
- ✓ Η παράμετρος του τεκτονικού καθεστώτος είναι εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης, δηλαδή επηρεάζει το σύστημα πολύ περισσότερο από ότι το σύστημα επηρεάζει το τεκτονικό καθεστώς και αυτό συμβαίνει γιατί η περιοχή της Παναγοπούλας αποτελεί τμήμα του πρανούς που αναπτύσσεται κατά μήκος δύο παράλληλων ενεργών ρηξιγενών δομών και οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στη συγκεκριμένη περιοχή ανήκουν στην γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου, οι οποίοι είναι έντονα τεκτονισμένοι και παρουσιάζουν την δομή κατά λέπη με επάλληλες επιππεύσεις, κάτι που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπόλοιπες επιλεγμένες παραμέτρους της περιοχής ενδιαφέροντος.
- ✓ Τέλος, η παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει το όλο σύστημα αλλά επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Σύμφωνα με το προηγούμενο Σχήμα 5.5, το νέφος συγκέντρωσης των σημείων των επιλεγμένων παραμέτρων είναι τοποθετημένο κάθετα στην ευθεία C=E, κάτι που σημαίνει ότι όλες οι επιλεγμένες παράμετροι είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας του εξεταζόμενου πρανούς. Οι προηγούμενοι πίνακες και σχήματα βοηθούν στην εύρεση υπολογισμού του δείκτη αστάθειας (Πίνακας 5.5).

Πίνακας 5.5. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Παναγοπούλα βάσει και της εργασίας των Tavouraris et al. (2017).

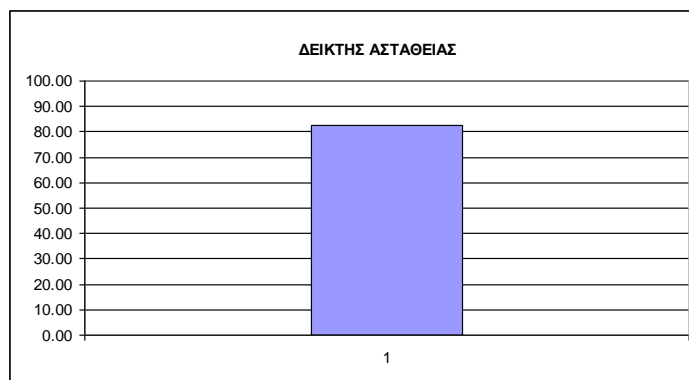
Υπολογισμός Δείκτη αστάθειας (Instability Index)											
Παράμετρος	Άνθρ. δραστ.	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσπν. Πρανών	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μονάδα αποσάθρωσης	Απόσταση από ποτάμι	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	Instability Index
Βαθμονόμηση πρανού	4	4	3	4	3	2	3	4	2	4	82,46
Μέγιστη τιμή βαθμονόμησης	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
$[(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%$	10,82	11,94	10,07	6,72	10,07	11,57	5,22	11,19	10,82	11,57	100,00
Σταθμικός Συντελεστής	2,71	2,99	2,52	1,68	2,52	2,89	1,31	2,80	2,71	2,89	

όπου:

Instability Index = Σ (σταθμικός συντελεστής x παράμετρος), δηλαδή ο δείκτης αστάθειας (Instability Index), είναι το συνολικό άθροισμα των γινομένων της κάθε επιμέρους παραμέτρου με τον αντίστοιχο σταθμικό συντελεστή.

$$\text{Σταθμικός συντελεστής} = \frac{1}{4} * [(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%$$

Σχηματικά, ο δείκτης αστάθειας απεικονίζεται με το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας στη θέση Παναγοπούλα.

Τέλος, στον Πίνακα 5.6 επεξηγείται η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων για την θέση αστοχίας στη θέση Παναγοπούλα, σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 5.6. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στην Παναγοπούλα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμο: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Πολύ ισχυρό τεκτονικό καθεστώς: συνδέεται με την παρουσία κατακερματισμένων ζωνών και με την παρουσία της έντονα ενεργής τεκτονικής δραστηριότητας της ευρύτερης περιοχής
Κλίση πρηνών	3	Μέση κλίση πλαγιάς της τάξης των 30°, όμως το πρηνές που αστόχησε πριν το κατολισθητικό γεγονός είχε μεγαλύτερη κλίση (η αρχική κλίση του φυσικού πρηνούς στην υπόψη θέση, ήταν της τάξης των 35°-40° (σύμφωνα με αναγνωριστική γεωλογική μελέτη της Γενικής Γραμματείας Δημοσίων Έργων του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.)
Προσαν. Πρηνών	4	0° - 45°
Λιθολογία	3	Παλιό/ανακατεμένο γεωύλκο (Η μετακίνηση της κατάντη περιοχής της Ν.Ε.Ο. οφείλεται στο είδος των εδαφικών υλικών που είναι κυρίως τα προϊόντα της μεγάλης κατολίθωσης πάνω στα οποία κατασκευάστηκαν επιχώματα και τοίχοι αντιστήριξης)
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Μέτρια περατότητα με βάση την εκόνα ότι στην περιοχή της Παναγοπούλας αναπτύσσονται διαφορετικοί υδροφόροι ορίζοντες, στο ανατολικό, κεντρικό και νότιο τμήμα της μελετούμενης περιοχής με κυμαινόμενη περατότητα (άλλοτε υψηλή και άλλοτε χαμηλή λόγω των εκάστοτε απαντώμενων στα τμήματα γεωλογικών σχηματισμών)
Βροχόπτωση	3	Τον Μάρτιο του 1971 (πριν τις κατολισθήσεις του Απριλίου – Μαΐου 1971), παρατηρήθηκαν υψηλής έντασης και διάρκειας βροχοπτώσεις (Koukis et al., 2009)
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	4	Είναι μεγαλύτερο των 3m
Απόσταση από ποτάμια	2	Η κατολίθωση στη θέση «Παναγοπούλα» έλαβε χώρα επί ενός αντερείσματος, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ δύο χειμάρρων, του ανατολικού και του δυτικού.
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Η περιοχή της Παναγοπούλας αποτελεί τμήμα του πρηνούς που αναπτύσσεται κατά μήκος δύο παράλληλων ενεργών ρηξιγενών δομών: του ρήγματος του Ψαθόπυργου στη βάση του χερσαίου τμήματος του πρηνούς και της υποθαλάσσιας νότιας ρηξιγενούς ζώνης του κόλπου που εντοπίζεται στη βάση του υποθαλάσσιου πρηνούς.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο δείκτης αστάθειας για το συγκεκριμένο πρηνές που αστόχησε στη θέση Παναγοπούλα ισούται με $I_{\text{instability}}$ $I_{\text{dex}}=82,46$, και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 [Κατηγοριοποίηση σχετικής κατολισθητικής επιδεκτικότητας κατά Brabb et al. (1972)] της εισαγωγής του παρόντος κεφαλαίου αντιστοιχεί στη στήλη L (Κατολίθωση), κάτι που επιβεβαιώνεται και από το συγκεκριμένο γεγονός που έλαβε χώρα τον Απρίλιο του 1971.

Πίνακας 5.1 κατά Brabb et al. (1972)*

% περιοχής που αστοχεί	0 - 1	2 - 8	9 - 25	26 - 42	43 - 53	54 - 70	100
RSN	I	II	III	IV	V	VI	L
Περιγραφή	Ασήμαντη	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Κατολίσθηση

*Παρατήρηση: Ο συγκεκριμένος πίνακας επανεμφανίζεται για διευκόλυνση του αναγνώστη

5.5. Κατολίσθηση Μαλακάσας

5.5.1. Ιστορικό

Τις πρωινές ώρες της 18ης Φεβρουαρίου 1995 έλαβε χώρα εκτεταμένη κατολίσθηση στο κατώτερο τμήμα των υπωρειών της Πάρνηθας, στα ανάντη της Νέας Εθνικής Οδού Πατρών – Αθηνών – Θεσσαλονίκης (ΠΑΘΕ) στη Χ.Θ. 36+000 του νέου αυτοκινητόδρομου Αθηνών – Λαμίας τρία χιλιόμετρα πριν τον κόμβο της Μαλακάσας.

Η κατολίσθηση προκάλεσε σημαντικές ζημιές (διακοπή της κυκλοφορίας των τρένων τουλάχιστον για δέκα ημέρες) στην Εθνική Οδό και το σιδηροδρομικό δίκτυο που ενώνει το νότιο με το βόρειο τμήμα της χώρας σχηματίζοντας μια ολισθημένη μάζα μέγιστου μήκους 306m, μέγιστου πλάτους 240m, όγκου της τάξης του 1,5 εκατομμυρίου m³ (Marinos et al., 1997) και κατέληξε με τον πόδα της στο οδόστρωμα της Ε.Ο. καταστρέφοντάς το επί μήκους 80m περίπου (Εικόνες 5.5 & 5.6).



Εικόνα 5.5. Η καταστροφή του οδοστρώματος της Ε.Ο. Αθηνών – Θεσσαλονίκης στη Χ.Θ. 36+000 (Ρόζος κ.α., 1995).



Εικόνα 5.6. Παραμόρφωση της σιδηροδρομικής γραμμής. από την κατολίσθηση της Μαλακάσας (Ρόζος κ.α., 1995).

Από τα στοιχεία που θα παρατεθούν στη συνέχεια προκύπτει ότι στη συγκεκριμένη θέση (η επιφάνεια που επηρεάστηκε ήταν 55-60 στρέμματα), ο χώρος ήταν κάτω από συνθήκες ασταθούς ισορροπίας για χρονική περίοδο παρατεταμένης διάρκειας. Μάλιστα, από το τέλος της δεκαετίας του 1960, το ΙΓΜΕ είχε συγκεκριμένα ερευνητικά στοιχεία για τα κατολισθητικά φαινόμενα και τις επιπτώσεις τους στην περιοχή (Αγγελίδης, 1995). Λόγω, λοιπόν, των επαναλαμβανόμενων κατολισθητικών φαινομένων που είχαν παρατηρηθεί στο παρελθόν στη συγκεκριμένη περιοχή αλλά και λόγω της ταραγμένης γεωλογικής ιστορίας της περιοχής, τα γεωλογικά υλικά του υπεδάφους στην περιοχή της Μαλακάσας εμφανίζονται αρκετά ανακατεμένα (Καβουνίδης κ.α., 1997).

Εφ' όσον, λοιπόν, με γνωστά τα παραπάνω δεδομένα δεν λαμβάνονταν για σειρά ετών τα αναγκαία μέτρα αντιμετώπισης ενώ παράλληλα οι ανθρώπινες παρεμβάσεις με τεχνικά έργα ήταν σε πλήρη εξέλιξη, όπως η διαπλάτυση της Εθνικής Οδού χωρίς ουσιαστική γεωλογική μελέτη για τις επιπτώσεις στο χώρο, τα φαινόμενα τόσο του Φεβρουαρίου όσο και του Οκτωβρίου του έτους 1995 ήταν αναμενόμενα. Όπως, δε, εξελίχθηκε η όλη κατάσταση, ο κύριος αποδέκτης των περισσότερων επιπτώσεων από τις κατολισθήσεις της περιοχής ήταν οι σιδηροδρομικές επικοινωνίες (συγκοινωνία, εμπορικές μεταφορές) της πρωτεύουσας με όλες τις προς βορρά περιοχές. Χωρίς να υποστηρίζεται ότι η προς νότο της σιδηροδρομικής γραμμής περιοχή είναι λιγότερο ευπαθής ή υπεύθυνη για τα κατολισθητικά φαινόμενα, εντούτοις η προς βορρά της γραμμής περιοχή θεωρείται ότι περικλείει όλα τα αίτια εκδήλωσης των κατολισθητικών κινήσεων αλλά και έχει το πρόσθετο στοιχείο οι μετακινήσεις αυτής της περιοχής να έχουν καταλυτικές επιπτώσεις στο σιδηροδρομικό δίκτυο. Απόδειξη για τις παραπάνω εκτιμήσεις είναι η εκδήλωση της κατολίσθησης τον Οκτώβριο του 1995 (Αγγελίδης, 1995).

5.5.2. Γεωλογία της περιοχής

Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε σε μια περιοχή παλαιοζωϊκών πετρωμάτων της Πελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης που είναι επωθημένα επί νεώτερων σχηματισμών (ασβεστολίθων) της Πάρνηθας ενώ το όλο σύστημα έχει δευτερογενώς καλυφθεί από νεώτερα κλαστικά υλικά με μικρή συνοχή, προερχόμενα από αποκόλληση και πτώση τεμαχίων των ανάντη ρηξιγενών πρηνών αλλά και από παλαιότερες εδαφικές μετακινήσεις.

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τον τεχνικογεωλογικό χάρτη κλίμακας 1:1000 που εκπονήθηκε στην περιοχή της κατολίσθησης από το ΙΓΜΕ (Ρόζος κ.α., 1995), τα υλικά που επικρατούν στην περιοχή της κατολίσθησης είναι τα ακόλουθα: υλικά επιχωματώσεων από παλαιά οικιστική δραστηριότητα (μπάζα), αναμοχλευμένα υλικά ποδός κατολίσθησης, υλικά ζωνών παλαιών κατολισθητικών κινήσεων, αποθέσεις περιοχών με ήπιο ανάγλυφο (κολλούβια), πρόσφατα κορήματα, παλαιά συνεκτικά κορήματα, ασβεστόλιθοι και σχηματισμοί παλαιοζωικού υποβάθρου.

Τα Παλαιοζωικά πετρώματα είναι έντονα τεκτονισμένα – καταπονημένα λόγω της επώθησης και συμπεριφέρονται σαν εδαφικός σχηματισμός μειωμένης συνοχής (Αγγελίδης, 1995). Η επιφάνεια θραύσης προσδιορίστηκε για το μεν ανατολικό τμήμα της μάζας της κατολίσθησης μέσα στα χαλαρά υλικά, για το δε δυτικό τμήμα μέσα στον Παλαιοζωικό σχηματισμό, που κυριαρχείται στην περιοχή αυτή από τη σχιστολιθική του φάση. Η επιφάνεια θραύσης ήταν προδιατηρημένη, καθώς από τα δείγματα των γεωτρήσεων προέκυψαν αρκετοί σε βάθος ορίζοντες που αποδόθηκαν σε παλαιότερες κατολισθήσεις (Γιαννάτος, 1997).

Στο παλαιοζωικό σύστημα εμφανίζονται δύο σειρές αργιλικών – φυλλιτικών σχιστολίθων, κάθε μια από τις οποίες εμπεριέχει και διακριτούς ορίζοντες άλλων πετρωμάτων (ασβεστολίθων και ψαμμιτών) ενώ ένα βασικό στοιχείο της μεταξύ τους διάκρισης είναι το χρώμα (Καβουνίδης κ.α., 1997).

Η μια σειρά αφορά τεφρούς ως τεφρόμαυρους σχιστόλιθους με παρεμβολές τεφρόμαυρων ασβεστολίθων και επίσης τεφρόμαυρων ψαμμιτών. Το πάχος των παρεμβαλλόμενων οριζόντων είναι από λίγα εκατοστά έως και λίγα μέτρα και στις περισσότερες περιπτώσεις οι ορίζοντες αυτοί χαρακτηρίζονται από διάρρηξη μέχρι και πλήρη κερματισμό. Η κυρίως μάζα, ωστόσο, είναι αυτή των σχιστολίθων που, συνήθως, εμφανίζονται αποσαθρωμένοι με πλήρη απώλεια της δομής τους λόγω προϋπάρχουσας διάτμησης από τεκτονική καταπόνηση ή και ολίσθηση.

Η άλλη σειρά αποτελείται από καστανούς έως καστανοκίτρινους αργιλικούς σχιστόλιθους που συνιστούν και την κυρίως μάζα της, στους οποίους παρεμβάλλονται μικρού πάχους κερματισμένοι ορίζοντες καστανών ή και τεφρόλευκων ψαμμιτών καθώς και τεφρόλευκων ή και λατυποπαγών ασβεστολίθων.

Τα τριαδικά ασβεστολιθικά πετρώματα της Πάρνηθας επιφανειακά συναντώνται εκτός της μάζας της κατολίσθησης και δημιουργούν σε ένα βαθμό έναν ευρύτερο

πλευρικό σκελετό στη ζώνη όπου εκδηλώθηκε η κατολίσθηση. Στον ευρύτερο χώρο είναι γνωστό ότι οι παλαιοζωϊκοί σχιστόλιθοι έχουν επωθηθεί στους ασβεστολίθους αυτούς. Η κατολίσθηση κατά την εκδήλωσή της εξελίχθηκε, κυρίως, μέσα στον παλαιοζωϊκό σχηματισμό και δευτερευόντως μέσα σε υλικά παλαιότερων μετακινήσεων (κορήματα κλπ) και όπως φαίνεται κατά μήκος προδιατημένης ζώνης.

5.5.3. Αίτια – μηχανισμός της κατολίσθησης – παράγοντες που την προκάλεσαν

Οι παράγοντες που επέδρασαν για να συμβεί η συγκεκριμένη κατολίσθηση είναι οι ακόλουθοι:

α) Τα έργα για τη διαπλάτυνση της Εθνικής Οδού (Ε.Ο.) και του παράλληλου βοηθητικού δρόμου. Όπως προαναφέρθηκε, το υπό μελέτη πραινές είχε ήδη παρουσιάσει αστάθεια κατά το μακρινό (1968) αλλά και το πρόσφατο παρελθόν (1993, 1994). Τα δύο τελευταία χρόνια που προηγήθηκαν της μεγάλης κατολίσθησης, είχαν παρουσιασθεί μικρότερες αστάθειες στην ίδια περιοχή. Με τη διαπλάτυνση του δρόμου (με τα έργα διαπλάτυνσης εκτιμάται ότι αφαιρέθηκε έδαφος της τάξης των 15.000 έως 20.000m³) απομακρύνθηκε μεγάλο μέρος της αργιλικής βάσης του παλαιότερου πραινούς και η ασυνεχής ανάντη μάζα του, υπό συνθήκες κορεσμού, ήταν επιρρεπής σε αστάθεια (δηλαδή, η εκσκαφή στον πόδα για ελαφρύσεις επέδρασε σε μια ήδη οριακή κατάσταση και αφαίρεσε οριακά σταθεροποιητικά φορτία).

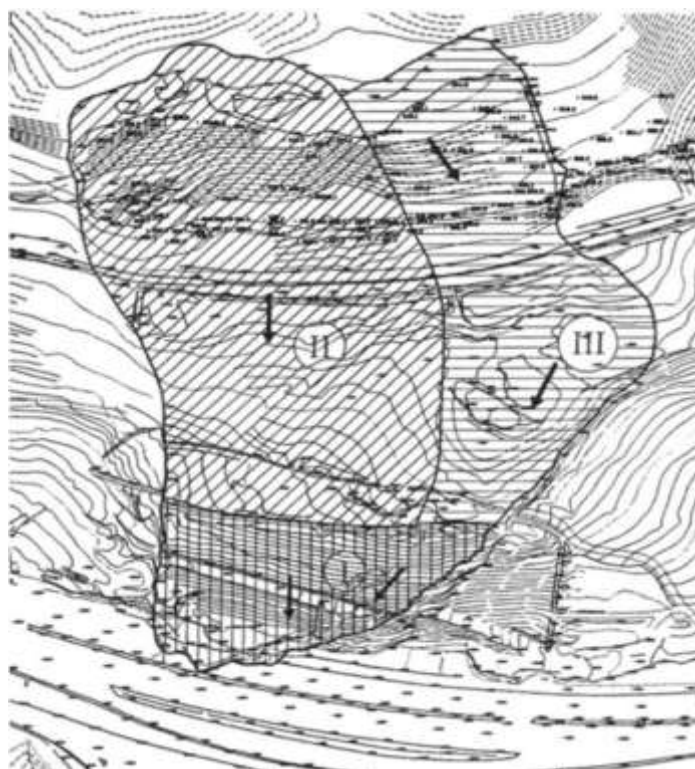
Τέτοιες συνθήκες δεν δημιουργήθηκαν λόγω του χαμηλού βροχομετρικού δείκτη (ο οποίος είχε επιφέρει σημαντική μείωση των υπεδαφικά διακινούμενων όγκων νερού) των ετών 1987 – 1992, όταν έγιναν οι εργασίες διαπλάτυνσης, αλλά λίγο αργότερα με τις αυξημένες βροχοπτώσεις των ετών 1992-1993, 1993-1994 και 1994-1995. Από τη μεγάλη (αθροιστικά) προσφορά νερού προκλήθηκε αύξηση της πίεσης πόρων στην ασυνεχή μάζα και από κάποιο οριακό σημείο και μετά ολίσθησε (Γιαννάτος, 1997).

Σημειώνεται ότι στις 26-27/10/1995 έλαβε χώρα νέα κατολίσθηση, μέσα στην έκταση της μεγάλης κατολίσθησης του Φεβρουαρίου του 1995, η οποία οφείλεται στο ότι ανάντη της διπλής σιδηροδρομικής γραμμής, εκτελέστηκαν μεγάλης έκτασης χωματουργικές εργασίες, προφανώς για τη μείωση του φορτίου του «ανωτέρου» τμήματος. Όμως, όπως δείχνουν οι γεωερευνητικές εργασίες και

κυρίως οι τεχνικογεωλογικές χαρτογραφήσεις, εκτιμήθηκε ότι οι παράγοντες που προκάλεσαν τις ωθήσεις στην έντονα διαταραγμένη περιοχή ανάντη αλλά και κατάντη της σιδηροδρομικής γραμμής δεν εξουδετερώθηκαν, παρά τις εκτεταμένες χωματοургικές εργασίες (Αγγελίδης, 1995). Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται στη συνέχεια.

Αξίζει να επισημανθεί ότι η γενική διάταξη της κατολίσθησης αποκαλύπτει ότι μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα του ποδός (περίπου 70m) επηρέασε το οδόστρωμα της Ε.Ο., καθώς η κίνηση στο αριστερό σκέλος της κατολίσθησης εκτονώθηκε στο πρηνές ανάντη αυτής (Σχήμα 5.8).

Γίνεται ανηλεπτό ότι αν αυτό δεν συνέβαινε, το μέγεθος της καταστροφής της Ε.Ο. σε μήκος οδοστρώματος θα ήταν πολλαπλάσιο (περισσότερο από 300 μέτρα), με τις όποιες πρόσθετες συνέπειες αυτό θα συνεπάγονταν από πλευράς κόστους αποκατάστασης (Ρόζος, 2007).



Σχήμα 5.8. Η κατολίσθηση της Μαλακάσας. Μόνο το δεξιό τμήμα του ποδός έχει επηρεάσει την Εθνική Οδό (Ρόζος κ.α., 1995).

β) Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε ύστερα από μια ιδιαίτερα υγρή βροχομετρικά χρονιά (1994-1995), η οποία ακολούθησε, σχεδόν, μια δεκαετία με πολύ μικρά ολικά ετήσια ύψη βροχής (Γιαννάτος, 1997). Σε συνδυασμό με την παρουσία σχηματισμών που χαρακτηρίζονται από μέσης έως σημαντικής, ακόμα και μεγάλης (π.χ. πρόσφατα και παλαιά κορήματα) υδροπερατότητας, άρα δημιουργίας μεγάλων υδραυλικών φορτίων σε εποχές υψηλής στάθμης νερών και υπέρμετρης αύξησης της πίεσης των πόρων, η βροχόπτωση έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση του φαινομένου με μείωση της αντοχής στην επιφάνεια ολίσθησης (Καβουνίδης, 1997).

Το υπόγειο νερό ακολούθησε προνομιακές οδούς κίνησης μέσα στο ετερογενές γεωλογικό υλικό που συνίσταντο από κορήματα διαφόρων ηλικιών και Παλαιοζωϊκούς σχηματισμούς (Αγγελίδης, 1995). Ήδη, πριν την κατολίσθηση στο πρηνές εκδηλωνόταν μικροπηγή ενώ κατά τις εργασίες διερεύνησης του φαινομένου εμφανίσθηκε και δεύτερη μικροπηγή δίπλα στη γραμμή του ΟΣΕ.

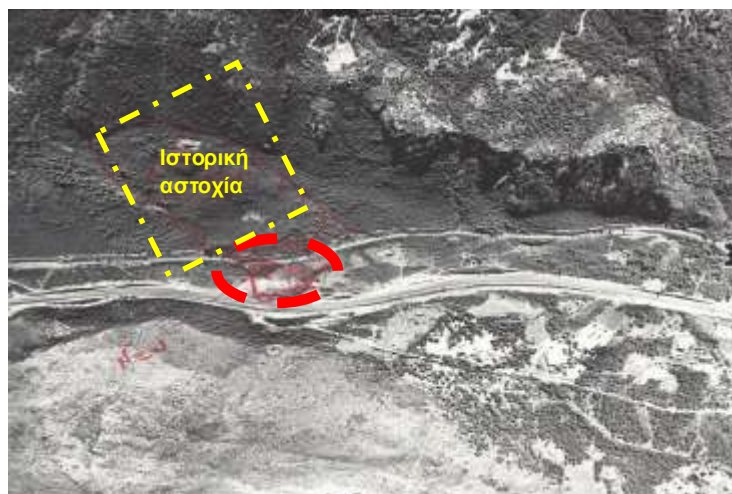
Μέσα σε αυτό το ασυνεχές μέσο, η υπόγεια ροή ακολούθησε δαιδαλώδεις και τυχαίες διαδρομές και αναπτύσσονταν αυτοτελείς υπόγειες υδροφορίες, ως επί το πλείστον χωρίς υδραυλική επικοινωνία και με πλευρικές αποσφηνώσεις. Η υπόγεια στάθμη σχηματιζόταν σε διαφορετικά βάθη, ακόμα και σε γεωτρήσεις που απέιχαν μεταξύ τους 10 περίπου μέτρα. Ο συντελεστής υδροπερατότητας προσδιορίσθηκε ότι ήταν πολύ μικρός. Η τροφοδοσία των υδροφοριών αυτών προερχόταν από πλευρικές διηθήσεις από τα ανάντη ανθρακικά πετρώματα αλλά και από απ' ευθείας κατείσδυση του νερού, που όπως αποδείχθηκε δεν ήταν αμελητέα. Πριν τη διαπλάτυνση του αυτοκινητόδρομου, στο μέσον περίπου του πρηνούς (κατάντη των σιδηροδρομικών γραμμών), εκδηλωνόταν και μια μικροπηγή η οποία αργότερα στέρεψε λόγω των παρεμβάσεων που έγιναν. Το πρηνές, λοιπόν, ήταν ουσιαστικά υπέρκορο και δεν αποστραγγιζόταν ικανοποιητικά, λόγω της επικράτησης αργιλικών συστατικών κατάντη της πηγής, στο τμήμα της μάζας της κατολίσθησης που σχημάτιζε το τεχνητό πρηνές του αυτοκινητόδρομου (Γιαννάτος, 1997).

γ) Άλλος παράγοντας πρόκλησης της συγκεκριμένης κατολίσθησης ήταν η φύση (σύσταση) και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σχηματισμών (ύπαρξη στο πρηνές χαλαρών υλικών όπως κορήματα, κολλούβια που τα χαρακτηρίζει η πολύ μικρή συνοχή) με μεγάλο ποσοστό αργιλικών ορυκτών, ιδιαίτερα όσων

θεωρούνταν ότι προέρχονταν από την αποσάθρωση και την μετακίνηση (Αγγελίδης, 1995).

δ) Σημαντικός ήταν και ο ρόλος των μορφολογικών κλίσεων για τους ιδιαίτερα επιρρεπείς σε μετακινήσεις σχηματισμούς (Αγγελίδης, 1995).

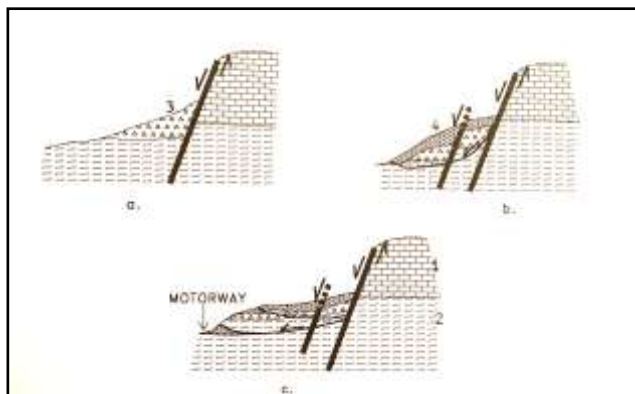
ε) Επίσης (κατά τον Αγγελίδη, 1995), βαρύνουσας σημασίας ήταν το γεωλογικό ιστορικό των σχηματισμών που καλύπτουν το υγιές υπόβαθρο (παλαιοζωϊκής ηλικίας) με τις αλληπάλληλες μετακινήσεις – κατολισθήσεις που είχαν προηγηθεί σε χρόνους γεωλογικής κλίμακας «υποχρεώνοντας» την πλαγιά να βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7. Διαχωρισμός ιστορικής αστοχίας και κατολισθησης (με κόκκινο κύκλο) του 1995 (Ρόζος, 1995).

στ) Κρίσιμο αίτιο για την πρόκληση της αστοχίας ήταν και η ενεργός τεκτονική της περιοχής ενδιαφέροντος και το γεγονός ότι η κατολισθημένη περιοχή αποτελεί τμήμα ενός τυπικού τεκτονικού παράθυρου (Galanakis et al., 1997). Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα μιας μεγάλης Νεογενούς λεκάνης που περιλαμβάνει τις περιοχές Θήβας, Τανάγρας και Μαλακάσας και συνδέεται με ένα κύριο σύστημα πτυχών, οι δε σχιστόλιθοι Παλαιοζωϊκής ηλικίας αποτελούν τον πυρήνα ενός μεγάλου αντίκλινου με διεύθυνση άξονα ΒΒΔ – ΝΝΑ. Επίσης, οι σχηματισμοί πριν από το Νεογενές έχουν κατακερματισθεί από μια σειρά κανονικών και μικρών ανάστροφων ρηγμάτων προκαλώντας τον κερματισμό των γεωλογικών υλικών του Παλαιοζωϊκού και ευνοώντας τη δημιουργία συνθηκών ολίσθησης τόσο εξ' αιτίας της λιθολογικής τους σύνθεσης όσο και λόγω του πρόσφατου τεκτονισμού.

Συγκεντρωτικά τα κύρια ρηξιγενή συστήματα της περιοχής ενδιαφέροντος είναι: ANA – ΔΒΔ, ΒΒΔ – ΝΝΑ και ΒΑ – ΝΔ. Μάλιστα, το πρώτο ρηξιγενές σύστημα που αποτελείται από ενεργά ρήγματα είναι αυτό που έχει σχηματίσει τη συγκεκριμένη λεκάνη. Το δεύτερο και τρίτο σύστημα λαμβάνει χώρα στους προνεογενείς σχηματισμούς. Ιδιαίτερα, το δεύτερο σύστημα (ΒΒΔ – ΝΝΑ) έχει παίξει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό της σημερινής μορφολογίας και στην πρόκληση των συνθηκών αστάθειας (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9. Απεικόνιση τριών βημάτων της ανάπτυξης της κατολίσθησης λόγω του ενεργού ρήγματος (1: Ασβεστόλιθοι, 2: Νεοπαλαιζωικός σχηματισμός, 3-4: Τεταρτογενείς αποθέσεις (Galanakis et al., 1997).

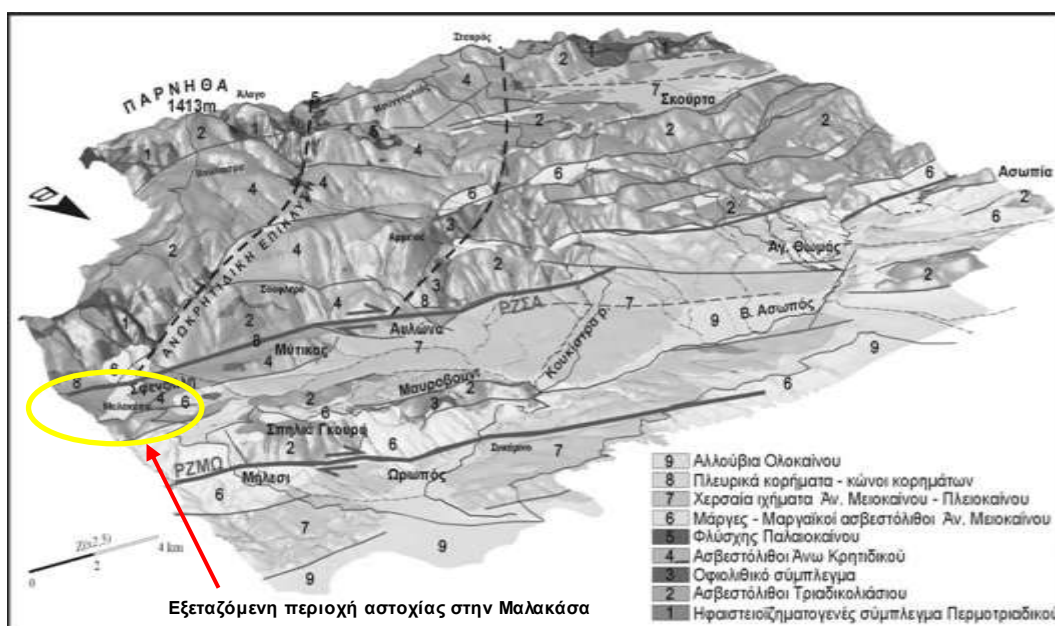
Το παραπάνω ενεργό ρήγμα αποτελεί τμήμα της μεγάλης ρηξιγενούς ζώνης Σφενδάλης (περίπου τρία χιλιόμετρα βόρεια της αστοχίας στην Χ.Θ. 36+000) – Αυλώνας, σημαντικής δεξιόστροφης συνιστώσας ολίσθησης (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8. Η ρηξιγενής ζώνη Σφενδάλης (περίπου τρία χιλιόμετρα βόρεια της αστοχίας στη Χ.Θ. 36+000) – Αυλώνας. Η απεικόνιση των ενεργών ρηγμάτων (με κόκκινο χρώμα) έχει ληφθεί από τους Ganas et al. (2013).

Η εξεταζόμενη, λοιπόν, περιοχή της αστοχίας στη Μαλακάσα ανήκει στην ανατολική λεκάνη του Βοιωτικού Ασωπού που σύμφωνα με τους Χατούπη και

Φουντούλη (2004), αποτελεί τμήμα ενός ενεργού νεοτεκτονικού περιθωρίου, η κινηματική και δυναμική διαχρονική εξέλιξη του οποίου έχει αποτυπωθεί στις επιμέρους μορφοτεκτονικές ενότητες τόσο της ορεινής περιοχής της Πάρνηθας όσο και της πεδινής λεκάνης του Ασωπού (Σχήμα 5.10). Μπορεί η σημερινή σεισμική δραστηριότητα να εντοπίζεται κυρίως στο υποθαλάσσιο χώρο του Ν. Ευβοϊκού, η παραμόρφωση ωστόσο φαίνεται ότι γίνεται όχι μόνο στον Ν. Ευβοϊκό αλλά και στον ευρύτερο χώρο της Αττικο-Βοιωτίας, γεγονός που έχει διαπιστωθεί από πρόσφατες γεωδαιτικές παρατηρήσεις, εντασσόμενη στο ευρύτερο νεοτεκτονικό καθεστώς του κεντρικού Αιγαίου.



Σχήμα 5.10. Τρισδιάστατη ψηφιακή απεικόνιση της γεωλογίας στην ανατολική λεκάνη του Β. Ασωπού (Χατούπης και Φουντούλης, 2004).

ζ) Επιπλέον, κρίσιμος παράγοντας αιτίου της αστοχίας ήταν και η παρουσία σχηματισμών που χαρακτηρίζονται από μέσης έως ακόμα και μεγάλης υδροπερατότητας, για παράδειγμα πρόσφατα και παλαιά κορήματα (Αγγελίδης, 1995). Συνολικά, το ιδιόμορφο υδρογεωλογικό καθεστώς της μάζας των υλικών του πρηνούς ήταν υπεύθυνο για τη δημιουργία τοπικά αυξημένων και τοπικά μηδενικών συνθηκών διακίνησης νερού. Η σημασία της παραμέτρου αυτής αποδεικνύεται και από το γεγονός της κατασκευής συστήματος αποστράγγισης τόσο στην επιφάνεια και κάτω από το πρηνές αλλά και κάτω από την Εθνική Οδό (γεωτρήσεις αποστράγγισης, μια διαμήκης και εγκάρσιες αποστραγγιστικές σήραγγες).

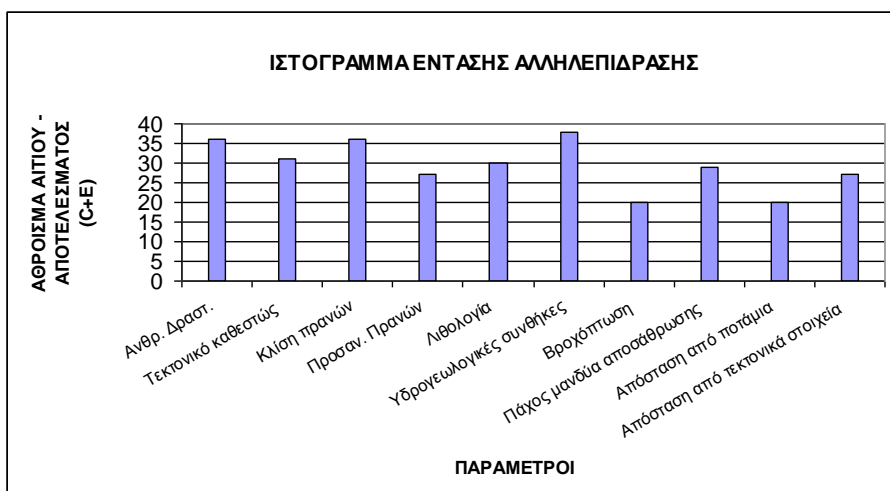
η) Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η γεωλογική μελέτη εξέτασε τη σεισμικότητα της περιοχής και τη σεισμική επικινδυνότητα των εδαφικών υλικών που λόγω του χαλαρού της μάζας τους είναι δυνατόν να αποσταθεροποιηθούν τοπικά από κάποια σεισμική δόνηση, αφού είναι γνωστό ότι η περιοχή είναι σεισμικά ενεργή ενώ είναι γνωστή η ύπαρξη γεωλογικού ρήγματος παράλληλου προς τον άξονα της οδικής και σιδηροδρομικής αρτηρίας. Η, δε, σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής ενδιαφέροντος με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2003 είναι II [Η τιμή εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού είναι 0,24g (ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g) για τη δεύτερη ζώνη].

Με βάση, λοιπόν, την παράθεση και επεξήγηση των προηγούμενων τεχνικογεωλογικών πληροφοριών, παρατίθεται στη συνέχεια η αποκωδικοποίησή τους μέσω της θεωρίας RES. Ειδικότερα, ακολουθούν πίνακες και γραφικές παραστάσεις που «μεταφράζουν», δηλαδή ποσοτικοποιούν ό, τι πληροφορία έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 5.7 δίνεται το μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Μαλακάσα,

Πίνακας 5.7. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Μαλακάσα.

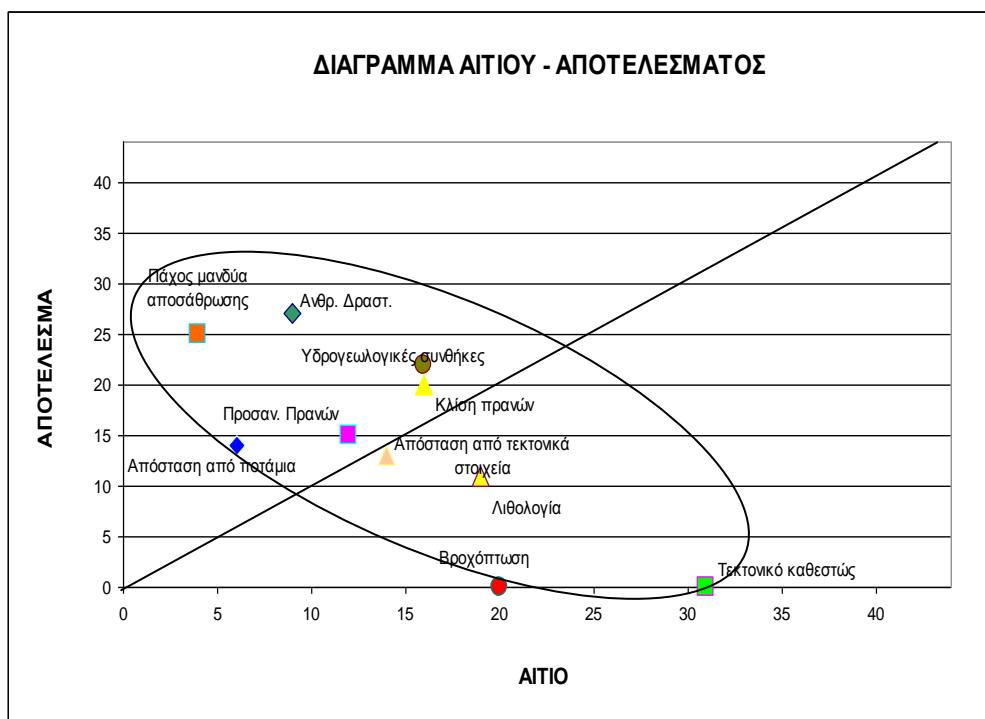
Rock Engineering System (RES) - ΘΕΣΗ ΜΑΛΑΚΑΣΑ																	
α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Αίτιο (Cause - C)	C+E	C-E	Parameters	(C+E)/C (-E)/C *100%	Μέγιστη επί βολονόμενος παρατηρού	Επιθμικός Συντελεστής
1	Ανήλ. Δραστ.	0	3	3	0	1	0	2	0	0	9	36	-18	Ανήλ. Δραστ.	12.24	4	3.06
2	3	Τεχνητά εκτετατός	4	4	4	4	0	4	4	4	31	31	31	Τεχνητά εκτετατός	16.54	4	2.64
3	3	0	0	0	0	0	0	4	1	2	16	36	-4	Κλίση πρανών	12.24	4	3.06
4	3	0	1	0	0	0	0	3	1	0	12	27	-3	0	9.18	4	2.30
5	3	0	3	2	0	0	0	3	2	2	19	30	8	0	16.20	4	2.55
6	4	0	2	1	1	0	0	1	2	3	16	38	-6	Προσχωματικές οδοί	12.93	4	3.23
7	4	0	3	3	1	4	0	4	1	0	20	20	20	0	6.80	4	1.70
8	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	29	-21	0	9.86	4	2.47
9	0	0	1	0	1	2	0	0	0	2	6	20	-8	0	6.80	4	1.70
10	4	0	2	1	0	2	0	2	3	3	14	27	1	0	9.18	4	2.30
Αποτέλεσμα (Effect - E)	27	0	28	15	11	22	0	25	14	13		294			193.80		

ενώ στο Σχήμα 5.11, απεικονίζεται το ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων.

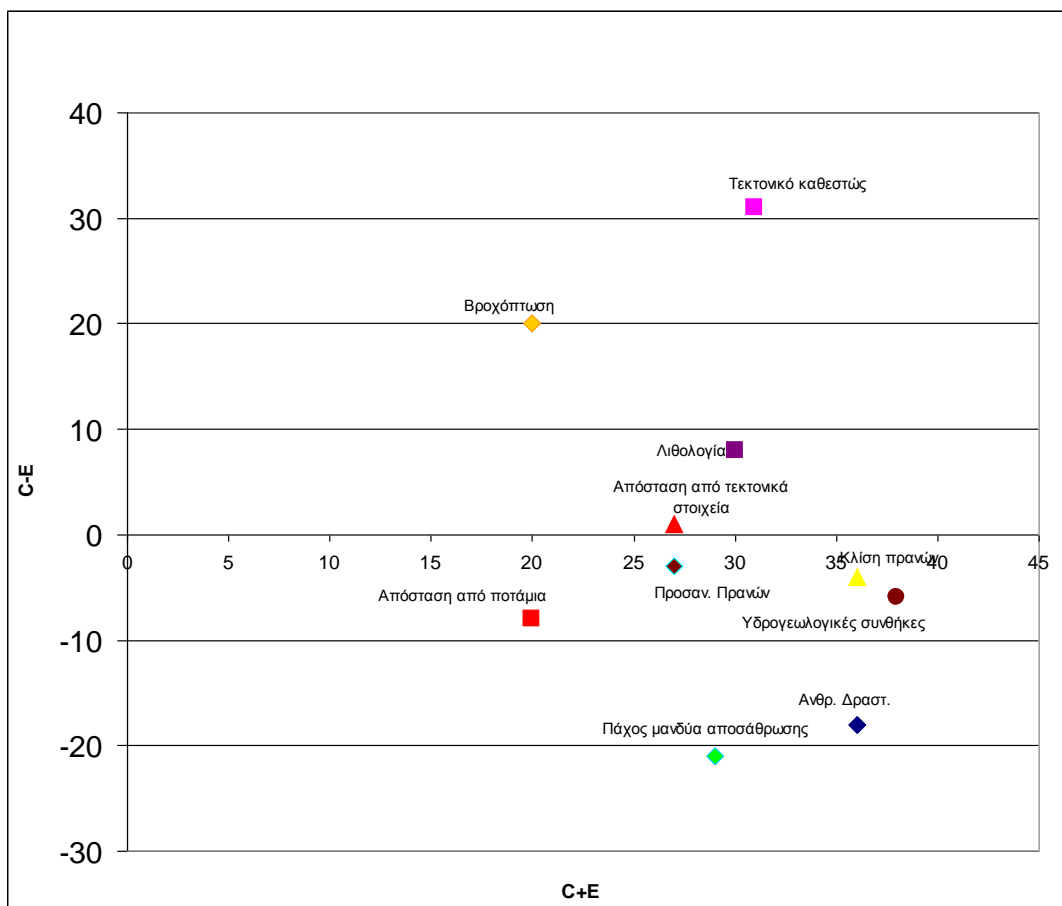


Σχήμα 5.11. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Μαλακάσα.

Από τον Πίνακα 5.7, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (Σχήμα 5.12) καθώς και το διάγραμμα (C+E) – (C-E), στο οποίο υπάρχει καλύτερη εικόνα αποτύπωσης της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επικράτηση (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.12. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Μαλακάσα.



Σχήμα 5.13. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη Μαλακάσα.

Μελετώντας, αναλυτικότερα, τα δύο ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 5.12 & 5.13), προκύπτει ο Πίνακας 5.8 και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πίνακας 5.8. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Μαλακάσα.

Παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{max}$	38	Υδρογεωλογικές συνθήκες
Παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{min}$	20	Βροχόπτωση, Απόσταση από ποτάμια
Παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{max}$	31	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{min}$	-21	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

- ✓ Οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης λόγω της πολύ υψηλής στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και της παρουσίας πηγών με συνέπεια να επηρεάζουν έντονα όλες τις υπόλοιπες επιλεγμένες παραμέτρους της περιοχής μελέτης.

- ✓ Η βροχόπτωση καθώς και η απόσταση από ποτάμια είναι οι παράμετροι με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης, κάτι που σημαίνει ότι επηρεάζονται πολύ λιγότερο από την δυναμική των υπολοίπων παραμέτρων.
- ✓ Το τεκτονικό καθεστώς αντιστοιχεί στον παράγοντα με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης, δηλαδή επηρεάζει το σύστημα πολύ περισσότερο από ότι το σύστημα επηρεάζει αυτό. Κρίσιμο αίτιο για την πρόκληση της αστοχίας ήταν το γεγονός ότι η κατολισθημένη περιοχή αποτελεί τμήμα ενός τυπικού τεκτονικού παράθυρου, το οποίο συνδέεται με την ύπαρξη ρηξιγενούς συστήματος που έχει παίξει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό της σημερινής μορφολογίας και στην πρόκληση των συνθηκών αστάθειας.
- ✓ Τέλος, η παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης είναι το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει το όλο σύστημα αλλά επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Σύμφωνα με το προηγούμενο Σχήμα 5.12, το νέφος συγκέντρωσης όλων των σημείων των επιλεγμένων παραμέτρων είναι τοποθετημένο κάθετα στην ευθεία C=E. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι επιλεγμένες παράμετροι είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας του εξεταζόμενου πρανούς.

Οι προηγούμενοι πίνακες και σχήματα βοηθούν στην εύρεση υπολογισμού του δείκτη αστάθειας (Πίνακας 5.9).

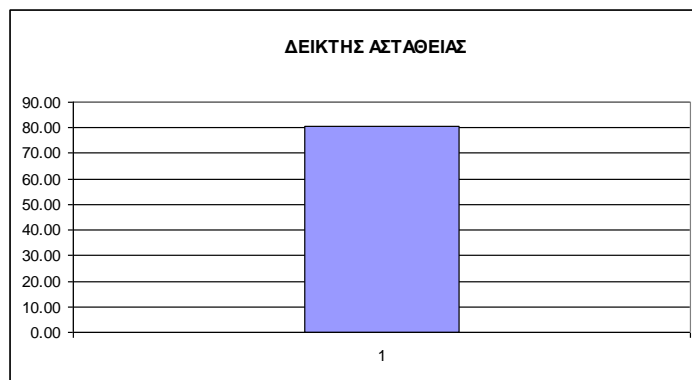
Πίνακας 5.9. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Μαλακάσα βάσει και της εργασίας των Tavoularis et al. (2017).

Υπολογισμός Δείκτη αστάθειας (Instability Index)											
Παράμετρος	Ανθρ. Δραστ.	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσαν. Πρανήν	Λιθολογία	Υδρογεωλογικός συνθέτης	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	Instability Index
Βαθμονόμηση πρανούς	4	4	2	4	3	4	3	4	0	3	80.53
Μέγιστη τιμή βαθμονόμησης παραμέτρου	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
$[(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%$	12.24	10.54	12.24	9.18	10.20	12.93	6.80	9.86	6.80	9.18	100.00
Σταθμικός Συντελεστής	3.06	2.64	3.06	2.30	2.55	3.23	1.70	2.47	1.70	2.30	

όπου: **Instability Index** = Σ (σταθμικός συντελεστής x παράμετρος), δηλαδή ο δείκτης αστάθειας (Instability Index), είναι το συνολικό άθροισμα των γινομένων της κάθε επιμέρους παραμέτρου με τον αντίστοιχο σταθμικό συντελεστή και

$$\text{Σταθμικός συντελεστής} = \frac{1}{4} * [(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%.$$

Σχηματικά, ο δείκτης αστάθειας απεικονίζεται με το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.14. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη Μαλακάσα.

Τέλος, στον Πίνακα 5.10, επεξηγείται η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη θέση Μαλακάσα, σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 5.10. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη Μαλακάσα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Ανθρ. Δραστ.	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εν ταπτό τεκτονικό καθεστώς: αν τιπροσωπεύει επιπτεύσεις και επιωθήσεις
Κλίση πρικών	2	16° -30°
Προσαν. Πρικών	4	135° - 225°
Λιθολογία	3	Λόγω των επαν αλαμβανόμενων κατολισθητικών φαινομένων που είχαν παρατηρηθεί στο παρελθόν στη συγκεκριμένη περιοχή αλλά και λόγω της παραγμένης γεωλογικής ιστορίας της περιοχής, τα γεωλικά του υπεδάφους στην περιοχή της Μαλακάσας εμφανίζονται αρκετά ακατεμένα.
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Η παρουσία μόνιμης πηγής και υψηλής πίεσης πόρων στον πόδα του πρικού επιβεβαιώνει την αφθονία νερού στην ολισθημένη μάζα.
Βροχόπτωση	3	Η κατολίσθηση εκδηλώθηκε ύστερα από μια ιδιαίτερα υγρή βροχομετρικά χρονιά (1994-1995)
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	4	Είναι μεγαλύτερο των 3m
Απόσταση από ποτάμια	0	Το πλησιέστερο στην εξεταζόμενη περιοχή ρέμα βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από 200m
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Σε απόσταση περίπου 70m βρίσκεται ενεργό τεκτονικό ρήγμα που ανήκει στη μεγάλη ρηξιγενή ζώνη Σφεν δάλης – Αυλώνας, η οποία οριοθετεί την ορεινή από την πεδινή μορφοτεκτονική ενότητα

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο δείκτης αστάθειας για το συγκεκριμένο πρικό που αστόχησε στη θέση Μαλακάσα ισούται με $I_{instability}$ $I_{index}=80.53$ και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 [Κατηγοριοποίηση σχετικής κατολισθητικής επιδεκτικότητας κατά Brabb et al. (1972)] αντιστοιχεί στη στήλη L (Κατολίσθηση), κάτι που επιβεβαιώνεται και από το συγκεκριμένο γεγονός που συνέβη τον Φεβρουάριο του 1995.

5.6 Κατολίσθηση στη θέση Τσακώνα, Ν. Αρκαδίας

5.6.1. Εισαγωγή

Η κατολίσθηση της Τσακώνας, η οποία γεωγραφικά τοποθετείται σε απόσταση περίπου δέκα πέντε (15) χιλιόμετρα νότια της Μεγαλόπολης, ανήκει στο νομό Αρκαδίας, βρίσκεται κοντά στα σύνορα με το νομό Μεσσηνίας και έλαβε χώρα τον χειμώνα του 2003 στον άξονα της Νέας Εθνικής Οδού (Ν.Ε.Ο.) Τρίπολης – Καλαμάτας (μεταξύ των Χ.Θ 16+250 και Χ.Θ. 16+550). Ωφείλεται στη συνδυασμένη δράση γεωλογικών διεργασιών και ανθρώπινων παρεμβάσεων. Συγκεκριμένα, από την έναρξη κατασκευής της Νέας Εθνικής Οδού (Ν.Ε.Ο.) Τρίπολης – Καλαμάτας στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έως και το καταστροφικό κατολισθητικό γεγονός που συνέβη τον Φεβρουάριο του 2003, εκδηλώθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους αστοχίες, είτε με τη μορφή ολισθήσεων στα επιχώματα, είτε με τη μορφή ρωγμών και καθιζήσεων στο οδόστρωμα (Εικόνα 5.9 (α) & (β)).



Εικόνα 5.9 (α & β). Λήψεις φωτογραφιών από τη θέση Τσακώνα πριν από το μεγάλο κατολισθητικό γεγονός του 2003 (Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων, 2002).

Στις αρχές Φεβρουαρίου του 2003, ύστερα από παρατεταμένες βροχοπτώσεις, σημειώθηκε γρήγορη μετακίνηση μεγάλης μάζας γεωλογικών υλικών που απέκοψε την οδό σε μήκος 300m περίπου (Ντουνιάς κ.α., 2006). Το φαινόμενο είχε καταστρεπτικά αποτελέσματα εκτός από την Ε.Ο. και σε μια περιοχή 400m ανάντη και 700m κατόντη, όπου σε μεγάλο βαθμό αλλοιώθηκε η μορφολογία της ευρύτερης περιοχής δημιουργώντας ρωγμές μεγάλου εύρους και άλματος, αλλαγές στην ροή ρεμάτων, καθώς και καταστροφή πολλών αγροτικών οδών (Εικόνα 5.10).

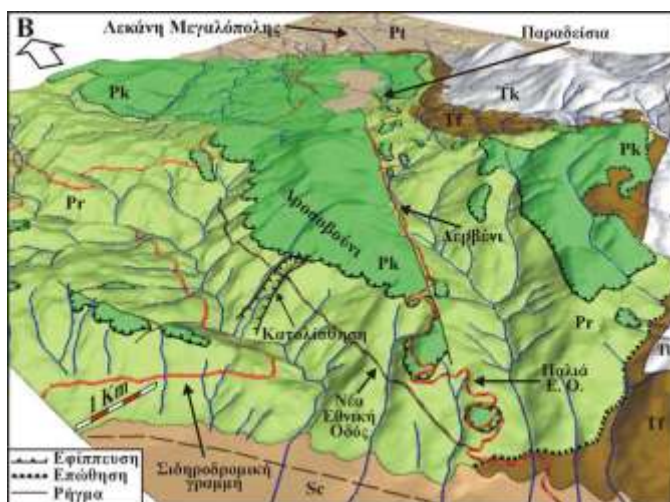


Εικόνα 5.10. Τμήμα του οδοστρώματος που μετακινήθηκε σε απόσταση της τάξης των 30m, κάτω από το αρχικό επίπεδο του αυτοκινητόδρομου (ΚΕΔΕ, 2003).

Η περιοχή της κατολίσθησης βρίσκεται μορφολογικά στα δυτικά πρηνή ενός επιμήκους αντερείσματος ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης (Σχήμα 5.15). Το ύψωμα αυτό (Δροσοβούνι) οριοθετείται ΒΔ και ΝΑ από δύο χείμαρρους που παρουσιάζουν έντονη κατά βάθος διάβρωση (Φουντούλης κ.α., 2004).

Το γεγονός ότι το τμήμα της οδού που αστόχησε τελικά διέρχεται από μια περιοχή με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο και έγινε σε θέση όπου κατολισθήσεις προϋπήρχαν της χάραξης και της κατασκευής του δρόμου τόσο ανάντη όσο και κατόντη της Εθνικής Οδού, δηλώνει ότι οι αρχικές αυτές αστοχίες δεν ελήφθησαν υπόψη. Το ιστορικό των κατολισθήσεων, λοιπόν, έχει διαμορφώσει την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής (Φουντούλης κ.α., 2004).

Σύμφωνα με τους Παπαντωνόπουλο κ.α. (2006), καθώς και όπως προέκυψε από την γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα, η καταστροφική κατολίσθηση έλαβε χώρα στα σχετικά επιφανειακά στρώματα και πιθανότατα πρόκειται για μία επανενεργοποίηση μίας διαταραγμένης εδαφικής μάζας σε προκαθορισμένες επιφάνειες, ορισμένες από τις οποίες εντοπίστηκαν από μετρήσεις κλισιομέτρων. Ως γνωστόν, προγενέστερα επεισόδια κίνησης εδαφικών μαζών επηρεάζουν την ευστάθεια των πρηνών και την έναρξη κατολισθήσεων μειώνοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους με κάτω όριο τις τιμές που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή (Zaruba and Menci, 1969).



Σχήμα 5.15. Προοπτική εικόνα του γεωλογικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής της κατολίτσης. Η κατασκευή του χάρτη έχει βασιστεί στα στοιχεία του γεωλογικού χάρτη φύλλο “ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ” του ΙΓΜΕ στο οποίο έχουν γίνει τροποποιήσεις. Sc: πλευρικά κορήματα, Pt: λιμναίες αποθέσεις λεκάνης Μεγαλόπολης, Tt: φλύσχης ενότητας Τρίπολης, Tk: ανθρακική ακολουθία ενότητας Τρίπολης, Pk: Ανωκρητιδικό ασβεστόλιθο ενότητας Πίνδου, Pr: Κερατολιθική σειρά και ακολουθία πρώτου φλύσχη ενότητας Πίνδου (Φουντούλης κ.α., 2004).

Από εκτεταμένη γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε μετά το συμβάν, προέκυψε ότι οι παράγοντες που αλληλεπίδρασαν και συνέβαλαν στην εκδήλωση του φαινομένου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Σωτηρόπουλος κ.α., 2004):

(α) σε εκείνους που δημιούργησαν το γεωλογικό πλαίσιο μίας γενικά ασταθούς περιοχής στην οποία έχουν ξανασυμβεί στο γεωλογικό παρελθόν κατολισθητικά φαινόμενα και

(β) σε εκείνους που έδρασαν προσθετικά σε σύντομο χρονικό διάστημα και οδήγησαν στην τελική εκδήλωση της αστοχίας το χειμώνα του έτους 2003.

Οι πρώτοι αφορούν την αλληλεπίδραση συγκεκριμένων φυσικών παραγόντων, όπως η λιθολογία των σχηματισμών του «πρώτου φλύσχη» της ζώνης Πίνδου και η τεκτονική καταπόνηση που έχουν υποστεί, οι υδρογεωλογικές συνθήκες όπως διαμορφώθηκαν από τους τεκτονικά υπερκείμενους ασβεστόλιθους και η μορφολογία, οι οποίοι δημιούργησαν μία ασταθή θέση με ιστορικό κατολισθητικών φαινομένων στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν.

Στην ενεργοποίησή της, το 2003, σημαντικό ρόλο διαδραμάτισαν οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στα πλαίσια κατασκευής της Ν.Ε.Ο., η οποία υλοποιήθηκε επί ασταθών υλικών. Στην τελική εκδήλωσή της συνέβαλαν σε πολύ μεγάλο βαθμό οι έντονες βροχοπτώσεις της περιόδου φθινόπωρο – χειμώνας

2003 και ειδικότερα αυτές που σημειώθηκαν τον Ιανουάριο του 2003. Συνεπώς, αποτέλεσαν τον μηχανισμό πυροδότησης μίας αστοχίας η οποία ήταν ώριμη να συμβεί, τόσο λόγω των γεωλογικών συνθηκών της θέσης, όσο και λόγω της επιβάρυνσης που υπέστη από τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Σωτηρόπουλος κ.α., 2004).

Γενικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κατολίσθηση της Τσακώνας, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν σημειωθεί στο ελληνικό οδικό δίκτυο (1000m μήκος, 300m πλάτος, 30m μέγιστο βάθος επιφάνειας ολίσθησης, 100m οριζόντια μετακίνηση, όγκος ολισθημένων υλικών περί τα 6.000.000m³), αποτελεί μια σύνθετη μεταθετική ολίσθηση. Στην ουσία πρόκειται για δύο κατολισθήσεις: η μια αφορά την περιοχή πάνω από τον αυτοκινητόδρομο, η οποία φόρπισε μαζί με τις τεχνητές επιχώσεις το κατάντη τμήμα, το οποίο με τη σειρά του αστόχησε. Για την όσο το δυνατόν καλύτερη τεκμηρίωση της βαθμονόμησης των παραμέτρων που συγκροτούν το σχετικό μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση της Τσακώνας, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα σημαντικότερα γεωλογικά χαρακτηριστικά που προκάλεσαν τη συγκεκριμένη αστοχία.

α) Μορφολογία

Η μορφολογική εικόνα της περιοχής χαρακτηρίζεται από διάφορες γεωμορφές, ο σχηματισμός των οποίων συνδέεται με τη στρωματογραφική και τεκτονική δομή καθώς και τις διαδικασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης. Οι επιφάνειες επιπέδωσης αποτελούν την κυριότερη γεωμορφή στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και σχετίζονται σε όλες τις περιπτώσεις με περιοχές ενεργών και παλαιών κατολισθήσεων. Η διεύθυνση ανάπτυξής τους είναι περίπου Α-Δ, εγκάρσια στον άξονα της οδού (Φουντούλης κ.α., 2004).

Η κλίση του μορφολογικού αναγλύφου (που εξαρτάται κυρίως από τη λιθολογία) στη στενή ζώνη των περιοχών αυτών κυμαίνεται από 5% έως 10% ενώ η μέση κλίση της ευρύτερης περιοχής είναι μεγαλύτερη του 20%.

Όσον αφορά στο υδρογραφικό δίκτυο, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη μορφολογική εικόνα μιας περιοχής. Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, το φαινόμενο της κατά βάθος διάβρωσης, το οποίο είναι πολύ έντονο συνδέεται με ηπειρωτικές ανυψώσεις λόγω τεκτονικών διεργασιών και είναι χαρακτηριστικό όλων των ρεμάτων της περιοχής (Φουντούλης κ.α., 2004).

Η στενή περιοχή της κατολίσθησης (μεταξύ των Χ.Θ 16+250 και 16+550) αποτελεί σε όλη την έκτασή της ένα μορφολογικό βύθισμα, στο οποίο συσσωρεύτηκαν μεγάλου πάχους χαλαρές αποθέσεις κορημάτων, πηγή των οποίων αποτελούν οι εκατέρωθεν σχηματισμοί του φλύσχη νότια και βόρεια της περιοχής και των ασβεστολίθων ανατολικά (Εικόνα 5.11).

Η μορφολογία του βυθίσματος τοποθετείται χρονικά πριν από την εκδήλωση των πρόσφατων κατολισθητικών φαινομένων και οφείλεται κυρίως (Σωτηρόπουλος κ.α., 2004): (α) στη διαφορική αποσάθρωση του ασθενούς φλυσχοειδούς υποβάθρου σε σχέση με τις εκατέρωθεν αυτού ψαμμιτικές και ιλυοψαμμιτικές εμφανίσεις, (β) στις κατά βάση αλπικές τεκτονικές δομές που προκάλεσαν έντονη παραμόρφωση στους φλυσχικούς σχηματισμούς του υποβάθρου και (γ) σε παλαιότερες αστοχίες και εδαφικές θραύσεις, οι οποίες δημιούργησαν αρκετές επιφάνειες χαμηλού αναγλύφου εντός της περιοχής κατολίσθησης που δέχθηκαν αλληπάλλληλα μεγάλες ποσότητες κορημάτων και επιπλέον λειτούργησαν σαν περιοχές συγκέντρωσης επιφανειακού νερού.



Εικόνα 5.11. Το μορφολογικό βύθισμα της στενής περιοχής της αστοχίας (προσωπική πηγή, 2011). Χαρακτηριστική είναι η μορφή των αναβαθμίδων με τα σεραζανέτια, προκειμένου να παροχετευθεί με ασφάλεια το καθεστώς των επί τόπου υδρογεωλογικών συνθηκών της υπό κατασκευής (εν έτει 2011) τοξωτής γέφυρας και να προστατευθούν οι κατάνη κατασκευαστικές εργασίες ανέγερσής της.

β) Λιθολογία

Η περιοχή μελέτης, γεωτεκτονικά, τοποθετείται σε ένα επωθημένο τέμαχος της ζώνης Πίνδου επί της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης. Στην περιοχή της ασταθούς μάζας αναπτύσσονται δύο ενότητες γεωλογικών σχηματισμών. Η μία αποτελείται από τους αλπικούς σχηματισμούς του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Πίνδου, οι οποίοι συνιστούν υπόβαθρο στην ευρύτερη περιοχή και η δεύτερη από τις

πρόσφατες αποθέσεις (όπως πλευρικά κορήματα), καθώς και υλικά κατολισθήσεων, οι οποίες καλύπτουν σημαντικό τμήμα στην επιφάνεια.

Στην τελευταία ομάδα εντάσσονται, επίσης, μάζες τεχνητών επιχώσεων, οι οποίες αποτελούν τμήμα της κατασκευασμένης οδού και καταλαμβάνουν σημαντικό τμήμα στην επιφάνεια (Σωτηρόπουλος κ.α., 2004).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ζώνης Πίνδου συνίστανται κατά κύριο λόγο από τους σχηματισμούς του «πρώτου φλύσχη» ανωιουρασικής - κατωκρητιδικής ηλικίας και δευτερευόντως από ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους. Η λιθολογική σύσταση των σχηματισμών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη τεχνικογεωλογική συμπεριφορά τους και το στενό γεωλογικό πλαίσιο στο οποίο εκδηλώθηκε η αστοχία διότι: (α) οι μεταλλικοί σχηματισμοί είναι εκείνοι που κυρίως συμμετέχουν στην αστοχία και (β) οι αλπικοί σχηματισμοί συνεισφέρουν στην τροφοδοσία των ασταθών υλικών και τα ασθενέστερα μηχανικά μέλη τους αποτελούν το υπόβαθρό της.

Ειδικότερα, ο σχηματισμός του «πρώτου» φλύσχη μπορεί, επιπλέον, να διακριθεί σε δύο επιμέρους ενότητες, μία ψαμμιτικής σύστασης η οποία αποτελεί τον τυπικό «πρώτο» φλύσχη της ζώνης Πίνδου και αναφέρεται ως ψαμμιτικός φλύσχος και μία ιλυολιθικής - κερατολιθικής κυρίως σύστασης, η οποία συνίσταται από εναλλασσόμενα στρώματα ιλυολίθων, ψαμμιτών, ερυθρών πηλιτών, κερατολίθων και σπανιότερα ασβεστολίθων, η οποία αναφέρεται με τον όρο «φλυσχοειδές». Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται εκτός των λιθολογικών και σε τεχνικογεωλογικά κριτήρια, γιατί ο ψαμμιτικός φλύσχος χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αντοχή και ομοιομορφία, ενώ το φλυσχοειδές συνιστά μικρότερης αντοχής βραχώμαζα χαρακτηριζόμενη από πτυχώσεις και εσωτερικές λεπιώσεις, οφειλόμενες στην πλαστικότητα και τη διαφορική παραμόρφωση των συχνών λιθολογικών εναλλαγών. Μάλιστα, λόγω της δομής του, το φλυσχοειδές παρουσιάζει μεταβλητό πάχος και προσανατολισμό (το μέγιστο πάχος του υπολογίζεται περίπου στα 40-50m).

Η συνεισφορά του φλυσχοειδούς στην αστοχία ήταν μεγάλη, καθώς τα τεχνικογεωλογικά «ασθενή» μέλη στα οποία επικρατούν ιλυόλιθοι και πηλίτες συνιστούν το άμεσο γεωλογικό περιβάλλον, της ασταθούς μάζας. Τα υλικά αυτά συνέβαλαν στη δημιουργία ενός σημαντικού πάχους και πολύ χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών ελουβιακού μανδύα, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 3m έως 12m. Ο

μανδύας αυτός αποτελεί ζώνη με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά (καστανή, μελανότεφρη ή ερυθρότεφρη άργιλος), με βάση δε τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας (δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και κλισιομετρήσεις) είναι το όριο μεταξύ των ασταθών υλικών και του «σταθερού» υποβάθρου.

Στη θέση της κατολίσθησης, στο φλυσχοειδές, εντοπίζεται η βαθύτερη ζώνη διάτμησης πάνω στην οποία έχουν ολισθήσει τα μεγάλα πάχους χαλαρά και ασταθή υλικά. Επιφανειακά οι σχηματισμοί του «πρώτου» φλύσχη παρουσιάζονται έντονα αποσαθρωμένοι, και κερματισμένοι γεγονός που οφείλεται πέρα από τα τεκτονικά αίτια και στις κλιματολογικές συνθήκες.

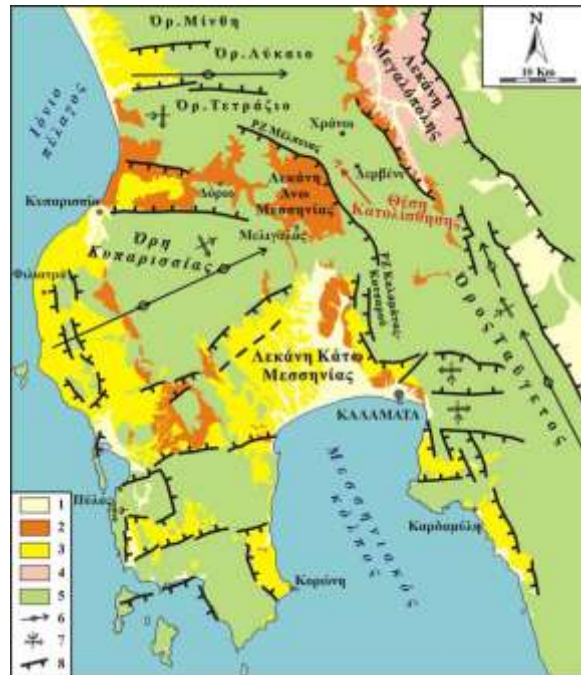
Να σημειωθεί ότι παλαιότερες εδαφικές θραύσεις στον «πρώτο» φλύσχη εκτιμάται ότι αποτέλεσαν και την κύρια αιτία για την προσφορά μεγάλων ποσοτήτων ασβεστολιθικών κορημάτων στην κύρια μάζα της κατολίσθησης από τον υπερκείμενο ανωκρητιδικό ασβεστόλιθο, τον οποίο υπέσκαψαν σε διάφορες γεωλογικές περιόδους, προκαλώντας με αυτή τη διαδικασία εκτεταμένες βραχοπτώσεις (Σωτηρόπουλος κ.α, 2004).

Όσον αφορά τους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους, η παρουσία τους στην περιοχή της κατολίσθησης είναι πολύ σημαντική για δύο λόγους: (α) διαμορφώνουν αποφασιστικά την επιφανειακή και υπόγεια υδροφορία του χώρου, τροφοδοτώντας τους υποκείμενους σχηματισμούς με νερό και (β) η παρουσία τους σχετίζεται με τις μεγάλες ποσότητες ασβεστολιθικών κορημάτων, τα οποία έχουν τροφοδοτήσει τις παρειές των λόφων, τμήμα των οποίων συμμετέχει στις κατολισθημένες μάζες.

γ) Τεκτονική

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται σε ένα πολύ κομβικό σημείο από τεκτονική άποψη γιατί βρίσκεται στο νοητό όριο μεταξύ δύο μεγάλων μορφοτεκτονικών ζωνών, οι οποίες καλύπτουν όλη την Πελοπόννησο. Το όριο αυτό έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και εκτείνεται από την περιοχή της Κορίνθου έως την Πύλο χωρίζοντας την Πελοπόννησο σε ένα βορειοδυτικό και ένα νοτιοανατολικό τμήμα. Ειδικότερα (Φουντούλης κ.α., 2004), η περιοχή της κατολίσθησης εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό όριο μιας νεοτεκτονικής δομής (τεκτονικό κέρασ) που βρίσκεται μεταξύ δύο τεκτονικών βυθισμάτων, της Άνω Μεσσηνίας και της Μεγαλόπολης (Σχήμα 5.16). Αξίζει να σημειωθεί ότι στο χώρο του τεκτονικού βυθίσματος της Άνω Μεσσηνίας

παρατηρήθηκε τη διετία 2001-2003 σεισμική δραστηριότητα που προκάλεσε μικρές ζημιές σε ορισμένα χωριά (όπως τον οικισμό Οιχαλία) που βρίσκονται μέσα στο βύθισμα. Η κατολίσθηση, λοιπόν, βρίσκεται σε μια περιοχή τεκτονικά ενεργή και μάλιστα πιο κοντά (σε απόσταση περίπου δύο χιλιομέτρων) στην ενεργή ρηξιγενή ζώνη της Μέλπειας (Φουντούλης, 2003).



Σχήμα 5.16. Οι Νεοτεκτονικές μακροδομές της ΝΔ Πελοποννήσου. 1: Ολοκαινικές αποθέσεις, 2: Χερσαίες Ανω Πλειστοκαικές αποθέσεις, 3: Θαλάσσιοι ΠλειοΠλειστοκαιικοί σχηματισμοί, 4: Λιμναίες αποθέσεις, 5: Αλπικό υπόβαθρο, 6: Άξονες μακροπτυχών, 7: Άξονες περιστροφής, 8: Ρηξιγενείς ζώνες. (Φουντούλης κ.α., 2004).

Τεκτονικά στην ευρύτερη περιοχή παρατηρήθηκαν πολλές και πολύπλοκες τεκτονικές δομές, οι οποίες εκφράζονται, κυρίως, με λεπιώσεις και πτυχές με κύριες διευθύνσεις ΒΒΑ/κές, ΒΑ/κές και ανατολικές. Η πολυπλοκότητα της δομής είναι παντού φανερή σε όλη την περιοχή με την πολύ συχνή αλλαγή της στρωματογραφικής σύνθεσης από θέση σε θέση και είναι αποτέλεσμα της παραμόρφωσης τόσο πλαστικά (πτυχές) όσο και θραυσιγενώς (λεπιώσεις, ρήγματα, διακλάσεις) και βεβαίως του αναγλύφου. Η επίδραση της τεκτονικής στην εκδήλωση της κατολίσθησης είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένου ότι σύμφωνα με τους Σωτηρόπουλο κ.α. (2004) έχει: α) προκαλέσει υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών της φλυσχικής βραχώμαζας, β) φέρει σε επαφή σχηματισμούς διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών, γ) επιδράσει στις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη μορφολογία.

Σύμφωνα με αδημοσίευτη έκθεση του Φουντούλη (2003), η τεκτονική δομή της περιοχής χαρακτηρίζεται από την εκδήλωση δύο τεκτονικών φάσεων, μια παλαιότερη στην αλπική ορογένεση και μια μεταγενέστερη (μεταλπική ή νεοτεκτονική φάση παραμόρφωσης).

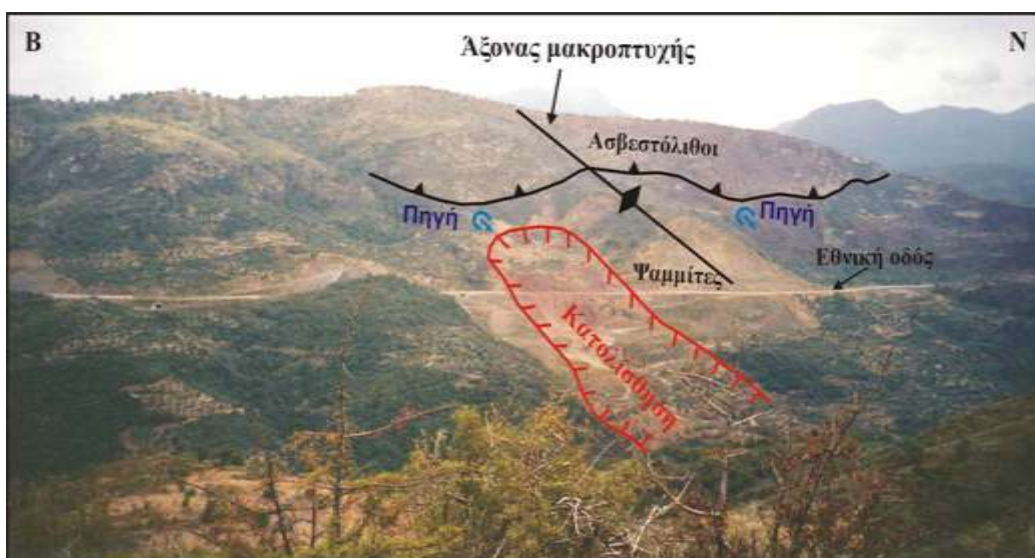
Στην αλπική φάση παραμόρφωσης που είναι και η παλαιότερη, επικρατούν οι εφαπτομενικού χαρακτήρα κινήσεις με γενική φορά κίνησης από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Αποτέλεσμα αυτών των κινήσεων είναι η παραμόρφωση των πετρωμάτων που ανάλογα με την μηχανική συμπεριφορά τους και τις συνθήκες παραμόρφωσης πτυχώνονται ή θραύονται. Οι εφαπτομενικές κινήσεις γίνονται, κυρίως, πάνω σε επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά σε δεδομένες συνθήκες (π.χ. επιφάνειες επαφής ιλυολίθων ή μαργών με ψαμμίτες ή πλακώδεις έως παχυπλακώδεις ασβεστόλιθους).

Στην μεταλπική ή νεοτεκτονική φάση παραμόρφωσης σταματούν οι εφαπτομενικές κινήσεις και κυριαρχούν οι κατακόρυφες κινήσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία τεκτονικών κεράτων και βυθισμάτων. Είναι, δηλαδή, η περίοδος που δημιουργούνται οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και τα ρήγματα πολλά από τα οποία είναι ενεργά σήμερα.

Η κυρίως τεκτονική παραμόρφωση που υπέστησαν οι σχηματισμοί προκλήθηκε από την αλπική ορογένεση και αποτυπώνεται με τη μορφή πτυχών, εφιππεύσεων και λεπνώσεων με κύρια διεύθυνση αξόνων B-N έως ΒΔ-ΝΑ και Α-Δ έως ΒΑ-ΝΔ. Μολονότι στην ευρύτερη περιοχή αναπτύσσονται νεοτεκτονικές δομές, η πιθανότερη έκφρασή τους στην περιοχή μελέτης, είναι η ανάπτυξη της κοιλάδας του ποταμού Χάραδρου (Ο συγκεκριμένος ποταμός αναπτύσσεται σε διεύθυνση Βορρά – Νότου και κινείται σε απόσταση περί τα 700 μέτρα οριζοντιογραφικά και κατάντη από τη διέλευση της οδού).

Οι κυριότερες δομές που σχετίζονται με τον ασταθή χώρο είναι οι εξής: (α) η χαμηλής κλίσης επιφάνεια εφιππεύσης μεταξύ των ανωκρητιδικών ασβεστολίθων της Πίνδου και του «πρώτου» φλύσχη της Πίνδου, μέσω της οποίας οι πρώτοι έχουν τοποθετηθεί τεκτονικά επί του δεύτερου, δομώντας το ανώτερο τμήμα των λόφων και της κατολίσθησης και επιδρώντας καθοριστικά στις υδρογεωλογικές συνθήκες, (β) η συγκλινική δομή των ασβεστολίθων ακριβώς ανάντη της κατολίσθησης με άξονα ΑΒΑ-ΔΝΔ, η οποία φαίνεται ότι συμβάλει στην περαιτέρω συγκέντρωση των υδάτων και κατ' επέκταση πηγών (Εικόνα 5.12), (γ) οι

πολλαπλές εσωτερικές λεπιώσεις και πτυχώσεις στο ιλυολιθικό – πηλιτικό φλυσχοειδές, των οποίων η συνεισφορά στην υποβάθμιση της ανομοιόμορφα παραμορφωμένης βραχώμαζας έχει, ήδη, αναφερθεί στη λιθολογική περιγραφή του σχηματισμού και (δ) τέλος η ύπαρξη μιας κύριας ρηξιγενούς ζώνης στο νότιο άκρο της κατολίσθησης (περίπου στη Χ.Θ. 16+550). Η σημασία της συγκεκριμένης ζώνης όσον αφορά τη σχέση της με την οριοθέτηση κατολισθημένων και μη υλικών αποτέλεσε το σημαντικότερο κριτήριο για την επιλογή του τύπου γέφυρας που κατασκευάστηκε και ολοκληρώθηκε στις αρχές του 2016 (Εικόνα 5.13). Τελικά, με βεβαιότητα αποκλείστηκε η ύπαρξη ενεργού ρήγματος στην περιοχή και ειδικότερα κοντά στο βάθρο της Καλαμάτας (Φουντούλης, 2004).



Εικόνα 5.12. Πανοραμική άποψη της κατολίσθησης. Στα χαμηλότερα σημεία της τεκτονικής επαφής των Ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων με τις υποκείμενες λιθολογίες παρατηρούνται εκφορτίσεις του υπόγειου υδροφορέα που αναπτύσσεται στους ασβεστόλιθους (Φουντούλης κ.α., 2004).

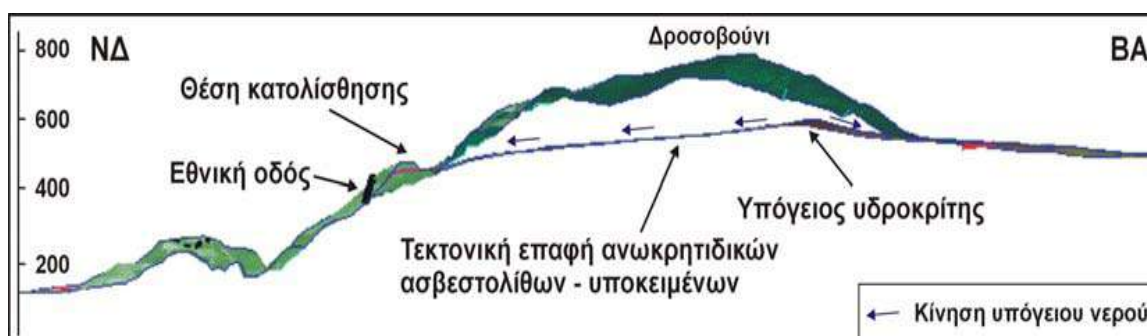
Να επισημανθεί ακόμα ότι σεισμικά, οι σχηματισμοί κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες, σύμφωνα με τον ΝΕΑΚ: Α οι βραχώδεις σχηματισμοί του υποβάθρου και Γ οι χαλαροί τεταρτογενείς σχηματισμοί. Εξάλλου η περιοχή, ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II με σεισμική επιτάχυνση $a=0,24g$, χαρακτηρίζεται ως μέτριας σεισμικότητας και όπως μαρτυρούν τα ιστορικά στοιχεία, τα επίκεντρα των ισχυρών σεισμών ($M>6.5$) εντοπίζονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 50-100 χιλιομέτρων από τη θέση της Τσακώνας (Σταυρακάκης, 2003), ενώ δεν έχει καταγραφεί ισχυρός σεισμός ($M>6.0$) κατά την τελευταία εκατονταετία.



Εικόνα 5.13. Άποψη από την τελική κατασκευαστική λύση της σύμμεικτης τοξωτής γέφυρας (ΥΠΟΜΕΔΙ, 2016).

δ) Υδρογεωλογία

Η παρουσία και ο ρόλος του νερού στην εκδήλωση της κατολίθωσης ήταν καθοριστικός. Το μεγαλύτερο μέρος των υδάτων που συγκεντρώθηκε στους κατολισθαίνοντες εδαφικούς σχηματισμούς προερχόταν από την ανάβλυση πηγών, οι οποίες αναπτύσσονταν στην επαφή των υπερκείμενων ανωκρητιδικών ασβεστολίθων με το σχηματισμό του «φλυσχοειδούς» (Σχήμα 5.17). Δημιουργήθηκε έτσι ένα μέτωπο πηγών σε όλο το τμήμα πάνω από την στέψη της κατολίθωσης. Η συγκέντρωση των πηγών υποβοηθήθηκε και από μία συγκλινική δομή εντός των ασβεστολίθων ανάντη της κατολίθωσης.



Σχήμα 5.17. Γεωλογική τομή, στην οποία φαίνονται το ανάγλυφο και η τεκτονική επαφή των ανωκρητιδικών ασβεστολίθων με τους υποκείμενους σχηματισμούς (Φουντούλης κ.α., 2004).

Η μεγάλη διαπερατότητα των τεχνητών επιχώσεων και των ασβεστολιθικών κορημάτων που κάλυπταν το μεγαλύτερο μέρος της κατολισθαίνουσας μάζας βοήθησε στην κατεΐσδυση του επιφανειακού και υπόγειου νερού που προερχόταν

από τους ασβεστόλιθους, προς το αδιαπέρατο φλυσχικό υπόβαθρο. Έτσι, αναπτύχθηκε μία στήλη νερού πάνω από το αδιαπέρατο φλυσχοειδές και ταυτόχρονα υδροστατική πίεση, η οποία λειτούργησε καταλυτικά στην εξέλιξη του φαινομένου. Η υδροστατική πίεση υποβοηθήθηκε επιπλέον από το γεγονός ότι επειδή η κεφαλή της κατολίσθησης σταμάτησε πρακτικά στο όριο με τους τεκτονικά υπερκείμενους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους, των οποίων η επαφή στην περιοχή αυτή με τους υποκείμενους (αδιαπέρατες) σχηματισμούς σχηματίζει μία συγκλινική δομή. Έτσι, τα νερά που κατείσδυναν στους έντονα καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους εκφορτίζονταν ακριβώς στην κεφαλή της κατολίσθησης (Σχήμα 5.17).

Η συνύπαρξη των πηγών με τους ασθενείς γεωμηχανικά ορίζοντες του «φλυσχοειδούς», δημιούργησε συνθήκες αστάθειας στους τελευταίους με συνέπεια την εκδήλωση αστοχιών μέσα στη μάζα τους και την υποσκαφή των υπερκείμενων ασβεστολιθών. Η υποσκαφή αυτή σε συνδυασμό με την έντονα τεκτονισμένη ασβεστολιθική βραχώμαζα, προκάλεσε αστοχίες μεγάλου όγκου βραχωδών τεμαχίων και βραχοπτώσεις, οι οποίες τροφοδότησαν με ασβεστολιθικά κορήματα την περιοχή της κατολίσθησης. Η διαδικασία αυτή τροφοδότησε με κορήματα όλο το τμήμα της οδού και έχει προκαλέσει την ανάπτυξη αρκετών κατολισθήσεων παρόμοιου μηχανισμού. Χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη κατολίσθησης μικρότερης έκτασης και πάχους, μεταξύ των Χ.Θ. 16+000 και Χ.Θ. 16+200, η οποία διερευνήθηκε για να διαπιστωθεί ο μηχανισμός της και η συνέχειά της ή όχι με τη μεγάλη κατολίσθηση (Χ.Θ. 16+200 - 16+400).

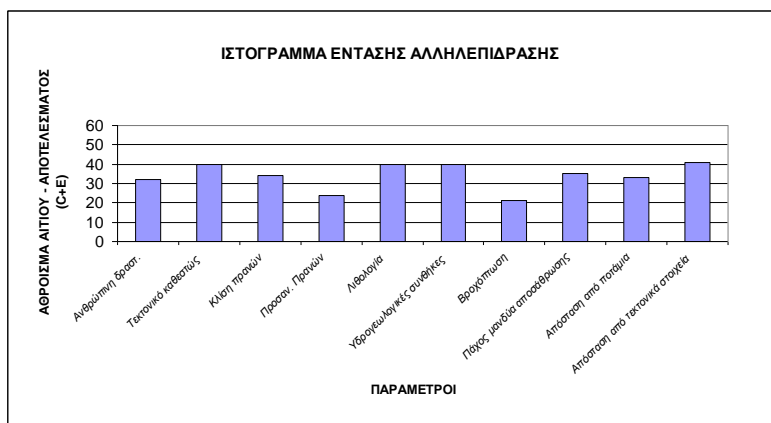
Με βάση, την παράθεση και επεξήγηση των προηγούμενων τεχνικογεωλογικών πληροφοριών, παρατίθεται στη συνέχεια η αποκωδικοποίησή τους μέσω της θεωρίας RES. Ειδικότερα, ακολουθούν πίνακες και γραφικές παραστάσεις που «μεταφράζουν», δηλαδή ποσοτικοποιούν ό, τι πληροφορία έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 5.11, δίνεται το μητρώο αλληλεπίδρασης για τη θέση Τσακώνα,

Πίνακας 5.11. Μητρώο αλληλεπίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα βάσει και της εργασίας των Tavoularis et al. (2015).

α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Αίτιο (Cause - C)	C+E	C-E
1	Ανθρώπινη δραστ.	0	3	0	0	2	0	3	2	0	10	32	-12
2	3	Τεκτονικό καθεστώς	4	4	4	4	0	4	4	4	31	40	22
3	2	2	Κλίση πρανών	1	0	3	0	2	2	1	13	34	-8
4	1	2	1	Προσαν. Πρανών	0	2	0	2	2	1	11	24	-2
5	4	1	3	2	Λιθολογία	4	0	4	4	4	26	40	12
6	1	0	2	1	3	Υδρογεωλογικές συνθήκες	0	3	3	1	14	40	-12
7	4	0	3	1	2	4	Βροχόπτωση	4	3	0	21	21	21
8	2	0	2	0	0	2	0	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	1	0	7	35	-21
9	1	0	0	1	1	2	0	2	Απόσταση από ποτάμια	1	8	33	-17
10	4	4	3	3	4	3	0	4	4	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	29	41	17
Αποτέλεσμα (Effect - E)	22	9	21	13	14	26	0	28	26	12		340	

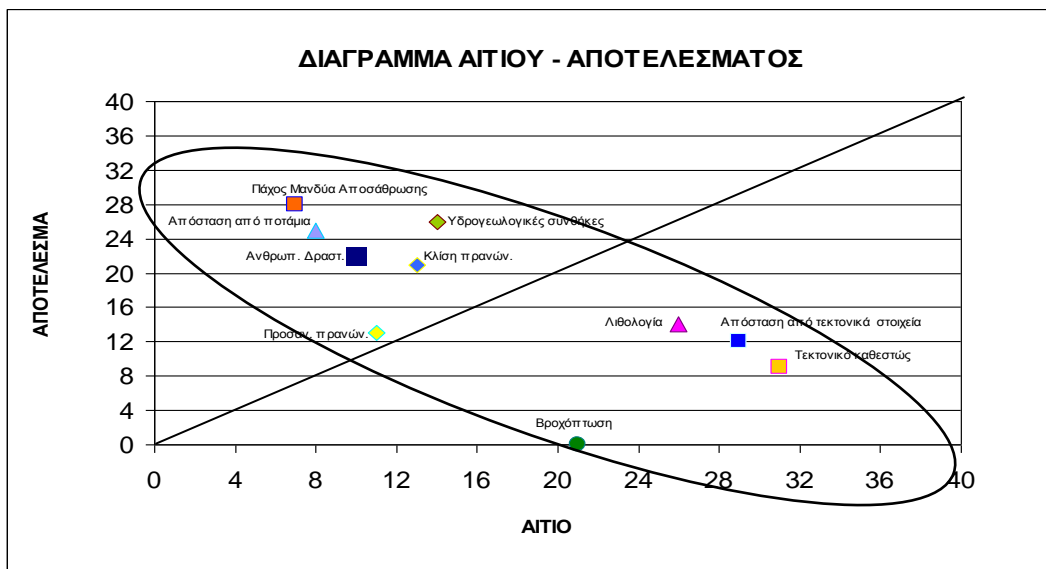
C+E	C-E	Παράμετροι	$[(C+E)/\Sigma(C+E)] \cdot 100\%$	Μέγιστη τιμή βαθμονόμησης
32	-12	Ανθρώπινη δραστ.	9.41	4
40	22	Τεκτονικό καθεστώς	11.76	4
34	-8	Κλίση πρανών	10.00	4
24	-2	Προσαν. Πρανών	7.06	4
40	12	Λιθολογία	11.76	4
40	-12	Υδρογεωλογικές συνθήκες	11.76	4
21	21	Βροχόπτωση	6.18	4
35	-21	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	10.29	4
33	-17	Απόσταση από ποτάμια	9.71	4
41	17	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	12.06	4
340			100.00	

ενώ στο Σχήμα 5.18 απεικονίζεται το ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων.

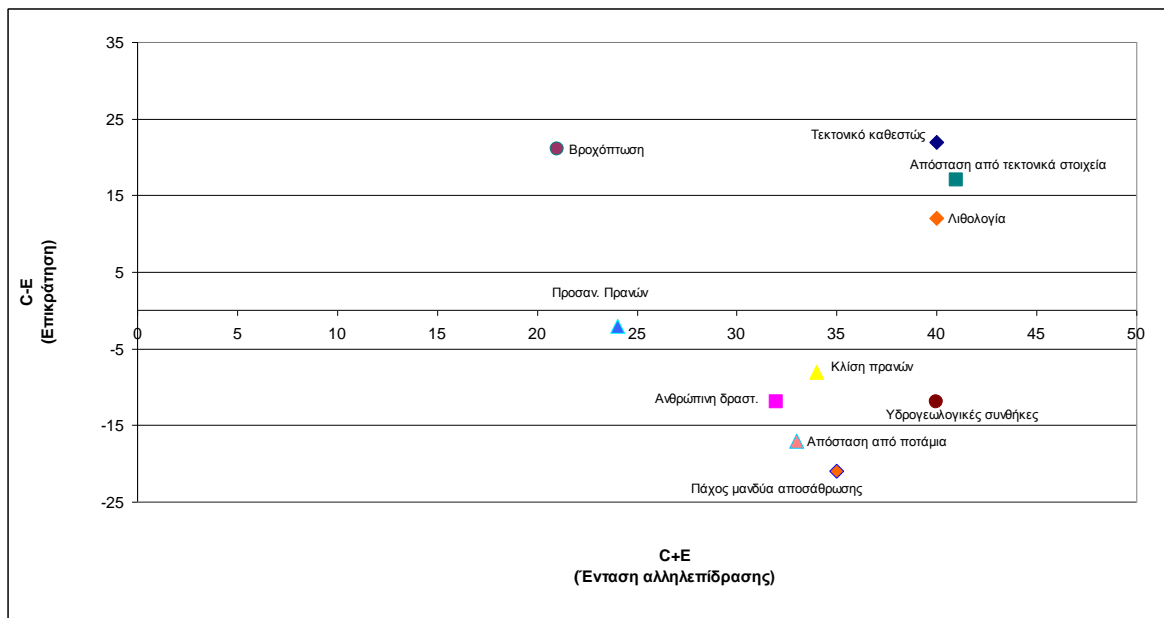


Σχήμα 5.18. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για τη θέση Τσακώνα.

Από τον Πίνακα 5.11, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (Σχήμα 5.19) καθώς και το διάγραμμα (C+E) – (C-E), στο οποίο υπάρχει καλύτερη εικόνα αποτύπωσης της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επικράτηση (Σχήμα 5.20).



Σχήμα 5.19. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Τσακώνα.



Σχήμα 5.20. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση Τσακώνα.

Μελετώντας, αναλυτικότερα, τα δύο ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 5.19 & 5.20), προκύπτει ο Πίνακας 5.12 και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πίνακας 5.12. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα.

Παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{max}$	41	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία
Παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{min}$	21	Βροχόπτωση
Παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{max}$	22	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{min}$	-21	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

- ✓ Η απόσταση από τεκτονικά στοιχεία είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και αυτό συμβαίνει γιατί αφ' ενός η περιοχή της κατολίσθησης εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό όριο μιας νεοτεκτονικής δομής (τεκτονικό κέρας) που βρίσκεται μεταξύ δύο τεκτονικών βυθισμάτων, της Άνω Μεσσηνίας και της Μεγαλόπολης και, αφ'ετέρου υπάρχει μια κύρια ρηξιγενής ζώνη στο νότιο άκρο της κατολίσθησης.
- ✓ Η βροχόπτωση είναι η παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης, κάτι που σημαίνει ότι δεν επηρεάζεται άμεσα από την δυναμική των υπολοίπων παραμέτρων αλλά ουσιαστικά αποτελεί έναν ανεξάρτητο εξωτερικό (για το σύστημα του πρανούς) παράγοντα.
- ✓ Το τεκτονικό καθεστώς χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης, δηλαδή επηρεάζει το σύστημα πολύ περισσότερο από ότι το σύστημα επηρεάζει αυτό. Αυτό είναι κατανοητό αφού η περιοχή μελέτης τοποθετείται σε ένα πολύ κομβικό σημείο από τεκτονική άποψη γιατί βρίσκεται στο νοητό όριο μεταξύ δύο μεγάλων μορφοτεκτονικών ζωνών, οι οποίες καλύπτουν όλη την Πελοπόννησο.
- ✓ Τέλος, η παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης είναι το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης. Η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει το όλο σύστημα αλλά επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.19, το νέφος συγκέντρωσης των περισσότερων σημείων των επιλεγμένων παραμέτρων είναι τοποθετημένο κάθετα στην ευθεία $C=E$. Αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι έχουν παρόμοιες τιμές έντασης αλληλεπίδρασης [Τεκτονικό καθεστώς $(C+E)=40$, Λιθολογία $(C+E)=40$, Υδρογεωλογικές συνθήκες $(C+E)=40$, Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία $(C+E)=41$] αλλά διαφέρουν πολύ στις τιμές επικράτησης, που δηλώνει ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι

επιλεγμένες παράμετροι για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας του εξεταζόμενου πρανούς. Οι προηγούμενοι πίνακες και σχήματα βοηθούν στην εύρεση υπολογισμού του δείκτη αστάθειας (Πίνακας 5.13).

Πίνακας 5.13 Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη θέση Τσακώνα βάσει και της εργασίας των Τανουλιάρη et al. (2015).

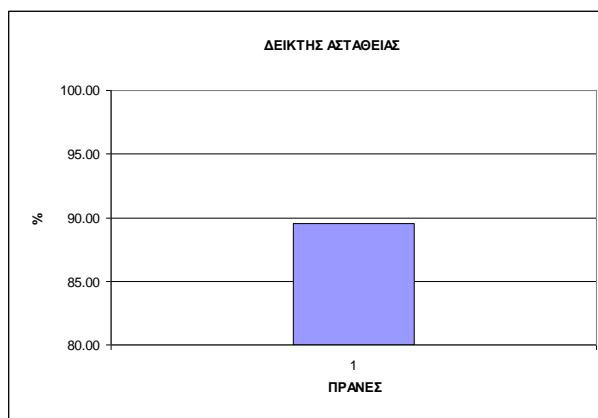
Υπολογισμός Δείκτη αστάθειας (Instability Index)											
Παράμετρος	Άνθρωπινη δραστ.	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσαν. Πρανών	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσαθρωσης	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	Δείκτης αστάθειας
Βαθμονόμηση Πρανούς	4	4	1	4	3	4	4	4	4	4	89.56
Μέγιστη τιμή βαθμονόμησης	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
$\frac{[(C+E)]}{\Sigma(C+E)} \cdot 100\%$	9.41	11.76	10.00	7.06	11.76	11.76	6.18	10.29	9.71	12.06	100.00
Σταθμικός Συντελεστής	2.35	2.94	2.50	1.76	2.94	2.94	1.54	2.57	2.43	3.01	

όπου:

Instability Index = Σ (σταθμικός συντελεστής x παράμετρος), δηλαδή ο δείκτης αστάθειας (Instability Index), είναι το συνολικό άθροισμα των γινομένων της κάθε επιμέρους παραμέτρου με τον αντίστοιχο σταθμικό συντελεστή.

Σταθμικός συντελεστής = $\frac{1}{4} * \frac{[(C+E)]}{\Sigma(C+E)} * 100\%$

Σχηματικά, ο δείκτης αστάθειας απεικονίζεται με το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.21. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη θέση Τσακώνα.

Τέλος, στον Πίνακα 5.14, επεξηγείται η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη θέση Τσακώνα, σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 5.14. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση Τσακώνα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εντατικό τεκτονικό καθεστώς: αντιπροσωπεύει επιπτώσεις και επωθήσεις
Κλίση πρηνών	1	(6°-15°)
Προσαν. Πρηνών	4	(0° - 45°, 135° - 225°)
Λιθολογία	3	Τεταρτογενείς αποθέσεις (Παλιό κατολισθητικό γεωλογικό υλικό)
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού: συνδέεται με το φορτίο από το χιόνι, το νερό της βροχής και των πηγών αλλά επίσης και από την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων
Βροχόπτωση	4	Εκτεταμένη περίοδος εξαιρετικά υψηλών βροχοπτώσεων
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	4	Είναι μεγαλύτερο των 3 μέτρων
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο δείκτης αστάθειας για το συγκεκριμένο πρηνές που αστόχησε στη θέση Τσακώνα ισούται με $I_{\text{instability}}$ $I_{\text{index}}=89.56$, και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 [Κατηγοριοποίηση σχετικής κατολισθητικής επιδεκτικότητας κατά Brabb et al. (1972)] αντιστοιχεί στη στήλη L (Κατολίσθηση), κάτι που επιβεβαιώνεται και από το συγκεκριμένο γεγονός που έλαβε χώρα τον Φεβρουάριο του 2003.

5.7 Κατολίσθηση στη θέση Χ.Θ. 123+000 (πλησίον της Νεμέας) της Εθνικής Οδού Αθηνών – Κορίνθου – Τρίπολης - Καλαμάτας

Στις 8 Φεβρουαρίου του 2003 κατόπιν έντονων και παρατεταμένων βροχοπτώσεων στη Χ.Θ. 123+000 της Ε.Ο. Αθηνών - Κορίνθου – Τριπόλεως εκδηλώθηκε κατολίσθηση, προκαλώντας τη διακοπή της συγκοινωνίας για δύο μήνες. Μέχρι να ολοκληρωθούν τα προσωρινά έργα η κίνηση των οχημάτων γινόταν με τοπική παράκαμψη της θέσης που εκδηλώθηκε η αστοχία (Εικόνα 5.14). Το αποκομμένο μήκος της Ε.Ο. ήταν περίπου 150m, ενώ η απόσταση της στέψης από τον πόδα της κατολίσθησης ήταν της τάξης των 180m, ενώ το μέγιστο βάθος 34m. Η αστοχία αυτή ενεργοποίησε σε μια έκταση σχεδόν 35 στρεμμάτων, εδαφική μάζα 400.000m³ περίπου. Η μέγιστη οριζόντια και κατακόρυφη καταγεγραμμένη μετακίνηση ήταν της τάξης των 4.0m (Ντουινιάς κ.α., 2006).



Εικόνα 5.14. Άποψη του βυθίσματος που προκάλεσε η κατολίσθηση στο οδόστρωμα της Ε.Ο. Κορίνθου - Τρίπολης / Χ.Θ. 123+000 (Ντουινιάς κ.α., 2006).

Οι πρώτες μικροκαθιζήσεις στο οδόστρωμα της Ε.Ο. είχαν παρατηρηθεί το έτος 1995 και αρχικά αποδόθηκαν σε συνίζηση του επιχώματος που διορθωνόταν με διαδοχικές ασφατικές επαλείψεις του οδοστρώματος κυκλοφορίας. Ωστόσο η εξέλιξη των μετακινήσεων συνεχίσθηκε, προκαλώντας στα τέλη του έτους 1998: α) παραμορφώσεις των μεταλλικών στηθαίων ασφαλείας στον άξονα της Ε.Ο., β) ρωγματώσεις στο οδόστρωμα της τάξης των 8.0cm και ανωμαλίες της επιφάνειάς του, γ) θραύσεις στο φυσικό πρανές κατόπιν του επιχώματος με άλμα της τάξης

των 30cm, δ) εδαφικές ρωγματώσεις στην περιοχή κοντά στο παρακείμενο ρέμα, και ε) θραύσεις εγκατεστημένων κλισιομέτρων.

Λόγω των σαφών, πλέον, ενδείξεων ύπαρξης σημαντικής αστοχίας πρηνούς, εκτελέσθηκε στις αρχές του έτους 1999 πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας με την εκτέλεση γεωτρήσεων, στις οποίες εγκαταστάθηκαν πιεζόμετρα και αποκλισιόμετρα, όπου διαπιστώθηκε ο αυξανόμενος ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου. Μόλις δυο μήνες μετά την εγκατάσταση των αποκλισιομετρικών σωλήνων, παρατηρήθηκε η θραύση του συνόλου τους (μέτρηση 5-4-1999) και προσδιορίσθηκε ότι το μέγιστο βάθος της ολίσθησης έφτανε στα 34m περίπου.

Κατά την παρακολούθηση αυτή, η οποία συνέπεσε στο χρονικό διάστημα από αρχές Οκτωβρίου 1998 έως τέλος Μαΐου 1999, διαπιστώθηκε ότι οι αστοχίες ήταν συνεχείς και με αυξανόμενο ρυθμό ιδιαίτερα κατά την υγρή περίοδο του έτους και ειδικότερα μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η συγκεκριμένη χρονική περίοδος θεωρείται από τις υγρότερες της 50ετίας με μεγάλο μέσο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, εκπονήθηκε γεωτεχνική μελέτη σταθεροποίησης του φαινομένου, η οποία όμως δεν υλοποιήθηκε μέχρι την επανεργοποίηση αυτού που οδήγησε στην αστοχία του έτους 2003. Η κατασκευή των σταθεροποιητικών μέτρων υλοποιήθηκε το 2003 - 2004 βάσει μελέτης εφαρμογής που προσάρμοσε και συμπλήρωσε την υφιστάμενη οριστική μελέτη με τα νέα δεδομένα.

Στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από το 1999, όπου εντοπίστηκε και οριοθετήθηκε το πρόβλημα, μέχρι τον χειμώνα του 2002-2003, η εξέλιξη της κατολίσθησης ήταν ερπυστικού τύπου με ρυθμούς μετακινήσεων της τάξης των 10cm το έτος, ενώ την χειμερινή περίοδο συχνά έφτανε και 3-4cm τον μήνα. Η διάνοιξη των ρωγμών είχε σαν αποτέλεσμα την ολοένα μεγαλύτερη εισροή υδάτων επιταχύνοντας το φαινόμενο έως την 8-2-2003, οπότε και αυτό εκδηλώθηκε (Μαρίνος κ.α., 2004).

Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων υπαίθρου και των γεωλογικών και γεωτεχνικών ερευνών, αποδεικνύουν, αφ' ενός την ύπαρξη στην περιοχή σημαντικού μήκους ρηγμάτων, αφ' ετέρου την ύπαρξη ενός κύκλου ολίσθησης σε βάθος στην άμεση περιοχή ενδιαφέροντος, που περιελάμβανε τον αυτοκινητόδρομο και την ανάντη περιοχή αυτού, έως τουλάχιστον το μέσον του χωματόδρομου ενώ προς τα κατόντη το πρηνές και έφθανε έως το παρακείμενο

ρέμα του Βελανδοπόταμου. Το συγκεκριμένο ρέμα αποτελεί κύριο γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό της περιοχής, το οποίο είναι παράλληλο με την χάραξη του αυτοκινητόδρομου (Εικόνα 5.15).



Εικόνα 5.15. Άποψη της κατολισθημένης μάζας από ανάντη. Διακρίνεται η στέψη της κατολίσθησης που έφτασε έως το μέσο του ανάντη της Ε.Ο. παράδρομου (Ντουινάς κ.α., 2006).

Ο Π. Μαρίνος (1998) αναφέρει, σχετικά με την εξελισσόμενη από το έτος 1998 αστοχία: «δεν υπάρχει αμφιβολία ότι στην περιοχή της Χ.Θ. 123+000 εκδηλώθηκε ρήξη της συνέχειας του φυσικού πρανούς». Οι Ντουινάς κ.α. (2006), αναφέρουν ότι γεωμορφολογικά η περιοχή αναπτύσσεται σε επικλινές ανάγλυφο και σε υψόμετρα που κυμαίνονται περίπου από 260 έως 320m, με μέσες κλίσεις πρανών κυμαινόμενες από 20° έως 30°, ενώ υπάρχουν και κλίσεις φυσικών πρανών που τοπικά κυμαίνονται από 40° – 45° ή/και 70° – 75°.

Από τον πόδα του πρανούς της κατολίσθησης διέρχεται ρέμα εποχιακής ροής γενικής διεύθυνσης Β-Ν, σε απόσταση περίπου 120m και παράλληλα με τον άξονα της Ε.Ο., το οποίο έχει διαβρώσει την κοίτη του διαμορφώνοντας απότομες κλιτείς. Συγκεκριμένα, η ανατολική όχθη του ρέματος χαρακτηρίζεται από απότομες κλίσεις, της τάξεως των 40° και τοπικά των 70°, που οφείλονται πιθανώς σε έντονη κατά βάθος διάβρωση. Η δυτική όχθη αποτελεί τον πόδα της κατολίσθησης και έχει ομαλότερες κλίσεις (20° έως 30°).

Σύμφωνα με τους Μαρίνος κ.α., 2004, η μορφολογία της περιοχής υποδεικνύει παλαιότερα κατολισθητικά γεγονότα, η ισοροπία των οποίων επιβαρύνθηκε από

την κατασκευή της Ε.Ο. Γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό των ισούψων του τοπογραφικού υποβάθρου πριν από την κατολίσθηση αποτελούσαν οι χαρακτηριστικές “γλώσσες” προς τα κατάντη που υποδεικνυαν παλαιότερες ευρείας κλίμακας κατολισθήσεις, ενώ η ύπαρξη τέτοιων φαινομένων γίνεται εμφανής από τη στρέψη των κορηματικών υλικών στο πρηνές προς τα ανάντη του παράδρομου. Αντίστοιχες γεωμορφές μπορούν να παρατηρηθούν και στη σημερινή μορφολογία του αναγλύφου. Επίσης, κατά τον Μαρίνο (1998), ενδείξεις παλαιότερης κατολισθητικότητας, κυρίως στο τμήμα προς Τρίπολη, αποτελούν τα ακόλουθα:

- ✓ παλαιά πλευρική ασυνέχεια,
- ✓ διόγκωση του φυσικού αναγλύφου κάτω από το δρόμο,
- ✓ παραμόρφωση των κορημάτων, προς Τρίπολη, η οποία φαίνεται σαφώς στο πρηνές του ορύγματος του παράδρομου που υποδηλώνει το πέρασμα του πλευρικού άκρου παλαιότερης εδαφικής ασυνέχειας.

Όσον αφορά στη λιθοστρωματογραφική διάρθρωση της περιοχής ενδιαφέροντος, αυτή αποτελείται, σύμφωνα με τους Ντουνιά κ.α. (2006) από:

α) Το αλπικό υπόβαθρο των ασβεστολίθων της ενότητας της Πίνδου το οποίο εμφανίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα ανάντη της κατολίσθησης και τοπικά στην κοίτη του ρέματος. Οι ασβεστόλιθοι είναι λεπτοστρωματώδεις, μέτρια καρστικοποιημένοι, ελαφρά πτυχωμένοι, έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και διατρέχονται από πυκνό δίκτυο διακλάσεων.

β) Νεογενείς σχηματισμούς, που επικάθονται στους ασβεστολίθους και αντιπροσωπεύονται από την παρουσία μαργών, ψαμμιτομαργών, ψαμμιτών, άμμων και ψηφίδοπαγών με χαλαρά μαργαϊκά κροκαλοπαγή. Τα υλικά αυτά ηλικιακά φθάνουν έως το Διλούβιο και εμφανίζονται στη στενή περιοχή της κατολίσθησης στη θέση της κοίτης του ρέματος. Ιδιαίτερα, θα πρέπει να τονισθεί ο εντοπισμός σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, το βάθος των οποίων έφθασε μέχρι την κοίτη του ρέματος, ενός αργιλικού στρώματος γκριζο-μπλέ χρώματος (το οποίο διατηρεί τα λιθοοψικά χαρακτηριστικά της μάργας αλλά στερείται δομής και στρώσης) με ψαμμιτικές εμφανίσεις γκριζου έως γκριζοκάστανου χρώματος, το οποίο επεκτείνεται σε όλη την έκταση της ασταθούς περιοχής και με αυξανόμενο πάχος προς την κοίτη του ρέματος.

- γ) Κώνο κορημάτων που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης. Τα κορηματικά αυτά υλικά έχουν προέλθει από την αποσάθρωση των ασβεστολιθικών σχηματισμών που συναντώνται στον ανάντη προς τα δυτικά ορεινό όγκο, παρουσιάζουν έντονη ετερογένεια και εμφανίζονται με λεπτομερή που εμφανίζουν αργιλοχαλικώδη, αμμώδη έως και αργιλική σύσταση. Η κατολίσθηση πραγματοποιήθηκε σε υλικά του κώνου κορημάτων του πρσανούς με βασική κατεύθυνση προς τα ανατολικά κατά μήκος βαθιάς επιφάνειας ολίσθησης.
- δ) Ποτάμιες αποθέσεις που εμφανίζονται στην κοίτη του ρέματος και συνίστανται από αμμοχαλικώδη υλικά με χαλαρή δομή, ενώ στην ευρύτερη περιοχή συναντώνται αναβαθμίδες αποτελούμενες από φακοειδείς ενστρώσεις άμμων και κροκαλών.
- ε) Τεχνητές επιχώσεις που υπέρκεινται του σχηματισμού του κώνου κορημάτων.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι ο αυτοκινητόδρομος βρίσκεται σε επίχωμα μέσου ύψους 10m πάνω από ασθενώς συγκολλημένα υλικά κορημάτων (αργιλώδη αμμοχάλικα), με έντονη ετερογένεια κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση και τα οποία αναπτύσσονται είτε επί νεογενών σχηματισμών είτε επί ασβεστολίθων του αλπικού υποβάθρου (Μαρίνος κ.α., 2004).

Από την αξιολόγηση των ευρημάτων διαπιστώθηκε ότι ενώ στους ανώτερους οριζόντες επικρατούν πιο αδρομερή κλάσματα και τα οποία φαίνεται να είναι ευσταθή έναντι επιφανειακών ολισθήσεων, στα βαθύτερα τμήματα εντοπίζονται ζώνες αργίλου γκριζου χρώματος που συνέβαλαν στη διαμόρφωση της βαθιάς επιφάνειας ολίσθησης, που έφτασε έως και βαθύτερα από το απόλυτο υψόμετρο της κοίτης του ρέματος και προσδιορίστηκε ότι το μέγιστο βάθος της φθάνει στα 34m περίπου. Κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης που προσδιορίστηκε από τα βάθη θραύσης των κλισιομέτρων, διαπιστώθηκε η συχνή παρουσία αργιλικών ενστρώσεων που κρίνεται ότι συνέβαλαν, λόγω της χαμηλής αντοχής τους, στη δημιουργία της ολίσθησης.

Σχεδόν συστηματικά και τουλάχιστον στην πιο κρίσιμη διατομή της κατολίσθησης, η επιφάνεια ολίσθησης εξελίχθηκε στις θέσεις μεταβολής της σύστασης των υλικών του κώνου κορημάτων από τα υπερκείμενα αδρομερή προς τα πλέον λεπτόκοκκα κλάσματα. Προφανώς, η επιφάνεια ολίσθησης δεν βρίσκεται εξ' ολοκλήρου εντός αργιλικών ενστρώσεων, αλλά εκτιμάται ότι οι παρεμβολές πιο

αδρομερών στοιχείων κατά μήκος της επιφάνειας αυτής ήταν μειωμένες. Οι άργιλοι έχουν συνήθως καστανό χρώμα αλλά στους βαθύτερους ορίζοντες παρεμβάλλεται σχηματισμός ασθενούς γκριζας αργίλου που αποτελεί τη βάση της επιφάνειας ολίσθησης.

Στον πόδα της κατολίσθησης εμφανίζεται πολύ συνεκτικός αργιλικός σχηματισμός με εμφανή στρωσιγένεια και ύπαρξη λείων επιφανειών, που υποδεικνύουν πιθανή επιφάνεια ολίσθησης. Λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση της κατολίσθησης και την κλίση των φυσικών πρηνών της ασταθούς περιοχής, της τάξης των 20° έως 30°, συμπεραίνεται ότι η στρωσιγένεια του αργιλικού σχηματισμού στις εν λόγω θέσεις υποβοήθησε στην περιοχή του πόδα την ανύψωση της βαθιάς ασθενούς επιφάνειας δημιουργώντας στην περιοχή αυτή μια κυκλικού τύπου αστοχία (Ντουινιάς κ.α., 2006).

Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας στην ενεργοποίηση της κατολίσθησης ήταν οι υδρογεωλογικές συνθήκες και συγκεκριμένα η αύξηση της πίεσης των πόρων λόγω των έντονων βροχοπτώσεων. Διαπιστώθηκε, δηλαδή, η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή εκδήλωσης των φαινομένων αστάθειας. Ο υδροφόρος αυτός ορίζοντας αναπτύσσεται στη σχετικά πιο αδρόκοκκη φάση του κώνου κορημάτων ως ελεύθερος κατά το μεγαλύτερο μέρος του ενώ προς τα κατάντη μπορεί να χαρακτηριστεί ως μερικώς υπό πίεση λόγω της ύπαρξης αυξημένου ποσοστού αργιλικών υλικών στις υπερκείμενες μάζες των κορημάτων. Η τροφοδοσία του προέρχεται, κυρίως, από την απ' ευθείας κατείσδυση των ομβρίων υδάτων, η οποία εκτιμάται ότι αυξήθηκε μετά την κατασκευή της κύριας οδοποιΐας αλλά και του παράπλευρου δρόμου. Σημαντική παράμετρος για τη διατήρηση του υδροφόρου αυτού ορίζοντα σε όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους είναι η ύπαρξη της κατώτερης αργιλικής ένστρωσης (κυρίως η γκριζο-μπλε άργιλος), η οροφή της οποίας φθάνει μέχρι την κοίτη του ρέματος. Η εκφόρτιση του υδροφόρου αυτού ορίζοντα γίνεται μερικώς προς τα νοτιοανατολικά, όπου στην κοίτη του ρέματος εντοπίστηκαν τρεις, τουλάχιστον, πηγαίες εκφορτίσεις κατά τους υγρούς μήνες του έτους, ασήμαντης παροχής και εποχιακού χαρακτήρα. Βασικό ρόλο στην τροφοδοσία του πρηνούς με νερό, εκτός των επιφανειακών κατεισδύσεων, έπαιξε και η παρουσία των περατών ασβεστολίθων που εμφανίζονται στα ανάντη και στα βαθύτερα τμήματα των πρηνών επί των οποίων υπέρκεινται τα κορήματα. Η ίδια υψομετρικά θέση του υδροφόρου ορίζοντα στα

πιεζόμετρα του ασβεστόλιθου και των πλευρικών κορημάτων είναι χαρακτηριστική της ανεμπόδιστης τροφοδοσίας (Ντουινιάς κ.α., 2006).

Το γεγονός ότι μετά την κατασκευή του αυτοκινητόδρομου (αλλά και του παράδρομου) προκλήθηκε αύξηση των κατεισδύσεων των ομβρίων υδάτων είχε σαν αποτέλεσμα τον ευνοϊκότερο κορεσμό των μικρής διαπερατότητας εδαφικών υλικών, τα οποία επικάθονται σε αδιαπέρατο αργιλικό υπόβαθρο.

Συμπερασματικά, η συστηματική εμφάνιση ενός σχηματισμού αργιλικής σύστασης στη βάση του κώνου κορημάτων καθώς και η ύπαρξη των σχηματισμών του Νεογενούς στο πόδα της κατολίσθησης, δηλαδή δύο κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών πολύ χαμηλής περατότητας, ευνόησαν τη δημιουργία επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων στους υπερκείμενους σχηματισμούς του κώνου κορημάτων που επιβάρυναν την ευστάθεια του πρανούς, προκαλώντας αλλαγή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών, υψηλές πιέσεις πόρων κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, μειώνοντας ταυτόχρονα την διατμητική αντοχή του γεωλογικού υλικού (Μαρίνος κ.α., 2004). Η διατμητική αντοχή επιβαρύνθηκε επιπρόσθετα και από την ύπαρξη ενός ρήγματος μεγάλου μήκους με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ/κή, το οποίο έχει δημιουργήσει ζώνη συνεκτικού λατυποπαγούς, καθώς επίσης και από δύο ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ/κής (Εικόνα 5.16).



Εικόνα 5.16. Άποψη της θέσης της αστοχίας. Με κόκκινη γραμμή, η απεικόνιση τεκτονικών ασυνεχειών.

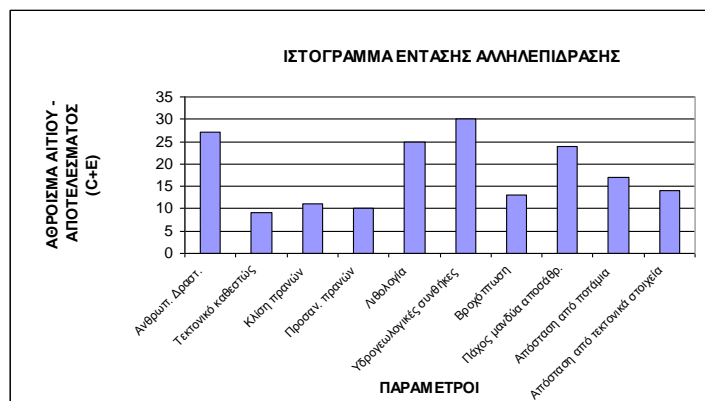
Με βάση, την παράθεση και επεξήγηση των προηγούμενων τεχνικογεωλογικών πληροφοριών, παρατίθεται στη συνέχεια η αποκωδικοποίησή τους σύμφωνα με τη μεθοδολογία του RES. Ειδικότερα, ακολουθούν πίνακες και γραφικές παραστάσεις

που «μεταφράζουν», ήτοι ποσοτικοποιούν ό,τι η πληροφορία έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 5.15, δίνεται το μητρώο αλληλεπίδρασης για την χιλιομετρική θέση 123+000.

Πίνακας 5.15. Μητρώο αλληλεπίδρασης για τη Χ.Θ. 123+000 της Ε.Ο. Αθηνών – Κορίνθου – Τρίπολης – Καλαμάτας (πλησίον της Νεμέας).

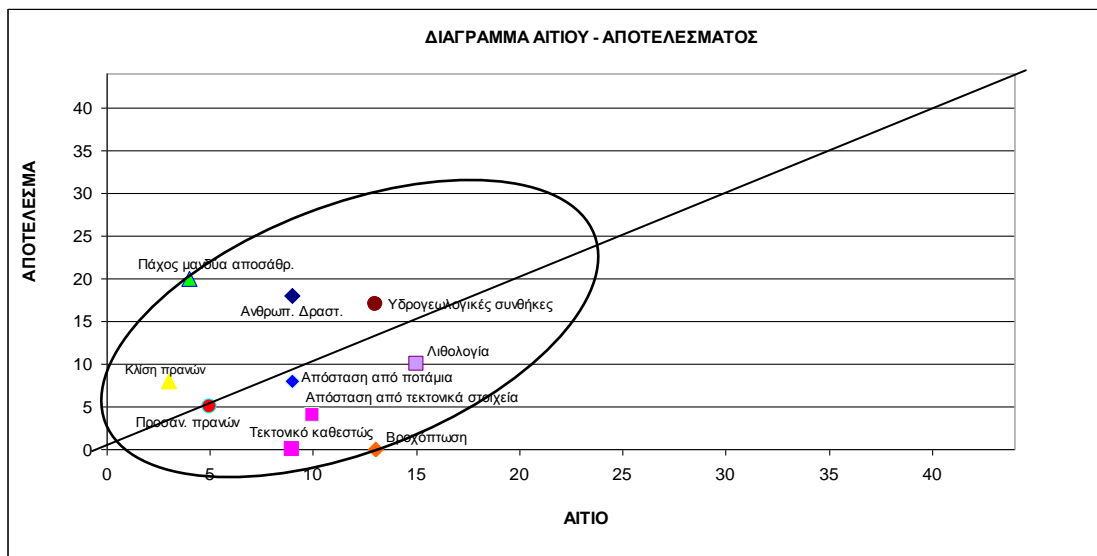
Rock Engineering System (RES) - ΘΕΣΗ Χ.Θ. 123+000 Ε.Ο. ΑΘΗΝΩΝ - ΚΟΡΙΝΘΟΥ - ΤΡΙΠΟΛΗΣ - ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ (ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΝΕΜΕΑΣ)																	
α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Αιτία (Cause - C)	C+E	C-E	Παράμετροι	ΣC+Ε/ΣC-Ε/Σ100%	Μέγιστη τιμή βαθμολογίας παραμέτρων	Σταθμικός Συντελεστής
1	Αέριου Δραστ.	0	2	2	0	2	0	3	0	0	9	27	-9	Αέριου Δραστ.	15.00	4	3.75
2	0	Τετανωκό καθεστώς	1	1	4	1	0	0	1	1	9	9	-9	Τετανωκό καθεστώς	5.00	4	1.25
3	1	0	Κλίση πρανών	0	0	0	0	2	0	0	3	11	-5	Κλίση πρανών	6.11	4	1.53
4	1	0	0	Προσπν. πρανών	0	1	0	1	2	0	5	10	-5	Προσπν. πρανών	5.56	4	1.39
5	0	0	1	1	Νεολογία	4	0	3	1	2	15	25	-5	Νεολογία	13.89	4	3.47
6	4	0	0	0	4	Υδρογεωλογικός συνθήκες	0	2	2	1	13	30	-4	Υδρογεωλογικός συνθήκες	16.67	4	4.17
7	4	0	0	0	1	4	Βροχόπτωση	4	0	0	13	13	13	Βροχόπτωση	7.22	4	1.81
8	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	4	24	-16	Πίεση μαζόλια αποστράθ.	13.33	4	3.33
9	2	0	2	0	1	1	0	3	0	0	9	17	1	Απόσπαση από πατάκια	9.44	4	2.36
10	1	0	2	1	0	2	0	2	2	0	10	14	6	Απόσπαση από τετανωκό σπασίμα	7.78	4	1.94
Αποτέλεσμα (Effect - E)	19	0	8	5	10	17	0	20	0	4	88	180			100.00		

ενώ στο Σχήμα 5.22, απεικονίζεται το ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων.

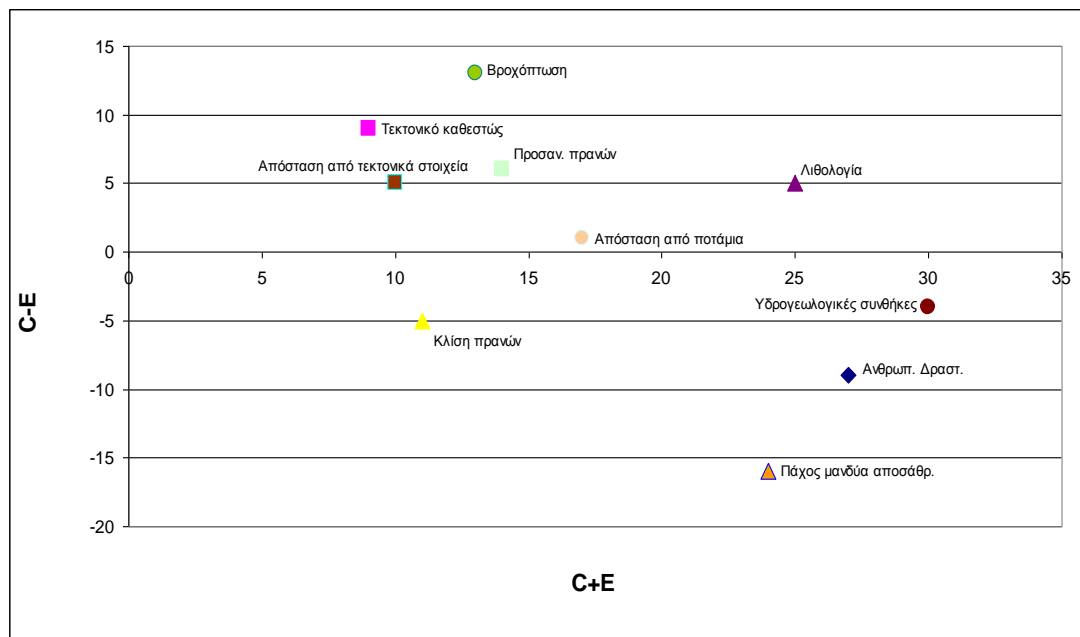


Σχήμα 5.22. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης στη θέση Χ.Θ. 123+000.

Από τον Πίνακα 5.15, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (Σχήμα 5.23) καθώς και το διάγραμμα (C+E) – (C-E), στο οποίο υπάρχει καλύτερη εικόνα αποτύπωσης της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επικράτηση (Σχήμα 5.24).



Σχήμα 5.23. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τη θέση Χ.Θ. 123+000.



Σχήμα 5.24. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για τη θέση στη Χ.Θ. 123+000.

Μελετώντας, αναλυτικότερα, τα δύο ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 5.23 & 5.24), προκύπτει ο Πίνακας 5.16 και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πίνακας 5.16. Παράθεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών έντασης αλληλεπίδρασης και επικράτησης των επιλεγμένων παραμέτρων για τη Χ.Θ. 123+000 πλησίον της Νεμέας.

Παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{max}$	30	Υδρογεωλογικές συνθήκες
Παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης	$(C+E)_{min}$	9	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{max}$	13	Βροχόπτωση
Παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{min}$	-16	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

- ✓ Οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και αυτό συμβαίνει γιατί: α) διαπιστώθηκε υδροφόρος ορίζοντας, η τροφοδοσία του οποίου προέρχεται κυρίως από την άμεση κατείσδυση των ομβρίων υδάτων, η οποία εκτιμάται ότι αυξήθηκε μετά την κατασκευή της κύριας οδοποιίας αλλά και του παράπλευρου δρόμου, καθώς και την παρουσία των περατών ασβεστολίθων που εμφανίζονται στα ανάντη και στα βαθύτερα τμήματα των πρानών στα οποία υπέρκεινται τα κορήματα, β) διαπιστώθηκε η ύπαρξη επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, λόγω της παρουσίας σχηματισμών πολύ χαμηλής περατότητας, η παρουσία των οποίων επιβαρύνει την ευστάθεια του πρανούς, προκαλεί αλλαγή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών και δημιουργεί υψηλές πιέσεις πόρων κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Η παρουσία, αυτή των προαναφερθέντων υδροφόρων οριζόντων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπόλοιπες επιλεγμένες παραμέτρους.
- ✓ Το τεκτονικό καθεστώς είναι η παράμετρος με τη μικρότερη ένταση αλληλεπίδρασης, κάτι που σημαίνει ότι δεν επηρεάζεται άμεσα από την δυναμική των υπολοίπων παραμέτρων αλλά ουσιαστικά αποτελεί έναν ανεξάρτητο εξωτερικό, για το σύστημα του πρανούς, παράγοντα.
- ✓ Η βροχόπτωση έχει τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης, δηλαδή επηρεάζει το σύστημα πολύ περισσότερο από ότι το σύστημα επηρεάζει αυτήν. Αυτό είναι κατανοητό αφού στη συγκεκριμένη θέση από τις αρχές του Φεβρουαρίου του 2003, μέχρι και την ημέρα της αστοχίας στις 08-02-2003, επικρατούσαν έντονες και παρατεταμένες βροχοπτώσεις και αυτή η συγκεκριμένη χρονική περίοδος θεωρήθηκε από τις υγρότερες της 50ετίας με μεγάλο μέσο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

- ✓ Τέλος, η παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης είναι το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει το όλο σύστημα αλλά επηρεάζεται από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.23, το νέφος συγκέντρωσης των περισσότερων σημείων των επιλεγμένων παραμέτρων είναι τοποθετημένο παράλληλα στην ευθεία C=E. Αυτό σημαίνει ότι για την ευστάθεια του πρανούς αρκεί να αντιμετωπισθούν εκείνες οι παράμετροι που φαίνεται ότι προκαλούν περισσότερο την αστάθεια στην εξεταζόμενη περιοχή, όπως η ανθρώπινη δραστηριότητα, οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η λιθολογία καθώς και η απόσταση από τα ποτάμια. Οι προηγούμενοι πίνακες και σχήματα βοηθούν στην εύρεση υπολογισμού του δείκτη αστάθειας (Πίνακας 5.17).

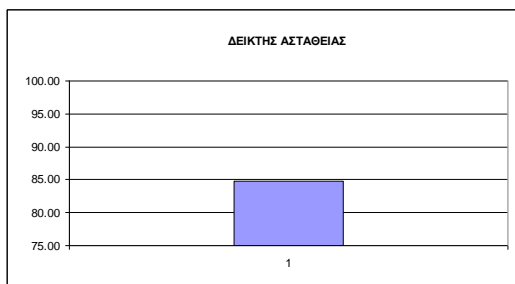
Πίνακας 5.17. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας για τη χιλιομετρική θέση 123+000 της Ε.Ο. Αθηνών – Κορίνθου – Τριπόλης - Καλαμάτας (πλησίον της Νεμέας).

Υπολογισμός Δείκτη αστάθειας (Instability Index)											
Παράμετρος	Ανθρωπ. Δραστ.	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσπ. πρανών	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρ.	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	Instability Index
Βαθμολόγηση Πρανούς Νο	4	3	2	2	3	4	4	4	2	4	84.72
Μέγιστη τιμή βαθμολόγησης παραμέτρου	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
$\frac{[(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%}{}$	15.00	5.00	6.11	5.56	13.89	16.67	7.22	13.33	9.44	7.78	100.00
Σταθμικός Συντελεστής	3.75	1.25	1.53	1.39	3.47	4.17	1.81	3.33	2.36	1.94	

όπου: **Instability Index** = Σ (σταθμικός συντελεστής x παράμετρος), δηλαδή ο δείκτης αστάθειας (Instability Index), είναι το συνολικό άθροισμα των γινομένων της κάθε επιμέρους παραμέτρου με τον αντίστοιχο σταθμικό συντελεστή και

$$\text{Σταθμικός συντελεστής} = \frac{1}{4} * \frac{[(C+E)/\Sigma(C+E)]*100\%}{}$$

Σχηματικά, ο δείκτης αστάθειας απεικονίζεται στο Σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.25. Διάγραμμα δείκτη αστάθειας για τη Χ.Θ. 123+000.

Τέλος, στον Πίνακα 5.18, επεξηγείται η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη χιλιομετρική θέση 123+000, σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά δεδομένα που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 5.18. Επεξήγηση βαθμονόμησης παραμέτρων για τη θέση αστοχίας στη Χ.Θ. 123+000.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Ανθρωπ. Δραστ.	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	3	Πολύ ισχυρό τεκτονικό καθεστώς: συνδέεται με την παρουσία κατακερματισμένων ζωνών
Κλίση πρηνών	2	16° -30°
Προσαν. πρηνών	2	135° - 225°
Λιθολογία	3	Νεογενή - Μολασσικά ιζήματα / Τεταρτογενείς αποθέσεις
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού: συνδέεται με το φορτίο από το χιόνι, το νερό της βροχής και των πηγών αλλά επίσης και από την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων
Βροχόπτωση	4	Έντονες και παρατεταμένες βροχοπτώσεις
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	4	Είναι μεγαλύτερο των 3m
Απόσταση από ποτάμια	2	Από τον πόδα του πρηνούς της κατολισθησης διέρχεται ρέμα εποχιακής ροής γενικής διεύθυνσης Β-N, σε απόσταση περίπου 120m, παράλληλα με τον άξονα της Ε.Ο.
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Η διαμητρική αντοχή των γεωλικών επιβαρύνθηκε επιπρόσθετα και από την ύπαρξη ενός ρήγματος μεγάλου μήκους με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (το οποίο έχει δημιουργήσει ζώνη συνεκτικού λατυπτοπαγούς) καθώς επίσης και από δύο ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο δείκτης αστάθειας για το συγκεκριμένο πρηνές που αστόχησε στη θέση Χ.Θ. 123+000 (πλησίον της Νεμέας) της Ε.Ο. Αθηνών - Κορίνθου – Τρίπολης - Καλαμάτας ισούται με $I_{instability}$ $I_{index}=84.72$ και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 [Κατηγοριοποίηση της σχετικής κατολισθητικής επιδεκτικότητας από τους Brabb et al., (1972)] αντιστοιχεί στη στήλη L (Κατολίσθηση), κάτι που επιβεβαιώνεται και από το συγκεκριμένο γεγονός που έλαβε χώρα τον Φεβρουάριο του 2003.

5.8 Συμπεράσματα – Σχολιασμοί από τις αστοχίες που μελετήθηκαν

Οι τέσσερις επιλεγείσες θέσεις (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα και Νεμέα) που συνδέθηκαν με σημαντικές κατολισθήσεις στον Ελληνικό χώρο ως προς το μέγεθός τους, τον όγκο των κατολισθαίνοντων υλικών και τη διατάραξη που προξένησαν οικονομικά και κοινωνικά στην εύρυθμη λειτουργία των ευρύτερων περιοχών που τις περιβάλλουν, μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή, ως προς την εύρεση εκείνων των παραμέτρων που οδηγούν στον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας μέσω της παρουσιαζόμενης μεθοδολογίας RES. Από την εκτενή

παρουσίαση και ανάλυση κάθε θέσης, επιβεβαιώθηκαν οι ανωτέρω αστοχίες μέσω του συγκεκριμένου εργαλείου (μητρώο αλληλεπίδρασης) του RES.

Αυτό αποδεικνύει ότι δυνητικά οι συγκεκριμένες δέκα επιλεγμένες παράμετροι που συνιστούν το μητρώο κάθε θέσης θα μπορούσαν να ληφθούν εκ των προτέρων υπόψη, δηλαδή πριν την έναρξη των κατασκευαστικών εργασιών για τη διάνοιξη ή/και διαπλάτυνση των διερχόμενων από αυτές αυτοκινητόδρομων και ως εκ τούτου να προγνωσθούν οι επερχόμενες αστοχίες ή έστω θα μπορούσαν να λαμβάνονταν εκείνα τα μέτρα αντιμετώπισης που θα αποσοβούσαν μεγάλο μέρος των καταστροφών που σημειώθηκαν.

Για παράδειγμα, το τεκτονικό καθεστώς ήταν η περισσότερο αλληλεπιδραστική παράμετρος για τις θέσεις Παναγοπούλα (λόγω της άμεσης εγγύτητας με τον σεισμοτεκτονικά ενεργό δυτικό Κορινθιακό Κόλπο) και Τσακώνα (λόγω της επώθησης των ασβεστολίθων, της τεκτονικής καταπόνησης του «πρώτου» φλύσχη καθώς και της ύπαρξης ρηξιγενούς ζώνης στο νότιο άκρο της κατολίθωσης). Η γνώση αυτή σε συνδυασμό με την ιστορικότητα των συγκεκριμένων θέσεων σε κατολισθήσεις και στο παρελθόν, η οποία (ιστορικότητα) προσέδιδε μια εκ των προτέρων μείωση στις γεωμηχανικές ιδιότητες των λιθολογικών τύπων των απαντώμενων στις θέσεις αυτές γεωλογικών σχηματισμών, θα μπορούσε να ληφθεί πολύ πιο σοβαρά υπόψη από τους μελετητές και κατασκευαστές κατά τον σχεδιασμό και υλοποίηση αντίστοιχα του υπόψη τεχνικού έργου (αυτοκινητόδρομου).

Επίσης, η παράμετρος των υδρογεωλογικών συνθηκών η οποία έπαιξε σημαντικό ρόλο στις αστοχίες των Μαλακάσα και Νεμέα, μαρτυρά την αδυναμία της εκπονηθείσας γεωλογικής μελέτης, η οποία δεν κατάφερε να προσδιορίσει σωστά το επί τόπου υδρογεωλογικό μοντέλο των συγκεκριμένων περιοχών. Σαν επιβεβαίωση της σημασίας της συγκεκριμένης παραμέτρου στις αστοχίες αυτές, ήταν οι εργασίες αποκατάστασης των αστοχιών μέσω των εξειδικευμένων αποστραγγιστικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν και στις δύο θέσεις (Καβουνίδης κ.α. 1997, Ντουινιάς κ.α. 2006).

Με βάση, τα αποτελέσματα των τεσσάρων εξεταζόμενων θέσεων και τη σύγκρισή τους με τον Πίνακα 5.1, υπολογίσθηκε ότι όλες οι θέσεις έχουν δείκτη αστάθειας μεγαλύτερο του 70% (Πίνακας 5.19).

Πίνακας 5.19. Συγκεντρωτικές τιμές δείκτη αστάθειας για τις θέσεις αστοχίας σε Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα και Νεμέα.

Μελετούμενη περιοχή	Δείκτης Αστάθειας
Παναγοπούλα	82,46
Μαλακάσα	80,53
Τσακώνα	89,56
Νεμέα	84,72

Αποδεικνύεται έτσι ότι η εφαρμογή του μητρώου αλληλεπίδρασης της μεθοδολογίας RES στις συγκεκριμένες γνωστές κατολισθητικά θέσεις ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά ως εργαλείο αναγνώρισης αστοχιών πρανών. Μάλιστα εφαρμόζοντάς αυτό σε κάθε μελέτη περίπτωσης γίνεται ανηλεπτό ότι: α) το εργαλείο RES προσαρμόζεται στις τοπικές, κάθε φορά, συνθήκες και στα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων δεδομένων αλλά και στη γνώση του ερευνητή, β) «αντικειμενικοποιεί» την υποκειμενική κρίση του εκάστοτε ερευνητή ελέγχοντας την επάρκεια των προτεινόμενων παραμέτρων και υπολογίζοντας τα σχετικά βάρη / σταθμικούς συντελεστές για κάθε μια από αυτές.

Για επιβεβαίωση της χρήσης των συγκεκριμένων παραμέτρων και την επικύρωση των παραπάνω εξαγόμενων συμπερασμάτων γίνεται στη συνέχεια εφαρμογή του RES σε συγκεκριμένη περιοχή του Ν. Αρκαδίας. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική για να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα χρήσης του μητρώου αλληλεπίδρασης και κατ' επέκταση της μεθοδολογίας RES στην πρόγνωση αστοχιών πρανών.

6. ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ RES ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ

6.1. Εισαγωγή

Η μέχρι τώρα πορεία της έρευνας έδειξε ότι εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του RES σε γνωστές από το παρελθόν περιοχές με σημαντικά προβλήματα κατολισθήσεων (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα και Νεμέα) κλίμακας 1:1000 – 1:2000, προέκυψαν υψηλές τιμές δείκτη αστάθειας πάνω από 70%, που επιβεβαιώνουν την αστοχία των πρανών στις συγκεκριμένες θέσεις. Με τον δείκτη αστάθειας περιγράφεται ποσοπικά η συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών ως προς την επιδεκτικότητά τους σε κατολίσθηση, λαμβάνοντας υπόψη όλες εκείνες τις παραμέτρους που τα επηρεάζουν.

Ο τελικός σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να αποδείξει ότι η εφαρμογή της συγκεκριμένης θεωρίας μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο/μοντέλο όπου με οικονομία και ταχύτητα να διερευνάται εκ των προτέρων η δυνητική αστοχία σε μια οποιαδήποτε περιοχή μελέτης, στην οποία πρόκειται να σχεδιασθεί και κατασκευασθεί ένα νέο τεχνικό έργο και ιδιαίτερα όπου δεν είναι εξ' αρχής γνωστό εάν έχει υπάρξει κάποια χρονική στιγμή στο παρελθόν περιστατικό κατολίσθησης. Η προσπάθεια αυτή επιχειρείται να επικυρωθεί με τη μελέτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility) μιας μεγαλύτερης περιοχής έρευνας και κατ'επέκταση μικρότερης τοπογραφικά (μεσαίας) κλίμακας σε σχέση με την μεγάλη κλίμακα 1:1.000 των προαναφερθέντων τεσσάρων περιοχών.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη”, κλίμακας 1:50.000 (ΙΓΜΕ, 1997), στην οποία έχουν λάβει χώρα αστοχίες πρανών κατά το παρελθόν και επιπλέον μπορούν να συμβούν δυνητικά (σύμφωνα με τεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ), αστοχίες όχι μόνο λόγω των εκτεταμένων πυρκαγιών που συνέβησαν το καλοκαίρι του 2007 αλλά και εξ' αιτίας της αλληλεπίδρασης των ήδη αναφερόμενων σε προηγούμενη ενότητα παραμέτρων του συγκεκριμένου φύλλου.

Επιπρόσθετα η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η επιβεβαίωση της καταλληλότητας χρήσης του RES θα αποτελέσουν νέα δεδομένα για τη σύνθεση χαρτών κατολισθητικού κινδύνου (landslide hazard map) και κατ' επέκταση

χαρτών διαχείρισης κατολισθητικής επικινδυνότητας (landslide risk management) στην συγκεκριμένη εξεταζόμενη περιοχή μελέτης.

6.2. Κατολισθητική επιδεκτικότητα (landslide susceptibility)

Στις περισσότερες περιπτώσεις η πολυπλοκότητα των αιτίων των αστοχιών και των παραγόντων εναύσματος, οι άγνωστες αλληλεπιδράσεις τους και η έλλειψη γνώσεων, καθιστούν την ανάλυση φαινομένων όπως οι κατολισθήσεις μια πολύ απαιτητική εργασία (Gokceoglu et al., 2005). Μια ανάλυση που προσπαθεί να αποκωδικοποιήσει την πολυπλοκότητα των παραπάνω είναι αυτή της κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Με τον όρο αυτόν, εννοείται η πιθανότητα μια κατολίσθηση να συμβεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση μεταξύ των κύριων παραμέτρων που οδηγούν στην αστοχία και της χωρικής κατανομής των κατολισθήσεων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν (Brabb, 1984).

Με βάση την βιβλιογραφία, δεν υπάρχει αποδεκτή συμφωνία ως προς τις μεθόδους για την παραγωγή χαρτών επιδεκτικότητας καθώς αρκετές ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι έχουν προταθεί για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Κριτικές για αυτές τις τεχνικές και μεθοδολογίες έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές (Carrara et al., 1995, Aleotti & Chodwdhury, 1999, Guzzetti et al., 1999, Dai et al., 2002, Glade et al., 2005).

Στο πεδίο έρευνας πρόγνωσης των αστοχιών πρανών και σε ότι αφορά την παραγωγή ενός χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας, που συνδέεται άμεσα με τον σχεδιασμό υλοποίησης ενός τεχνικού έργου, πιστεύεται ότι η ακρίβεια ενός τέτοιου χάρτη μεγιστοποιείται, όταν υπολογίζονται όλες εκείνες οι παράμετροι που μπορούν να ληφθούν υπόψη στην αναλυτική διαδικασία. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, αυτό πολύ δύσκολα επιτυγχάνεται, λόγω της δυσκολίας απόκτησης όλων των δεδομένων (Ayalew et al. 2004) και/ή λόγω του πολύ υψηλού κόστους ή της πολύ χαμηλής ανάλυσης (Conoscenti et al. 2008), εάν αφορά δεδομένα τηλεπισκόπησης.

Σύμφωνα με τον Van Western et al. (1997), η ανάλυση κατολισθητικής επιδεκτικότητας περιέχει ουσιαστικά τέσσερις κύριες φάσεις: α) την παραγωγή ενός χάρτη στον οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των αστοχιών, β) την εκτίμηση ενός γεγονότος ή τον έλεγχο των παραγόντων που επηρεάζουν το κατολισθητικό καθεστώς, γ) την εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων για τον προσδιορισμό των

βαρών του κάθε επιμέρους παράγοντα και δ) την συμπλήρωση του χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας χρησιμοποιώντας τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (ΓΣΠ).

Η ανάλυση κατολισθητικής επιδεκτικότητας συχνά χρησιμοποιεί τεχνικές αποφάσεων πολυκριτηριακής ανάλυσης αφού στις περισσότερες περιπτώσεις ο τύπος και η δομή των δεδομένων που είναι διαθέσιμα είναι τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά γεγονός που απαιτεί την χρήση ημι-ποσοτικής μεθόδου ώστε να μπορέσει ενσωματώσει και τους δύο τύπους δεδομένων (Ayalew & Yamagishi, 2005).

Σε αντίθεση με τη συμβατική πολυκριτηριακή ανάλυση, η χωρική πολυκριτηριακή ανάλυση χρειάζεται τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά δεδομένα, αλλά επιπλέον δε και την γεωγραφική χωροθέτηση των παραμέτρων. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας τα ΓΣΠ και πολυκριτηριακές μεθόδους ανάλυσης, όπως αυτή του RES, με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζονται και αθροίζονται βάρη, ώστε να προκύψει η παραγωγή χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας.

6.3. Σχόλια – παρατηρήσεις για τους χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility map)

Με τον όρο «χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας» εννοείται ο χάρτης εκείνος που δείχνει την οριοθέτηση ενός τμήματος της γήινης επιφάνειας κάποιας συγκεκριμένης περιοχής και την ταξινόμησή του σύμφωνα με το βαθμό του υπαρκτού ή δυνητικού κινδύνου από κατολισθήσεις. Με βάση αυτό και επειδή υπάρχει μεγάλη διαφορά στις προσεγγίσεις για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, οι μελετητές για την παραγωγή ενός τέτοιου χάρτη θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα ακόλουθα (Corominas and Mavrouli, 2011):

1. Το σκοπό της μελέτης.
2. Την κλίμακα της περιοχής μελέτης, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με τον σκοπό της μελέτης.
3. Τα διαθέσιμα δεδομένα.
4. Τις πηγές συγκέντρωσης των δεδομένων καθώς και τη χρονική περίοδο της μελέτης.
5. Τον τύπο και τους μηχανισμούς των αστοχιών.
6. Την ομοιογένεια της εξεταζόμενης περιοχής.

7. Εάν ο σκοπός είναι η πρόβλεψη επαναδραστηριοποίησης ήδη υφιστάμενων κατολισθήσεων ή η πρόβλεψη περιοχών που αστοχούν για πρώτη φορά. Η πρώτη περίπτωση έχει πολύ μικρή αβεβαιότητα καθώς είναι γνωστή, ήδη, η θέση της αστοχίας και η μεθοδολογία επικεντρώνεται στην εκτίμηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες οι ήδη γνωστές κατολισθήσεις θα μπορούσαν να επανεργοποιηθούν. Αντίθετα, η ανάλυση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας για την ύπαρξη νέων αστοχιών εμπεριέχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα με συνέπεια μια ευρύτερη ποικιλία μεθόδων να απαιτείται να εφαρμοσθούν.

Επισημαίνεται ότι οι μέθοδοι για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, συνήθως, βασίζονται στη θεώρηση ότι περιοχές που έχουν υποστεί αστοχίες πρηνών στο παρελθόν, είναι πιθανόν να αστοχήσουν ξανά μελλοντικά. Κατά συνέπεια η συγκέντρωση λεπτομερών χαρτών απογραφής (landslide inventory maps), είναι μεγάλης σημασίας σε κάθε εκτίμηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Ο αντίλογος στην προηγούμενη θεώρηση είναι ότι χρησιμοποιώντας το ανάλογο επιχείρημα ενός επενδυτή αγορών, τα αποτελέσματα που έχουν λάβει χώρα στο παρελθόν δεν εγγυώνται ότι θα συμβούν και μελλοντικά.

Αυτό σημαίνει ότι οι συνθήκες στις οποίες έλαβαν χώρα κατολισθήσεις στο παρελθόν και οι χάρτες επιδεκτικότητας που σχεδιάστηκαν, αφορούν την τότε συγκεκριμένη κατάσταση. Από τη στιγμή που ενδεχομένως διαφοροποιούνται οι τιμές των επιλεγμένων παραμέτρων, οι αντίστοιχοι χάρτες επιδεκτικότητας θα πρέπει να αναθεωρούνται (Corominas and Mavrouli, 2011).

Τέλος, οι Soeters and Van Western (1996) σημειώνουν ότι υπάρχουν δύο τύποι λαθών που εντοπίζονται σε χάρτες κατολισθητικής επικινδυνότητας: α) κατολισθήσεις μπορεί να λάβουν χώρα σε περιοχές που έχουν προβλεφθεί ότι είναι σταθερές και β) αστοχίες πρηνών μπορεί πράγματι να μην συμβούν σε περιοχές που προβλέπονται να είναι ασταθείς.

6.4. Επικύρωση (validation) της μεθοδολογίας RES

Ένα σημαντικό ζήτημα κατά τη διαμόρφωση ενός μοντέλου είναι η εκτίμηση της ποιότητάς του, δεδομένου ότι για κάθε μοντέλο (διαδικασία ή χάρτη), πρέπει να επαληθευθεί και επικυρωθεί. Σύμφωνα με το Αμερικανικό Ινστιτούτο Αστροδιαστημικής (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998),

επαλήθευση (Verification) είναι η διαδικασία εφαρμογής του μοντέλου με βάση την ακρίβεια που αντιπροσωπεύει η εννοιολογική περιγραφή και επίλυση του μοντέλου από τον προγραμματιστή, ενώ επικύρωση (Validation) είναι η διαδικασία του προσδιορισμού του βαθμού στο οποίο το μοντέλο παρουσιάζει την ακριβή αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου με βάση την προοπτική των επιδιωκόμενων χρήσεων του μοντέλου (Corominas and Mavrouli, 2011).

Η ακρίβεια, δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική (true) τιμή και στην αντίστοιχη εκτιμώμενη (estimated) κάθε μοντέλου κατολισθητικής επιδεκτικότητας πρέπει να προσδιορισθεί, δηλαδή να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων.

Για παράδειγμα, η ακρίβεια χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί εάν οι παρατηρούμενες αστοχίες πρανών έχουν λάβει χώρα στα περισσότερα «επιρρεπή» σε επιδεκτικότητα κατολίσθηση κελιά (ενός χάρτη ΓΣΠ) και επίσης εάν έχει γίνει σωστή διάκριση μεταξύ περιοχών με καταγεγραμμένες αστοχίες πρανών σε σχέση με δυνητικές θέσεις επιδεκτικές σε αστοχία.

Όταν ένα μοντέλο κατολισθητικής επικινδυνότητας εφαρμόζεται στην πράξη, η ζωνοποίηση της υπό μελέτη περιοχής με βάση την κατολισθητική επιδεκτικότητα συνδέεται με οικονομικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, μια περιοχή που έχει χαρακτηριστεί μετά την εφαρμογή του μοντέλου σαν μη επικίνδυνη κατολισθητικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την οικονομική της αξία. Αντίθετα, μια ασταθής με βάση το μοντέλο περιοχή, περιορίζει τον βαθμό χρήσεων γης και κατά συνέπεια μειώνεται και η αξία της (Corominas and Mavrouli, 2011).

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει πολλές φορές ο κίνδυνος της μη σωστής κατηγοριοποίησης μιας εξεταζόμενης περιοχής ως προς τη ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, που μπορεί να οφείλεται στην ποιότητα και ανάλυση των δεδομένων εισόδου, στο μέγεθος της περιοχής ή ακόμα και στο βαθμό επάρκειας της προσέγγισης της διαδικασίας ή του μοντέλου στο οποίο η μελέτη κατολισθητικής επικινδυνότητας βασίζεται. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση ενός μοντέλου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια: (α) αξιοπιστία, ευκρίνεια-ανάλυση δεδομένων, (β) επάρκεια στην περιγραφή του μοντέλου (δηλαδή ότι η ακρίβεια του μοντέλου είναι κατάλληλη για την επιδιωκόμενη χρήση), (γ) ευελιξία, ώστε το μοντέλο να μπορεί να ανταποκριθεί σε

μικρές αλλαγές των δεδομένων εισόδου και (δ) ακρίβεια, δηλαδή τη διαφορά ανάμεσα στην αληθινή-πραγματική τιμή και στην εκτιμώμενη, των μοντέλων κατολισθησης και χαρτών. Η επικύρωση, λοιπόν, των αποτελεσμάτων ενός προγνωστικού μοντέλου είναι οπωσδήποτε ουσιώδης ώστε η εφαρμογή του να έχει πρακτική αξία.

6.5. Η επιλογή της περιοχής του φύλλου Μεγαλόπολη για την εφαρμογή του RES

Για την επικύρωση της μεθοδολογίας RES, επιλέχθηκε η περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη” και ορίσθηκε γιατί η συγκεκριμένη περιοχή συνδέεται με ζωτικής σημασίας πόλους ανάπτυξης. Η μελέτη, λοιπόν, της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της εξεταζόμενης περιοχής με τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας και τη δημιουργία - ζωνοποίηση χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility map) κλίμακας 1:50.000, έχει σκοπό να επιβεβαιώσει τα ακόλουθα:

α) τις ήδη υφιστάμενες κατολισθήσεις στη συγκεκριμένη εξεταζόμενη περιοχή, β) να εντοπίσει νέες πιθανές θέσεις αστοχίας πρανών και γ) τελικά να βοηθήσει όχι μόνο στην επιλογή ασφαλούς τεχνικογεωλογικά θέσης για την κατασκευή ενός τεχνικού έργου αλλά και να συνδράμει στον καλύτερο σχεδιασμό των μέτρων πολιτικής προστασίας έναντι μελλοντικών φυσικών καταστροφών γιατί μια κατολισθηση πρέπει να μελετάται τόσο ως προς την τοπική όσο και την ευρύτερη διάσταση αυτής (Pitilakis et al., 2011). Με αυτόν τον τρόπο πιστεύεται ότι μπορούν να προστατευθούν τεχνικογεωλογικά, περιβαλλοντικά και κατ' επέκταση κοινωνικά και οικονομικά οι σπουδαιότεροι πόλοι ανάπτυξης που συνδέονται με την υπό μελέτη περιοχή και οι οποίοι στη συγκεκριμένη περιοχή είναι οι ακόλουθοι (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιφέρειας Πελοποννήσου, 2012):

- Κύριοι πόλοι ανάπτυξης διαπεριφερειακής εμβέλειας, που περιλαμβάνουν την Τρίπολη και την Καλαμάτα. Οι συγκεκριμένες πόλεις συνδέονται με την εξεταζόμενη περιοχή μέσω του αυτοκινητόδρομου Κόρινθος – Τρίπολη – Καλαμάτα. Μάλιστα, σε αυτόν τον οδικό άξονα συνέβη και η μεγάλη κατολισθηση της Τσακώνας (2003) με ήδη γνωστές τις συνέπειες από την ανάλυση που έγινε σε προηγούμενη ενότητα.
- Στην Μεγαλόπολη αποδίδεται ειδικός υπερτοπικός ρόλος ως Ενεργειακό Κέντρο, λόγω της παρουσίας της Δ.Ε.Η. Η περιοχή της Πελοποννήσου

αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες περιοχές του νοτίου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας δεδομένου ότι είναι η κυριότερη εγκατάσταση που βρίσκεται στο νότιο μέρος της Ελλάδος και λειτουργεί επικουρικά για την εξυπηρέτηση της Αθήνας. Στην Περιφέρεια Πελοποννήσου παράγεται περίπου το 8% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. πανελλαδικά, με τη συμβολή των θερμοηλεκτρικών και υδροηλεκτρικών σταθμών στη Μεγαλόπολη και τον Λάδωνα αντίστοιχα. Σήμερα, η Πελοπόννησος αποτελεί την πλέον κρίσιμη περιοχή για την ευστάθεια τάσεων του Νοτίου Συστήματος, καθώς σε περιόδους υψηλών φορτίων και με μειωμένη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής στη Μεγαλόπολη εμφανίζονται προβλήματα τάσεων που επηρεάζουν ολόκληρο το Νότιο Σύστημα. Εξ' άλλου, το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου (ΕΣΜΦΑ) που αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα έργα υποδομής της σύγχρονης Ελλάδας, που υλοποιείται από τον Διαχειριστή του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου, προβλέπει την κατασκευή αγωγού υψηλής πίεσης, μήκους 159 χλμ., που θα συνδέει το ΕΣΜΦΑ από το σταθμό στους Αγίους Θεοδώρους του Ν. Κορινθίας μέχρι το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη. Το έργο εξασφαλίζει εκτός από την ομαλή και φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία του Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη, τις προϋποθέσεις για την τροφοδότηση με Φυσικό Αέριο βιομηχανικών, οικιακών και άλλων καταναλωτών της ευρύτερης περιοχής από την οποία διέρχεται. Επίσης, στην περιοχή της Μεγαλόπολης σχεδιάζεται η δημιουργία μονάδας συνδυασμένου κύκλου ισχύος 800 MW, με καύσιμο φυσικό αέριο. Ήδη, έχει σχεδιαστεί και θα υλοποιηθεί η επέκταση του αγωγού φυσικού αερίου στο σύνολο της Περιφέρειας ενώ έχει υπάρξει συμφωνία παράλληλα με τον αγωγό να ενσωματωθεί δίκτυο οπτικής ίνας που θα καταστήσει την Πελοπόννησο ως Περιφέρεια με την μεγαλύτερη ευρυζωνικότητα στην επικράτεια. Όλα, λοιπόν, τα παραπάνω αποτελούν κρίσιμα σημεία οικονομικής ανάπτυξης που σαφέστατα χρειάζονται να κατασκευασθούν σε εδάφη γεωλογικά και γεωτεχνικά ευσταθή, ώστε να μην ελλοχεύουν δυνητικοί κίνδυνοι αποσαθρώσεων, διαβρώσεων και τελικά αστοχιών πρανών.

- Ενδοπεριφερειακά κέντρα ανάπτυξης που περιλαμβάνουν ανάμεσα σε άλλα το Γύθειο, την Αρεόπολη, τη Μεσσήνη, την Πύλο, την Κυπαρισσία και τη

Καρδαμύλη (αναφέρονται, αυτά που γειτνιάζουν με την εξεταζόμενη περιοχή έρευνας και από την οποία διέρχονται οι οδικοί άξονες που τα συνδέουν με τα περιφερειακά κέντρα ανάπτυξης).

Οι άξονες ανάπτυξης της περιφέρειας και κατ' επέκταση και της κύριας περιοχής ενδιαφέροντος (περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη) ορίζονται κυρίως από τους ανωτέρω πόλους/οικιστικά κέντρα ανάπτυξης και τους βασικούς χερσαίους άξονες και κόμβους μεταφορών, όπως είναι ο ήδη ολοκληρωμένος εθνικής εμβέλειας άξονας Αθήνα – Κόρινθος – Τρίπολη – Καλαμάτα, καθώς και ο άξονας Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα, στα δυτικά της Περιφέρειας Πελοποννήσου που στόχος του θα είναι να ενώσει την Καλαμάτα και την Τρίπολη μέσω Τσακώνας με την Πάτρα, η οποία διαθέτει μια σημαντική πύλη (λιμάνι) εισόδου-εξόδου της χώρας που την συνδέει με την Ιταλία και κατ' επέκταση με πολλές από τις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης.

Επίσης, στους ήδη δύο προαναφερθέντες σημαντικούς οδικούς άξονες θα πρέπει να επισημανθεί η σημασία της σύνδεσής τους με το εσωτερικό οδικό δίκτυο της Περιφέρειας που εντοπίζεται στους παράλιους οδικούς άξονες (ανατολικός, νότιος και νοτιοδυτικός), καθώς και στους λοιπούς άξονες του ορεινού οδικού δικτύου. Σημειώνεται ότι ολοκληρώθηκε και ο αυτοκινητόδρομος «Λεύκτρο – Σπάρτη», ο οποίος διασχίζει τους νομούς Αρκαδίας και Λακωνίας και ένα σημαντικό τμήμα του (16 περίπου από τα συνολικά 47 χιλιόμετρα) τέμνει την περιοχή μελέτης που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη”.

Η ολοκλήρωση, όμως, των βασικών οδικών αξόνων και η διέλευση από αυτούς συνδέεται με πλήθος τουριστικών δραστηριοτήτων όπως:

- Η ύπαρξη διεθνή αερολιμένα στην Καλαμάτα, που υποδέχεται πτήσεις charter,
- Η επέκταση και βελτίωση της λιμενικής υποδομής με κατεύθυνση την αύξηση του βαθμού εξυπηρέτησης ακτοπλοΐας και τουρισμού,
- Η αξιοποίηση του θαλασσίου άξονα Αδριατικής-Ιονίου-Ανατολικής Μεσογείου που προωθείται στο πλαίσιο των Διευρωπαϊκών Δικτύων και δημιουργία νότιας πύλης εισόδου από το λιμάνι της Καλαμάτας,
- Το πλήθος αξιόλογων και επισκέψιμων σπηλαίων, φαραγγιών,
- Το εκτεταμένο δίκτυο Παραδοσιακών Οικισμών, Εκκλησιών και Κάστρων,
- Η μεγάλη πολιτιστική κληρονομιά με ιδιαίτερα αξιόλογους πολιτιστικούς και αρχαιολογικούς χώρους,

- Οι πολλαπλές επιλογές διαφορετικού τύπου τουριστικών προορισμών,
- Η ύπαρξη πολλών θεσμοθετημένων προστατευόμενων περιοχών Natura, καθώς αξιόλογης και σπάνιας χλωρίδας και πανίδας. Τα οικοσυστήματα, δε, που υπάρχουν στην Περιφέρεια χαρακτηρίζονται από τα σημαντικότερα της Ελλάδος και από τα πλέον σημαντικά της Ευρώπης.

Τέλος, αξίζει να τονισθεί ότι στην μελετούμενη περιοχή του φύλλου Μεγαλόπολη εντοπίζονται θέσεις ενδεχόμενης αστοχίας πρανών λόγω των πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν το καλοκαίρι του 2007 (Αποστολίδης κ.α., 2007). Οι δασικές πυρκαγιές της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, καταγράφηκαν ως οι πλέον καταστροφικές των τελευταίων δεκαετιών, όχι μόνο σε εθνικό, αλλά και ευρύτερα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Μάλιστα, για πρώτη φορά, οι καταστροφές επεκτάθηκαν πολύ πέρα από τα δάση και τις αγροτικές καλλιέργειες και έπληξαν σοβαρά οικισμούς και υποδομές.

Αυτές οι καταστροφές, όμως, δημιουργούν μεγάλα προβλήματα εδαφικής υποβάθμισης και αυξάνουν τον κίνδυνο εδαφικής διάβρωσης. Στις πληγείσες από πυρκαγιές δασικές εκτάσεις, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, δημιουργείται στο έδαφος ένα επιφανειακό υδρόφοβο στρώμα (κρούστα), πάχους 5-6 χιλιοστών που εμποδίζει το νερό να διηθηθεί μέσα στο έδαφος και ρέει επιφανειακά (επιφανειακή απορροή). Το νερό, τότε, αποκτά μεγάλη ταχύτητα και παρασέρνει στο πέρασμά του την εδαφική επιφάνεια προκαλώντας έντονο φαινόμενο διάβρωσης (Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Life+, 2014). Είναι, λοιπόν, επιτακτικής σημασίας να υπολογισθεί επιπλέον ο δυνητικός δείκτης αστάθειας που συνδέεται με αυτές τις πληγείσες από πυρκαγιές περιοχές γιατί άμεσα ωφελούμενοι από αυτή την προσπάθεια θα είναι:

- (α) οι αγρότες, των οποίων οι καλλιέργειες βρίσκονται κυρίως στις ορεινές ζώνες της εξεταζόμενης περιοχής,
- (β) το οικοσύστημα και η βιοποικιλότητα της περιοχής,
- (γ) τα εδάφη των περιοχών που είναι ευάλωτα στην διάβρωση, προκειμένου να βοηθηθεί η σταθεροποίησή τους και κατά συνέπεια η αποτροπή αποσαθρώσεων, διαβρώσεων, ολισθήσεων και κατακρημνίσεων. Ακόμα θα βελτιωθούν οι υδρολογικές συνθήκες (περιορισμός απορροής, αύξηση διήθησης και απόληψης νερού) και κατ' επέκταση της αντιπλημμυρικής προστασίας των γύρω οικισμών και τέλος θα περιοριστεί η παραγωγή φερτών υλών.

Οι έμμεσα ωφελούμενοι θα είναι: (α) η τοπική οικονομία και γενικότερα ο τουριστικός τομέας, διότι διασφαλίζεται η πολιτιστική κληρονομιά των περιοχών, μέσω διατήρησης των μωσαϊκών των τοπίων (περισσότερη επεξήγηση για αυτή την παράμετρο έμμεσης ωφέλειας δίνεται στη συνέχεια), (β) οι ιδιοκτήτες κατοικιών και ακινήτων και οι οικισμοί στις κοντινές περιοχές καθώς δεν θα διατρέχουν κίνδυνο από φυσικές καταστροφές, (γ) το κράτος, η περιφέρεια και οι τοπικές κοινότητες εξαιτίας της εξοικονόμησης πόρων από μη ανάγκη καταβολής αποζημιώσεων και βοηθημάτων λόγω φυσικών καταστροφών αλλά και της δυνατότητας για ανάλυση κόστους - κέρδους σχετικά με τον προσδιορισμό της προτεραιότητας των μέτρων αντιμετώπισης μιας κατολίσθησης. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η βελτίωση, αφ' ενός του σχεδιασμού, υλοποίησης και παρακολούθησης έργων προστασίας από την εδαφική διάβρωση και αφ' ετέρου του συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

Συμπερασματικά, ωφελούμενοι είναι όλοι οι κάτοικοι της περιοχής μελέτης γιατί αυξάνεται όχι μόνο η αφύπνιση και η εγρήγορση στους ήδη υπαρκτούς γεωκινδύνους αλλά και η εκτίμησή τους για την ανάληψη δράσεων που επιχειρούνται από τους σχετικούς τοπικούς και περιφερειακούς δημόσιους φορείς.

6.5.1 Ιστορικό και Πολιτιστικό Περιβάλλον

Για την ολοκληρωμένη αναφορά στο ευρύτερο περιβαλλοντικό, ιστορικό και οικονομικό πλαίσιο της εξεταζόμενης περιοχής του Φύλλου Μεγαλόπολη, αναφέρονται επιγραμματικά ορισμένα ιστορικά και πολιτιστικά μνημεία (ΔΕΗ, 2010).

α. Αρχαίος οικισμός περιοχής Κυπαρισσίων Δήμου Γόρτυνας

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 1931/Β/30.12.2005 έχει κηρυχθεί ως αρχαιολογικός χώρος, ο οχυρωμένος αρχαίος οικισμός που ανακαλύφθηκε στην περιοχή των Κυπαρισσίων του Δήμου Γόρτυνας του Νομού Αρκαδίας. Ο συγκεκριμένος αρχαιολογικός χώρος περιλαμβάνει οικιστικά κατάλοιπα και τμήμα του οχυρωματικού τείχους του αρχαίου οικισμού ο οποίος αναπτύχθηκε με κανονικό σχηματισμό και η κύρια φάση του ανάγεται από τους κλασικούς έως τους ρωμαϊκούς χρόνους. Εντός του κηρυσσόμενου χώρου συμπεριλαμβάνεται επίσης ο λόφος της Αγίας Κυριακής που ταυτίζεται με την Ακρόπολη του ανωτέρου οικισμού, στους πρόποδες του οποίου εντοπίστηκαν λείψανα νεκροταφείου ρωμαϊκών αυτοκρατορικών χρόνων.

β. Αρχαία Μεγαλόπολη

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αρχαία πόλη της Μεγαλόπολης. Πρόκειται για σχετικά νέα πόλη, καθώς χτίστηκε το 370 π.Χ. κατά διαταγή του Θηβαίου Επαμεινώνδα, μετά την ήττα των Λακεδαιμονίων στα Λεύκτρα. Επιθυμία του ήταν η πόλη να αποτελέσει προμαχώνα της νότιας Αρκαδίας εναντίον της Σπάρτης. Ήταν χτισμένη στις όχθες του ποταμού Ελισσώνα, στα δυτικά της γέφυρας του ποταμού στο σημερινό δημόσιο δρόμο Μεγαλόπολης – Καρύταινας. Τελικά οι Σπαρτιάτες κατάφεραν να την καταστρέψουν το 222 π.Χ. Έκτοτε η Μεγαλόπολη έχασε την αίγλη της και σχεδόν ερημώθηκε. Επί τουρκοκρατίας ήταν κατοικημένη από Τούρκους και ονομαζόταν Σινάνο.

Η θέση της αρχαίας Μεγαλόπολης εξακριβώθηκε από Άγγλους αρχαιολόγους το 1890, οι οποίοι αποκάλυψαν το περίφημο θέατρο και πίσω από αυτό ίχνη του μεγαλοπρεπούς τελεστηρίου, τη στοά του βασιλιά Φιλίππου, το στάδιο και το ιερό του Δία. Στο κέντρο της πόλης βρισκόταν η αγορά, ένα αρμονικό σύνολο οικοδομημάτων και στοών με τετράγωνο περίβολο. Στο μουσείο της πόλης εκτίθενται ευρήματα από τους αρχαιολογικούς χώρους. Το αρχαίο θέατρο και οι υπόλοιπες αρχαιότητες βρίσκονται μόλις 2 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης.

γ. Αρχαία Λυκόσουρα

Στα αξιόλογα αρχαιολογικά μνημεία της περιοχής αξίζει να αναφέρουμε την Αρχαία Λυκόσουρα. Βρίσκεται στις νότιες υπώρειες του Λυκαίου όρους, ένα χιλιόμετρο νότια του ομώνυμου χωριού που αποτελεί Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Μεγαλόπολης με πληθυσμό 65 περίπου κατοίκους.

Θεωρείται η αρχαιότερη πόλη στον κόσμο (10.000 – 8.000 π.Χ.). Κατά την αρχαιότητα ήταν ιερή πόλη των Αρκάδων. Ήταν μια πόλη γεμάτη φως. Άλλωστε βρίσκεται στο όρος Λυκαίο, που σημαίνει φωτεινό, και δεσπόζει στον Πελοποννησιακό χώρο προσφέροντας μοναδική θέα. Ο Πausanίας τη χαρακτηρίζει ως την αρχαιότερη από όλες τις πόλεις που υπήρξαν ποτέ πάνω σε ηπειρωτική ή νησιωτική γη, ως την πρώτη πόλη που είδε το φως του ήλιου.

Οι ανασκαφές του 19ου αιώνα έφεραν στο φως το φημισμένο Ιερό της Δέσποινας (ανατολικά της Ακρόπολης) ερείπια των βωμών της Δέσποινας και της Δήμητρας, οικοδομικό συγκρότημα στα δυτικά του κυρίως ιερού, κρηνικό οικοδόμημα. Πρωτότυπα γλυπτών, που βρέθηκαν στο χώρο αυτό, φυλάσσονται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο Αθηνών.

6.5.2. Περιγραφή των γεωλογικού καθεστώτος της περιοχής μελέτης

6.5.2.1. Μορφολογικό ανάγλυφο

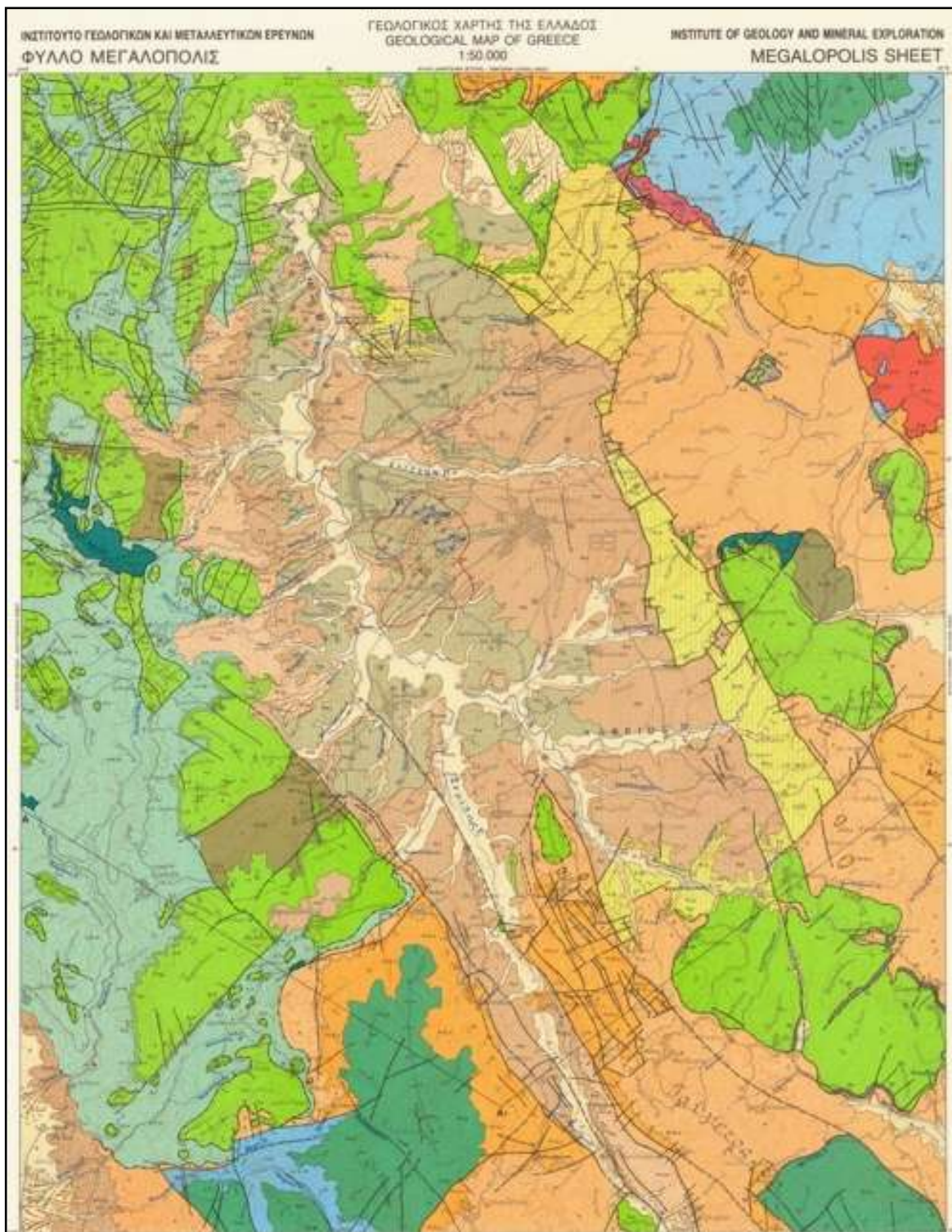
Η υπό διερεύνηση περιοχή αντιστοιχεί στο νοτιοδυτικό τμήμα του Νομού Αρκαδίας, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος σε έκταση νομός της Πελοποννήσου. Η μορφολογική εξέλιξη και ανάπτυξη οφείλεται, κυρίως, στην τεκτονική δράση καθώς και στη διαφορετική λιθολογική σύσταση των σχηματισμών που τη δομούν (Υπουργείο Γεωργίας, 1994). Οι κύριες γεωμορφολογικές ενότητες που απαντούν στο φύλλο “Μεγαλόπολη” είναι: α) Οι μάζες των ασβεστολιθικών ορεινών όγκων, β) Οι λόφοι και οι ημιορεινές περιοχές των τριτογενών ιζημάτων, γ) Οι τεταρτογενείς αποθέσεις των χαμηλών περιοχών και των κλειστών λεκανών των υψιπέδων.

Χαρακτηριστικό γεωμορφολογικό στοιχείο της περιοχής είναι η λεκάνη της Μεγαλόπολης, η οποία αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα που οφείλεται στη Μεταλπική τεκτονική. Χαρακτηρίζεται από τεμαχισμούς των αναδυθειών ξηρών, από ανοδικές, καθοδικές κινήσεις και βυθίσεις τεμαχών που αρχίζουν το Μειόκαινο και ολοκληρώνονται στο Πλειστόκαινο με την παρουσία των πλειστοκαινικών αποθέσεων.

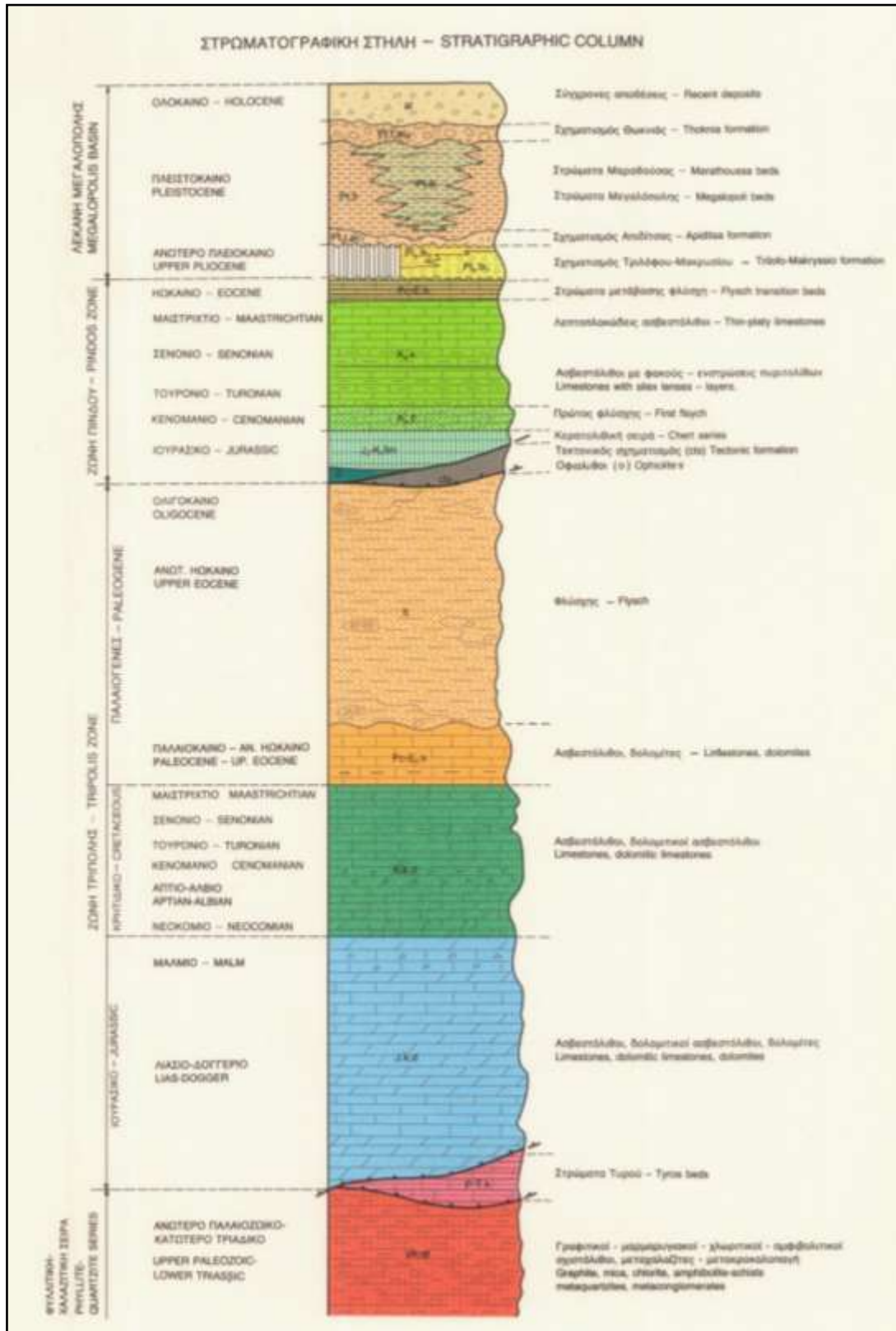
Στα Νότια του οροπεδίου της Τρίπολης σχηματίζεται το οροπέδιο της Ασέας, που κατεβαίνει προς τη λεκάνη της Μεγαλόπολης, η οποία ήταν λίμνη κατά το Τριτογενές και τέλμα κατά το Τεταρτογενές. Οι φυτικές ύλες που συγκεντρώθηκαν εκεί, έχουν σχηματίσει επιφανειακά κοιτάσματα λιγνίτη, τα μεγαλύτερα της Ελλάδας μαζί με αυτά της Πτολεμαΐδας. Τα όρη Λύκαιο (1.421 μέτρα) και Τετράζιο (1.389 μέτρα) κλείνουν τη λεκάνη της Μεγαλόπολης στα δυτικά και τη χωρίζουν από τη σχετικά εύφορη πεδιάδα της Μεσσηνίας (ΔΕΗ, 2010).

6.5.2.2. Γεωλογική σύσταση και δομή

Η γεωλογική δομή της εξεταζόμενης περιοχής είναι ιδιαίτερα σύνθετη. Εκτός από τις Τεταρτογενείς και Νεογενείς αποθέσεις που εμφανίζονται στις ομαλές χαμηλές περιοχές καθώς και στις κοιλάδες των ποταμών και χειμάρρων, παρουσιάζονται ακόμα οι Μεσοζωϊκοί και Τριτογενείς σχηματισμοί. Η γενική στρωματογραφική διάρθρωση του ευρύτερου χώρου δίνεται στον Χάρτη 6.1 και στο Σχήμα 6.1 (στρωματογραφική κολώνα) που αντιστοιχούν στον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδος κλίμακας 1:50.000, φύλλο “Μεγαλόπολη” (Γαπαδόπουλος, ΙΓΜΕ, 1997). Συνοπτικά, οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι οι ακόλουθοι:



Χάρτης 6.1. Γεωλογικός χάρτης Φύλλου Μεγαλόπολης κλίμακας 1:50.000 (Παπαδόπουλος, ΙΓΜΕ, 1997).



Σχήμα 6.1. Στρωματογραφική κολώνα Γεωλογικού Φύλλου Μεγαλόπολης (Παπαδόπουλος, ΙΓΜΕ, 1997).

A) Μεταλπικοί σχηματισμοί του Νεογενούς και Τεταρτογενούς

Αποτελούνται από εναλλαγές αδρομερών υλικών (κροκάλες, κροκαλοπαγή, άμμοι) με πλέον λεπτομερή υλικά (άργιλοι, μάργες, ιλύες). Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν πληρώσει το βύθισμα της Μεγαλόπολης. Σε πρόσφατη γεωλογική περίοδο το βύθισμα αυτό ήταν ένα έλος, ώστε στην επιφάνεια του εδάφους ή λίγο κάτω από αυτήν να αναπτύσσονται οργανικοί άργιλοι ή τύρφη, δηλαδή εδάφη με μεγάλη συμπιεστότητα (καθιζήσεις) και μικρή φέρουσα ικανότητα (Μαρίνος, 2005).

B) Μεσοζωικοί - Τριτογενείς σχηματισμοί

Οι σχηματισμοί αυτοί ανήκουν στις γεωτεκτονικές ζώνες Ωλονού - Πίνδου, Γαβρόβου – Τρίπολης.

1) Ζώνη Ωλονού - Πίνδου:

Χαρακτηρίζεται από ιζήματα βαθείας αύλακας (πελαγικά) με πλαστική τεκτονική. Η εσωτερική δομή της ζώνης αυτής είναι δομή έντονων πτυχώσεων, εφιππεύσεων, επωθήσεων και λεπιών. Ανήκει στο ετερόχθον σύστημα και έχει επωθηθεί πάνω στη ζώνη Γαβρόβου. Τα στρώματα και οι πτυχές έχουν γενική διεύθυνση Β – Ν. Συναντάται στους ορεινούς όγκους και περιλαμβάνει στρώματα μετάβασης του φλύσχη, λεπτοπλακώδεις, πλακώδεις έως στρωματώδεις ασβεστόλιθους, «πρώτο» φλύσχη, κερατολιθική σειρά, μέλη μιας διαμελισμένης οφιολιθικής – ηφαιστειακής σειράς και έναν τεκτονικό σχηματισμό, ο οποίος εμφανίζεται στη βάση του επωθημένου Πινδικού καλύμματος και αποτελείται από υπολείμματα ψαμμιτών, κερατολίθων, εκρηξιγενών πετρωμάτων και κροκαλολατυποπαγών των ασβεστολίθων των ζωνών Τρίπολης και Πίνδου. Τα στρώματα της ζώνης παρουσιάζονται έντονα πολυπτυχωμένα και διαρρηγμένα.

Από τεχνικογεωλογικής πλευράς επισημαίνεται ότι: α) οι ασβεστόλιθοι λόγω του λεπτοπλακώδους χαρακτήρα, των διαρρήξεων και του πλήθους των μικροπτυχών που προέρχονται από την πλαστικότητα της ζώνης και της παρεμβολής σχιστολιθικών ενστρώσεων, προκαλούν προβλήματα αστάθειας σε διάφορες θέσεις της εξεταζόμενης περιοχής του φύλλου Μεγαλόπολη. Επίσης, ο φλύσχη λόγω της ύπαρξης εφιππεύσεων και λεπιώσεων, παρουσιάζεται κερματισμένος, διατμημένος και γενικά ασθενής, άρα επιρρεπής σε ολίσθηση (Μαρίνος, 2005).

2) Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης

Είναι νηρητικής φάσης ζώνη με χαρακτήρα ράχης και έχει δεχθεί την επώθηση της ζώνης Ωλονού – Πίνδου. Περιλαμβάνει τον φλύσχη (κλαστικά ιζήματα που

προέρχονται από τους ασβεστόλιθους της ζώνης Τρίπολης ή της Πίνδου και αποτελούνται κυρίως από λεπτο- έως αδρόκοκκους ψαμμίτες με ενστρώσεις αργίλων, αργιλικών μαργών και παρεμβολές μονόμικτων κροκαλοπαγών), ασβεστόλιθους, τα Στρώματα Τυρού (σειρά ανθρακικών ιζημάτων), που βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με την υποκείμενη φυλλιτική – μεταχαλαζιτική σειρά. Από τεχνικογεωλογικής πλευράς, οι κατολισθήσεις που παρατηρούνται στον φλύσχη Τρίπολης ευνοούνται περισσότερο από την ίδια τη φύση του γεωλογικού σχηματισμού (παρουσία αργιλικού υλικού) και λιγότερο από τον τεκτονικό κερματισμό που είναι ασθενέστερος από ότι στη ζώνη της Πίνδου (Μαρίνος, 2005).

3) Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά

Εμφανίζεται στο ΒΑ τμήμα του Φύλλου, είναι έντονα τεκτονισμένη με κεκλιμένες μικροπτυχές αποτελούμενη από χλωριτικούς, αμφιβολιτικούς, γραφιτικούς, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, μεταχαλαζίτες και μετακροκαλοπαγή. Λόγω του έντονου βαθμού διακλάσεων του σχηματισμού, οι σχηματισμοί στη σειρά αυτή αποσαθρώνονται εύκολα, σχηματίζοντας μεγάλο πάχος μανδύα αποσάθρωσης (πάνω από τρία μέτρα, που είναι διακριτή κλάση βαθμονόμησης παραμέτρου στην παρούσα διατριβή).

6.5.2.3. Τεκτονική

Το τεκτονικό γεγονός που χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή είναι η επώθηση, υπό μορφή τεκτονικών καλυμμάτων, των σχηματισμών της ζώνης Ωλονού – Πίνδου πάνω στους σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης (Καρφάκης, 2004). Λόγω της επωθητικής αυτής κίνησης, που έγινε από τα ανατολικά προς τα δυτικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί και των δύο ζωνών (ιδιαίτερα αυτών της ζώνης Πίνδου) είναι έντονα πτυχωμένοι (δημιουργώντας σύγκλινα και αντίκλινα με άξονες κυρίως Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ/κής διεύθυνσης και στολιδωμένοι ενώ παρουσιάζονται και επιπτευτικές κινήσεις (λεπιώσεις) μεταξύ των στρωμάτων. Οι δομές αυτές διακόπτονται από ρήγματα με επιμήκη ή και εγκάρσια διεύθυνση δημιουργώντας κέρατα και βυθίσματα (τάφρους).

Τα δύσκαμπτα πετρώματα (ιζήματα ηπειρωτικής προέλευσης) της ζώνης Τρίπολης δεν πτυχώνονται εύκολα, οπότε συμβαίνει το φαινόμενο των ρηγματώσεων, οι οποίες στην περιοχή είναι πολύ έντονες. Τα ρήγματα αυτά είναι αποτυπωμένα στο γεωλογικό χάρτη. Τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης

Τρίπολης, είναι μέσο – έως παχυστρωματώδη και έντονα διαρρηγμένα που συντελούν στην έντονη μορφολογία με απότομα (μεγάλες κλίσεις) πρηνή.

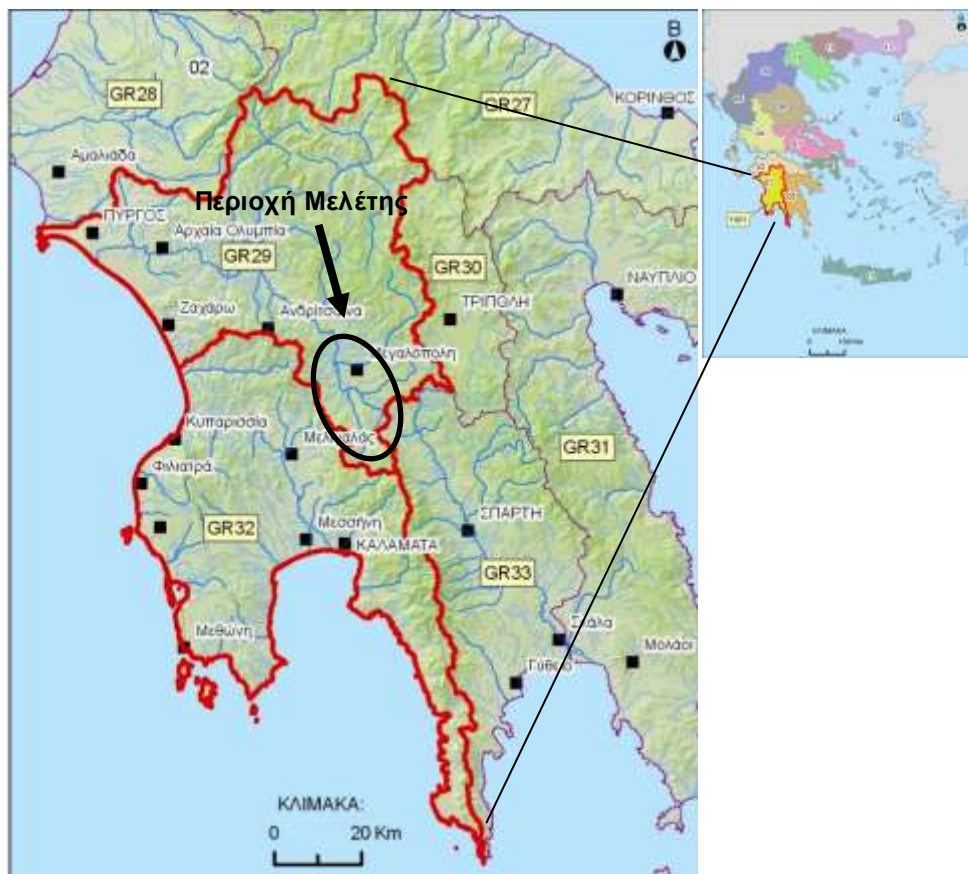
Η έντονη τεκτονική καταπόνηση των ανθρακικών σχηματισμών σε συνδυασμό με τις εναλλαγές διαπερατών και αδιαπέρατων ζωνών λόγω των λεπτιώσεων έχουν συμβάλλει στη διαμόρφωση των επιμέρους υδρογεωλογικών συστημάτων και λεκανών. Πολλές φορές τα κύρια ποτάμια και ρέματα της περιοχής κινούνται κατά μήκος των τεκτονικών αυτών διαρρήξεων.

6.5.2.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου (ΥΔ 01) που αποτελεί ένα από τα δεκατέσσερα υδατικά διαμερίσματα στα οποία διαιρέθηκε ο Ελληνικός χώρος με το Νόμο 1739/1987 (Χάρτης 6.2). Ειδικότερα εντοπίζεται στη Λεκάνη απορροής Αλφειού (GR29), που συγκροτεί τη μια από τις δύο λεκάνες απορροής του συγκεκριμένου υδατικού διαμερίσματος [η άλλη είναι αυτή των Πάμισου – Νέδοντος – Νέδα (GR32)]. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Αλφειού έχει έκταση 3.810 χλμ² και περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη του Αλφειού έκτασης 3.568 χλμ² που αφορά κυρίως την περιοχή μελέτης. Όσον αφορά την υδρολιθολογική ταξινόμηση των απαντώμενων σχηματισμών της εξεταζόμενης περιοχής συναντώνται οι σχηματισμοί του Πίνακα 6.1 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Πίνακας 6.1. Υδρολιθολογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών Λεκάνης Απορροής Αλφειού.

Κοκκώδεις σχηματισμοί	Καρστικοί σχηματισμοί	Ρωγματώδεις σχηματισμοί
Προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης περατότητας	Ανθρακικοί σχηματισμοί υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας	Ρωγματώδεις σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (φλύσχης)
Μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής περατότητας	Ανθρακικοί σχηματισμοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας	Ρωγματώδεις σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι)
Κορήματα κυμαινόμενης υδροπερατότητας		



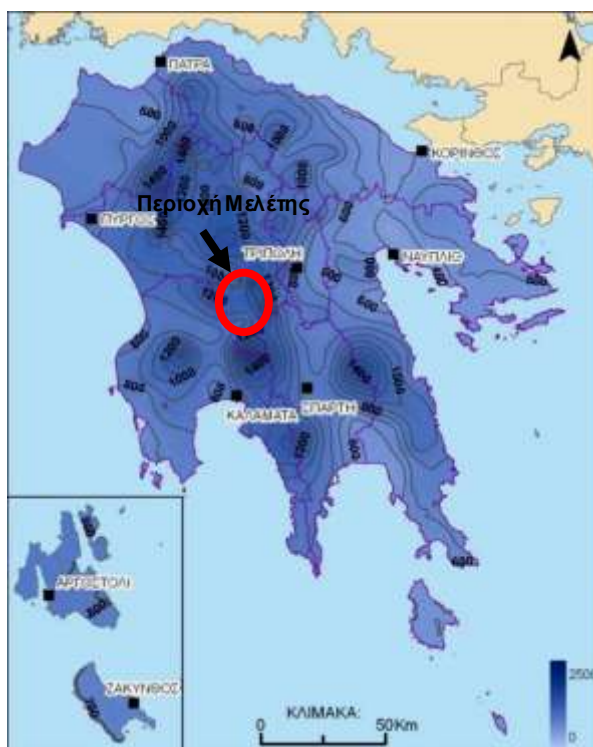
Χάρτης 6.2. Περιοχή μελέτης στις Λεκάνες Απορροής (GR29, GR32) του Υδατικού Διαμερίσματος της Δυτικής Πελοποννήσου (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα βουνά της Αρκαδίας αποτελούν τον βασικό υδροκρίτη της Πελοποννήσου. Από τους κύριους ποταμούς του νομού που εμφανίζονται στην μελετούμενη περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη είναι ο Αλφειός και ο Ελισσών.

Η Μεγαλόπολη βρίσκεται στο κέντρο ενός εύφορου οροπεδίου, του δεύτερου σε έκταση της Αρκαδίας μετά από αυτό της Μαντινείας. Η λεκάνη απορροής της Μεγαλόπολης ή της δυτικής Αρκαδίας, όπως επίσης αποκαλείται, έχει μήκος είκοσι δύο (22) χιλιόμετρα, και πλάτος δέκα (10) χιλιόμετρα. Περιβάλλεται κυρίως από τα όρη Μαίναλο, Ταύγετο και Πάρνωνα αλλά και από μικρότερα βουνά. Ολόκληρη η περιοχή διασχίζεται από τον Αλφειό και τους παραποτάμους του, οι οποίοι σχηματίζουν βαθιές κοιλάδες, διοχετεύουν το υδάτινο φορτίο της λεκάνης απορροής στη θάλασσα και την αποστραγγίζουν εντελώς. Από το Νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής πηγάζει ο ποταμός Ευρώτας. Από γεωργικής άποψης, η λεκάνη απορροής της Μεγαλόπολης είναι η φτωχότερη από τις πεδινές περιοχές της Πελοποννήσου (ΔΕΗ, 2010).

6.5.2.5. Υδρομετεωρολογικά στοιχεία

Λόγω του έντονου ανάγλυφου και του αποκλεισμού από τις θαλάσσιες επιρροές, το κλίμα της εξεταζόμενης περιοχής του Φύλλου Μεγαλόπολη χαρακτηρίζεται ως ορεινό. Έτσι, οι βροχοπτώσεις είναι υψηλότερες από τα δυτικά προς τα ανατολικά, λόγω της σαφούς συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου (Χάρτης 6.3). Τα κατακρημνίσματα στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Αλφειού είναι αρκετά σημαντικά και φθάνουν περίπου τα 1.058mm το χρόνο. Στις ορεινές περιοχές το ύψος κυμαίνεται μεταξύ 1.000mm και 1.200mm (σε κάποιες περιοχές ξεπερνά και τα 1.400mm) ενώ στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης φθάνει τα 1.000mm.



Χάρτης 6.3. Κατανομή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Πελοπόννησο και ειδικότερα στην εξεταζόμενη περιοχή έρευνας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Τα ανωτέρω μέσα ετήσια κατακρημνίσματα αντιστοιχούν κατά προσέγγιση σε έναν όγκο 8,1 δις μ^3 νερού ανά έτος, το οποίο τροφοδοτεί τον υδρολογικό κύκλο της λεκάνης. Οι περισσότερες βροχοπτώσεις παρουσιάζονται κατά τους μήνες Οκτώβριο έως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα τον Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας, τα ανωτέρω περιγραφόμενα γεωμορφολογικά, γεωλογικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά και υδρομετεωρολογικά δεδομένα, απεικονίζονται σε επιμέρους θεματικούς χάρτες, ώστε να γίνει και ποιοτικά εμφανέστερη η σχέση των αντίστοιχων επιλεγμένων παραμέτρων κατολισθητικότητας (που σχετίζονται με τους χάρτες αυτούς) με τις παρατηρούμενες θέσεις αστοχιών πρηνών που μελετώνται στην περιοχή που ορίζει το φύλλο “Μεγαλόπολη”.

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω, κατασκευάστηκαν και καταγράφονται ακολούθως:

α) το μητρώο αλληλεπίδρασης για την εξεταζόμενη περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη”, στο οποίο αφ’ ενός αναφέρονται πολύ συνοπτικά οι αλληλεπιδράσεις των επιλεγμένων παραμέτρων (Πίνακας 6.2), αφ’ ετέρου αποδίδεται η κωδικοποίησή τους (Πίνακας 6.3) με βάση την βαθμονόμηση από 1 (ασθενής αλληλεπίδραση) έως 4 (πολύ ισχυρή αλληλεπίδραση).

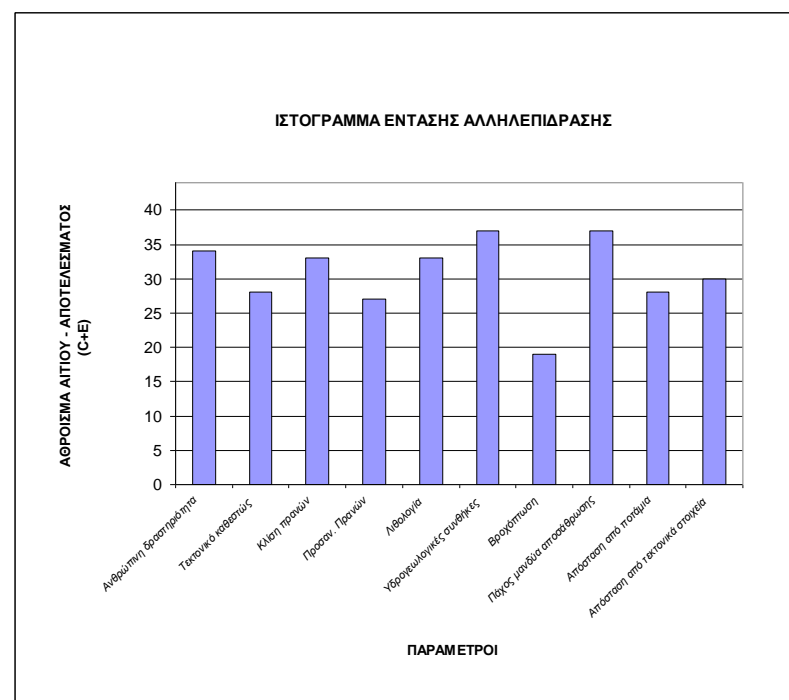
Πίνακας 6.2. Συνοπτική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των επιλεγμένων παραμέτρων της περιοχής του φύλλου “Μεγαλόπολη”.

Τροποποιημένο Rock Engineering System (RES) - ΠΕΡΙΟΧΗ ΦΥΛΛΟΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ										
α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Η ανθρώπινη δραστηριότητα δεν μπορεί να επηρεάσει το τεκτονικό καθεστώς μιας περιοχής	Επηρεάζει ισχυρά την κλίση πρηνών	Σε ένα σύνθετο περιβάλλον, ο προσανατολισμός του πρηνούς μπορεί να καθορισθεί από την παρουσία παρακείμενων σπράγγων	Δεν επηρεάζεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα	Επηρεάζει ελαφρώς το υδρογεωλογικό καθεστώς	Δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Επηρεάζει ισχυρά το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Δεν επηρεάζεται από την απόσταση από δρόμους	Δεν επηρεάζεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα
2	Υψηλές επί τόπου τάσεις επηρεάζουν τη μέθοδο εκσκαφής (π.χ. Λόγω ενός επανερργοποιημένου ρήγματος)	Τεκτονική	Η τεκτονική επηρεάζει ισχυρά την κλίση των πρηνών	Υψηλές τάσεις, οριζόντιας κατεύθυνσης, κοντά στην επιφάνεια μπορεί να καθορίσουν τον προσανατολισμό του πρηνούς	Τα ορογενετικά γεγονότα μπορούν να κατακερματίσουν/διατημήσουν τα πετρώματα/εδάφη.	Το πεδίο των τάσεων αλλάζει την περατότητα	Το τεκτονικό καθεστώς δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Επιδρά πολύ ισχυρά	Επιδρά πολύ ισχυρά	Η γεωλογική ιστορία έχει σχηματίσει τέτοιες γεωμορφολογικές συνθήκες που προκαλούν τον σχημασμό ασυνεχών
3	Επηρεάζεται πολύ ισχυρά από την κλίση των πρηνών	Η κλίση των πρηνών δεν μπορεί να επηρεάσει το τεκτονικό καθεστώς μιας περιοχής	Κλίση πρηνών	Η κλίση επηρεάζει ελαφρώς τον προσανατολισμό ενός πρηνούς	Δεν επηρεάζεται από την κλίση	Όσο πιο μεγάλο είναι το πρηνές, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα	Η κλίση του πρηνούς δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Η κλίση ενός πρηνούς επηρεάζει μετρίως το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Επηρεάζει μέτρια την απόσταση από ποτάμια	Επηρεάζει ελαφρώς την απόσταση από τεκτονικά στοιχεία
4	Επηρεάζει μετρίως την ανθρώπινη δραστηριότητα	Ο προσανατολισμός του πρηνούς επηρεάζει τον προσανατολισμό του επί τόπου τασικού πεδίου	Ο προσανατολισμός επηρεάζει μετρίως την κλίση ενός πρηνούς	Προσανατολισμός Πρηνών	Ο προσανατολισμός του πρηνούς μπορεί να οδηγήσει σε σχετική κίνηση και κατά συνέπεια σε παραμόρφωση βραχώμασας/γαιωδών σχημασμών	Ο προσανατολισμός του πρηνούς επηρεάζει την υπεδάφικη ροή του νερού	Ο προσανατολισμός του ορύγματος ενός δρόμου μπορεί να οδηγήσει σε βροχόπτωση και κατ'επέκταση σε πλημμύρες στο κατάστρωμα του δρόμου	Επηρεάζεται μετρίως από τον προσανατολισμό του πρηνούς	Ο προσανατολισμός του πρηνούς επηρεάζει την εδαφική ροή του νερού	Ο προσανατολισμός του πρηνούς επηρεάζει τη δυνατότητα για αστοχία ρηξισμικών και σχημασμό νέων διακλάσεων
5	Επηρεάζει ισχυρά την ανθρώπινη δραστηριότητα	Επηρεάζει ελαφρώς το τεκτονικό καθεστώς	Η λιθολογία επηρεάζει ισχυρά την κλίση των πρηνών	Η λιθολογία επηρεάζει ισχυρά τον προσανατολισμό των πρηνών	Λιθολογία	Η λιθολογία επηρεάζει πολύ ισχυρά το καθεστώς κίνησης της ροής του νερού	Η λιθολογία δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Επηρεάζεται πολύ ισχυρά από τη λιθολογία	Επηρεάζεται μετρίως από τη λιθολογία	Επηρεάζεται ισχυρά από τη λιθολογία
6	Αύξηση της ροής στις ασυνέχειες μειώνει το ύψος ασφάλειας ενός πρηνούς και οδηγεί σε οξείδωση των στοιχείων υποστήριξης	Δεν επηρεάζει το τεκτονικό καθεστώς	Αύξηση της ροής στις ασυνέχειες μειώνει το ύψος ασφάλειας ενός πρηνούς	Ροή νερού που προέρχεται από κοντινές πηγές τροφοδοσίας καθορίζει τον προσανατολισμό του πρηνούς	Ο ρόλος του νερού επηρεάζει ελαφρώς τη δομή των γεωλογικών υλικών	Υδρογεωλογία	Ο παράγοντας Υδρογεωλογία δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Αλλοίωση των ασυνεχών και αποσάθρωση στην μικροδομή λόγω ροής του νερού	Επηρεάζεται ελαφρώς από την υδρογεωλογία	Επηρεάζεται ελαφρώς από την κίνηση του νερού
7	Επηρεάζει πολύ ισχυρά την ανθρώπινη δραστηριότητα	Η βροχόπτωση δεν επηρεάζει το τεκτονικό καθεστώς	Η βροχόπτωση επηρεάζει ισχυρά την κλίση του πρηνούς	Δεν επηρεάζει τον προσανατολισμό του πρηνούς	Επηρεάζει μέτρια τη δομή των γεωλογικών υλικών	Ισχυρή και παρατεταμένη βροχόπτωση οδηγεί σε αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, σε μείωση της αντοχής των γεωλογικών που επηρεάζονται από πιθανή ολίσθηση	Βροχόπτωση	Επηρεάζεται πολύ ισχυρά από τα κατακρημνίσματα	Δεν επηρεάζεται από την βροχόπτωση	Δεν επηρεάζεται από την βροχόπτωση
8	Επηρεάζεται ισχυρά από το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Δεν επηρεάζει το τεκτονικό καθεστώς	Το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης επηρεάζει ελαφρώς την κλίση του πρηνούς	Δεν επηρεάζεται από το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Δεν επηρεάζεται από το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Η κίνηση του νερού επηρεάζεται ισχυρά από το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	Επηρεάζει ελαφρώς την απόσταση από ποτάμια	Τα αποτελέσματα της αποσάθρωσης μειώνουν τη διατημητική αντοχή των ασυνεχών
9	Επηρεάζεται μέτρια από την απόσταση από ποτάμια	Δεν επηρεάζεται από την παράμετρο “απόσταση από ποτάμια”	Επηρεάζει ελαφρώς την κλίση του πρηνούς	Ροή νερού που προέρχεται από κοντινές πηγές τροφοδοσίας καθορίζει τον προσανατολισμό του πρηνούς	Επηρεάζει ελαφρώς τη δομή των γεωλογικών υλικών	Η απορροή στα πρηνά μπορεί να μεταβάλλει τον υδροφόρο ορίζοντα μιας περιοχής	Δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Η αποσάθρωση προκαλείται από τη ροή του νερού	Απόσταση από ποτάμια	Επηρεάζεται ελαφρώς από την απόσταση από ποτάμια
10	Η εγγύτητα σε τεκτονικά στοιχεία μπορεί να προκαλέσει αστοχία	Δεν επηρεάζει το τεκτονικό καθεστώς	Η απόσταση από τεκτονικά στοιχεία επηρεάζει ισχυρά την κλίση ενός πρηνούς	Η απόσταση από τεκτονικά στοιχεία επηρεάζει ελαφρώς τον προσανατολισμό ενός πρηνούς	Επηρεάζει ελαφρώς τη δομή των γεωλογικών υλικών	Αυξανόμενος αριθμός ασυνεχών προκαλεί αύξηση της περατότητας	Η απόσταση από τεκτονικά στοιχεία δεν επηρεάζει την βροχόπτωση	Επηρεάζει ισχυρά το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης	Ανοίγματα ασυνεχών μεγάλου εύρους οδηγούν σε αυξημένη ροή	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία

Πίνακας 6.3. Μητρώο αλληλεπίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων για την περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη”.

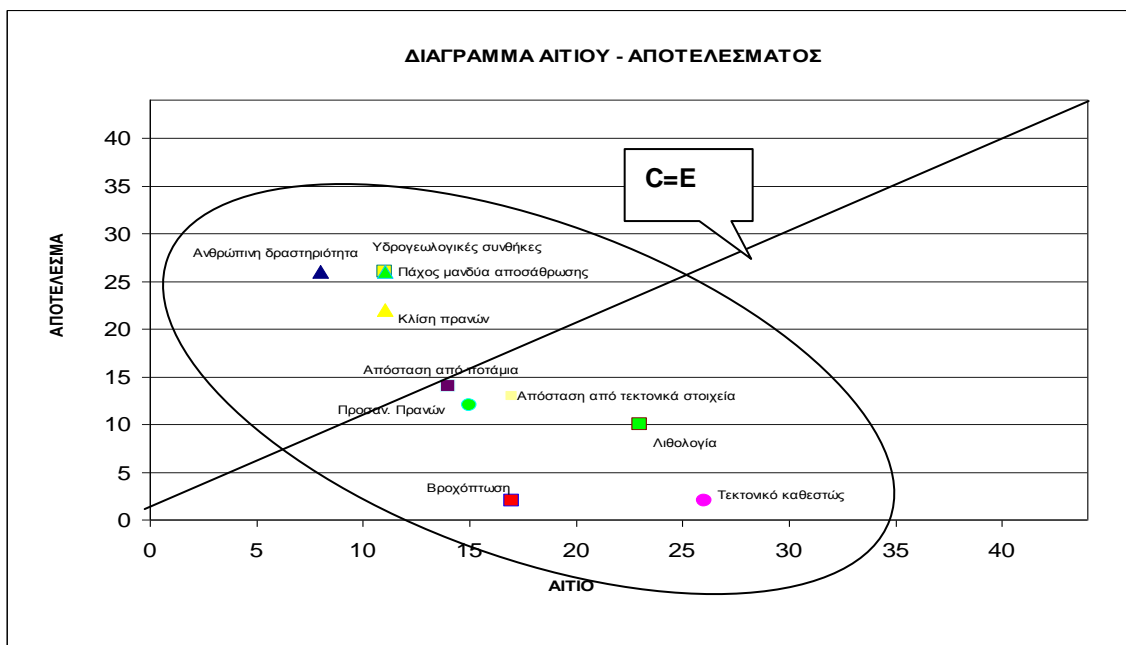
Τροποποιημένο Rock Engineering System (RES) - ΠΕΡΙΟΧΗ ΦΥΛΛΟΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ																	
α/α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Αίτιο (Cause - C)	C+E	C-E	Παράμετροι	$\frac{ C+E }{\sum(C+E)} \cdot 100\%$	Μέγιστη πηγή βαθμολόγησης	Σταθμικός Συντελεστής
1	Ανθρώπινη δραστηριότητα	0	3	1	0	1	0	3	0	0	8	34	-18	Ανθρώπινη δραστηριότητα	11.11	4	2.78
2	3	Τεκτονικό καθεστώς	3	1	4	3	0	4	4	4	26	28	24	Τεκτονικό καθεστώς	9.15	4	2.29
3	4	0	Κλίση πρηνών	1	0	1	0	2	2	1	11	33	-11	Κλίση πρηνών	10.78	4	2.70
4	2	1	2	Προσαν. Πρηνών	1	2	2	2	2	1	15	27	3	Προσαν. Πρηνών	8.82	4	2.21
5	3	1	3	3	Λιθολογία	4	0	4	2	3	23	33	13	Λιθολογία	10.78	4	2.70
6	2	0	2	2	1	Υδρογεωλογικές συνθήκες	0	2	1	1	11	37	-15	Υδρογεωλογικές συνθήκες	12.09	4	3.02
7	4	0	3	0	2	4	Βροχόπτωση	4	0	0	17	19	15	Βροχόπτωση	6.21	4	1.55
8	3	0	2	0	0	3	0	Πάχος μονόα αποσάθρωσης	1	2	11	37	-15	Πάχος μονόα αποσάθρωσης	12.09	4	3.02
9	2	0	1	3	1	4	0	2	Απόσταση από ποτάμια	1	14	28	0	Απόσταση από ποτάμια	9.15	4	2.29
10	3	0	3	1	1	4	0	3	2	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	17	30	4	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	9.80	4	2.45
Αποτέλεσμα (Effect - E)	26	2	22	12	10	26	2	26	14	13		306			100.00	32	25.00

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται το ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης των δέκα επιλεγμένων παραμέτρων.

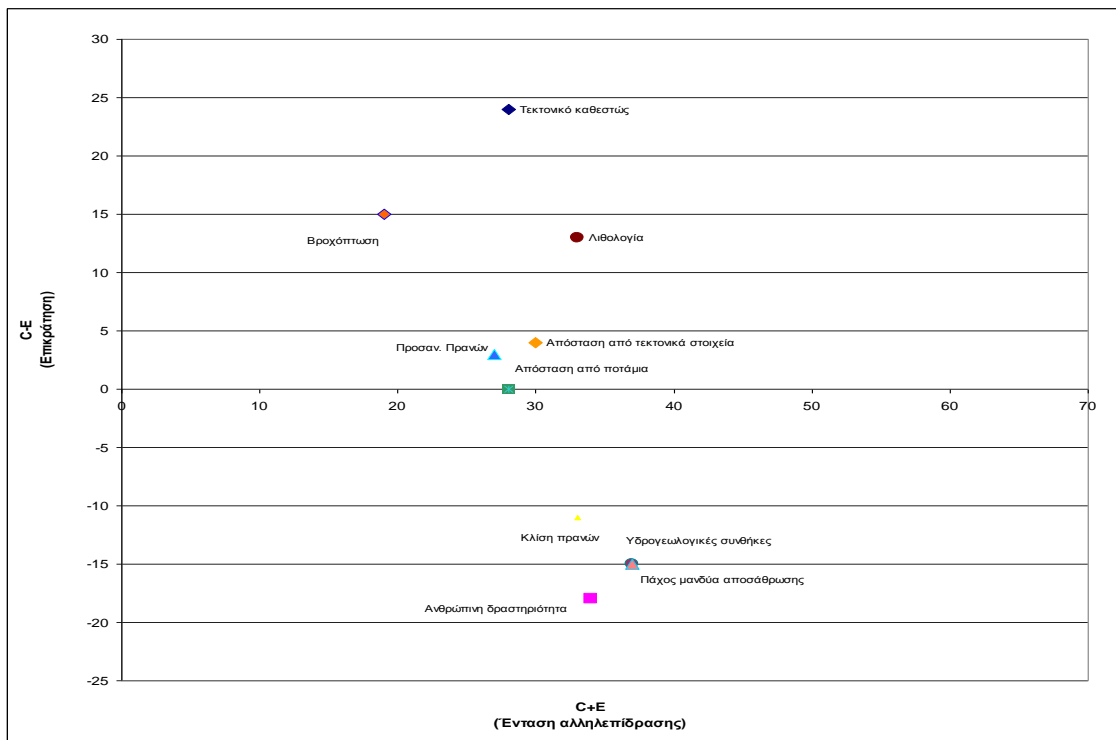


Σχήμα 6.2. Ιστόγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.

Από τον Πίνακα 6.3, προκύπτει το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (Σχήμα 6.3) καθώς και το διάγραμμα (C+E) – (C-E), στο οποίο υπάρχει καλύτερη εικόνα αποτύπωσης της περισσότερο αλληλεπιδραστικής παραμέτρου και της παραμέτρου με τη μεγαλύτερη επικράτηση (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.3. Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για το φύλλο “Μεγαλόπολη”.



Σχήμα 6.4. Διάγραμμα έντασης αλληλεπίδρασης – επικράτησης για το φύλλο “Μεγαλόπολη”.

Μελετώντας, αναλυτικότερα, τα δύο ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 6.3 & 6.4), προκύπτει ο Πίνακας 6.4 καθώς και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Πίνακας 6.4. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές αλληλεπίδρασης και επικράτησης για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.

Περισσότερο αλληλεπιδραστική παράμετρος	$(C+E)_{max}$	37	Υδρογεωλογικές συνθήκες, Πάχος μανδύα αποσάθρωσης
Λιγότερο αλληλεπιδραστική παράμετρος	$(C+E)_{min}$	19	Βροχόπτωση
Παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{max}$	24	Τεκτονικό καθεστώς
Παράμετρος με τη μικρότερη τιμή επικράτησης	$(C-E)_{min}$	-18	Ανθρώπινη δραστηριότητα

Από το Σχήμα 6.3 διαπιστώνεται ότι το νέφος των σημείων είναι κάθετο στη γραμμή $C=E$, άρα όλες οι επιλεγμένες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Επίσης, παρατηρείται από τον Πίνακα 6.4 και το Σχήμα 6.4, ότι οι περισσότερο αλληλεπιδραστικές παράμετροι είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες και το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης. Η παράμετρος που κυριαρχεί (επικρατεί) είναι το τεκτονικό καθεστώς, κάτι που αποδεικνύεται από την έντονη παρουσία των ρηγμάτων και των επιπτεύσεων – επωθήσεων λόγω των δύο σημαντικών γεωτεκτονικών ζωνών που εμφανίζονται στο Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη” (Ενότητα Πίνδου, Ενότητα Τρίπολης) ενώ η παράμετρος με τη μικρότερη επίδραση είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Σημειώνεται ότι οι τιμές της κωδικοποίησης που φέρει ο Πίνακας 6.3 είναι με βάση την βιβλιογραφική διερεύνηση της εξεταζόμενης περιοχής, την εμπειρία και την έρευνα από ανάλογες μελέτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας στην Ελλάδα και διεθνώς. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι ναι μεν η ανθρώπινη δραστηριότητα στην παρούσα έρευνα για το φύλλο “Μεγαλόπολη” δείχνει να έχει τη μικρότερη επίδραση προς το παρόν, αλλά είναι δυνητικά μια παράμετρος που μπορεί να ανατρέψει αυτή την εικόνα λόγω των περιπτώσεων δράσης που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα και σαφώς λόγω της ερμηνείας που δίνεται στο Σχήμα 6.3.

6.6 Η χρήση των παραμέτρων σε χάρτες με βάση τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Για τη μελέτη της κατολισθητικής επιδεκτικότητας χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (1997) του φύλλου “Μεγαλόπολη” κλίμακας 1:50.000, ο οποίος σαρώθηκε και έγινε μετατροπή του σε ψηφιακή μορφή συγκεκριμένου format εικόνας (Tavoularis et al., 2017). Στη συνέχεια, αφού εισήχθηκε στο Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα (Geographical Information System ή GIS) Arc Info της εταιρείας ESRI έκδοσης 10.2.2, πραγματοποιήθηκε η γεωμετρική του διόρθωση. Η αναγωγή αφορούσε στην αντιστοίχιση των συντεταγμένων των άκρων του ψηφιακού φύλλου – χάρτη με τις αντίστοιχες συντεταγμένες των ίδιων σημείων στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87 από τους πίνακες συντεταγμένων της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.), με στόχο την απόδοση πραγματικών επίγειων συντεταγμένων. Ο γεωαναφερμένος, πλέον, γεωλογικός χάρτης χρησιμοποιήθηκε με αυτόν τον τρόπο ως υπόβαθρο, χρήσιμο, σε περαιτέρω επεξεργασίες με άλλα δεδομένα αυτής της διατριβής.

Σε δεύτερη φάση ακολούθησε η εισαγωγή των δεδομένων στο σύστημα, με αποτύπωση και αποθήκευσή τους. Σε λίγες περιπτώσεις τα δεδομένα προήρθαν από έτοιμα ψηφιακά αρχεία, ενώ το μεγαλύτερο τμήμα των δεδομένων χρειάστηκε μετατροπή της γεωλογικής, γεωμορφολογικής κ.λ.π. πληροφορίας από χάρτες και έρευνες σε μορφή αποδεκτή από το Γ.Σ.Π. Κύρια, έγινε συγκέντρωση γεωλογικών, τεκτονικών και λοιπών δεδομένων (και σε μορφή χαρτών) για την περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.

Σε μια ανάλυση κατολισθητικής επιδεκτικότητας, σημαντικό στάδιο αποτελεί η δημιουργία μιας χωρικής βάσης δεδομένων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), στην οποία περιέχονται οι θέσεις των κατολισθήσεων και οι παράγοντες που συνδέονται με αυτές (Tsangaratos and Rozos, 2013). Η χρήση των ΓΣΠ παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την μοντελοποίηση των κατολισθητικών φαινομένων από τη στιγμή που η συλλογή, διαχείριση και ανάλυση των σχετικών δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με μεγαλύτερη ευκολία και οικονομικότερα. Όλα τα ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία των παραγόντων που συνέβαλαν στο κατολισθητικό καθεστώς, όπως τοπογραφικά χαρακτηριστικά (π.χ. κλίση και προσανατολισμός πρανών), υδρολογικά δεδομένα (π.χ. υδρογραφικό δίκτυο), γεωλογικά στοιχεία (π.χ.

λιθολογία, τεκτονικά στοιχεία) και περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. βροχόπτωση, ανθρωπογενείς παράγοντες) συλλέχθηκαν και αρχειοθετήθηκαν. Μετά την κατασκευή της χωρικής βάσης δεδομένων, ακολούθησε η χωρική ανάλυση με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την εξαγωγή των βαρών που αποδίδονται σε κάθε παράμετρο. Η επιλογή της μεθόδου βασίστηκε στη διαθεσιμότητα και ποιότητα των δεδομένων καθώς και στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αφού αποσαφηνίσθηκαν τα ανωτέρω, όλα τα δεδομένα για να αναλυθούν και να απεικονισθεί ο τελικός παραγόμενος χάρτης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας έπρεπε από διανυσματικής μορφής να μετατραπούν σε ψηφιδωτή μορφή. Έτσι, για την υλοποίηση της μεθοδολογίας του RES μέσω των ΓΣΠ για την εύρεση του δείκτη αστάθειας και την ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής μελέτης, αρχικά όσα δεδομένα ήταν σε διανυσματική μορφή μετατράπηκαν σε μορφή raster (ψηφιδωτή μορφή με μέγεθος pixel 30m, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό για χάρτες κλίμακας 1:50.000) και στη συνέχεια (πλέον όλα τα ψηφιδωτά δεδομένα) επαναταξινομήθηκαν με βάση την κατηγοριοποίηση (από 1 έως 4) που δόθηκε για την κατολισθητική επιδεκτικότητα στην εισαγωγή του 5^{ου} Κεφαλαίου. Στη συνέχεια αποδίδεται συνοπτικά η διαδικασία μετατροπής των αρχικών δεδομένων σε ψηφιδωτή μορφή που είναι αναγκαία για την περαιτέρω χωρική ανάλυση και την παραγωγή των επιμέρους θεματικών χαρτών, η αλληλεπίθεση των οποίων θα σχηματίσει τον τελικό ζητούμενο χάρτη της πρόγνωσης αστοχίας πρανών της εξεταζόμενης περιοχής του Φύλλου Μεγαλόπολη.

6.6.1. Απόσταση από οδικό δίκτυο

Odiko diktyo (διανυσματική μορφή) → feature to raster (μετατροπή από διανυσματική σε ψηφιδωτή μορφή) → odiko diktyo_rast → Euclidean Distance (εργαλείο απόστασης) → odiko diktyo_dist → reclassify (επαναταξινόμηση) → odiko diktyo_rec.

6.6.2. Τεκτονικό καθεστώς

Για το συγκεκριμένο διανυσματικό επίπεδο (layer), το μόνο που απαιτήθηκε να γίνει ήταν αρχικά η μετατροπή του σε ψηφιδωτό και στη συνέχεια η επαναταξινόμησή του σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας που έχει ήδη αναφερθεί (Πίνακας 5.2). Δηλαδή, tectonic regime → feature to raster → tectonic regime_rast → reclassify → tectonic regime_rec.

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 5.2 καταγράφονται πέντε κλάσεις για την βαθμονόμηση του τεκτονικού καθεστώτος, αλλά πρακτικά στο εξεταζόμενο φύλλο “Μεγαλόπολη” και στον παραγόμενο χάρτη με χρήση ΓΣΠ, εμφανίζονται τέσσερις, οι ακόλουθες: Ασθενές, Ισχυρό, Πολύ ισχυρό και Εντατικό τεκτονικό καθεστώς.

6.6.3. Κλίση πρανών

Από το αρχικό επίπεδο των ισοϋψών, έγινε μετατροπή σε δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (tin), το οποίο μετατράπηκε στο ψηφιδωτής μορφής επίπεδο slope. Στη συνέχεια το επίπεδο αυτό επαναταξινομήθηκε σε slope_rec.

6.6.4. Προσανατολισμός πρανών

Από το αρχικό επίπεδο των ισοϋψών, έγινε μετατροπή σε δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (tin), το οποίο μετατράπηκε στο ψηφιδωτής μορφής επίπεδο aspect. Στη συνέχεια το επίπεδο αυτό επαναταξινομήθηκε σε aspect_rec.

6.6.5. Λιθολογία

Ομοίως, οι γεωλογικοί σχηματισμοί ακολουθούν μια ανάλογη διαδικασία και συγκεκριμένα: geology → feature to raster → geology_rast → reclassify → geology_rec.

6.6.6. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η αντίστοιχη γεωεπεξεργασία είναι: υδρολιθολογικός χάρτης (σε διανυσματική μορφή) → feature to raster → hydr_rast → reclassify → hydr_rec.

6.6.7. Βροχόπτωση

Επειδή για την παραγωγή του θεματικού χάρτη της βροχόπτωσης δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς στον ευρύτερο χώρο της εξεταζόμενης περιοχής, κρίθηκε σκόπιμο, για να παραχθεί ο σχετικός ψηφιοποιημένος χάρτης, να γίνει γεωστατιστική επεξεργασία με βάση τους υφιστάμενους σταθμούς με το ακόλουθο σκεπτικό. Δημιουργήθηκαν επιπλέον τυχαία σημεία στο φύλλο “Μεγαλόπολη”, τα οποία παίζουν το ρόλο επιπρόσθετων μετεωρολογικών σταθμών (ώστε να μεγαλώσει η βάση δεδομένων) και στη συνέχεια αφού έλαβαν υψομετρικά χαρακτηριστικά και τιμές (χιλιοστά βροχόπτωσης) με βάση τους γειτονικούς υφιστάμενους μετεωρολογικούς σταθμούς (όπως περιγράφει η θεωρία της γεωστατιστικής), προέκυψαν τιμές βροχόπτωσης και για τους νέους δημιουργημένους (για τις ανάγκες της διατριβής) σταθμούς. Στη συνέχεια έγινε επαναταξινόμηση των παραγόμενων τιμών με βάση την κατηγοριοποίηση που έχει αναφερθεί στον Πίνακα 5.2. Το τελικό ψηφιδωτό

επίπεδο είναι το rainfall_rec. Σημειώνεται ότι τα διαθέσιμα δεδομένα πάνω στα οποία στηρίχθηκε η γεωστατιστική επεξεργασία βασίσθηκαν σε στοιχεία από τα αρχεία της Δ/σης Υδρογεωλογίας του Υπουργείου Γεωργίας (2015), από τεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ για την υδρογεωλογική αναγνώριση περιοχών του Φύλλου Μεγαλόπολης (Μαραβέγιας, 2009), από εργασίες των Μπουτίνα (2012) και Φαρμακάκη (2012) καθώς και από τη ΔΕΗ (2010).

6.6.8. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

Αν και σύμφωνα με ερευνητές (Segoni et al., 2009, Segoni et al., 2012), είναι δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός του εύρους του πάχους του μανδύα αποσάθρωσης για περιοχές μεσαίας κλίμακας (για παράδειγμα 1:50.000, όπως στην εξεταζόμενη περιοχή της διατριβής), εν τούτοις, έγινε έλεγχος της εμφάνισης του πάχους μανδύα αποσάθρωσης στην περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη”, με βάση: α) τον εδαφολογικό χάρτη της Ελλάδας κλίμακας 1:50.000 (Σχινάς κ.α., 1989), β) τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται σε αυτό το φύλλο, την από βιβλιογραφία και εμπειρία δυνατότητα αποσάθρωσής των και τί τιμές πάχους μπορούν να παράξουν καθώς και γ) διάφορες εκθέσεις (υδρογεωλογικές, τεχνικογεωλογικές) που έχουν εκπονηθεί από το ΙΓΜΕ Αθήνας και Παράρτημα Τρίπολης, στις οποίες ανάμεσα σε άλλα περιγράφονται τα ευρήματα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, φρέατα, υδρογεωτρήσεις και επιτόπια τεχνικογεωλογική αναγνώριση (Μαραβέγιας, 1987, 1988, Κουμαντάκης κ.α., 2004, Κανάρης και Πογιατζή, 2008, Νικολάου και Κυνηγαλάκη, 2008, Μαραβέγιας, 2010).

Αφού, λοιπόν, προσδιορίσθηκε (διανυσματικά) στον συγκεκριμένο θεματικό χάρτη το εύρος κύμανσης του πάχους σύμφωνα με την βαθμονόμηση του Πίνακα 5.2, στη συνέχεια έγινε μετατροπή των διανυσματικών δεδομένων σε ψηφιδωτή μορφή και ακολούθως επαναταξινόμηση. Το τελικό παραγόμενο επίπεδο είναι το depthsoil_rec.

6.6.9. Απόσταση από κοίτες ρεμάτων

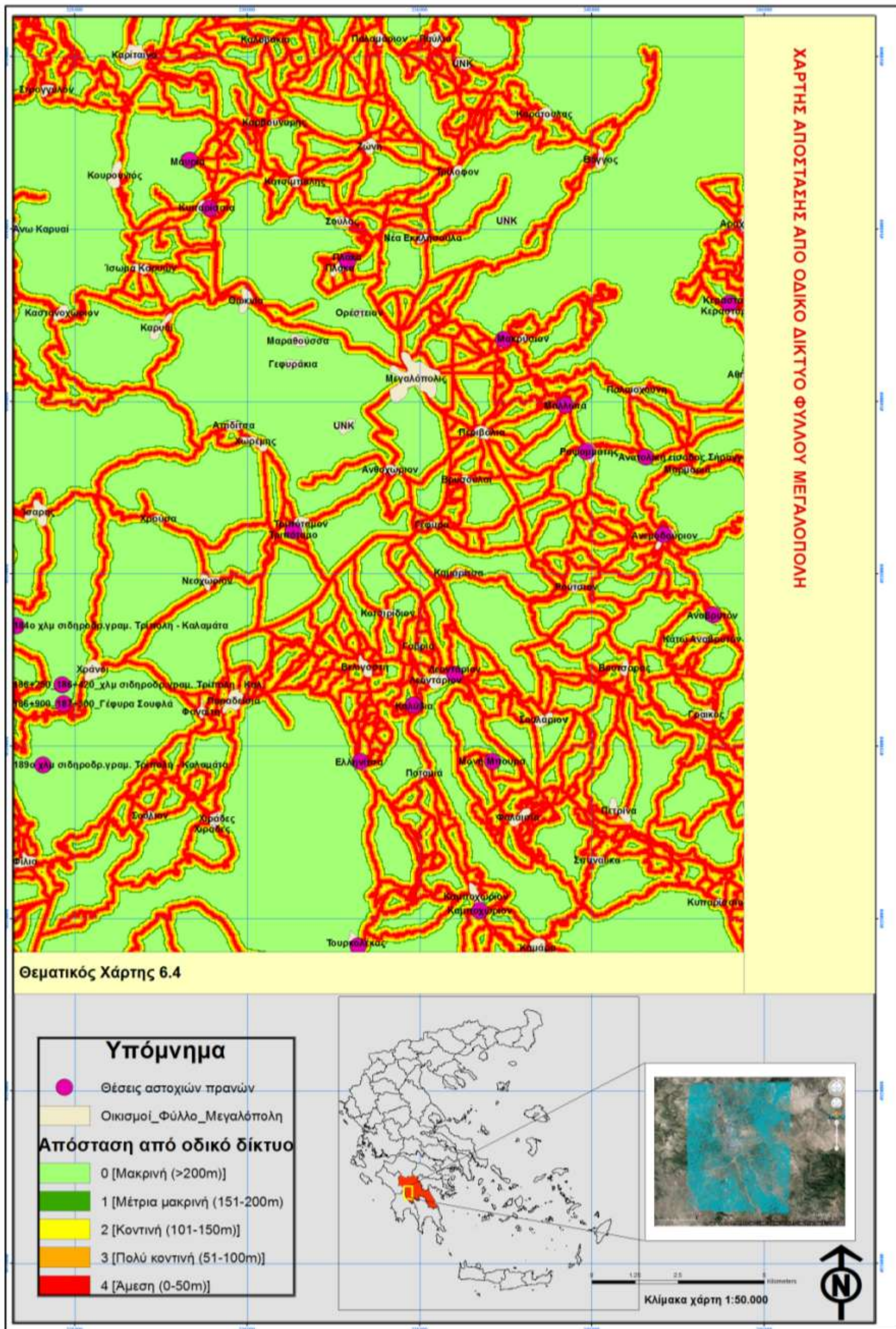
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη: ρέματα → feature to raster → remata_rast → Euclidean Distance → remata_dist → reclassify → remata_rec.

6.6.10. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία:

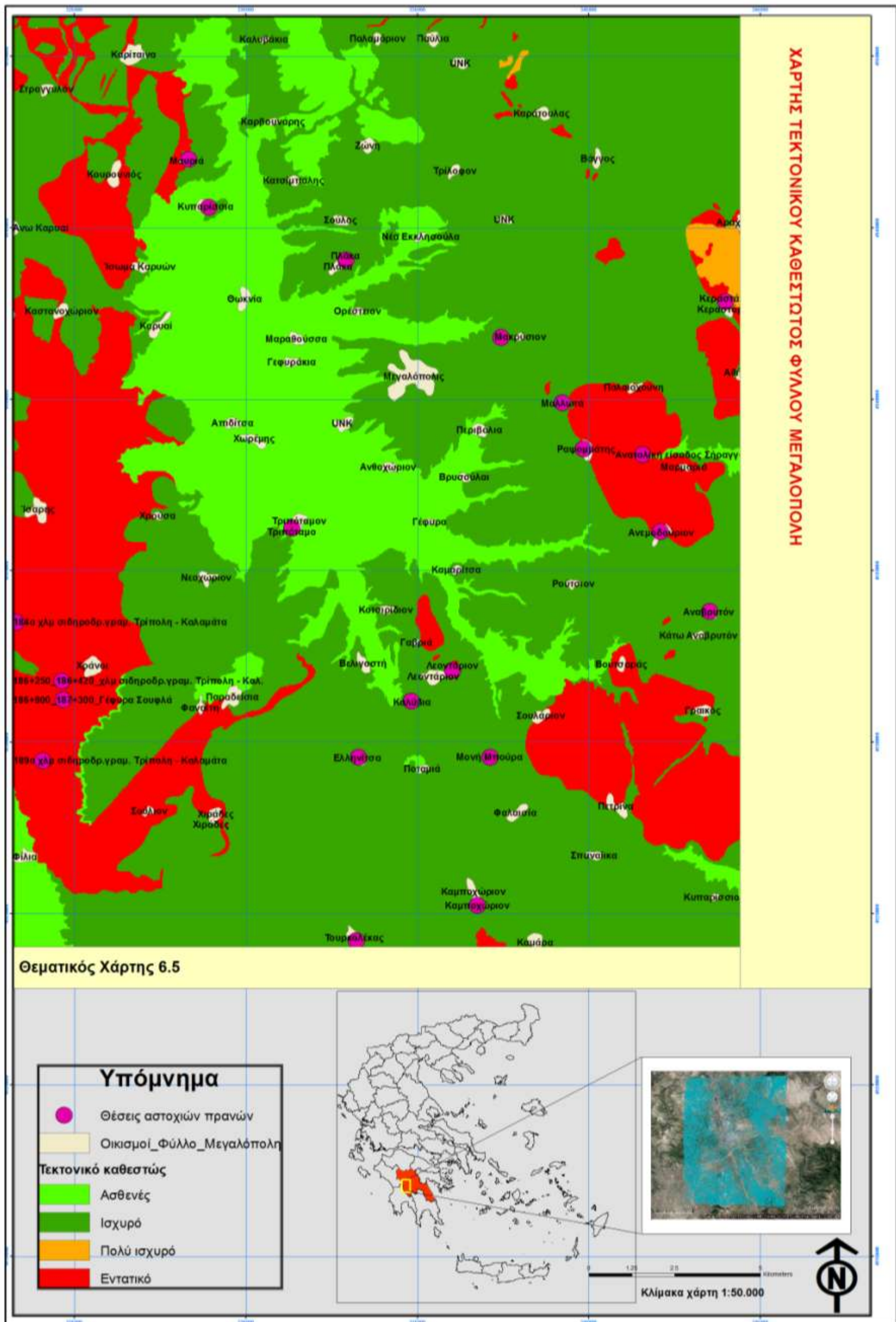
Από αυτήν την παράμετρο, σημασία για την εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας έχει το εύρος της απόστασης των υφιστάμενων ή/και πιθανών

ρηγμάτων, εφιππεύσεων, επωθήσεων και γενικά τεκτονικών γραμμών. Άρα, μετά την μετατροπή του διανυσματικού αρχείου (ρήγματα.shp) σε ψηφιδωτό (rigmata_rast), με βάση το εργαλείο (Euclidean Distance), προκύπτει το επίπεδο rigmata_dist, το οποίο στη συνέχεια επαναταξινομείται σε tecton_rec.

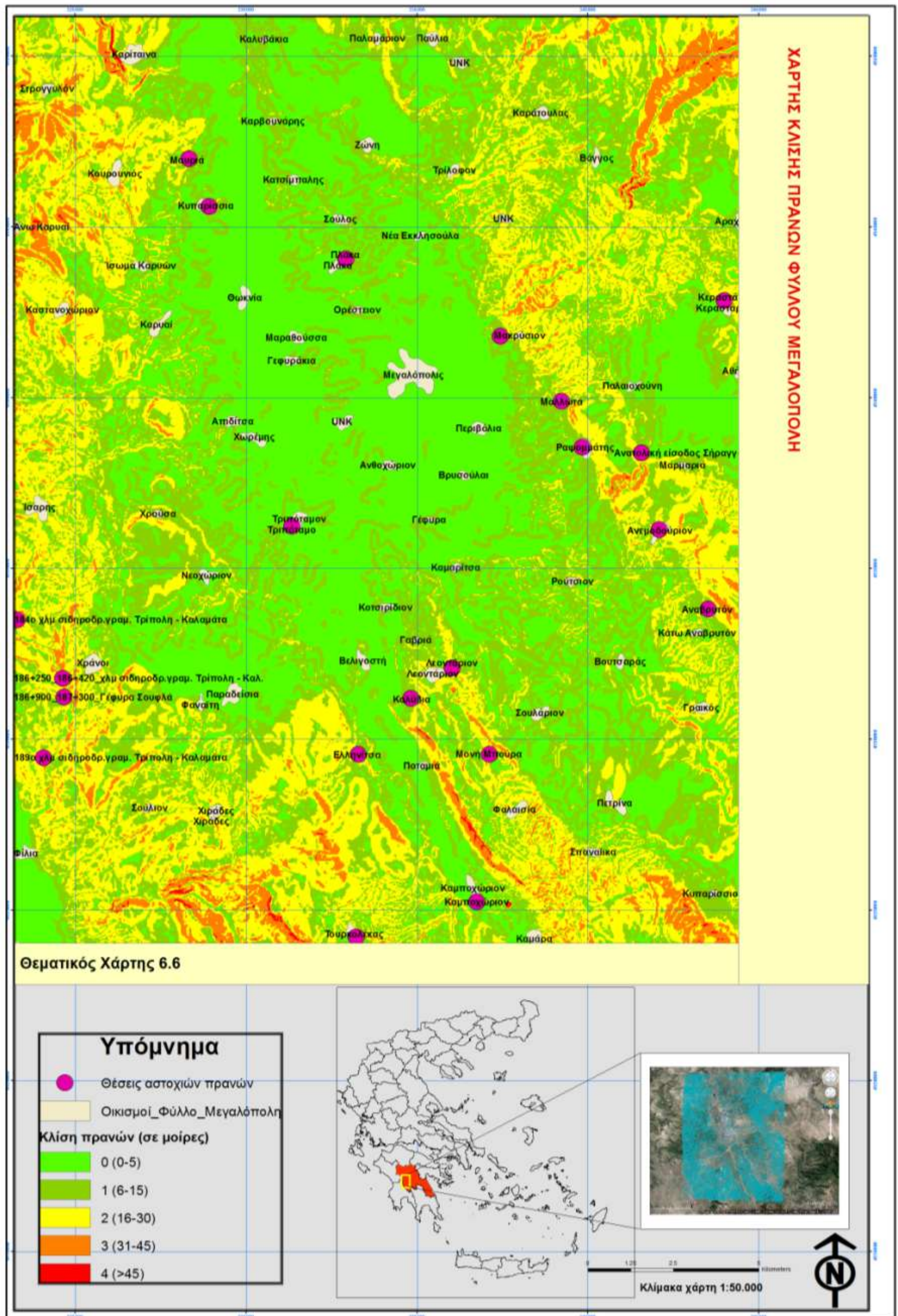
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι επιμέρους θεματικοί χάρτες (Θεματικοί χάρτες 6.4 έως και 6.13) που απεικονίζουν την βαθμονόμηση των αντίστοιχων παραμέτρων που συντελούν, κατά την διατριβή, στην πρόγνωση της αστάθειας των πρανών με την εύρεση του δείκτη αστάθειας μέσω της μεθοδολογίας RES.



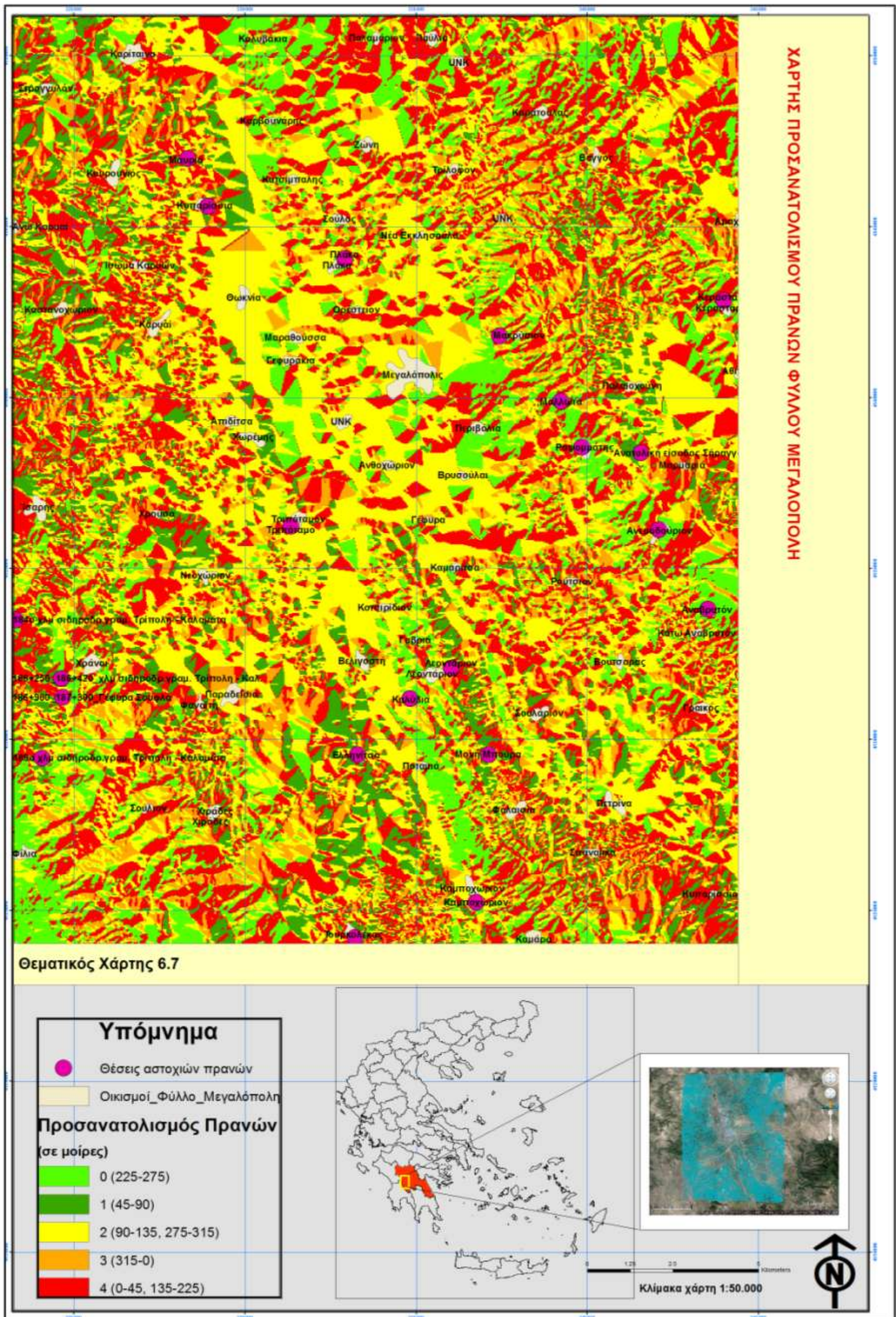
Χάρτης 6.4. Απόσταση από Οδικό Δίκτυο.



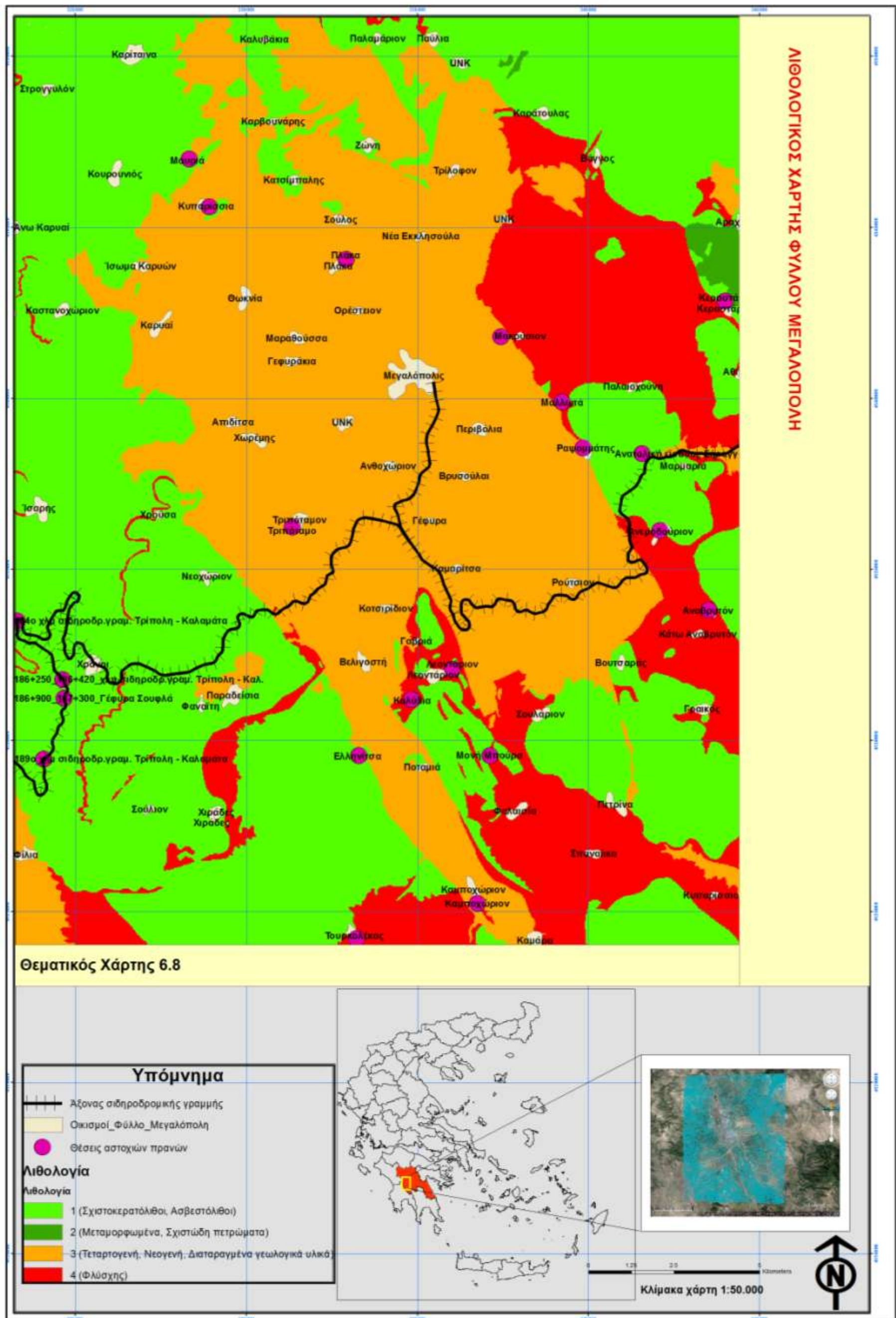
Χάρτης 6.5. Τεκτονικό καθεστώς.



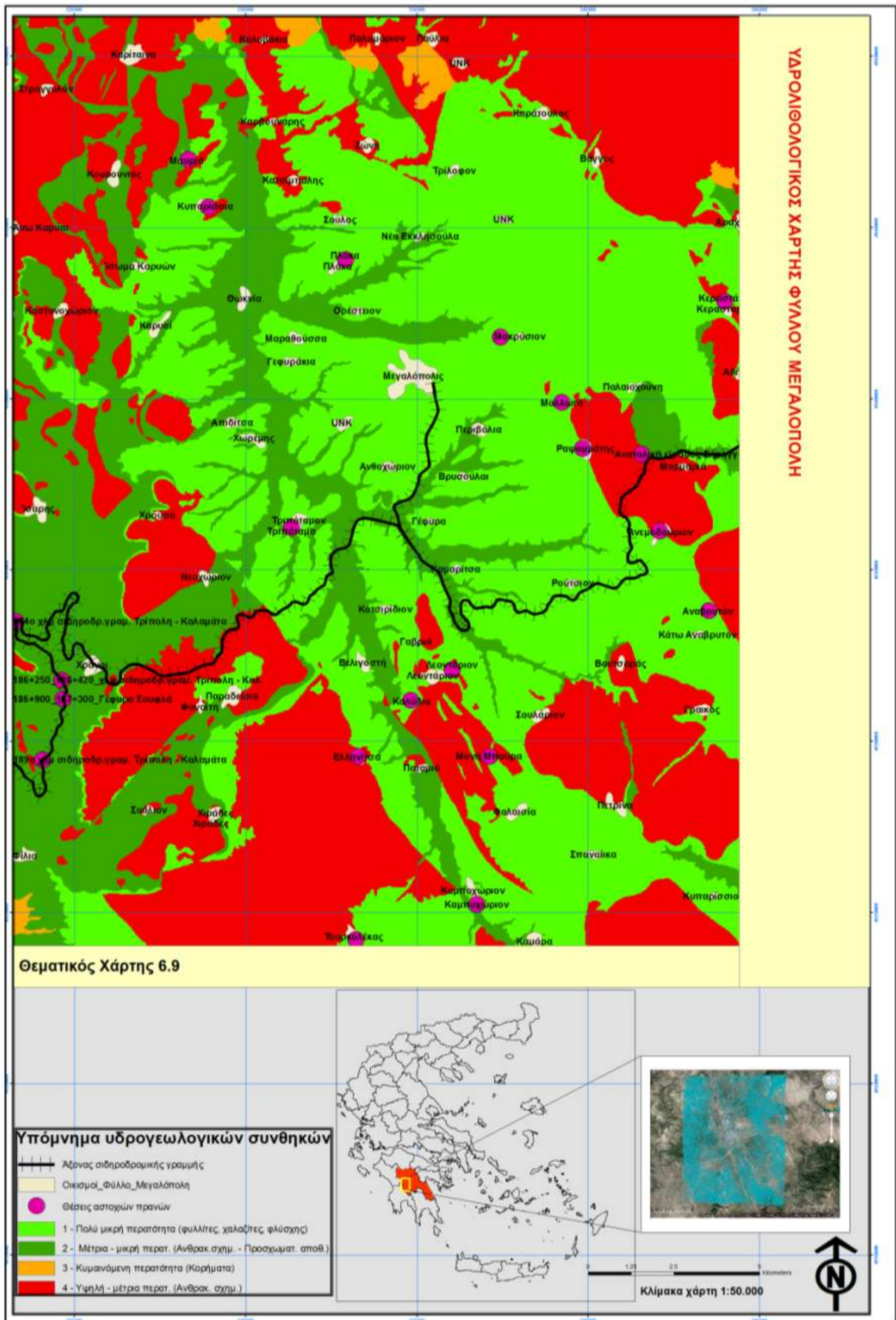
Χάρτης 6.6. Κλίσεις Πρανών.



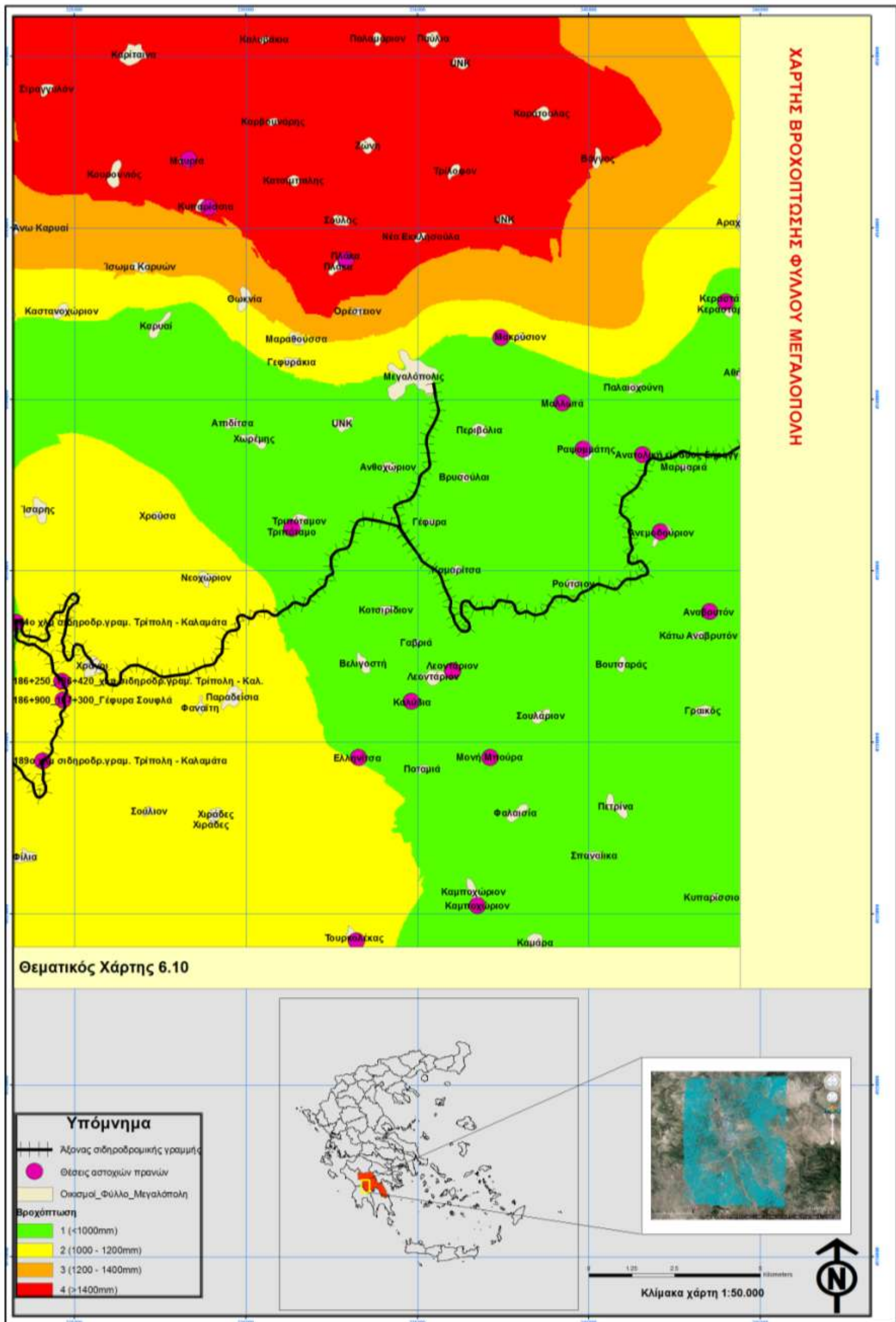
Χάρτης 6.7. Προσανατολισμός Πρανών.



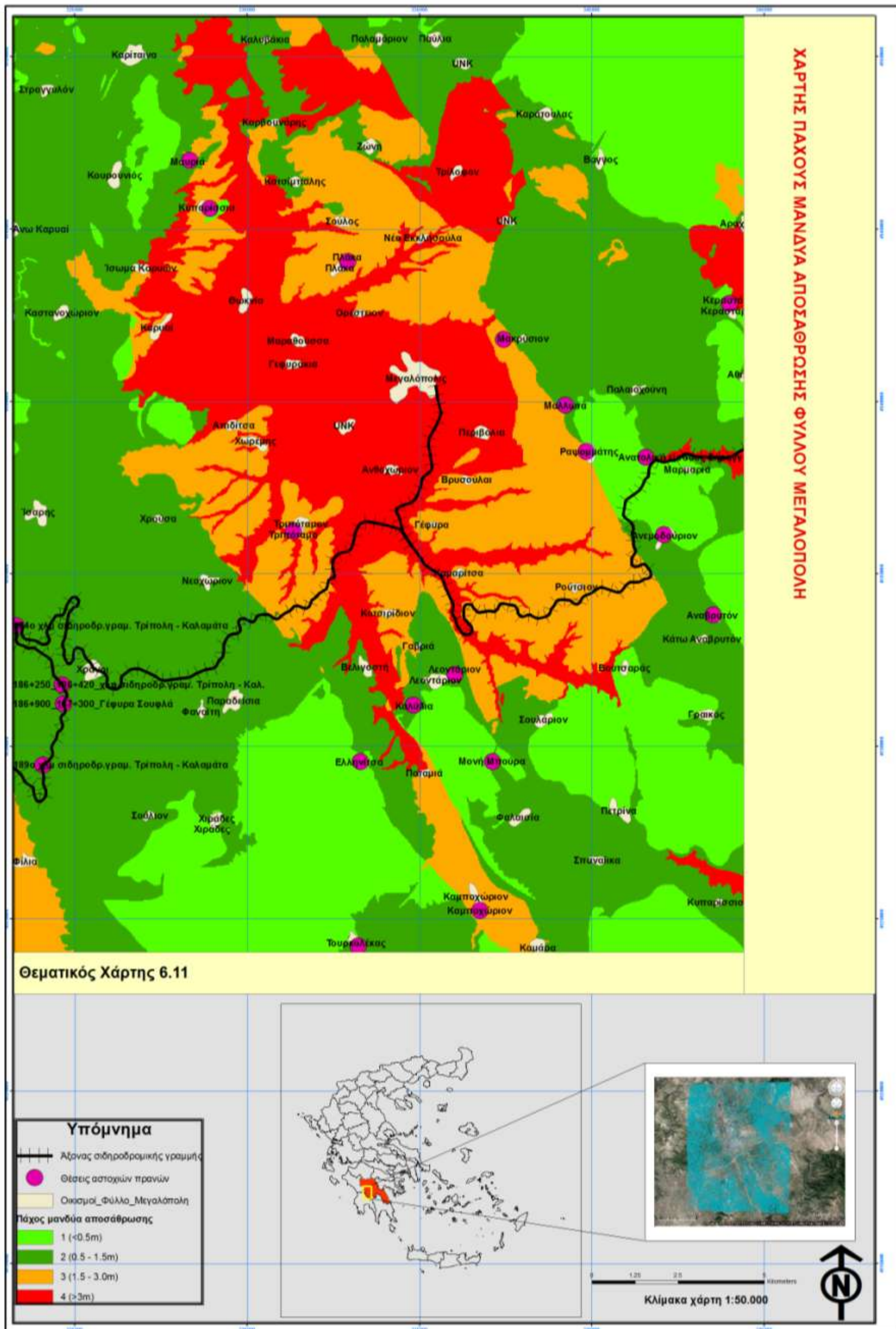
Χάρτης 6.8. Λιθολογικός Χάρτης.



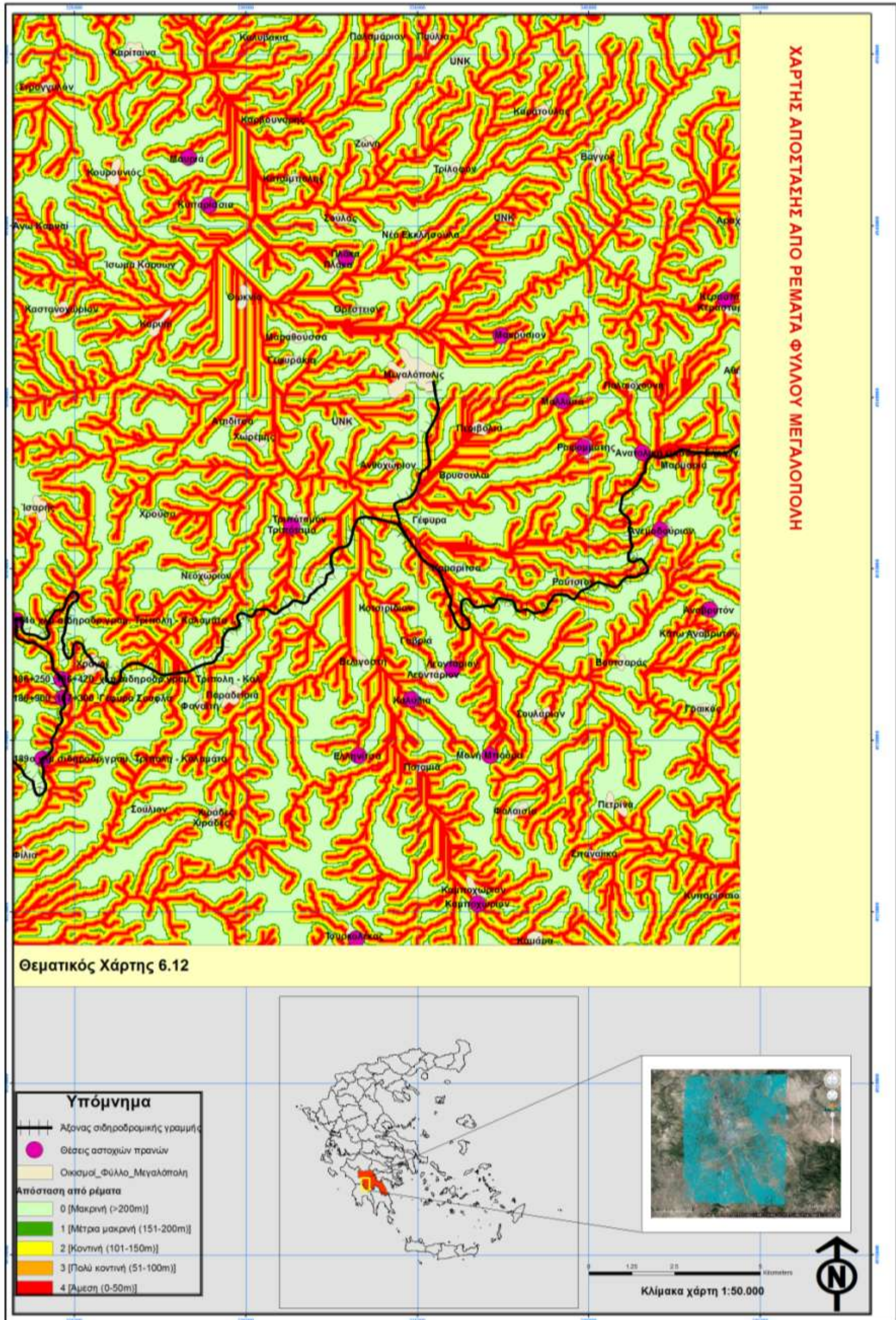
Χάρτης 6.9. Υδρολιθολογικός χάρτης.



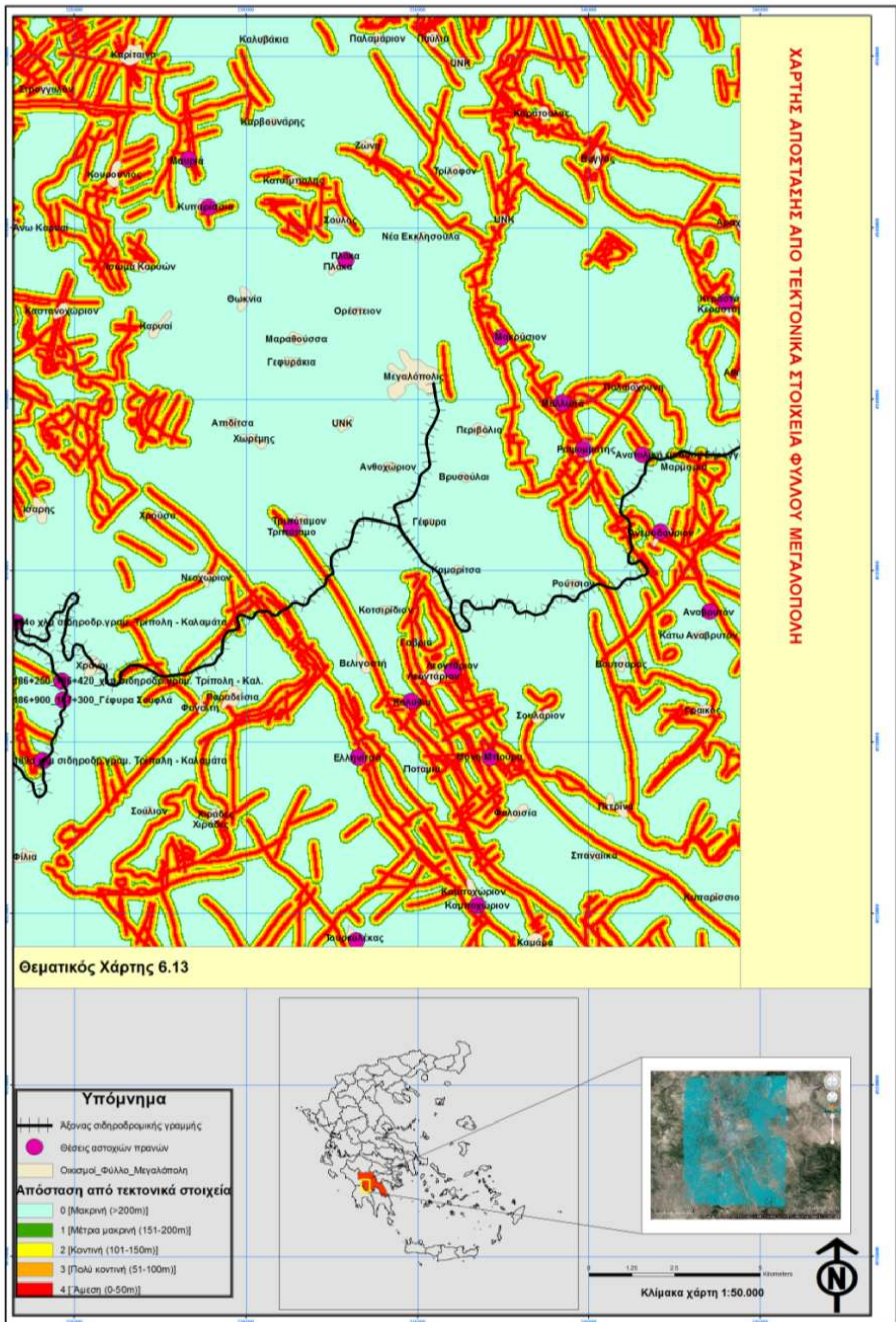
Χάρτης 6.10. Χάρτης βροχόπτωσης.



Χάρτης 6.11. Χάρτης πάχους μανδύα αποσάθρωσης.



Χάρτης 6.12. Χάρτης απόστασης από ρέματα.



Χάρτης 6.13. Χάρτης απόστασης από τεκτονικά στοιχεία.

6.7 Τεχνικογεωλογικό καθεστώς και υπολογισμός δείκτη αστάθειας των θέσεων αστοχίας του Φύλλου Μεγαλόπολη

6.7.1. Εφαρμογή RES σε 8 θέσεις αστοχιών πρανών

Στην συγκεκριμένη περιοχή έρευνας του φύλλου “Μεγαλόπολη” μελετήθηκαν αρχικά οκτώ (8) θέσεις περιπτώσεων αστοχιών πρανών (όχι βραχωδών) που έχουν συμβεί στο παρελθόν, ώστε με την εύρεση του δείκτη αστάθειας, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία RES να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη ή όχι των ανωτέρω κατολισθήσεων. Για τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας κάθε εξεταζόμενης θέσης, βαθμονομήθηκαν όλες οι επιλεγμένες παράμετροι που αφορούν τη συγκεκριμένη αστοχία. Η βαθμονόμηση βασίστηκε στη συνεκτίμηση των δεδομένων που απορρέουν από τους προαναφερόμενους επιμέρους θεματικούς χάρτες (Χάρτες 6.4 έως και 6.13), στη σχετική βιβλιογραφία (κυρίως τεχνικές εκθέσεις ΙΓΜΕ) και την εμπειρία από την εφαρμογή του RES σε άλλες μελέτες περιπτώσεων (π.χ. Rozos et al., 2006, Rozos et al., 2008, Rozos et al., 2011). Για την κάθε εξεταζόμενη θέση αστοχίας, παραθέτονται τα ακόλουθα στοιχεία:

6.7.1.1. Κατολισθητικά φαινόμενα στην κοινότητα Τριπόταμου του Ν. Αρκαδίας

Η Κοινότητα ζήτησε από το ΙΓΜΕ (1988) την εξέταση των εδαφικών μετακινήσεων που είχαν εκδηλωθεί στα πρανή της περιοχής που περιβάλλει τον οικοδομικό χώρο. Επιπρόσθετος λόγος για τη διερεύνηση γενικότερα των γεωτεχνικών συνθηκών, ήταν η σχεδιαζόμενη από τη ΔΕΗ εκτροπή του ποταμού Αλφειού, σε θέση κατάντη της κοινότητας. Έτσι, θεωρήθηκε σκόπιμο στα πλαίσια της εξέτασης αυτής, να εκτιμηθούν και οι επιπτώσεις της εκτροπής στις συνθήκες ευστάθειας στο χώρο της Κοινότητας.

α) Μορφολογία

Η Κοινότητα Τριποτάμου εντοπίζεται σε οδική απόσταση οκτώ χιλιομέτρων, περίπου, νοτιοδυτικά της Μεγαλόπολης και σε υψόμετρο 415m (Εικόνα 6.1). Ο οικοδομικός χώρος της Κοινότητας αναπτύσσεται σε επίπεδη έκταση λοφοειδούς έξαρσης μικρού σχετικά ύψους. Περιφερειακά του οικοδομικού χώρου σχηματίζονται αραιά δενδροκαλυμμένα πρανή με κλίση που κυμαίνεται από 15° – 25°. Από τα πρανή αυτά διέρχονται χείμαρροι των οποίων η παροχή, ακόμα και

τους χειμερινούς μήνες, είναι ελάχιστη γιατί στην Κοινότητα έχει κατασκευασθεί επαρκές δίκτυο συγκέντρωσης και απομάκρυνσης των επιφανειακών νερών.

β) Γεωλογία

Η Κοινότητα είναι θεμελιωμένη σε ιζήματα Πλειστοκαινικής ηλικίας, χαμηλής έως μέσης συνοχής αργιλώδεις άμμοι, μέτριας υδροπερατότητας, τα οποία ανήκουν στη λιθοφασική βαθμίδα του Χωρεμίου. Βρίσκεται στο νότιο άκρο της λεκάνης της Μεγαλόπολης, η οποία γεωλογικά συνιστά τεκτονική τάφρο που η πλήρωσή της πραγματοποιήθηκε με λιμναία, ποτάμια και χερσαία ιζήματα Πλειοκαινικής - Πλειοπλειστοκαινικής ηλικίας και τη δημιουργία έτσι διαφόρων λιθοφασικών βαθμίδων. Τα ιζήματα περιέχουν λιγνιτικές ενστρώσεις των οποίων η εκμετάλλευση πραγματοποιείται από τη ΔΕΗ.



Εικόνα 6.1. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Τριπόταμο (Google Earth).

γ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Εντός του οικοδομικού χώρου της Κοινότητας δεν εντοπίστηκαν εδαφικές μετακινήσεις (Νικολάου, 1988). Τα πρανή, όμως, που διαμορφώνονται περιφερειακά και κατάντη της Κοινότητας, με εξαίρεση το κεντρικό τμήμα του χωριού, χαρακτηρίζονται από σχετικά επισφαλείς συνθήκες ευστάθειας. Συγκεκριμένα σε ορισμένα από αυτά, ιδιαίτερα νότια της Κοινότητας εντοπίστηκαν στο παρελθόν (1973) ίχνη ερπυστικών κινήσεων και παλαιών εδαφικών μετακινήσεων. Στα πρανή της κοίτης έχουν εκδηλωθεί κατολισθητικά φαινόμενα μικρής έκτασης που ενδέχεται να αυξηθούν μελλοντικά.

Από γεωτεχνική αναγνώριση που πραγματοποιήθηκε (Τζιτζιρας, 2001), διαπιστώθηκε ότι σε αρκετές περιοχές του Κοινοτικού χώρου υπήρξαν εδαφικές μετακινήσεις, οι οποίες εκδηλώθηκαν στο μεγαλύτερο τμήμα του χωριού και σε περιοχές που δεν ήταν πλησίον των έργων της ΔΕΗ με αποτέλεσμα να προκαλέσουν αστοχίες στα σπίτια. Πρόκειται για φαινόμενα που περιοδικά και ιδιαίτερα ύστερα από έντονες και μακράς διάρκειας βροχοπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο επαναλαμβάνονται, σύμφωνα και με μαρτυρίες των κατοίκων. Κατά τη διάρκεια της επί τόπου έρευνας το 1988, εντοπίστηκαν ερπυστικές μετακινήσεις σε αρκετά από τα πρηνή και μια θέση εκδήλωσης εδαφικής θραύσης που συνοδεύτηκε από μετακίνηση των υλικών προς τα κατάντη με αποτέλεσμα την καταστροφή του διανοιχθέντος το 1988 επαρχιακού δρόμου στη βάση του πρηνούς. Κύρια αίτια εκδήλωσης της παρατηρούμενης εδαφικής μετακίνησης ήταν τα ακόλουθα (Νικολάου 1988, Τζιτζιρας 2001):

1. Μικρή συνοχή των εδαφικών υλικών που απαντώνται και επί πλέον φόρτιση των εδαφικών υλικών του πρηνούς από τα νερά των βροχοπτώσεων, καθώς και η διάβρωση των επιφανειακών νερών.
2. Έλλειψη φυτοκάλυψης στα πρηνή.
3. Εκσκαφές που πραγματοποιήθηκαν στη βάση του πρηνούς για τη διάνοιξη του επαρχιακού δρόμου, χωρίς να γίνουν τα κατάλληλα έργα αντιστήριξης.
4. Μεγάλες κλίσεις των πρηνών που σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων μειώνουν την διατμητική αντοχή του εδαφικού σχηματισμού και εκδηλώνονται ερπυστικά φαινόμενα. Απόδειξη των ανωτέρω είναι ότι όλα τα δένδρα που υπάρχουν σε αυτά, έχουν σημαντική κλίση από την κατακόρυφο.
5. Κακή ποιότητα θεμελίωσης σε αρκετές οικίες.
6. Η πιθανότητα ύπαρξης διογκούμενων εδαφών που είναι δυνατόν να προκαλέσουν αστοχίες, μικρής γενικά έντασης.

Σημειώνεται ότι στα πλαίσια εκμετάλλευσης του λιγνιτικού πεδίου που αναπτύσσεται κάτω από την κοίτη του ποταμού Αλφειού, η ΔΕΗ με εκσκαφή σημαντικών διαστάσεων πραγματοποίησε εκτροπή του ποταμού που διέρχεται σε απόσταση περίπου 100-500m από το νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα του χωριού.

Η εκσκαφή της νέας κοίτης για την εκτροπή του Αλφειού ποταμού δεν έχει προκαλέσει αστάθειες στο χωριό αν και υπάρχουν κατολισθήσεις στα πρηνή της κοίτης, δεδομένου ότι η νέα κοίτη είναι αρκετά μακριά από το χωριό. Άλλα

ερπυστικά φαινόμενα έχουν εκδηλωθεί και στις βόρειες περιοχές του χωριού. Οι αστοχίες είχαν αρχίσει να εκδηλώνονται πριν την κατασκευή της εκτροπής του Αλφειού ποταμού. Οι θέσεις των σπιτιών που παρουσιάζουν αστοχίες βρίσκονται στο μανδύα αποσάθρωσης Πλειστοκαινικών σχηματισμών. Η επέκταση του λιγνιτικού πεδίου μελλοντικά προς το χωριό υπό προϋποθέσεις είναι δυνατόν να προκαλέσει περισσότερες αστοχίες στην ήδη ασταθή περιοχή. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.5.

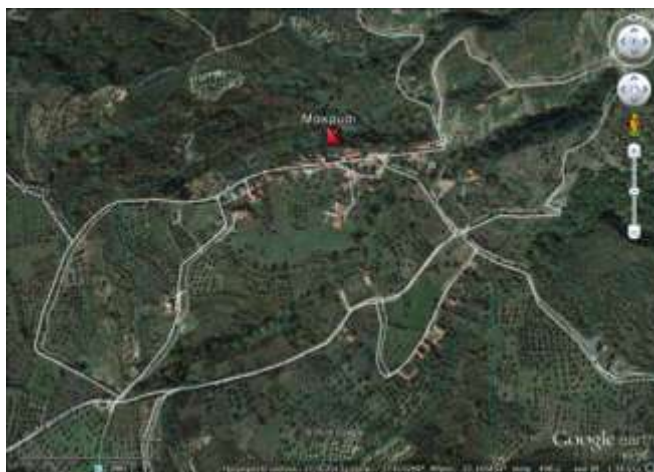
Πίνακας 6.5. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Τριπόταμο.

Κοινότητα Τριπόταμου		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	3	Απόσταση από δρόμους: Πολύ κοντινή (51-100m)
Τεκτονικό καθεστώς	0	Ασθενές
Κλίση πρηνούς	2	16° – 30°
Προσανατολισμός πρηνούς	2	90° – 135°, 275° – 315°
Λιθολογία	3	Ιζημάτα Πλειστοκαινικής ηλικίας βαθμίδας Χωρεμίου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Προσχωματικές αποθέσεις (Μέτρια έως μικρή περατότητα)
Βροχόπτωση	2	Έντονες και μακράς διάρκειας βροχοπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο (<1000mm)
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	4	Οι θέσεις των σπιτιών που παρουσιάζουν αστοχίες βρίσκονται στο μανδύα αποσάθρωσης Πλειστοκαινικών σχηματισμών.
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.1.2. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Μακρύσι

α) Μορφολογία

Ο οικισμός αυτός αναπτύσσεται σε μικρό ύβωμα, του οποίου το άνω τμήμα είναι σχεδόν οριζόντιο σε σημαντική έκταση και στην οποία έχει δομηθεί ο μεγαλύτερος αριθμός των σπιτιών (Εικόνα 6.2). Τα εκατέρωθεν πρηνή είναι μικρά με ήπιες κλίσεις. Το έτος 2003 εκδηλώθηκαν στο χωριό βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις με συνέπεια την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων που είχαν ως αποτέλεσμα την καταστροφή μιας κατοικίας καθώς και του υπάρχοντος κεντρικού δρόμου (Τζιτζιρας, 2003).



Εικόνα 6.2. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Μακρύσι (Google Earth).

β) Γεωλογία

Ως προς τις γεωλογικές συνθήκες, στην περιοχή που εκδηλώθηκαν τα κατολισθητικά φαινόμενα συναντώνται:

i) Σχηματισμοί του Νεογενούς από αργίλους, ιλύες, άμμους και μάργες ενώ κατά θέσεις συναντώνται κροκαλοπαγή. Πρόκειται γενικά για χαλαρούς και με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σχηματισμούς, στους οποίους εκδηλώθηκαν τα κατολισθητικά φαινόμενα.

ii) Σχηματισμοί του φλύσχη αποτελούμενοι από εναλλαγές ιλυολίθων, αργίλων και λεπτόκοκκων - αδρόκοκκων ψαμμιτών με δ/νση $B25^{\circ}\Delta$ και κλίση 45° ΝΔ/κή και ομόρροπη με αυτή του πρανούς. Επιφανειακά οι σχηματισμοί είναι αποσαθρωμένοι και καλύπτονται από μανδύα μικρού πάχους έως 0,40m.

γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες

Όσον αφορά στις υδρογεωλογικές συνθήκες στη στενή περιοχή που εκδηλώθηκαν τα κατολισθητικά φαινόμενα, οι σχηματισμοί του φλύσχη είναι πρακτικά στεγανοί και δεν επιτρέπουν τη δημιουργία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Τα Νεογενή ιζήματα είναι περατοί σχηματισμοί και υπό προϋποθέσεις επιτρέπουν την ανάπτυξη σημαντικής υδροφορίας.

δ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Αποτέλεσμα των εκδηλούμενων φαινομένων ήταν να δημιουργηθούν στους Νεογενείς σχηματισμούς οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις της τάξης του 1,20m και 1,40m αντίστοιχα. Στο αναπτυσσόμενο κατόντη πρανές υπήρχαν πολλαπλές και παράλληλες εδαφικές ρωγμές με οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση της τάξης των 30-40cm. Στον κεντρικό τσιμεντοστρωμένο δρόμο

υπήρχαν άφθονα νερά που έρρεαν και κατέληγαν στο αμέσως κατάντη πρηνές. Το γεγονός αυτό προκάλεσε την διαβροχή των χαλαρών εδαφικών σχηματισμών, την μείωση της διατμητικής αντοχής αυτών με συνέπεια την εκδήλωση των κατολισθητικών κινήσεων.

Οι Ρόζος κ.α. (2013), διερεύνησαν τη θέση αστοχιών πρηνών στον οικισμό του Μακρυσίου που επηρεάζουν τον κύριο δρόμο του οικισμού. Οι κύριοι στόχοι της έρευνας αυτής ήταν η διερεύνηση της υπάρχουσας εκδηλωμένης αστοχίας, η παρακολούθηση της εξέλιξής αυτής, μέσω αποκλισημετρήσεων και πιεζομετρήσεων σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, ο καθορισμός του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης καθώς και η πιθανή σχέση της διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης στην ενεργοποίηση της αστοχίας.

Από τη συσχέτιση κύμανσης βροχοπτώσεων, πιεζομετρικής στάθμης και εδαφικών μετακινήσεων διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- α) Δεν υπάρχει ενιαίος υδροφόρος έστω και φρεάτιος στην έκταση του χώρου των αστοχιών στο Μακρύσι, αλλά μεμονωμένοι, ανάλογα με τις διαφορές στην κοκκομετρία του υλικού και τις μεταβολές αυτής, τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια,
- β) Η χρονική περίοδος αυξημένου ύψους βροχόπτωσης συμπίπτει με τη χρονική περίοδο όπου σημειώνεται η μεγαλύτερη άνοδος της πιεζομετρικής επιφάνειας του υπόγειου νερού, αλλά και την εμφάνιση των μεγαλύτερων εδαφικών μετακινήσεων στο χώρο του πρηνούς κατάντη του δρόμου.

Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές αλλά και τα σχετικά βιβλιογραφικά δεδομένα στην περιοχή, φαίνεται ότι η περιοδικότητα εκδήλωσης αυξημένων ερπυστικών κινήσεων στο χώρο των αστοχιών, συμπίπτει με την εμφάνιση αυξημένων βροχοπτώσεων και κατ' επέκταση ανόδου της στάθμης εντός του ανώτερου εδαφικού ορίζοντα, με τη δράση του νερού να αυξάνει το βάρος του, να μειώνει τη διατμητική του αντοχή αλλά και να λειτουργεί σαν "λιπαντικό" στην επαφή με τον υποκείμενο εδαφικό ορίζοντα. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.6.

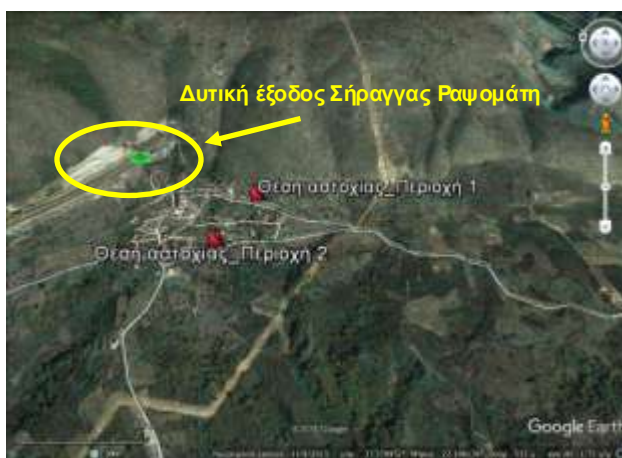
Πίνακας 6.6. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μακρύσι

Μακρύσι		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρηνούς	1	Το χωριό Μακρύσι αναπτύσσεται σε μικρό ύψωμα του οποίου το άνω τμήμα είναι σχεδόν οριζόντιο σε σημαντική έκταση και στην οποία έχει δομηθεί ο μεγαλύτερος αριθμός των σπιτιών του χωριού.
Προσανατολισμός πρηνούς	3	315° – 0°
Λιθολογία	3	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης και νεογενείς σχηματισμοί Μακρυσιού (Στους τελευταίους που είναι χαλαροί με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά εκδηλώθηκαν αστοχίες).
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού (πολύ μικρή περατότητα)
Βροχόπτωση	3	Η περιοδικότητα εκδήλωσης αυξημένων ερπυστικών κινήσεων στο χώρο των αστοχιών, συμπίπτει με την εμφάνιση αυξημένων βροχοπτώσεων, όπως αυτών του έτους 2003
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	3	1.5-3.0m
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	1	Μέτρια μακρινή (151-200m)

6.7.1.3. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Ραψομάτη

α). Μορφολογία

Ο οικισμός αυτός αναπτύσσεται σε πρηνή με ήπιες κλίσεις και τρεις χείμαρροι με δ/ση Α-Δ αποστραγγίζουν τα επιφανειακά νερά αυτού αλλά και της ευρύτερης περιοχής (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3. Άποψη από τις θέσεις αστοχίας στον οικισμό Ραψομάτη (Google Earth)

β) Γεωλογία

Όσον αφορά στις γεωλογικές συνθήκες στον οικιστικό χώρο συναντώνται (Τζίτζιρας, 2003):

1) Ασβεστολιθικά κορήματα (ζώνης Πίνδου) αποτελούμενα από ασβεστολιθικά τεμάχια ποικίλου μεγέθους και σημαντικό ποσοστό λεπτομερών συστατικών. Ο σχηματισμός αυτός καταλαμβάνει το άνω τμήμα του οικιστικού χώρου και ελάχιστα κτίσματα είναι θεμελιωμένα σε αυτόν.

2) Νεογενή ιζήματα από αργίλους, ιλύες, άμμους, κροκαλοπαγή και μάργες. Χαλαροί σχηματισμοί, πάνω στους οποίους είναι θεμελιωμένο το μεγαλύτερο τμήμα του οικισμού.

γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στη στενή περιοχή χαρακτηρίζονται από την παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στα Νεογενή, ο οποίος τροφοδοτείται και από τους ασβεστόλιθους που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή.

δ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Οι αστοχίες δημιουργήθηκαν με τις βροχοπτώσεις το χειμώνα του 2002-2003. Στον οικιστικό χώρο, εκδηλώθηκαν σε δύο περιοχές κατολισθητικές κινήσεις. Στην πρώτη περιοχή (περιοχή 1 - περιφερειακός δρόμος), εκδηλώθηκαν δύο πολύ μικρές αστοχίες με μήκος τόξου 2-3μ και σε απότομο πρανές που βρίσκεται ανάντη του υπάρχοντος δρόμου. Ο κύριος λιθολογικός σχηματισμός που συναντάται στην περιοχή είναι τα ασβεστολιθικά κορήματα. Η εκδήλωση των κατολισθήσεων οφείλεται:

α) στην πολύ μικρή συνοχή των ασβεστολιθικών κορημάτων,

β) στην διαβροχή του σχηματισμού και

γ) στην απότομη κλίση του πρανούς.

Στην δεύτερη περιοχή (περιοχή 2) εκδηλώθηκε κατολίσθηση σε δρόμο του χωριού όπου υπήρχε τεχνητός οχετός όμβριων υδάτων και είχε αποφραχθεί από διάφορα αντικείμενα, με αποτέλεσμα τα νερά του χειμάρρου να συγκεντρωθούν στην περιοχή για μεγάλο χρονικό διάστημα, ασκηθούν πιέσεις στα πρανή και προκληθούν οι αστοχίες. Αποτέλεσμα των κατολισθήσεων ήταν να καταστραφεί το υφιστάμενο τεχνικό και προκληθούν εδαφικές ρωγμές κατάντη του οχετού σε μήκους 40-50m, με οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση 10cm περίπου. Στη συγκεκριμένη περιοχή δεν υπήρχαν κατοικίες. Έτσι, τα κατολισθητικά φαινόμενα

προκλήθηκαν από την ελλιπή λειτουργία του οχετού. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ραψομάτη.

Ραψομάτη		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό: συνδέεται με την παρουσία πτυχών, ρηγμάτων και ασυνεχειών
Κλίση πρηνούς	1	6° - 15°
Προσανατολισμός πρηνούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	3	Ασβεστολιθικά κορήματα (ζώνης Πίνδου) και νεογενείς σχηματισμοί Μακρυσίου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη δράση του νερού
Βροχόπτωση	1	<1000mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	3	1.5 – 3.0m
Απόσταση από ποτάμια	3	Πολύ κοντινή (51-100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.1.4. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Πλάκα

α) Μορφολογία

Η περιοχή στην οποία εκδηλώθηκαν τα φαινόμενα χαρακτηρίζεται από ήπιες κλίσεις που δεν υπερβαίνουν τις 25° (Τζίτζιρας, 2003). Αμέσως κατάντη του δρόμου και για λίγα μέτρα αναπτύσσεται πρηνές με ισχυρή κλίση (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Πλάκα (Google Earth).

β) Γεωλογία

Στην κατολισθαίνουσα περιοχή ο μόνος λιθολογικός σχηματισμός που συναντάται είναι εναλλαγές μαργών, αργίλων, χουμωδών αργίλων και λιγνιτικών στρωμάτων με παρεμβολές λεπτόκοκκων άμμων και φακοειδών χαλαρών κροκαλοπαγών. Είναι χαλαρός σχηματισμός του Πλειστοκαίνου.

γ) Υδρογεωλογικές συνθήκες

Στη μελετούμενη περιοχή ο παραπάνω λιθολογικός σχηματισμός δίνει σημαντική υδροφορία αλλά σε μεγάλο βάθος, που δεν επηρεάζει την ευστάθεια αυτής. Εν τούτοις, είναι υδατοπερατός σχηματισμός διευκολύνοντας έτσι ει την εσωτερική διάβρωση αυτού.

δ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Στην περιοχή μελέτης εκδηλώθηκαν μικρής έκτασης κατολισθητικά φαινόμενα που κατέστρεψαν τον επαρχιακό δρόμο στην είσοδο του χωριού και σε μήκος 25m περίπου, με κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση της τάξης των 1,20m και 25cm αντίστοιχα. Κατά την του υπάρχοντος δρόμου και της περιοχής που δημιουργήθηκαν τα κατολισθητικά φαινόμενα παρατηρήθηκαν παλαιές ερπυστικές κινήσεις σε πρηνή με ήπιες κλίσεις. Επομένως, η περιοχή παρουσιάζει μια αστάθεια που ενεργοποιήθηκε με τις βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις το χειμώνα του 2002-2003. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Πλάκα.

Πλάκα		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρηνούς	1	6° -15°
Προσανατολισμός πρηνούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	3	Χαλαρός σχηματισμός του Πλειστοκαίνου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	4	Η περιοχή παρουσίασε αστάθεια που ενεργοποιήθηκε με τις βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις του χειμώνα 2002-2003
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	3	1.5 – 3.0m
Απόσταση από ποτάμια	0	Μακρινή (>200m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

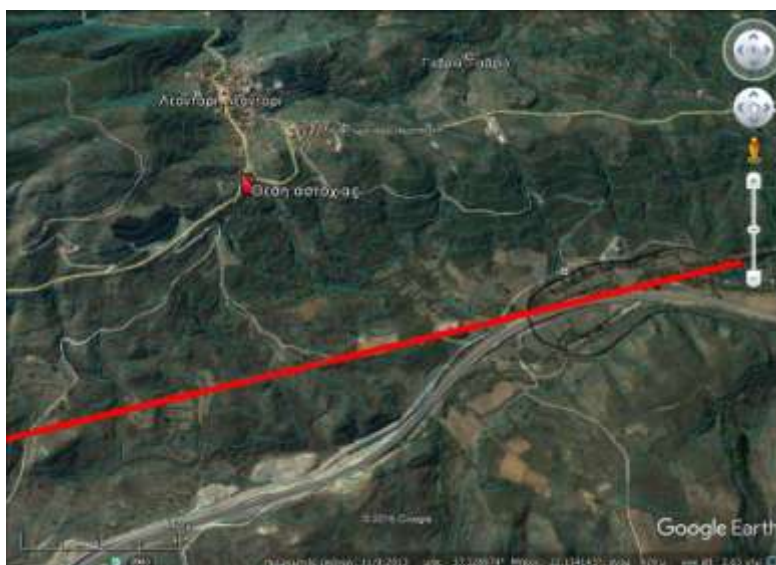
6.7.1.5. Κατολισθητικά φαινόμενα στον οικισμό Λεοντάρι

α). Μορφολογία

Η περιοχή στην οποία εκδηλώθηκαν τα φαινόμενα βρίσκεται στον παλιό δρόμο Λεοντάρι - Μεγαλόπολη και σε πρανές με κλίση που δεν υπερβαίνει τις 30° (Τζίτζιρας, 2003). Ανάντη αυτής έχει κατασκευασθεί ο νέος επαρχιακός δρόμος Λεοντάρι – Μεγαλόπολη (Εικόνα 6.5).

β) Γεωλογία

Οι μόνοι λιθολογικοί σχηματισμοί που απαντάται στην περιοχή εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων είναι αυτοί του φλύσχη (ζώνης Τρίπολης) αποτελούμενος από εναλλαγές ιλυολίθων, αργίλων και λεπτόκοκκων - αδρόκοκκων ψαμμιτών. Επιφανειακά είναι αποσαθρωμένοι και καλύπτονται από μανδύα μικρού πάχους έως 0,50m.



Εικόνα 6.5. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Λεοντάρι (Google Earth). Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε γειπνάζον ενεργό ρήγμα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης (Ganas et al., 2013).

γ) Τεκτονική

Σε μικρή απόσταση από την κατολισθαίνουσα περιοχή και ανάντη αυτής διέρχεται ρήγμα δ/νσης ΒΔ-ΝΑ/κής. Γεωλογικά η περιοχή είναι έντονα τεκτονισμένη με αποτέλεσμα τη συχνή μεταβολή των γεωμετρικών στοιχείων του φλύσχη.

δ). Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στη στενή περιοχή που εκδηλώθηκαν τα κατολισθητικά φαινόμενα δείχνουν ότι ο φλύσχος είναι πρακτικά στεγανός σχηματισμός και δεν επιτρέπει τη δημιουργία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Από

υδρολογική συμπεριφορά, οι σχηματισμοί του φλύσχη είναι πρακτικά στεγανοί και ο συντελεστής κατείσδυσης πολύ μικρός, με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη ποσότητα νερού να ρέει επιφανειακά και προκαλεί την διάβρωση αυτών.

ε) Γεωτεχνικές συνθήκες

Στον παλαιό επαρχιακό δρόμο Λεοντάρι - Μεγαλόπολη, με τις βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις το χειμώνα του 2002-2003, εκδηλώθηκαν κατολισθητικά φαινόμενα που είχαν ως αποτέλεσμα την εκδήλωση πολλαπλών παράλληλων εδαφικών ρωγμών στου οδόστρωμα και σε μήκους 30μ περίπου. Αποτέλεσμα των εκδηλωμένων φαινομένων ήταν να δημιουργηθούν αστοχίες μικρής έκτασης στο οδόστρωμα που επέτρεψαν, όμως, τη λειτουργία του δρόμου. Ακριβώς ανάντη της περιοχής όπου δημιουργήθηκαν αυτά τα φαινόμενα, διέρχεται ο νέος επαρχιακός δρόμος Λεοντάρι – Μεγαλόπολη. Στο εσωτερικό αυτού υπάρχει ρείθρο που διευκολύνει τη συγκέντρωση των νερών από τις βροχοπτώσεις. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την κυκλοφορία των νερών κάτω από τη βάση του νέου επαρχιακού δρόμου και την καταστροφή του παλαιού.

Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Λεοντάρι.

Λεοντάρι		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό τεκτονικό καθεστώς
Κλίση πρσανούς	2	16° - 30°
Προσανατολισμός πρσανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	4	Φλύσχος ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	Με τις βροχοπτώσεις – χιονοπτώσεις του χειμώνα 2002-2003, εκδηλώθηκαν κατολισθητικά φαινόμενα
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0,50 – 1,50m
Απόσταση από ποτάμια	3	Πολύ κοντινή (51 - 100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.1.6. Κατολισθητικό φαινόμενο στον οικισμό Καμποχώρι

α) Μορφολογία

Η συγκεκριμένη αστοχία εκδηλώθηκε σε πρανές με ισχυρή κλίση που υπερβαίνει τις 50° (Τζιτζιρας, 2003). Το ύψος του πρανούς κυμαίνεται από 28-35m (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Καμποχώρι (Google Earth).

β) Γεωλογία

Τα νεογενή που απαντώνται στην περιοχή εκδήλωσης του φαινομένου συνίστανται από εναλλαγές μαργών, αργίλων και κροκαλοπαγών ερυθροφαίου χρώματος. Πρόκειται για χαλαρό και με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σχηματισμό.

γ) Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στη στενή περιοχή μελέτης του φαινομένου, χαρακτηρίζονται από την απουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, λόγω της μεγάλης κλίσης του πρανούς, καθώς και των βαθιών χαραδρώσεων που υφίστανται στην ευρύτερη περιοχή.

δ). Γεωτεχνικές συνθήκες

Ανάντη μιας κατοικίας και σε απόσταση 6-8m αναπτύσσεται πρανές με κλίση μεγαλύτερη των 50° . Στη βάση του πρανούς πραγματοποιήθηκε το 1982 επέμβαση με σκοπό την αύξηση σε έκταση του οριζόντιου τμήματος. Η εκσκαφή αυτή επιτάχυνε την εκδήλωση των κατολισθητικών κινήσεων χωρίς να ληφθούν

μέτρα προστασίας στο πρηνές, που δομείται από σχηματισμούς με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά και είχε ισχυρή κλίση.

Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Καμποχώρι.

Καμποχώρι		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρηνούς	4	>45°
Προσανατολισμός πρηνούς	2	275°-315°
Λιθολογία	3	Εναλλαγές μαργών, αργίλων και κροκαλοπαγών
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	1	<1000mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	3	1.5 – 3.0m
Απόσταση από πτώμα	3	Πολύ κοντινή (51-100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.1.7. Αστοχία στον ενοριακό σταθμό Κοιμήσεως της Θεοτόκου στον οικισμό Κεραστάρη Μαντίνειας

α) Μορφολογία

Ο οικισμός βρίσκεται νοτιοδυτικά της Τρίπολης, στους νότιους πρόποδες του όρους Μαίναλου (Καραγεωργίου, 1968 & 1969). Απέχει τέσσερα χιλιόμετρα από την Ε.Ο. Τρίπολης – Καλαμάτας και πέντε χιλιόμετρα από το σιδηροδρομικό σταθμό Κάτω Ασέας (Εικόνα 6.7).

β). Γεωλογία

Η εξεταζόμενη περιοχή δομείται από μεσοζωϊκούς ασβεστόλιθους στους οποίους εδράζεται η εκκλησία, τους υποκείμενους κρυσταλλικούς σχιστόλιθους ενώ στην πλατεία του οικισμού εμφανίζονται προσχωσιγενή υλικά, πάχους έως 1,5m, με υποκείμενο το φλύσχη, από αργιλικούς σχιστόλιθους σε λεπτά στρώματα).



Εικόνα 6.7. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Κεραστάρη (Google Earth).

γ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Η αστοχία εκδηλώθηκε με τη μορφή ερπυστικής κίνησης στο χώρο της εκκλησίας και σε υψόμετρο 720m περίπου, που βρίσκεται εκτός του οικισμού, στο βόρειο και δυτικό άκρο αυτού. Η αστοχία αυτή οφείλεται στη διαβρωτική ενέργεια του νερού του ρέματος Τσιμογιάννη καθώς και στην κατεΐσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο εσωτερικό της μάζας των κρυσταλλικών ασβεστολίθων. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Κεραστάρη.

Κεραστάρη		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	1	Απόσταση από δρόμους: Μέτρια μακρινή (151-200m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εντατικό: αντιπρωσωπέυει επωθήσεις και επιπτώσεις
Κλίση πρηνούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρηνούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	1	Ασβεστόλιθοι
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού λόγω των ασβεστολίθων μέσης έως υψηλής περατότητας
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	1	<0.5m
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.1.8. Γεωτεχνικές συνθήκες στο χώρο θεμελίωσης του Ιερού Ναού Κοίμησης της Θεοτόκου της Μονής Μπούρας Φαλαισίας

Μετά από αίτηση του Υπουργείου Πολιτισμού προς το ΙΓΜΕ, η Δ/νση Τεχνικής Γεωλογίας ανέλαβε να διερευνήσει τις εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης του Ιερού Ναού Κοιμήσεως της Θεοτόκου Μονής Μπούρας, ο οποίος είχε υποστεί σοβαρές ζημιές (Εικόνα 6.8).

α) Μορφολογία

Η Μονή βρίσκεται σε υψόμετρο 720m (Τζιτζιρας, 1985). Η στενή περιοχή είναι σχεδόν επίπεδη και αποστραγγίζεται από τους παρακείμενους χειμάρρους που την διατρέχουν. Στην ανατολική πλευρά της Μονής και σε μικρή απόσταση από αυτήν, υψώνεται λοφοειδής έξαρση από ασβεστόλιθους μικρού ύψους ενώ στη συνέχεια προς τα κατόντη δημιουργείται απότομο πρηνές.



Εικόνα 6.8. Άποψη από τη θέση αστοχίας στη Μονή Μπούρα Φαλαισίας (Google Earth).

β). Γεωλογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντούν στη στενή περιοχή της Μονής είναι οι ακόλουθοι: (i) Μανδύας αποσάθρωσης του φλύσχη που δεν υπερβαίνει το 1m, (ii) Φλύσχη από λεπτές εναλλαγές στρωμάτων ψαμμίτη και ιλυόλιθου με επικράτηση της ψαμμιτικής φάσης, (iii) Ασβεστόλιθοι, σε τεκτονική επαφή με τον φλύσχη και έντονα κερματισμένοι.

Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.12, ως ακολούθως.

Πίνακας 6.12. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση της Μονής Μπούρα Φαλαισίας.

Περίοδος Ναός Κοίμησης της Θεοτόκου της Μονής Μπούρας Φαλαισίας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρσανούς	1	6°-15°
Προσανατολισμός πρσανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	4	Φλύσχης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5 – 1.5m
Απόσταση από ποτάμια	2	Κοντινή (101-150m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.2. Εφαρμογή RES στο τμήμα Χρανών – Διαβολισίου της Σιδηροδρομικής Γραμμής Πελοποννήσου

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας – Υδρογεωλογίας, του Τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής των Μεταλλειολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ερευνήθηκαν οι αστοχίες πρσανών σε τέσσερις (4) θέσεις του τμήματος Χρανών – Διαβολισίου της σιδηροδρομικής γραμμής Πελοποννήσου. Ακολούθως αναφέρονται τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής που παρατηρήθηκαν αστοχίες (Κουμαντάκης κ.α., 2004). Σημειώνεται ότι η απόσταση των προβληματικών, λόγω αστάθειας πρσανών από την όδευση της σιδηροδρομικής γραμμής, λογίζεται κατ' αντιστοιχία με την έννοια απόσταση από δρόμους και λαμβάνει τη μέγιστη βαθμονόμηση 4 για άμεση απόσταση 0-50m. Με βάση την έρευνα αυτή διαπιστώνεται ότι η διάνοιξη της σιδηροδρομικής γραμμής επηρέασε την ισορροπία - ευστάθεια του στενού περιβάλλοντός και σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους, συνετέλεσε στις ακόλουθες καταγεγραμμένες αστοχίες πρσανών.

6.7.2.1. Προβλήματα στο 184° χλμ της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας

α) Μορφολογία

Η εξεταζόμενη περιοχή βρίσκεται μεταξύ της Τρίπολης και της Καλαμάτας (ειδικότερα μεταξύ των οικισμών Χρανών και Δεσύλλα), ανήκει στους πρόποδες

του όρους Τετράζιο και διασχίζεται από τον χείμαρρο Χάραδρο Παμίσου (Καραγεωργίου, 1959).

β). Γεωλογία

Την κατολισθαίνουσα περιοχή συνιστούν ερυθροκάσταντοι αργιλικοί σχιστόλιθοι με ενστρώσεις κερατολίθων και μαργαϊκών ασβεστολίθων (ιζήματα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, Ιουρασικής-Κάτω Κρητιδικής ηλικίας). Οι σχιστόλιθοι αποκαλύπτονται πάνω από την σήραγγα (με κατεύθυνση από Κόρινθο) και κατά μήκος της κλιτύς της δεξιάς πλευράς του χείμαρρου Χάραδρος Παμίσου. Στο σύστημα των σχιστοκερατολίθων επίκειται με τεκτονική επαφή αυτό του φλύσχη της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, που επικαλύπτεται στη συνέχεια από τεταρτογενείς αποθέσεις.

Οι παραπάνω γεωλογικοί σχηματισμοί, έχουν υποστεί την έντονη επίδραση των ορογενετικών δυνάμεων με αποτέλεσμα την πτύχωσή και διάρρηξη - κατακερματισμό, καθώς και την αλλοίωση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των θεωρητικά υδατοστεγανών σχηματισμών, όπως ο φλύσχη.

γ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Από την κατολίσθηση, επηρεάστηκε κυρίως η σήραγγα, η οποία εντοπίζεται στην δεξιά πλευρά του ρέματος «Χάραδρος Παμίσου», αμέσως μετά την σιδηροδρομική γέφυρα. Η θέση αυτή είναι γνωστή και ως «Μισελίνι», από το όνομα του Ιταλού κατασκευαστή της σήραγγας (Εικόνα 6.9).

Η εξεταζόμενη περιοχή ακόμα και πριν την κατασκευή της σήραγγας είχε υποστεί κατολισθήσεις, στη δεξιά πλευρά του χείμαρρου Χάραδρος Παμίσου και ψηλότερα της σιδηροδρομικής γραμμής. Τα αίτια της κατολίσθησης οφείλονται στον κατακερματισμό των πετρωμάτων της περιοχής λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης, στη μεγάλη κλίση του πρानούς, στη γεωλογική σύσταση των σχηματισμών και στη κυκλοφορία του νερού μέσω των ρωγμών αυτών, κυρίως του φλύσχη και πολύ λιγότερο της υποκείμενης σχιστοκερατολιθικής διάπλασης.



Εικόνα 6.9. Άποψη από τη θέση αστοχίας στο 184^ο χλμ της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (Google Earth).

Το σημαντικό πρόβλημα που παρατηρήθηκε στο χώρο της σήραγγας ήταν η αδυναμία απορροής του υπόγειου νερού εσωτερικά αλλά και υπεράνω της σήραγγας, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση υδροφόρου ορίζοντα υψηλής στάθμης, που επέφερε την επιβολή σημαντικών πιέσεων στο εσωτερικό τοίχωμα της σήραγγας (Κουμαντάκης κ.α., 2004). Οι κατασκευαστές της σήραγγας είχαν προβλέψει το πρόβλημα και είχαν διαμορφώσει σε όλο το ύψος της εσωτερικής πλευράς αυτής οπές ανακούφισης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα που θα αναπτυσσόταν πίσω από τη σήραγγα. Όμως, με την πάροδο του χρόνου και δεδομένης της αυξημένης παρουσίας στο νερό ανθρακικού ασβεστίου, σημειώθηκαν αποφράξεις των οπών ανακούφισης από την απόθεση σταλακτιτικού (ασβεστιτικού) υλικού. Έτσι, καθώς δεν είχε ληφθεί μέριμνα καθαρισμού των οπών αυτών ή διάνοιξης άλλων, την εποχή της αυτοψίας, το 2004, πίσω από τη σήραγγα παρατηρήθηκε διαμόρφωση υψηλού εποχιακού υδροφόρου ορίζοντα, ακόμα και σε στάθμες υψηλότερες της οροφής αυτής, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των πιέσεων και ανεξέλεγκτες ροές νερού από ρωγματώσεις της λίθινης επένδυσης της σήραγγας, τόσο από τις πλευρές όσο και από την οροφή. Η μακροχρόνια δράση των φαινομένων αυτών είναι δυνατόν να προκαλέσει αστοχίες στη σήραγγα. Επιπρόσθετα και καθώς ο χώρος της εισόδου αποτελεί περιοχή παλαιού βυθίσματος αστοχιών, η δράση του νερού είναι πιθανόν να

επαναδραστηριοποιήσει παλαιά φαινόμενα αστοχιών. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση του 184^{ου} χλμ ιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.

184ο χλμ της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από άξονα σιδηροδρομικής γραμμής: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Οι σχηματισμοί έχουν υποστεί την έντονη επίδραση των ορογενετικών δυνάμεων με αποτέλεσμα την διάρρηξη και την πτύχωσή τους
Κλίση πρηνούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρηνούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	1	Ιζήματα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης της ζώνης Ωλονού – Πίνδου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Λόγω του κατακερματισμού των σχηματισμών και της αλλοίωσης της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των θεωρητικά υδατοστεγανών σχηματισμών, όπως ο φλύσχις
Βροχόπτωση	2	1000-1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5-1.5m
Απόσταση από πτώμα	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

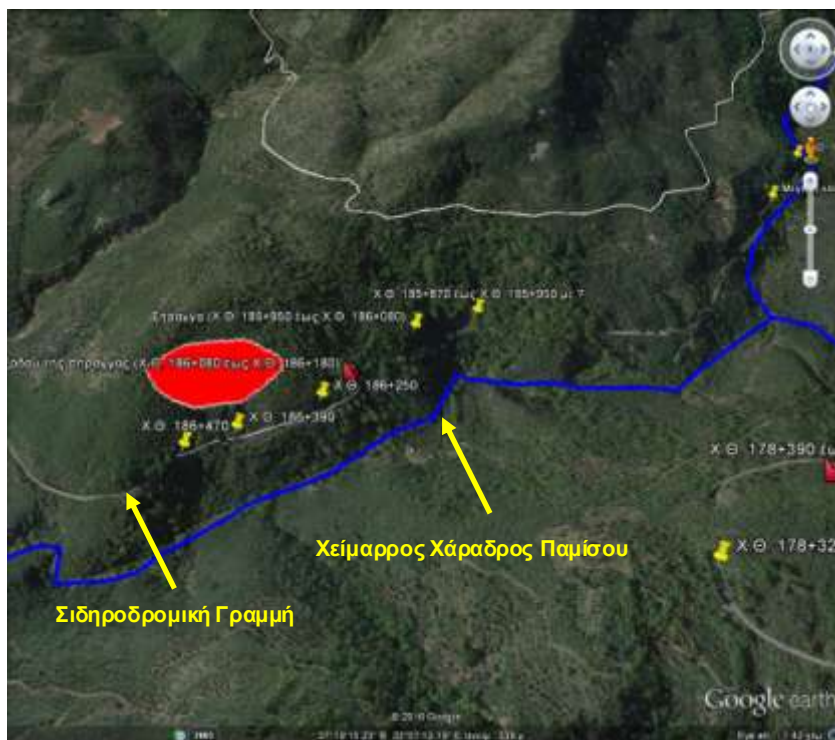
6.7.2.2. Θέση διπλής αστοχίας στο ανάντη της γραμμής πρηνές (Χ.Θ. 186+250 – Χ. Θ. 186+420 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας

α) Μορφολογία

Ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί το ανατολικό πρηνές της ΝΑ/κής απόληξης λοφοειδούς έξαρσης με ΒΔ/κή – ΝΑ/κή κατεύθυνση (Κουμαντάκης κ.α., 2004). Το πλέον χαρακτηριστικό στοιχείο στο πρηνές αυτό είναι η ισχυρή κλίση ανάντη και κατάντη της γραμμής (Εικόνα 6.10).

β) Γεωλογία

Από πλευράς τεκτονικής, ρήγμα ΒΑ/κής - ΝΔ/κής διεύθυνσης διασχίζει το χώρο, εκτός όμως της βαθμονομημένης ζώνης των 200m, ενώ σημαντικός είναι και ο ρόλος της διαβρωτικής δράσης του νερού του Πάμισου ρέματος στη βάση του πρηνούς. Επίσης, κατάντη εμφανίζεται η ανάπτυξη του βραχώδους υποβάθρου, ενώ ανάντη έντονη είναι η παρουσία αποσθρωμάτων με κορήματα.



Εικόνα 6.10. Άποψη από τη θέση αστοχίας (κόκκινου χρώματος επιφάνεια) στη Χ.Θ. 186+250 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (Google Earth).

γ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Στην ευρύτερη περιοχή της θέσης αυτής, η σιδηροδρομική γραμμή διασχίζει σχηματισμούς της ψαμμιτοσχιστοκερατολιθικής ενότητας, όπου επικρατούν οι ψαμμίτες, οι οποίοι εξασφαλίζουν την ευστάθεια των πρανών. Όμως από τη Χ.Θ. 186+250 έως Χ.Θ. 186+420 οι σχηματισμοί του υποβάθρου καλύπτονται από αποσαθρώματα και κορήματα αρκετού πάχους, με αποτέλεσμα να σημειώνονται αστοχίες στο ανάντη της γραμμής πρανές, όπως αυτές που συνέβησαν το 2003 και οι οποίες προκάλεσαν απόφραξη της γραμμής με τα υλικά που ολίσθησαν.

Αρχικά και στο τμήμα Χ.Θ. 186+250 έως Χ.Θ. 186+390, σημειώθηκε αστοχία εδαφικών υλικών που ρευστοποιήθηκαν το χειμώνα του 2003. Η αστοχία εκδηλώθηκε σε χώρο παλαιότερων μετακινήσεων, όπως διαπιστώθηκε από τα έργα αντιστήριξης στη βάση του πρανούς. επηρέασε τα υλικά αποσάθρωσης και κορημάτων, κατέστρεψε με τα υλικά που μετακινήθηκαν τον παλαιό τοίχο στη βάση του πρανούς και κάλυψε με τα υλικά που μετακινήθηκαν τη σιδηροδρομική γραμμή. Από τα έργα προστασίας του πρανούς που είναι πολύ παλαιά, διαπιστώνεται ότι το πρόβλημα των αστοχιών, στο συγκεκριμένο χώρο, είχε απασχολήσει τους κατασκευαστές της γραμμής, πιθανά με τη μορφή ερπυστικών κινήσεων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα θολωτά ανοίγματα στον τοίχο ποδός, που

αποτελούσαν πιθανά λύση στο πρόβλημα υποβιβασμού της στάθμης του νερού που αναπτυσσόταν πίσω από τον τοίχο. Σήμερα τα ανοίγματα αυτά έχουν πλέον αποφραχθεί από τα συνεχώς μετακινούμενα προς τα κατάντη εδαφικά υλικά που έχουν καλύψει όλο το χώρο πίσω από τον τοίχο.

Στο αμέσως γειτονικό τμήμα της προηγούμενης αστοχίας, επίσης στο ανάντη της γραμμής πρανές και σε μήκους 70m περίπου (Χ.Θ. 186+ 400 - Χ.Θ. 186+470), εμφανίζεται χώρος παλαιότερης αστοχίας. Στη θέση αυτή, όπως και στη γειτονική της που περιγράφηκε προηγούμενα, οι σχηματισμοί του υποβάθρου καλύπτονται από αποσαθρώματα σε ανάμιξη με ψαμμιτικά κορήματα, σημαντικού πάχους.

Τα κύρια αίτια εκδήλωσης των αστοχιών στη θέση αυτή αποτέλεσαν κυρίως: α) η παρουσία των χαλαρών εδαφικών υλικών με σημαντικό πάχος στο χώρο, β) η δράση των όμβριων νερών, γ) οι ισχυρές κλίσεις του πρανούς, δ) Οι δυναμικές φορτίσεις που επιβάλλει η κίνηση των συρμών. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.14.

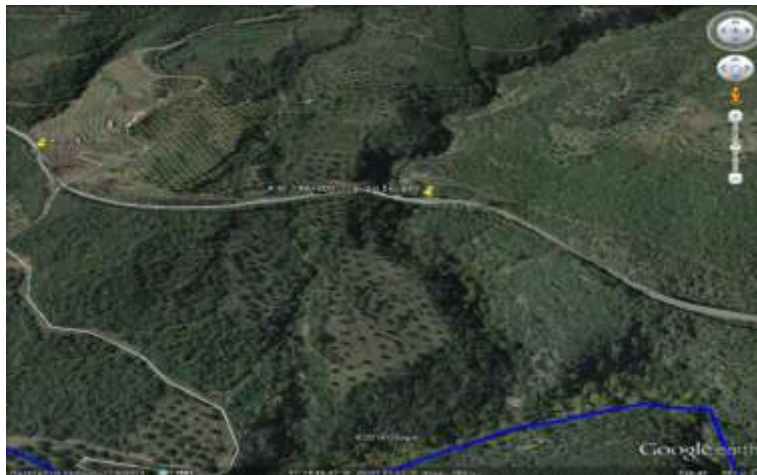
Πίνακας 6.14. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Χ.Θ. 186+250 – Χ.Θ. 186+420 σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.

Χ.Θ. 186+250 – Χ.Θ. 186+420 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπιν η δραστηριότητα	4	Απόσταση από άξονα σιδηροδρομικής γραμμής: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εντατικό
Κλίση πρανούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρανούς	4	0° - 45°, 135° - 225°
Λιθολογία	1	Σχηματισμοί της ψαμμιποσχιστοκερατολιθικής ενότητας, όπου επικρατούν οι ψαμμίτες
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Διαβρωτική δράση του νερού του Πάμισου ρέματος στη βάση του πρανούς
Βροχόπτωση	3	1200 - 1400mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5 - 1.5m
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

6.7.2.3. Θέση αστοχίας από το χώρο της γέφυρας Σουφλά (Χ.Θ. 186+900) και μέχρι τη Χ.Θ. 187+300 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας

Στα κατάντη πρανή της γραμμής σημειώνονται σε δύο τουλάχιστον θέσεις παλαιές αστοχίες (Εικόνα 6.11). Οι ζώνες των αστοχιών αυτών που εντοπίζονται σε υλικά του μανδύα και κορήματα που καλύπτουν το σχιστοκερατολιθικό υπόβαθρο της περιοχής, βρίσκονται εκτός της ζώνης της γραμμής και συνεπώς δεν την επηρεάζουν (Κουμαντάκης κ.α., 2004). Γενικά τα υλικά αυτά εύκολα

ενεργοποιούνται και μετακινούνται στα πρηνή του λόφου, λόγω των ισχυρών βροχοπτώσεων, των υποσκαφών του ρέματος, των ανθρωπογενών παρεμβάσεων κλπ. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.15.



Εικόνα 6.11. Αποψη από τη θέση αστοχίας στη γέφυρα Σουφλά (Χ.Θ. 186+900) της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (με μπλέ χρώμα ο χείμαρρος Χάραδρος) (Google Earth).

Πίνακας 6.15. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Γέφυρα Σουφλά (Χ.Θ. 186+900 έως Χ.Θ. 187+300) της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.

Γέφυρα Σουφλά (Χ.Θ. 186+900) έως Χ.Θ. 187+300 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από άξονα σιδηροδρομικής γραμμής: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Έντατικό
Κλίση πρηνούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρηνούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	1	Σχηματισμοί της ψαμμιποσχιστοκερατολιθικής ενότητας, όπου επικρατούν οι ψαμμίτες
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Διαβρωτική δράση του νερού του Πάμισου ρέματος στη βάση του πρηνούς
Βροχόπτωση	3	1200 - 1400mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5 – 1.5m
Απόσταση από οπάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

6.7.2.4. Θέση κατολίσθησης (Χ.Θ. 189+000) στο κατάντη της γραμμής πρανές, με την πηγή νερού της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας

Από την έρευνα, προέκυψε κατ' αρχήν η παρουσία στην ευρύτερη περιοχή του πρανούς κατάντη της γραμμής εκτεταμένων μαζών χαλαρών υλικών (αποσαθρωμάτων με κορήματα) που την καλύπτουν επιφανειακά (Εικόνα 6.12). Πιθανόν, αποτελεί χώρο πολύ παλαιάς αστοχίας που διευκόλυνε μεταγενέστερα τη συγκέντρωση τέτοιων υλικών σε μεγάλο πάχος.



Εικόνα 6.12. Άποψη από τη θέση αστοχίας στη Χ.Θ. 189+000 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας (με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η παρουσία ενεργού ρήγματος) (Google Earth).

α). Μορφολογία

Η μορφολογία είναι απότομη (ισχυρές κλίσεις πρανών), ενώ χαρακτηριστική είναι η πυκνή φυτοκάλυψη, που αποκαλύπτει την παρουσία νερού και η διαβρωτική δράση του ρέματος Χάραδρου στη βάση του πρανούς με τα μεγάλου πάχους εδαφικά υλικά (αποσαθρώματα και κορήματα).

Η παρουσία της συγκεκριμένης κατολίσθησης που ευτυχώς κατά το έτος της έρευνας (2004) δεν επηρέασε τη γραμμή, οφειλόταν, πέρα από τις προαναφερθείσες γεωμηχανικές και μορφολογικές συνθήκες, στις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, όπως εκσκαφές τοπικού οδικού δικτύου και διαμόρφωσης χώρου πηγής, στα χαλαρά υλικά, στις υποσκαφές της βάσης του πρανούς αλλά και στην παρουσία του νερού.

β) Γεωτεχνικές συνθήκες

Στην περιοχή αυτή και συγκεκριμένα στο πρανές κατάντη της γραμμής (Χ.Θ. 189+000), εντοπίστηκε θέση σημαντικής αστοχίας που οριοθετήθηκε από θραύση που έφθανε τα 20-30m περίπου, στο χώρο μεταξύ της γραμμής και του κατάντη αυτής διαμορφούμενου αγροτικού δρόμου. Δευτερεύουσες εδαφικές θραύσεις εντός της ζώνης αστοχίας που υποδηλώνουν την προς τα ανάντη μετεξέλιξη της κατολίσθησης, εντοπίστηκαν και στο ύψος του αγροτικού δρόμου αλλά και κατάντη αυτού, όπου σημειώθηκαν και ρευστοποιήσεις των μετακινθέντων και αναμοχλευμένων υλικών.

Ο υπόψη δρόμος καταστράφηκε από την κατολίσθηση επί μήκους 65m περίπου ενώ τα εδαφικά υλικά που κάλυπταν τους σχηματισμούς του υποβάθρου στο πρανές ανάντη του δρόμου αλλά και στην περιοχή αυτού μετακινήθηκαν τελείως προς τα κατάντη. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αποκάλυψη στο χώρο του δρόμου των σχηματισμών του υποβάθρου, που είναι λεπτές εναλλαγές βυσσινέρυθρων σχιστοκερατολίθων μέχρι 8cm σε πάχος.

Από τους σχηματισμούς αυτούς, που διαμορφώνουν συγκλινική πτυχή με ρήγμα στην κορυφή αυτής και αποκάλυψη στο πρανές του σκέλους με τις αντίρροπες σε αυτό κλίσεις, εντοπίζεται πηγή σύμφωνα με τη συγκεκριμένη έρευνα. Η πηγή αυτή που διαμορφωνόταν στην κορυφή της συγκλινικής πτυχής ήταν παροχής 4 περίπου m^3/h και τα νερά της εμπόπιζαν ανεξέλεγκτα τα εδαφικά υλικά στο πρανές καθώς υπήρχε πλήρης απουσία υδρομάστευσης αυτής.

Πρόχειρη εκμετάλλευσης των νερών της πηγής αυτής, όπως αποκαλύπτει δίκτυο σωλήνων νερού, φαίνεται να έγινε με εκσκαφή στο εσωτερικό του δρόμου και δημιουργία χώρου συγκέντρωσης νερού μπροστά από την πηγή. Η προχειρότητα όμως της όλης προσπάθειας φαίνεται να επέτεινε την αστοχία και στο ύψος του πρανούς ανάντη της πηγής, όπου έλαβε χώρα η οριακή θραύση της ζώνης αστοχίας. Από την επιτόπου εξέταση διαπιστώθηκε ότι η κατολίσθηση του πρανούς στη θέση αυτή οφειλόταν:

- στις αυξημένες κλίσεις του πρανούς
- στην κάλυψη αυτού με σημαντικού πάχους χαλαρά εδαφικά υλικά (αποσαθρώματα σε ανάμιξη με κορήματα)
- στην ανεξέλεγκτη απορροή των νερών της πηγής

- στις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις με τη διαμόρφωση χώρου συγκέντρωσης του νερού της πηγής και πρόχειρης υδρομάστευσης στο εσωτερικό του δρόμου.

Οι παραπάνω παράγοντες σε συνδυασμό με τα νερά των αυξημένων βροχοπτώσεων το χειμώνα του 2003, οδήγησαν στον πλήρη κορεσμό των εδαφικών υλικών με συνέπεια την σημαντική αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και την τελική ρευστοποίηση και ροή των υλικών προς τα κατόπι. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.16.

Πίνακας 6.16. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Χ.Θ. 189+000 σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας.

Χ.Θ. 189+000 της σιδηροδρομικής γραμμής Τρίπολης – Καλαμάτας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από άξονα σιδηροδρομικής γραμμής: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Έντατικό
Κλίση πρηνούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρηνούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	1	Σχηματισμοί της ψαμμιποσχιστοκερατολιθικής ενότητας
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Μέτρια γεωμηχανική δράση του νερού (ύπαρξη πηγής με ανεξέλεγκτη απορροή της)
Βροχόπτωσηση	3	Αυξημένες βροχοπτώσεις το χειμώνα του 2003
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5 – 1.5m
Απόσταση από ποτάμια	2	Κοντινή (101-150m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	4	Άμεση (0-50m)

6.7.3. Καταγραφές αστοχιών στους οικισμούς Κυπαρίσσια και Μαυριά

Τα παρακάτω αναφερόμενα, αφορούν δύο (2) περιοχές οικισμών αυτές των Κυπαρισσίων και Μαυριά, σύμφωνα με υδρογεωλογική αναγνώριση του Δήμου Γόρτυνος Ν.Αρκαδίας (Μαραβέγιας & Βάγιας, 2002).

Στα πλαίσια εκπόνησης μελετών για υδρευτικά θέματα του Δήμου Γόρτυνος, ζητήθηκε από το ΙΓΜΕ να εξετασθεί επιπλέον και ο επηρεασμός της ευστάθειας του υπεδάφους σε δύο δημοτικά διαμερίσματα Κυπαρίσσια (Εικόνα 6.13) και Μαυριά από τις εξορυκτικές δραστηριότητες του λιγνιτικού κέντρου Μεγαλόπολης της ΔΕΗ.

6.7.3.1. Οικισμός Κυπαρίσσια

α) Μορφολογία

Η ευρύτερη περιοχή του Δήμου Γόρτυνος είναι κυρίως ορεινή με πεδινή έκταση στις βόρειες απολήψεις της λεκάνης Μεγαλόπολης. Οι πεδινές εκτάσεις δομούνται κύρια από τεταρτογενείς - πλειστοκαινικούς και νεογενείς σχηματισμούς, όπου και γίνεται απόληψη των κοιτασμάτων λιγνίτη ενώ η ορεινή αποτελείται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς της ζώνης Ωλονού - Πίνδου, που συνιστούν και το υπόβαθρο της πεδινής, κυρίως ζώνης.



Εικόνα 6.13. Άποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Κυπαρίσσια (Google Earth).

β) Γεωλογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής είναι οι Τεταρτογενείς αποθέσεις, καθώς και αυτοί της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, δηλαδή: φλύσχης, τα μεταβατικά ιζήματα, οι ασβεστόλιθοι και η σχιστοκερατολιθική διάπλαση με τον "πρώτο φλύσχη".

Στην περιοχή, η γεωλογική αυτή σειρά χαρακτηρίζεται από έντονη πτύχωση και λεπιώσεις. Έτσι, δημιουργούνται καρστικοί υδροφόροι στους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους, που ανάλογα με το πάχος δημιουργούν είτε απλά υδροφόρα συστήματα, όπου ο καρστικός υδροφόρος εκτονώνεται με πηγές επαφής είτε σύνθετα, όπου δημιουργούνται καρστικοί υπόγειοι υδροφόροι.

γ) Γεωτεχνικές συνθήκες

Κατά το έτος 1947, αποκαλύφθηκε λιγνιτική εμφάνιση στη ΒΔ/κή λεκάνη και σε θέση περί τα 200 μέτρα νότια του οικισμού, με την κατολίσθηση της κλιτύος του λόφου (Μαρίνος Γ., 1957). Στην έκθεση των Μαραβέγια και Βάγια (2002), το ανατολικό τμήμα του οικισμού εδράζεται σε ασβεστόλιθο και δεν έχει πρόβλημα

ενώ το δυτικό σε λιγνιτοφόρα στρώματα. Έτσι, το πρόβλημα ευστάθειας πρηνών εξαρτάται από το βάθος του μετώπου εξόρυξης, των κλίσεων και της απόστασης ασφαλείας από τον οικισμό και είναι θέμα γενικότερα της γεωτεκτονικής συμπεριφοράς των πρηνών του τοπικού ορυχείου. Με βάση, όμως, τα αποτελέσματα έκθεσης του ΙΓΜΕ (Αποστολίδης κ.α., 2007) ύστερα από τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007, αναφέρεται ότι τα Κυπαρίσσια είναι ένας από τους οικισμούς που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών πρηνών. Τέλος, σημειώνεται ότι το έτος 2012, καταγράφηκε κατολίσθηση και καθίζηση καθώς επίσης και ρωγμάτωση του ανατολικού τόξου του ορυχείου Κυπαρισσίων (Αναγνωστοπούλου, Πογιατζή, 2013).

Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.17.

Πίνακας 6.17. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Κυπαρίσσια.

Κυπαρίσσια		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	1	Μέτριο
Κλίση πρηνούς	1	6°-15°
Προσανατολισμός πρηνούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	3	Πλειστοκαινικά στρώματα Μαραθούσας
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Υπαρξη ανωκρητιδικών ασβεστολιθών με καρστικούς υδροφόρους
Βροχόπτωση	4	>1400mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	3	1.5 – 3.0m
Απόσταση από ποτάμια	1	Μέτρια μακρινή (151-200m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.3.2. Εξέταση αστοχιών στον οικισμό Μαυριά

Στα πλαίσια σύμβασης της Κεντρικής Ένωσης Δήμων και Κοινοτήτων Ελλάδας με το ΙΓΜΕ, ο Δήμος Γόρτυνος – Καρίταινας ζήτησε από το ΙΓΜΕ τη γεωλογική – γεωτεχνική εξέταση του χωριού Μαυριά (Εικόνα 6.14), σχετικά με τη δυνητική επίδραση που θα είχε σε αυτό η λειτουργία του λιγνιτωρυχείου της ΔΕΗ Μεγαλόπολης (Τζιτζιρας, 2002).



Εικόνα 6.14. Αποψη από τη θέση αστοχίας στον οικισμό Μαυριά (Google Earth).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι τα Νεογενή που καταλαμβάνουν μικρή έκταση στο Ανατολικό τμήμα του χωριού και οι ασβεστόλιθοι που εμφανίζονται στη μεγαλύτερη έκταση αυτού. Εξετάσθηκαν αστοχίες που παρατηρήθηκαν στην εκκλησία του οικισμού και σε δύο γειτονικά σπίτια, από όπου προέκυψε ότι οι αστοχίες οφείλονταν σε κακή θεμελίωση (διαφορική καθίζηση) και όχι στη λειτουργία του λιγνιτωρυχείου. Ωστόσο, από τον τελικό παραγόμενο χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας, φαίνεται ότι δυνητικά η θέση στον οικισμό μπορεί να δώσει κατολισθήσεις. Συνοπτικά, η βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων δίνεται στον Πίνακα 6.18.

Πίνακας 6.18. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μαυριά.

Μαυριά		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Στην περιοχή, η γεωλογική σειρά είναι πτυχωμένη, εφίπτευμένη με έντονα φαινόμενα τεκτονισμού.
Κλίση πρσανούς	1	6°-15°
Προσανατολισμός πρσανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	1	Ασβεστόλιθοι
Υδρογεωλογικές συνθήκες	2	Μέτρια δράση του νερού
Βροχόπτωση	4	>1400mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5-1.5m
Απόσταση από ποτάμια	1	Μέτρια μακρινή (151-200m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (151-200m)

6.7.4. Εφαρμογή RES σε έξι (6) θέσεις πυρόπληκτων οικισμών

Το RES εφαρμόστηκε επίσης, σε έξι (6) θέσεις οικισμών του φύλλου “Μεγαλόπολη”, όπου αναφέρονται σε έκθεση του ΙΓΜΕ ως πυρόπληκτοι κατά τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007. Σε αυτούς εντοπίστηκαν κατολισθητικά φαινόμενα, τα οποία μελλοντικά πιθανόν να επαναδραστηριοποιηθούν ή και να επεκταθούν λόγω της αποψίλωσης των πρανών από τις εκδηλωθείσες πυρκαγιές, ενώ υπάρχει δευτερευόντως και ο κίνδυνος πλημμυρικών φαινομένων (Αποστολίδης κ.α., 2007). Σύμφωνα με την έκθεση, οι οικισμοί αυτοί που εμφανίζουν την μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών πρανών είναι οι ακόλουθοι: Ελληνίτσα, Τουρκολέκας, Καλύβια, Μαλλωτά, Ανεμοδούρι και Αναβρυτό.

Οι πμές βαθμονόμησης που παρουσιάζονται, προέκυψαν από τους επιμέρους θεματικούς χάρτες που παρήχθησαν στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, μέσω των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων, για το φύλλο “Μεγαλόπολη”. Στη συνέχεια δίνονται, συνοπτικά, οι παρατηρήσεις και η βαθμονόμηση για κάθε δυνητική θέση αστοχίας.

6. 7.4.1. Ελληνίτσα



Εικόνα 6.15. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Ελληνίτσα (Google Earth).

Πίνακας 6.19. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ελληνίτσα.

Ελληνίτσα		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρανούς	1	6°-15°
Προσανατολισμός πρανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	1	Πλειστοκαινικά στρώματα Μεγαλόπολης και ασβεστόλιθοι με δολομίτες ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	1	0.0 – 0.5m
Απόσταση από ποτάμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.4.2. Τουρκολέκας



Εικόνα 6.16. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Τουρκολέκα (Google Earth).

Πίνακας 6.20. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Τουρκολέκας.

Τουρκολέκας		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση(0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρανούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	4	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης και ασβεστόλιθοι με δολομίτες ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	3	1200 - 1400mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5–1.5m
Απόσταση από ποτάμια	1	Μέτρια μακρινή (151-200m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

6.7.4.3. Καλύβια



Εικόνα 6.17. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Καλύβια (Google Earth).

Πίνακας 6.21. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Καλύβια.

Καλύβια		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρανούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρανούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	4	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5–1.5m
Απόσταση από ποτάμια	3	Πολύ κοντινή (51-100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.4.4. Μαλλωτά



Εικόνα 6.18. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Μαλλωτά. Διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τεχνικά έργα για την αντιμετώπιση τυχόν ολίσθησης. Το cut and cover και ο τοίχος αντιστήριξης (Google Earth).

Πίνακας 6.22. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Μαλλωτά.

Μαλλωτά		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρανούς	3	31°-45°
Προσανατολισμός πρανούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	4	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5–1.5m
Απόσταση από ποτάμια	2	Κοντινή (101-150m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	1	Μέτρια μακρινή (151-200m)

6.7.4.5. Ανεμοδούρι



Εικόνα 6.19. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Ανεμοδούρι (Google Earth).

Πίνακας 6.23. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Ανεμοδούρι.

Ανεμοδούρι		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εντατικό
Κλίση πρανούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρανούς	2	90°-135°, 275°-315°
Λιθολογία	1	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης και ασβεστόλιθοι ζώνης Πίνδου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	1	<0.5m
Απόσταση από ποτάμια	3	Πολύ κοντινή (51-100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.4.6. Αναβρυτό



Εικόνα 6.20. Άποψη από τη δυνητική θέση αστοχίας στον οικισμό Αναβρυτό (Google Earth).

Πίνακας 6.24. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση Αναβρυτό.

Αναβρυτό		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	2	Ισχυρό
Κλίση πρανούς	1	6°-15°
Προσανατολισμός πρανούς	0	225°-275°
Λιθολογία	4	Φλύσχης ζώνης Τρίπολης
Υδρογεωλογικές συνθήκες	1	Περιορισμένη γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	1	<1000mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	2	0.5–1.5m
Απόσταση από πτώαμια	4	Άμεση (0-50m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	0	Μακρινή (>200m)

6.7.5. Εφαρμογή RES σε θέση πλησίον ανατολικής εισόδου Σήραγγας Ραφομάτη

Τέλος, στα πλαίσια εξέτασης της καταλληλότερης διέλευσης του αγωγού φυσικού αερίου που θα συνδέει τους Αγίους Θεοδώρους με την Μεγαλόπολη, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας ενότητας, εξετάστηκαν διάφορες λύσεις. Για την όδευση του αγωγού, η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων κατέληξε σε τρεις εναλλακτικές χαράξεις (ΔΕΣΦΑ, 2010). Την προτεινόμενη ALT1-P και τις εναλλακτικές λύσεις ALT2 και ALT3. Ειδικότερα, η ALT2 απορρίφθηκε λόγω σοβαρών προβλημάτων εφικτότητας, όπως αδειοδοτήσεις που αφορούσαν τη διέλευση μέσα από αρχαιολογικές περιοχές, διέλευση από δεσμευμένες περιοχές επέκτασης Εθνικής Οδού και Διοδίων, παραλληλίες με ενεργά ρήγματα, διέλευση από γεωλογικά ασταθή εδάφη καθώς και χάραξης σε επικλίσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού αφορά στο ασταθές έδαφος πλησίον της ανατολικής εισόδου στη Σήραγγα Ραφοματίου, που αποτελεί μέρος της χάραξης ALT2 (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5. Σχηματικό Διάγραμμα Χάραξης (Προτεινόμενη Λύση, ALT1-P). Σημειώνεται συνολικά η χάραξη διέλευσης του αγωγού που διέρχεται και στην εξεταζόμενη περιοχή που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη”. Σε κόκκινο κύκλο (Χ.Θ. 109+600 έως Χ.Θ. 120+000) απεικονίζεται η περιοχή, πλησίον της οποίας υπήρχε δυνητική θέση αστοχίας (νότια της ανατολικής εισόδου της Σήραγγας Ραφομάτη), [ΔΕΣΦΑ, 2010].

Συγκεκριμένα, στο τμήμα με χιλιομετρική θέση Χ.Θ. 109+600 – 120+000, η χάραξη θα προσπερνούσε το σημείο όπου θα κατασκευαζόταν η Ν.Ε.Ο. Τρίπολης - Καλαμάτας (Χ.Θ. 111+526) και θα διέσχιζε τον ορεινό όγκο πάνω από τον Ραφιομάτη. Στο τμήμα όμως αυτό, υπήρχαν κατασκευαστικά προβλήματα λόγω όδευσης του αγωγού σε ασταθή εδάφη, όπως απέδειξε και η εφαρμογή του RES, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.25.

Πίνακας 6.25. Βαθμονόμηση παραμέτρων στη θέση πλησίον της ανατολικής εισόδου της Σήραγγας Ραφιομάτη.

Δυνητική θέση αστοχίας πλησίον της ανατολικής εισόδου της Σήραγγας Ραφιομάτη		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Ανθρώπινη δραστηριότητα	4	Απόσταση από δρόμους: Άμεση (0-50m)
Τεκτονικό καθεστώς	4	Εντατικό: αντισπρωπτεύει επιπτώσεις και επωθήσεις
Κλίση πρσανούς	2	16°-30°
Προσανατολισμός πρσανούς	4	0°-45°, 135°-225°
Λιθολογία	1	Ασβεστόλιθοι ζώνης Πίνδου
Υδρογεωλογικές συνθήκες	4	Εντατική γεωμηχανική δράση του νερού
Βροχόπτωση	2	1000 - 1200mm
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	1	<0.5m
Απόσταση από ποτάμια	2	Κοντινή (51-100m)
Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	3	Πολύ κοντινή (51-100m)

6.7.6. Συμπερασματικοί σχολιασμοί

Με την παρουσίαση τόσο των υφιστάμενων όσο και των δυνητικών θέσεων αστοχιών, θα πρέπει να επισημανθεί ότι έχουν εντοπισθεί προβλήματα αστάθειας και σε άλλες θέσεις κατά μήκος του Εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου του Νομού Αρκαδίας που αφορούν την εξεταζόμενη περιοχή στο φύλλο “Μεγαλόπολη”. Στις θέσεις αυτές δυνητικά αναμένεται η εκδήλωση ή επαναδραστηριοποίηση κατολισθητικών φαινομένων μετά την καταστροφή της χλωρίδας, από τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007 και σε συνδυασμό με τις δύσκολες καιρικές συνθήκες που, συνήθως, επικρατούν την χειμερινή περίοδο (βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις).

Ενδεικτικά αναφέρονται θέσεις (Αποστολίδης κ.α., 2007): α) στην επαρχιακή οδό Μεγαλόπολης-Τρίπολης, πριν τη Μεγαλόπολη, β) στον επαρχιακό δρόμο Λεοντάρι – Ποταμιά, γ) στο δρόμο προς Αναβρυτό, δ) στο δρόμο προς Ανεμοδούριο, ε) στο δρόμο προς Αραχαμίτες καθώς και στ) στο δρόμο Τουρκολέκα - Καλύβια. Οι παραπάνω θέσεις επιβεβαιώνονται από τον τελικό παραγόμενο χάρτη

κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Χάρτης 6.14). Τέλος, στα πλαίσια του έργου “Soil Pro – Monitoring for soil protection” του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Life+ ENV/IT/08/428 (2014), αναφέρονται επιγραμματικά στον Πίνακα 6.26 αστάθειες πρανών, που επιβεβαιώνουν κάποιες από τις αστοχίες που περιγράφηκαν στην εξεταζόμενη περιοχή του Φύλλου Μεγαλόπολη.

Στη συνέχεια, μετά την αναλυτική περιγραφή και βαθμονόμηση των είκοσι ένα θέσεων που είτε έχουν ήδη αστοχήσει είτε έχουν τάση να αστοχήσουν, υπολογίζεται ο δείκτης αστάθειας (Πίνακας 6.27) και απεικονίζεται το ιστόγραμμα του δείκτη αστάθειας για κάθε θέση αντίστοιχα (Σχήμα 6.6).

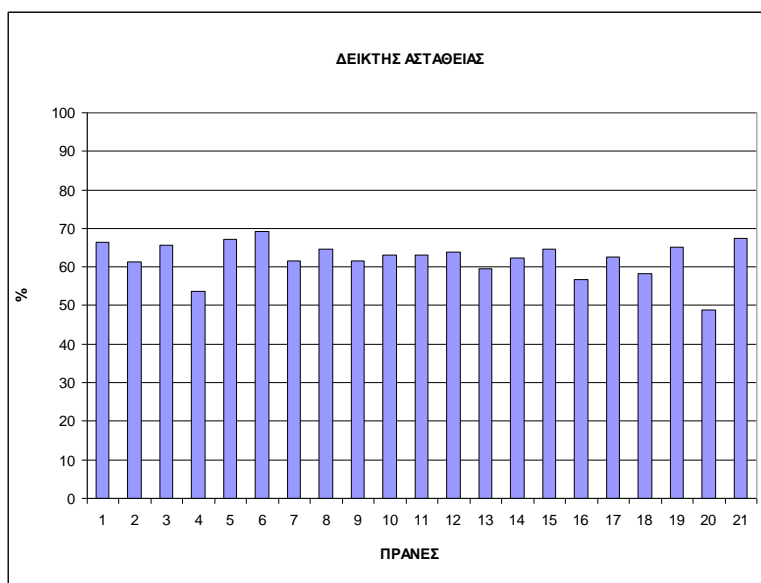
Σημειώνεται ότι ο σταθμικός συντελεστής που εμφανίζεται για κάθε επιλεγμένη παράμετρο στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 6.27, έχει προκύψει από τον Πίνακα 6.3 (Μητρώο αλληλεπίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων για την περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη”).

Πίνακας 6.26. Προβλήματα αστοχιών και μέτρα αντιμετώπισης σε θέσεις του φύλλου “Μεγαλόπολη”.

α/α	Τίτλος έργου	Τοπωνύμιο	Εργασίες	Εμπλεκόμενοι Φορείς	Προβλήματα	Αποτελέσματα	Προϋπολογισμός	Κόστος
1	Κατασκευαστικές εργασίες στην περιοχή Ραψομάτη Λεύκτρων	Ραψομάτη	Κατασκευή πασσαλότοιχων και στεγάστρου	Περιφέρεια Πελοποννήσου & Μορέας Α.Ε.	Αστάθεια των πρανών που οδηγούσε σε υποχωρήσεις του εδάφους στην ανάντη περιοχή καθώς επίσης και κατολισθήσεις.	Περιορισμός της αστάθειας των πρανών. Ο δρόμος από το 2011 και μετά δεν έχει ξανακλείσει.		
2	Κατασκευαστικά έργα προστασίας στα χωριά Ανεμοδούρι, Μαλλωτά, Ραψομάτη. Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων και κατασκευή αντιπλημμυρικών στις πυρόπληκτες περιοχές Ν. Αρκαδίας.	Ανεμοδούρι	Κατασκευή τάφρου ορθογωνικής διατομής ανάντη, τοιχείου αντιστήριξης και επέκταση κιβωτοειδούς οχετού	Περιφέρεια Πελοποννήσου	Κατολισθήσεις, Αστάθεια Πρανών, Πλημμύρες στους οικισμούς λόγω πυρκαγιών	Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επιτυχώς και δεν έχει αναφερθεί άλλο περιστατικό έκτοτε.	1.185.000 €	1.161.500 € (το ποσό αφορά και στα τρία έργα)
3	Κατασκευαστικά έργα προστασίας στα χωριά Ανεμοδούρι, Μαλλωτά, Ραψομάτη. Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων και κατασκευή αντιπλημμυρικών στις πυρόπληκτες περιοχές Ν. Αρκαδίας.	Ραψομάτη	Αγωγός σωληνωτός. Με φρεάτια οδηγήθηκε η απορροή στο ρέμα Κατασκευή τάφρου ορθογωνικής διατομής ανάντη, ένα τοίχειο αντιστήριξης, επέκταση κιβωτοειδούς οχετού, κατασκευή σωληνωτού οχετού για διευθέτηση ρέματος που διερχόταν από τον οικισμό Ραψομάτη Σωλήνωση κατά μήκος του δρόμου από τη διασταύρωση στην είσοδο της παλαιάς Εθνικής Οδού Τρίπολης – Μεγαλόπολης. Κατασκευή σωληνωτού οχετού για διευθέτηση ρέματος που διερχόταν από τον οικισμό Ραψομάτη	Περιφέρεια Πελοποννήσου	Κατολισθήσεις, Αστάθεια Πρανών, Πλημμύρες στους οικισμούς λόγω πυρκαγιών	Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επιτυχώς και δεν έχει αναφερθεί άλλο περιστατικό έκτοτε.	1.185.000 €	1.161.500 € (το ποσό αφορά και στα τρία έργα)
4	Αντιπλημμυρική προστασία του Δημοτικού Διαμερίσματος Ραψομάτη, Δήμου Μεγαλόπολης	Ραψομάτη	Κατασκευή σωληνωτού οχετού. Στο τρίτο ρέμα που διέρχεται από το Ανατολικό τμήμα του Δ.Δ.Ραψομάτη γίνεται διευθέτηση με σωλήνα Φ100 & κατασκευή μικρού τοιχείου αντιστήριξης στο ΒΑ άκρο του οικισμού (Περίπου 20-25 μέτρα)	Περιφέρεια Πελοποννήσου	Υπερχείλιση του ρέματος λόγω πυρκαγιών, ύπαρξη κινδύνου να πλημμυρίσει ο οικισμός, αστάθεια πρανών	Το έργο είναι σε εξέλιξη (αναφέρεται κατά το έτος 2014)	300.000 €	200.000 €
5	Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων και κατασκευή αντιπλημμυρικών στις πυρόπληκτες περιοχές Ν. Αρκαδίας. Έργα προστασίας στην Εθνική Οδό Τρίπολης Καλαμάτας (περιοχή Μακρυσίου)	Παλαιά Εθνική οδός Τρίπολης Μεγαλόπολης (μετά τον οικισμό Παλαιόχουνη)	Κατασκευή τοίχων αντιστήριξης, βραχοπαγίδες, απάλυνση πρανών, πατάρια και αποθηκευτικές τάφροι πάνω στις παγάνες που δημιουργήθηκαν στα πρανά.	Περιφέρεια Πελοποννήσου	Αστάθεια πρανών μετά τις πυρκαγιές του 2007. Κατολισθήσεις	Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επιτυχώς και δεν έχει αναφερθεί άλλο περιστατικό έκτοτε.	1.185.000 €	1.760.000 € μετά από συμπληρωματική σύμβαση

Πίνακας 6.27. Υπολογισμός δείκτη αστάθειας των θέσεων αστοχιών (υφιστάμενων και δυνητικών) του Φύλλου Μεγαλόπολη.

Υπολογισμός δείκτη αστάθειας (Instability Index)													
Παράμετρος	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσπ. Πνευμάτων	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία	Δείκτης αστάθειας	RSN	Κατολισθητική επιδεκτικότητα
Βαθμολογία Πρασιός Νο 1 (Γερόλαμος)	3	0	2	2	3	2	2	4	4	4	66	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 2 (Μακρμάς)	4	2	1	3	3	1	3	3	4	1	61	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 3 (Ραφουάτι)	4	2	1	4	3	1	1	3	3	4	66	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 4 (Πλάκα)	4	2	1	4	3	1	4	3	0	0	54	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 5 (Λαονίσι)	4	2	2	4	4	1	2	2	3	3	67	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 6 (Καμπούρι)	4	2	4	2	3	1	1	3	3	4	69	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 7 (Κρασιόρα)	1	4	2	2	1	4	2	1	4	4	62	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 8 (Μαυή Μπαύρα)	4	2	1	4	4	1	2	2	2	4	65	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 9 (184ο χ/μ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	4	1	2	2	2	4	0	62	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 10 (X.Θ. 186+250 έως X.Θ. 186+420 χ/μ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	4	1	2	3	2	4	0	63	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 11 (X.Θ. 186+800 έως X.Θ. 187+300 χ/μ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας Γόφυρα Σουφινά)	4	4	2	4	1	2	3	2	4	0	63	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 12 (189ο χ/μ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	2	1	2	3	2	2	4	64	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 13 (Κιταριάσι)	4	1	1	2	3	2	4	3	1	3	60	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 14 (Μαυρά)	4	4	1	4	1	2	4	2	1	3	62	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 15 (Ελληνόσα)	4	2	1	4	1	4	2	1	4	3	65	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 16 (Παυρολίτσες)	4	2	2	4	4	1	3	2	1	0	57	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 17 (Καλιόρα)	4	2	2	2	4	1	2	2	3	3	63	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 18 (Μαλλουλά)	4	2	3	2	4	1	2	2	2	1	68	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 19 (Αετασούρι)	4	4	2	2	1	4	2	1	3	3	65	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 20 (Αναβρύσι)	4	2	1	0	4	1	1	2	4	0	49	V	Πολύ Υψηλή
Βαθμολογία Πρασιός Νο 21 (Πύργος ανατολικής οδόου Στραγγός Ραφουάτι)	4	4	2	4	1	4	2	1	2	3	67	VI	Εξαιρετικά Υψηλή
Μέγιστη τιμή βαθμολογίας	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
$\frac{\sum(C+E)}{n(C+E)} \cdot 100\%$	11.11	9.15	19.78	8.82	10.78	12.09	6.21	12.09	9.15	9.09	100.00		
Σταθμικός Συντελεστής	2.78	2.29	2.79	2.21	2.70	3.02	1.66	3.02	2.29	2.45			



Σχήμα 6.6. Ιστόγραμμα δείκτη αστάθειας θέσεων αστοχίας φύλλου Μεγαλόπολη.

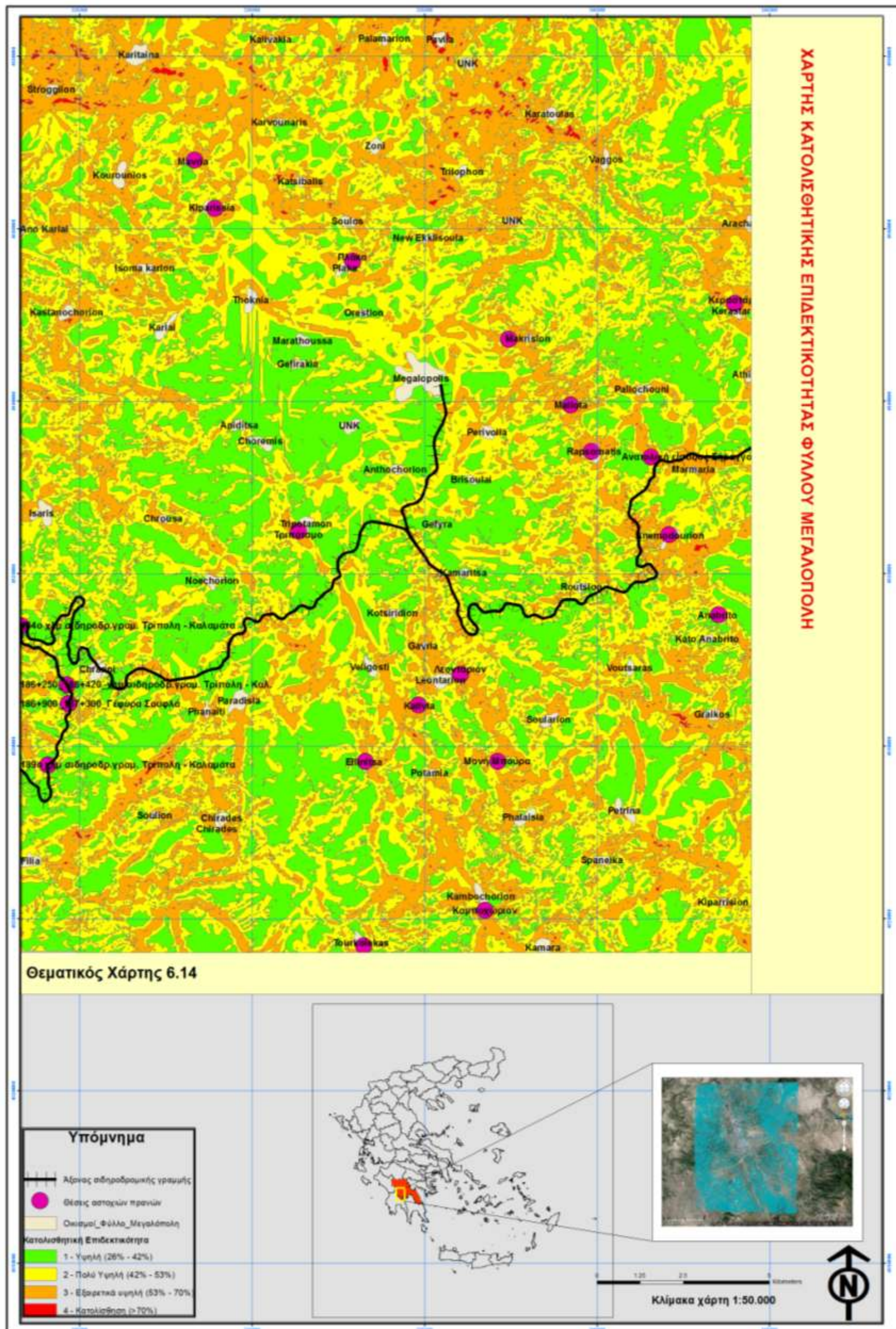
Από το προηγούμενο διάγραμμα (Σχήμα 6.6) και σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 κατά Brabb (1972), αναφορά του οποίου έγινε στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 5 (Εφαρμογή μεθοδολογίας RES – Κατολισθήσεις που μελετήθηκαν), παρατηρείται ότι οι τιμές του δείκτη αστάθειας για το 95% των εξεταζόμενων θέσεων είναι στην κατηγορία 54% - 70%, δηλαδή αντιστοιχούν στην κατηγορία «εξαιρετικά υψηλή επιδεκτικότητα σε κατολίσθηση». Παράλληλα με την εύρεση των δεικτών αστάθειας, στην παρούσα διατριβή, ύστερα από την αλληλεπίθεση των επιμέρους επιλεγμένων παραμέτρων υπό μορφή ψηφιοποιημένων θεματικών χαρτών, προκύπτει και η τελική εποπτική εικόνα του συνόλου της εξεταζόμενης περιοχής (Χάρτης 6.14), στην οποία απεικονίζεται η κατηγοριοποίηση σε υψηλή, πολύ υψηλή, εξαιρετικά υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα και κατολίσθηση με βάση την αντίστοιχη βαθμονόμηση των επιλεγμένων παραμέτρων, δηλαδή από 1 έως και 4. Έτσι, στο συγκεκριμένο χάρτη το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην βαθμονόμηση 4 που σημαίνει περιοχές που αστοχούν (>70%), το πορτοκαλί συνδέεται με την βαθμονόμηση 3 και ορίζει περιοχές εξαιρετικά υψηλής επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση (54-70%) ενώ οι υπόλοιπες δύο βαθμονομήσεις 2 και 1 προσδιορίζουν περιοχές με λιγότερο επιδεκτικές (<54%) σε αστοχία πρσανών (κίτρινο και πράσινο αντίστοιχα).

Σε συνέχεια των παραπάνω, είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι ακόλουθοι όροι που συνδέονται με την κατηγοριοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας και απεικονίζονται στον τελικό παραγόμενο χάρτη που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη”. Η ερμηνεία έχει δοθεί από τους Miller et al. (2009).

Υψηλής και πολύ υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας περιοχές: Σε αυτές τις περιοχές, κατολισθήσεις είναι δυνατόν να λάβουν χώρα λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και πρόσφατων κλιματικών/περιβαλλοντικών συνθηκών. Επιπλέον, μικρές αλλαγές στις συνθήκες του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, αύξηση στην επιφανειακή απορροή, εκσκαφές στον πόδα του πρσανούς και αύξηση της γωνίας κλίσης του πρσανούς μπορεί να συντελέσουν στην αστοχία ενός πρσανούς.

Η διαδικασία της χωρικής ανάλυσης ολοκληρώθηκε με την αλληλεπίθεση των παραπάνω επιμέρους θεματικών χαρτών, βάσει του εργαλείου Weighted Sum, όπου πολλαπλασιάστηκαν τα τελικά επαναταξινομηθέντα επίπεδα με τους

αντίστοιχους σταθμικούς συντελεστές (βάρη) που προέκυψαν από την ανάλυση του μητρώου αλληλεπίδρασης της μεθοδολογίας RES για το φύλλο “Μεγαλόπολη”. Το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε, απεικονίζεται στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Χάρτης 6.14).



Χάρτης 6.14. Χάρτης κατοισθητικής επιδεκτικότητας φύλλου “Μεγαλόπολη”.

Από τη μελέτη του ανωτέρου χάρτη σε συνδυασμό με τους επιμέρους θεματικούς χάρτες των επιλεγμένων παραμέτρων καθώς και τα στοιχεία-πληροφορίες από τον τοπογραφικό (π.χ. οικισμοί, υψόμετρο, οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο) και το γεωλογικό (π.χ. ποτάμια, ρήγματα, γεωλογικοί σχηματισμοί) χάρτη της περιοχής μελέτης (φύλλο “Μεγαλόπολη”, κλίμακας 1:50.000), προκύπτουν οι ακόλουθοι σχολιασμοί:

1. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό είναι ότι οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα (πορτοκαλί χρώμα), διέρχονται από τους οδικούς άξονες τόσο του Εθνικού όσο και του επαρχιακού δικτύου. Συγκεκριμένα, το 86% των εξεταζόμενων θέσεων αστοχίας βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 50m από τους υφιστάμενους οδικούς άξονες. Τούτο, όμως, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν δυνητικά και άλλες θέσεις (εκτός των γραμμικών αξόνων) που θα μπορούσαν να εκδηλωθούν φαινόμενα αστοχίας (όπως αυτές που προέκυψαν από την χωρική ανάλυση και απεικονίζονται στον χάρτη με πορτοκαλί χρώμα).
2. Οι θέσεις με δείκτη αστοχιών άνω του 54% βρίσκονται σε περιοχές που είναι τεκτονικά περισσότερο διαταραγμένες σε συνδυασμό ενίοτε με τη λιθολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών (π.χ. τεταρτογενείς αποθέσεις, νεογενή, φλύσχης). Συγκεκριμένα, ποσοστό 38% των θέσεων αστοχίας συνδέεται με ισχυρό τεκτονικό καθεστώς, το 24% των θέσεων αντιστοιχεί στο πολύ ισχυρό τεκτονικό καθεστώς και το 33% συνδέεται με εντατικό καθεστώς.
3. Όσον αφορά στη σχέση των θέσεων αστοχίας με την κλίση των πρηνών, βρέθηκε ότι ποσοστό 33% ανήκει στην κατηγορία 2 (16° - 30°) και 48% στην κλάση 1 (6° - 15°), λαμβάνοντας υπόψη την παρατήρηση που σημειώνεται στον Πίνακα 5.2.
4. Προσανατολισμός πρηνούς
Σχετικά με την παράμετρο αυτή, η έρευνα έδειξε ότι ποσοστό 43% των θέσεων αστοχίας ανήκει στην κατηγορία 4 (0° - 45° , 135° – 225°) και ακολούθως 29% εντάσσεται στην κατηγορία 2 (90° - 135° , 275° – 315°).
5. Στον Πίνακα 6.28 καταγράφεται η σχέση των εξεταζόμενων θέσεων αστοχίας με το γεωλογικό σχηματισμό στον οποίο εδράζονται:

Πίνακας 6.28. Γεωλογικό υπόβαθρο θέσεων αστοχίας φύλλου “Μεγαλόπολη”.

α/α	Θέση	Γεωλογικός σχηματισμός
1	Τρίποταμο	Μεταλπικά ιζήματα
2	Μακρύσι	Μεταλπικά ιζήματα
3	Ραφομάτη	Μεταλπικά ιζήματα
4	Πλάκα	Μεταλπικά ιζήματα
5	Λεοντάριον	Φλύσχη
6	Καμποχώρι	Μεταλπικά ιζήματα
7	Κεραστάρη	Ασβεστόλιθοι με παρεμβολές δολομιτιωμένων ασβεστολίθων, δολομιτών (Ζώνη Τρίπολης)
8	Μονή Μπούρα	Φλύσχη
9	184 χλμ σιδηροδρ. γραμμής Πελοπ.	Σχιστοκερατολιθική σειρά
10	Χ.Θ. 186+250 – Χ.Θ. 186+420 σιδηροδρ. γραμμής Πελοπ.	Σχιστοκερατολιθική σειρά
11	Χ.Θ. 186+900 – Χ.Θ. 187+300 σιδηροδρ. γραμμής Πελοπ. (Γέφυρα Σουφλά)	Σχιστοκερατολιθική σειρά
12	Χ.Θ. 189+000	Σχιστοκερατολιθική σειρά
13	Κυπαρίσσια	Μεταλπικά ιζήματα
14	Μαυριά	Σχιστοκερατολιθική σειρά
15	Ελληνίτσα	Ασβεστόλιθοι με παρεμβολές δολομιτιωμένων ασβεστολίθων, δολομιτών (Ζώνη Τρίπολης)
16	Τουρκολέκας	Φλύσχη
17	Καλύβια	Φλύσχη
18	Μαλλωτά	Φλύσχη
19	Ανεμοδούρι	Ασβεστόλιθοι
20	Αναβρυτό	Φλύσχη
21	Πλησίον ανατολικής εισόδου σήραγγας Ραφομάτη	Ασβεστόλιθοι

Από τον συγκεκριμένο πίνακα, παρατηρείται ότι σε σύνολο 21 θέσεων, έξι (6) θέσεις αστοχίας (ποσοστό 29% επί του συνόλου) σχετίζονται με το φλύσχη, που σύμφωνα με τους Koukis and Zioukcas (1991) είναι ο πλέον επιρρεπής σχηματισμός σε κατολισθήσεις. Σημειώνεται ότι κοντά σε τεκτονικές επαφές και περιοχές με μεγάλες εδαφικές κλίσεις και έντονη αποσάθρωση, ο φλύσχη παρουσιάζεται με υποβαθμισμένη γεωμηχανική συμπεριφορά, ανάλογα με τον προσανατολισμό των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών, τη μορφολογία και τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες. Στις θέσεις αυτές τα αργιλικής σύστασης στρώματα προκαλούν κατολισθητικά φαινόμενα.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των νεογενών ιζημάτων και των Τεταρτογενών αποθέσεων σε ποσοστό επίσης 29%, λόγω των μειωμένων γεωμηχανικών χαρακτηριστικών και της σχετικά μεγάλης υδροπερατότητας αποτελούν επίσης δείκτες ασταθών γεωλογικά περιοχών.

Ο σχηματισμός της ψαμμιτοσχιστοκερατολιθικής διάπλασης (ποσοστό εμφάνισης 24%) είναι μεν βαθμονομημένος με τη μικρότερη τιμή (1) σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2, αλλά ο συνδυασμός του προσανατολισμού της σχιστότητας με ομόρροπη κλίση πρηνούς και κατείσδυση - κυκλοφορία επιφανειακού και υπόγειου νερού αποτελεί δείκτη ασταθούς ισορροπίας για τα πρηνή. Επίσης, τέσσερις θέσεις εδράζονται σε ασβεστολίθους (ποσοστό εμφάνισης 19%) αλλά δεν αποτελούν κρίσιμο παράγοντα οι ασβεστόλιθοι από μόνοι τους για την αστάθεια των συγκεκριμένων θέσεων.

Εναλλακτικά, ως προς το ποσοστό βαθμονόμησης των κλάσεων, το 43% αναφέρεται στην κατηγορία 1 (Σχιστοκερατόλιθοι, Ασβεστόλιθοι), το 29% στην κατηγορία 3 (Νεογενή ιζήματα, Τεταρτογενείς αποθέσεις) και ποσοστό ίσο με 29% αναφέρεται στην κλάση 4 (Φλύσχη).

6. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Το 43% των θέσεων αστοχίας ανήκει στην κατηγορία περιορισμένης γεωμηχανικής δράσης του νερού λόγω εμφάνισης του φλύσχη, των σχιστοκερατόλιθων και εν μέρει των ασβεστολίθων. Ποσοστό της τάξης του 19% σχετίζεται με την ύπαρξη αλλουβιακών αποθέσεων και ανθρακικών σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας περατότητας. Τέλος, το 29% συνδέεται με την ύπαρξη ανθρακικών σχηματισμών μέσης έως υψηλής περατότητας, όπως σχετικά αναφέρεται στον Πίνακα 5.2.

7. Βροχόπτωση

Με βάση τις τεχνικές εκθέσεις του ΙΓΜΕ που αναφέρθηκαν στις προαναφερθείσες θέσεις αστοχίας στο φύλλο “Μεγαλόπολη” καθώς και τις εργασίες των Μπουτίνα (2012) και Φαρμακάκη (2012) που λήφθηκαν υπόψη, το 57% των θέσεων αστοχίας βρίσκεται στην κατηγορία 2 (1000 - 1200mm ύψους βροχής), το 29% είναι στην κατηγορία 3 (1200 – 1400mm) ενώ το 14% ανήκει στην κατηγορία 4 (>1400mm).

8. Πάχος μανδύα αποσάθρωσης

Το μεγαλύτερο ποσοστό 43% βρίσκεται στην κλάση 3 (1.5 - 3.0m) και ακολουθεί η κατηγορία 4 (>3.0m) με ποσοστό 29%.

9. Χαρακτηριστική είναι σε αρκετές θέσεις η συσχέτιση ρεμάτων και θέσεων αστοχίας, λόγω της εντονότερης διάβρωσης των γεωλογικών σχηματισμών σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής. Αυτό έχει ως

συνέπεια τη μείωση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών και την επιδεκτικότητά αυτών σε ολισθήσεις και γενικά αστοχίες. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι ποσοστό ίσο με 43% ανήκει στην κλάση 4, δηλαδή οι θέσεις αστοχίας βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 50m από τα ρέματα, ακολουθεί ποσοστό ίσο με 33% το οποίο χαρακτηρίζει την κατηγορία 3 (απόσταση πρηνών: 51-100m) και ποσοστό ίσο με 19% που χαρακτηρίζει την κλάση 2 (101-150m).

10. Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία

Το μεγαλύτερο ποσοστό των θέσεων αστοχίας (33%) ανήκει στην κατηγορία 3 (απόσταση από τεκτονικά στοιχεία 51-100m) και ακολουθεί ποσοστό ίσο με 29%, το οποίο χαρακτηρίζει δύο κατηγορίες, δηλαδή 0 (>200m) και 4 (μικρότερη των 50m).

11. Εκτός των οικισμών και συγκεκριμένων θέσεων ευρύτερων περιοχών που καταγράφηκαν ως περιοχές που είτε έχουν ήδη αστοχήσει είτε δυνητικά μπορεί να αστοχήσουν, βάσει υφιστάμενων τεχνικών εκθέσεων (ΙΓΜΕ), στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας (Χάρτης 6.14) απεικονίζονται και άλλες θέσεις που είναι επικίνδυνες να αστοχήσουν είτε στο άμεσο μέλλον, είτε μακροπρόθεσμα. Τέτοιες θέσεις αφορούν, κυρίως, οικισμούς όπως τους παρακάτω:

Στρογγυλό, Καρίταινα, Κουρουνός, Καλυβάκια, Καρβουνάρης, Άνω Καρυαί, Παλαμάριον, Ζώνη, Κατσιμπαλης, Ίσωμα Καρυών, Καστανοχώρι, Λύκαιον, Κατσιμπαλης, Σούλος, Ίσαρης, Χρούσα, Νεοχώριο, Χράνοι, Φίλια, Χιράδες, Φαναϊτή, Παραδείσια, Καμάρα, Σπαναίικα, Κυπαρίσσιο, Πετρίνα, Γραικός, Φαλαισία, Ποταμιά, Σουλάριο, Κοτσιριδίο, Γαβριά, Ρούτσιο, Μαρμαριά, Κάτω Αναβρυτό, Βουσαράς, Παλαιοχούνη, Αθήναιον, Νέα Εκκλησουλά, Καράτουλας, Βάγγος, Παύλια, Απιδίτσα, Σούλιο και Μεγαλόπολη.

12. Σε αρκετά μεγάλο τμήμα του παλαιού σιδηροδρομικού δικτύου (από Τρίπολη προς Καλαμάτα) που διασχίζει το φύλλο “Μεγαλόπολη”, παρατηρείται ότι στις ακόλουθες θέσεις εμφανίζονται δυνητικές θέσεις εξαιρετικά υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας με 54-70% δείκτη αστάθειας (απεικόνιση με πορτοκαλί χρώμα), όπως: α) στη διαδρομή από Μαρμαριά – Ραψομάτη - Ανεμοδούρι έως και Ρούτσιο, β) νότια της Καμαρίτσας έως και το ύψος του οικισμού Γέφυρα, γ) κατά θέσεις από το ύψος του οικισμού Τριπτόταμου έως και

τον οικισμό Χράνοι και τέλος κατά θέσεις από τη Μεγαλόπολη έως και το ύψος του οικισμού Γέφυρα.

13. Το ποσοστό των θέσεων που αφορούν την κατηγορία «Εξαιρετικά υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα» αντιστοιχεί σε τιμή ίση με 95% επί του συνόλου των εξεταζόμενων θέσεων ενώ αυτών που αναφέρονται ως θέσεις με πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα ισούνται με 5%.

Συμπερασματικά, ο αντίλογος που σχετίζεται με αρνητικές απόψεις που εκφέρονται για αυτά που περιγράφει η μεθοδολογία RES, όπως για παράδειγμα της υποκειμενικής κρίσης ενός ερευνητή-μελετητή στην εκτίμηση της βαθμονόμησης των εκάστοτε επιλεγμένων παραμέτρων, στην πρόγνωση αστοχιών πρηνών, βρίσκεται στην εμπειρική παρουσίαση και πρακτική αξιολόγηση της μεθοδολογίας σε μελέτες περιπτώσεων διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών, περιοχών - θέσεων και τεχνικογεωλογικών συνθηκών που έχουν λάβει χώρα κατά την τελευταία εικοσαετία διεθνώς (Hudson 1992, Hudson & Harrison, 1997, Mazzoccola & Hudson 1996) αλλά και στον Ελληνικό χώρο (Benardos & Kaliampakos 2004, Rozos et al. 2006, 2008) και ειδικά κατά την εφαρμογή του RES στις θέσεις Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα, Νεμέα και την περιοχή που ορίζεται από το “φύλλο” Μεγαλόπολη, που αποδεικνύουν την ορθότητα του σκεπτικού της, ως προς την αντιμετώπιση των ζητημάτων που άπτονται της πρόγνωσης των αστοχιών πρηνών.

Τέλος, με αφορμή την απεικόνιση και το περιεχόμενο του ανωτέρω χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας, αναφέρεται η άποψη ενός ερευνητή που σημειώνει ότι (Brabb, 1996): *«Η προετοιμασία των χαρτών κατολισθητικής επικινδυνότητας δεν εγγυάται ότι πράγματι θα χρησιμοποιηθούν. Οι γεωεπιστήμονες θα πρέπει να στοχοποιούν διαφορετικό ακροατήριο για αυτούς τους χάρτες, εάν θέλουν να τους κάνουν αποδεκτούς και εν τέλει χρηστικούς. Θα πρέπει, λοιπόν, οι ειδικοί να επιτύχουν, αρχικά, το περιεχόμενο των παραγόμενων χαρτών να είναι, απλό, άμεσο και εύκολα κατανοητό και να χρησιμοποιούνται εκείνα τα χρώματα, όπως το κόκκινο για τις περισσότερο επικίνδυνες περιοχές, το πράσινο για τις ασφαλέστερες και το κίτρινο για της μέσης (ενδιάμεσης) επικινδυνότητας. Στη συνέχεια, θα πρέπει αυτοί οι χάρτες να διαφημισθούν ή/και να «πωληθούν» σε άτομα όπως οι μελετητές, οι πολιτικοί, το προσωπικό άμεσης ανάγκης, οι τραπεζίτες και οι ασφαλιστικές εταιρείες στην έναρξη της ζωής ενός*

έργου, έτσι ώστε αυτές οι κατηγορίες πολιτών να νιώθουν ότι έχουν άμεση επίδραση στην ανάπτυξη των δεδομένων και των παραγόμενων τους χαρτών με επακόλουθο την πιθανή χρήση του τελικού προϊόντος του χάρτη κατολισθητικής επικινδυνότητας».

Ωστόσο, είναι γεγονός ότι αν και οι επικίνδυνες για αστοχία πρηνών περιοχές δεν μπορούν πολλές φορές να αποφευχθούν, εν τούτοις, η αναγνώρισή τους στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού των τεχνικών έργων μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή των κατάλληλων προληπτικών μέτρων που θα ελαχιστοποιήσουν την επικινδυνότητά τους. Τα παραπάνω συμπεράσματα δίνονται στον Πίνακα 6.29.

Πίνακας 6.29. Ποσοστό κλάσεων βαθμονόμησης των επιλεγμένων παραμέτρων στο φύλλο “Μεγαλόπολη”.

Παράμετρος	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσεν. Πρανών	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 1 (Γραπύλα)	3	0	2	2	3	2	2	4	4	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 2 (Μακρόση)	4	2	1	3	3	1	3	3	4	1
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 3 (Ραφομάτη)	4	2	1	4	3	1	1	3	3	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 4 (Γλάσκ)	4	2	1	4	3	1	4	3	0	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 5 (Λεονόρα)	4	2	2	4	4	1	2	2	3	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 6 (Καμπολάρα)	4	2	4	2	3	1	1	3	3	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 7 (Κιζοστόφης)	1	4	2	2	1	4	2	1	4	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 8 (Μονή Μπούρα)	4	2	1	4	4	1	2	2	2	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 9 (184ο χλμ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	4	1	2	2	2	4	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 10 (X.Θ. 188+250 έως X.Θ. 196+300 χλμ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	4	1	2	3	2	4	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 11 (X.Θ. 196+300 έως X.Θ. 197+300 χλμ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας, Γέφυρα Σουφλά)	4	4	2	4	1	2	3	2	4	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 12 (189ο χλμ της Σδ. Γραμμής Τρίπολης - Καλαμάτας)	4	4	2	2	1	2	3	2	2	4
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 13 (Καταμάτας)	4	1	1	2	3	2	4	3	1	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 14 (Μακρά)	4	4	1	4	1	2	4	2	1	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 15 (ΕΛΑΡΗΣ)	4	2	1	4	1	4	2	1	4	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 16 (Ταυροκόσος)	4	2	2	4	4	1	3	2	1	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 17 (Καράβια)	4	2	2	2	4	1	2	2	3	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 18 (Μολλυτή)	4	2	3	2	4	1	2	2	2	1
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 19 (Λεοδοσόρα)	4	4	2	2	1	4	2	1	3	3
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 20 (Λαβράρα)	4	2	1	0	4	1	1	2	4	0
Βαθμονόμησης Πρανούς Νο 21 (Γνώσιον οπισθηκός οικότου Σιδηράνας Ραυμάτη)	4	4	2	4	1	4	2	1	2	3
Ποσοστό κλάσεων βαθμονόμησης παραμέτρων	Ανθρώπινη δραστηριότητα	Τεκτονικό καθεστώς	Κλίση πρανών	Προσεν. Πρανών	Λιθολογία	Υδρογεωλογικές συνθήκες	Βροχόπτωση	Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	Απόσταση από ποτάμια	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία
0	0.00	4.76	9.52	9.52	0.00	4.76	0.00	0.00	4.76	28.57
1	4.76	0.00	47.62	9.52	42.86	42.86	0.00	23.81	0.00	9.52
2	0.00	38.10	33.33	28.57	0.00	19.05	57.14	4.76	19.05	0.00
3	9.52	23.81	4.76	9.52	28.57	4.76	28.57	42.86	33.33	33.33
4	85.71	33.33	4.76	42.86	28.57	28.57	14.29	28.57	42.86	28.57
ΣΥΝΟΛΟ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Παρατήρηση: Οι κλάσεις βαθμονόμησης έχουν προκύψει από τον Πίνακα 5.2 (Βαθμονόμηση επιλεγμένων παραμέτρων αστοχίας πρανών).

6.8. Εναλλακτικός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων κατολισθητικής επιδεκτικότητας – Δημιουργία μοντέλου Model Builder

Εισαγωγή

Οποιαδήποτε πρόβλεψη κατολισθητικής επιδεκτικότητας έχει έναν βαθμό αβεβαιότητας (Guzzetti et al., 2006). Στοιχεία αβεβαιότητας είναι: α) λάθη και παραλείψεις στις διαθέσιμες παραμέτρους μιας κατολίσθησης για την ολοκλήρωση της ανάλυσης, β) μη σωστή κατανόηση της διεργασίας της κατολίσθησης συμπεριλαμβανομένου της γεωγραφικής και χρονικής της εξέλιξης, γ) περιορισμοί που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές για τον προσδιορισμό της επιδεκτικότητας και δ) εγγενής φυσική μεταβλητότητα (variability) του κατολισθητικού φαινομένου (Carrara et al., 1992; Ardizzone et al., 2002).

Κατά συνέπεια, κάθε επιλογή κριτηρίων, καθώς και η προσεκτική και τεκμηριωμένη βαθμολόγησή τους με οποιαδήποτε από τις μεθόδους βαθμολόγησης που υπάρχουν βιβλιογραφικά, εμπεριέχει και τον κίνδυνο λάθους, που μπορεί να οφείλεται σε πλήθος αστάθμητων παραγόντων αλλά και στην πληροφορία που συλλέχθηκε για το πρόβλημα και τα κριτήρια, όπως επίσης και στα δεδομένα τα οποία μπορεί να είναι ελλιπή. Θα πρέπει, λοιπόν, αρκετές φορές να βαθμολογηθούν εκ νέου τα αρχικά κριτήρια ή να τροποποιηθούν κάποιες ιδιότητές τους. Για να ανημερωπισθεί αυτός ο προβληματισμός, υιοθετείται η δημιουργία ενός μοντέλου εργασιών, στο οποίο θα είναι δυνατή η τροποποίησή του σε κάθε στιγμή. Στο περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) αυτή η διαδικασία ονομάζεται «Model Builder». Πρόκειται για μια οπτικοποιημένη γλώσσα μοντελοποίησης, η οποία μπορεί να παραμετροποιεί τις ιδιότητες των δεδομένων, ώστε κάθε φορά να παράγει διαφορετικό αποτέλεσμα (Ανδρουλακάκης κ.α., 2009).

Είναι γεγονός, ότι τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια της παρακολούθησης, εκτίμησης και αξιοποίησης του φυσικού περιβάλλοντος, τα ΓΣΠ κάνουν δυναμικά την παρουσία τους στο χώρο της Γεωλογίας και των Γεωεπιστημών γενικότερα. Τηλεπισκοπικά δεδομένα που καθημερινά μεταδίδονται από τους δορυφόρους συνδυάζονται με βάσεις γεωλογικών δεδομένων και έτσι, μέσω των ΓΣΠ επιτρέπεται η διαχρονική παρακολούθηση των γεωλογικών διαθεσίμων, των σχέσεων αλληλεξάρτησής τους και των χωρικών και χρονικών μεταβολών τους. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ή Geographical Information Systems,

ορίζουν «ένα δυναμικό σύνολο από εργαλεία για τη συλλογή, αποθήκευση, μετασχηματισμό, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο, για κάποιους συγκεκριμένους σκοπούς». Έτσι, ένα ΓΣΠ μπορεί να αποθηκεύσει, να διαχειριστεί και να ενσωματώσει ένα μεγάλο όγκο χωρικών δεδομένων ενώ παράλληλα αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο χωρικής ανάλυσης και επίλυσης χωρικών προβλημάτων μέσα από την οργάνωση, διαχείριση και μετασχηματισμό μεγάλου όγκου δεδομένων με τέτοιο τρόπο που η πληροφορία να είναι προσιτή σε όλους τους χρήστες (Burrough, 1986).

Κατατάσσονται στα συστήματα ανοικτού περιεχομένου, έτσι ώστε να είναι σε θέση να δομηθεί κάθε φορά ένα γεωλογικό μοντέλο, εισάγοντας εκείνα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την επίλυση των εκάστοτε προβλημάτων που προκύπτουν, τηρώντας τις αρχές της διαλειτουργικότητας, δηλαδή να μπορούν τα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν από οποιοδήποτε εμπορικό λογισμικό ΓΣΠ.

Η χρησιμοποίηση του γεωλογικού μοντέλου προσθέτει δυνατότητες, όπως:

α) Δημιουργία μοντέλων και χωρικών βάσεων δεδομένων, β) Δημιουργία ενός ενιαίου γεωλογικού χάρτη, γ) Ευκολότερη συντήρηση και διαχείριση χωρικών δεδομένων, δ) Αναζήτηση και ανάλυση χωρικών δεδομένων σε επίπεδο επικράτειας, ε) Εύκολη διαχείριση περιγραφών των γεωλογικών σχηματισμών, στ) Χρησιμοποίηση μεταδεδομένων για την περιγραφή των χωρικών δεδομένων του, ζ) Αρχαιοθέτηση raster (ψηφιδωτών) εικόνων μαζί με τα διανυσματικά (vector) δεδομένα, η) Αρχαιοθέτηση των σχέσεων (relations) των διαφόρων οντοτήτων μαζί με τα δεδομένα, θ) Δημιουργία ορίων τιμών (domain names) σε ένα χαρακτηριστικό για όλη την υπάρχουσα βάση, ι) Ενημέρωση της βάσης από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα.

Η τεχνολογία των ΓΣΠ βρίσκει εφαρμογή σε θέματα ανάλυσης και σχεδιασμού, που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τον γεωγραφικό χώρο (Κουτσόπουλος, 2002). Συνεπώς, η αναμφισβήτητη απαραίτητη εξεύρεση αποτελεσματικών εργαλείων και μεθόδων εκτίμησης της ευστάθειας πρανών, αποσκοπώντας στη πρόληψη οποιωνδήποτε ανεπιθύμητων φαινομένων, είναι κάτι το εφικτό μέσα από τη χρήση ΓΣΠ.

Ο κύριος σκοπός των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών είναι η χρήση τους για την μετάβαση από στοιχεία σε πληροφορία, που επιτυγχάνεται με έναν μηχανισμό – διαδικασία που αποκαλείται Γεωδιαχείριση (Geoprocessing).

Αποτελεί ουσιαστικά μια σειρά από εργαλεία για τη διαχείριση και ανάλυση χωρικών δεδομένων. Ένα από τα κύρια τμήματα του μηχανισμού είναι οι αναλυτικές διαδικασίες του Model Builder, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη υλοποίηση των αναλυτικών λειτουργιών που επιθυμεί ο χρήστης των ΓΣΠ, ακολουθώντας ένα σαφώς καθορισμένο μοντέλο που έχει δημιουργηθεί για ένα συγκεκριμένο σκοπό (Κουτσόπουλος, Ανδρουλακάκης, 2004).

6.8.1. Αναπαράσταση χωρικών δεδομένων

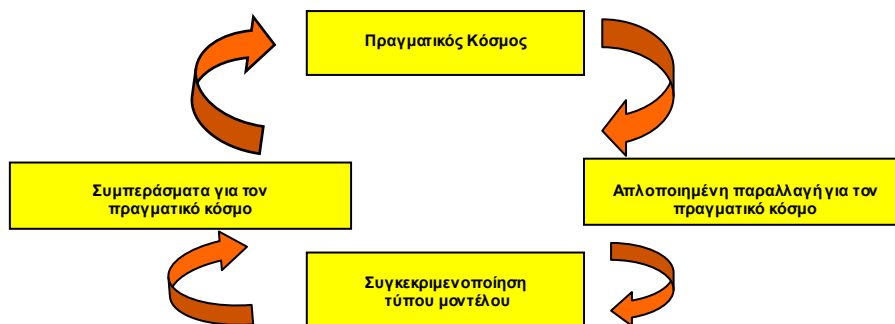
Είναι γεγονός, αναμφισβήτητο, ότι σήμερα κυριαρχεί η εποχή της ψηφιακής επανάστασης, αφού σχεδόν όλες οι επικοινωνίες μεταξύ των ανθρώπων είναι σε ψηφιακή μορφή. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της ψηφιακής αναπαράστασης είναι ότι τις περισσότερες φορές είναι αθέατη από τον κοινό χρήστη και προσβάσιμη μόνο από ορισμένους εξειδικευμένους τεχνικούς. Ο χρήστης αντί της ψηφιακής πληροφορίας βλέπει ορισμένες αναπαραστάσεις (views) των οποίων το περιεχόμενο έχει νόημα για αυτόν. Είναι γνωστό ότι οι υπολογιστές αναπαριστούν τα διάφορα φαινόμενα σαν δυαδικά ψηφία μηδέν (0) ή ένα (1). Όλα αυτά τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά πρότυπα με τα οποία μετατρέπεται η πληροφορία σε ψηφιακή μορφή. Παρόμοια, για την αναπαράσταση των γεωγραφικών δεδομένων χρησιμοποιούνται συστήματα κωδικοποίησης. Δηλαδή, σε κάθε μέρος μίας πολύτιμης πληροφορίας της επιφάνειας της γης, αντλούνται ορισμένα χαρακτηριστικά από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών και αναπαριστάται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή σαν μία ακολουθία από μηδέν (0) ή ένα (1) (Κουτσόπουλος, Ανδρουλακάκης, 2004).

Η ψηφιακή αναπαράσταση της Γεωγραφικής πληροφορίας, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή αναπαράσταση (χάρτινοι χάρτες, γραπτές αναφορές από εξερευνητές), διότι χρησιμοποιεί όλα τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα, υπολογιστές, διαδίκτυο, μαζικά μέσα αποθήκευσης για να χειρισθεί κάθε είδους πληροφορία ανεξάρτητα από το νόημά της. Τα ψηφιακά δεδομένα αντιγράφονται εύκολα, μεταδίδονται με μεγάλες ταχύτητες και μπορεί να αποθηκευτούν χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος της φυσικής καταστροφής ή αλλοίωσής τους, όπως οι παραδοσιακοί χάρτες. Βέβαια, το πιο σημαντικό από όλα είναι ότι τα δεδομένα αυτά εύκολα μετασχηματίζονται, επεξεργάζονται και αναλύονται.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών επιτρέπουν να γίνονται λειτουργίες με τα ψηφιακά δεδομένα τα οποία είναι αδύνατον να εκτελούνταν ποτέ με τα παραδοσιακά δεδομένα των χάρπινων χαρτών. Για παράδειγμα, με τα ΓΣΠ υπάρχει η δυνατότητα να αλληλεπιτεθούν ή να συνδυασθούν πληροφορίες από πολλά επίπεδα (χάρτες), να μετρηθούν γρήγορα και με ακρίβεια αποστάσεις, να αλλαχθεί η κλίμακα, να μεγεθυνθεί μία περιοχή ή να γίνει μετακίνηση μέσα στον χάρτη χωρίς να ενδιαφέρουν τα όρια του (Κουτσόπουλος, Ανδρουλακάκης, 2004).

6.8.2. Το βασικό πρόβλημα

Σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς, υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι αναπαράστασης του γεωγραφικού κόσμου και κανένας από αυτούς δεν είναι τέλειος αλλά ούτε και ιδανικός για όλες τις εφαρμογές. Το βασικότερο πρόβλημα για συζήτηση σε ένα ΓΣΠ, είναι ποια πληροφορία πρέπει να αναπαρασταθεί και πως θα γίνει αυτό. Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την αποτελεσματικότητα της αναπαράστασης είναι η ακρίβεια (accuracy). Επειδή η γεωγραφική πληροφορία είναι πολύπλοκη, πάντοτε πρέπει να γίνουν επιλογές για το τι θα συμπεριληφθεί και αντίστοιχα τι θα παραληφθεί. Μία παρά πολύ καλή προσέγγιση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η χρησιμοποίηση μοντέλων αναπαράστασης. Όποτε χρειάζεται να ληφθεί κάποια απόφαση για τον γεωγραφικό κόσμο, τότε θα πρέπει πρώτα να γίνουν πειράματα με διάφορα μοντέλα και αναπαραστάσεις δοκιμάζοντας διαφορετικά σενάρια. Βέβαια, για να δουλέψει αυτό, θα πρέπει η αναπαράσταση να συμπεριφέρεται και να αντιδρά όπως ο πραγματικός κόσμος. Αυτό απαιτεί μεγάλη συσσώρευση γνώσης γύρω από τον κόσμο, προτού εφαρμοσθεί μία ακριβής αναπαράστασή του και η οποία επιτρέπει την εξομοίωση της συμπεριφοράς του από τον υπολογιστή. Η δόμηση και η χρήση μοντέλων είναι ουσιαστικά μια διαδικασία λήψης αποφάσεων. Τα κυριότερα τμήματα της διαδικασίας αυτής, όπου διακρίνονται τέσσερα βασικά στάδια, που συνδέονται μεταξύ τους με μια κυκλική σχέση φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7. Δόμηση μοντέλων (Κουτσόπουλος, Ανδρουλακάκης, 2004)

6.8.3. Στάδια Δόμησης Μοντέλων

Στο πρώτο στάδιο, την αφαίρεση, υπάρχει η δημιουργία μιας απλοποιημένης εικόνας του πραγματικού κόσμου. Στην αφαίρεση, από το τεράστιο πληροφοριακό υλικό, αφαιρούνται όσα στοιχεία δεν θεωρούνται σημαντικά και χρησιμοποιούνται μόνο όσα κατά την κρίση του ερευνητή μπορούν να αποκαλύψουν την πραγματικότητα. Δηλαδή, γίνεται επιλογή των σημαντικότερων μεταβλητών και σχέσεων για μια δοσμένη κατάσταση. Σ' αυτό το στάδιο της αφαίρεσης είναι που υπεισέρχεται το υποκειμενικό στοιχείο στη δόμηση μοντέλων και γίνονται οι υποθέσεις για την ισχύ του μοντέλου, ανάλογα με τις απόψεις του ερευνητή. Κατά συνέπεια, είναι πιθανό να παραληφθούν είτε σκόπιμα, είτε από άγνοια σημαντικοί παράγοντες ή να εισαχθούν άλλοι που είναι παραπλανητικοί. Οι παραδοχές, συνήθως, γίνονται για να απλοποιηθούν το πλαίσιο όπου μέσα του λαμβάνουν χώρα τα γεγονότα.

Στο δεύτερο στάδιο που είναι ο μετασχηματισμός, η απλοποιημένη εικόνα του πραγματικού κόσμου μετατρέπεται σε μια κατάλληλη αναλογία. Ουσιαστικά πρόκειται για την απόφαση επιλογής ενός από τους διάφορους τύπους μοντέλων. Ο ειδικός τύπος μοντέλου, που επιλέγεται, εξαρτάται κατά ένα μέρος από τη φύση του προβλήματος και κατά ένα άλλο μέρος από τα ενδιαφέροντα του ερευνητή. Έτσι, στο στάδιο του μετασχηματισμού οι καταστάσεις που μελετούνται, μεταφράζονται σε κάποιο αναλογικό σχήμα, που είναι απλούστερο στο χειρισμό του, περισσότερο προσιτό ή ελέγχεται πιο εύκολα.

Στο τρίτο στάδιο μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τον πραγματικό κόσμο. Τα συμπεράσματα αυτά παίρνουν τη μορφή μιας σειράς υποθέσεων που ελέγχονται ή μιας σειράς πραγματικών δεδομένων. Ο τρόπος που

εξάγονται τα συμπεράσματα, εξαρτάται από τον τύπο του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Στα μαθηματικά μοντέλα, για παράδειγμα, τα συμπεράσματα προκύπτουν σαν αποτέλεσμα της μαθηματικής λογικής.

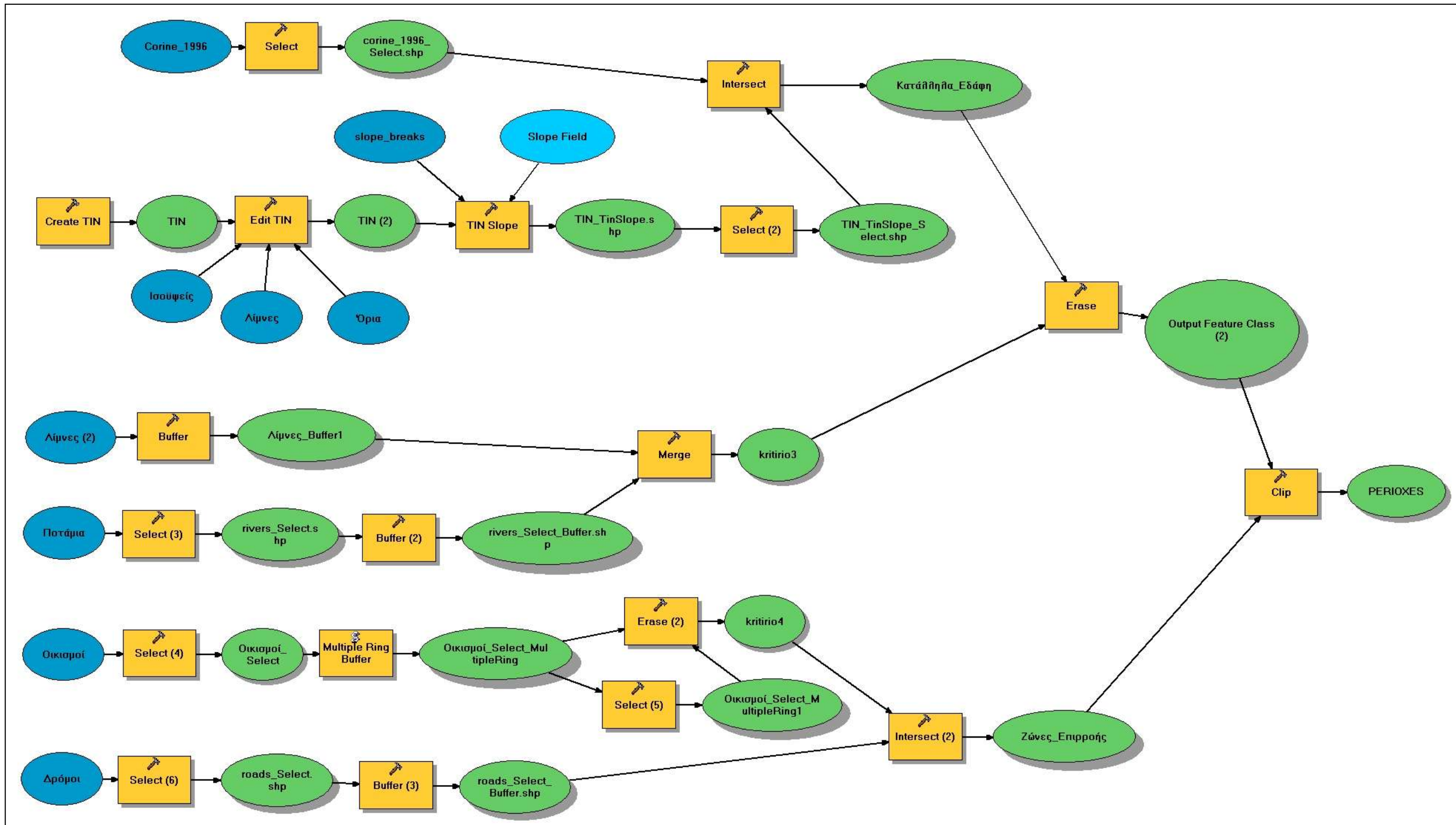
Το τελικό στάδιο είναι η επαλήθευση, δηλαδή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με ό,τι συμβαίνει στον πραγματικό κόσμο. Τα αποτελέσματα είναι δυνατό να επαληθευθούν πολύ απλά με οπτική σύγκριση. Όμως, είναι πολύ πιο σωστό να χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι για την επαλήθευση των μοντέλων. Κάτι τέτοιο σημαίνει μια σειρά κανόνων που δίνουν τη δυνατότητα να ισχυριστεί κανείς, με ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας, πόσο κοντά βρίσκονται τα συμπεράσματα του μοντέλου με τον πραγματικό κόσμο. Το μεγάλο πλεονέκτημα σ' αυτές τις στατιστικές τεχνικές είναι ότι διαφορετικοί ερευνητές χρησιμοποιώντας την ίδια πληροφορία καταλήγουν στα ίδια συμπεράσματα. Η χρήση στατιστικών μεθόδων δίνει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να συμφωνήσουν αν οι παραδοχές του μοντέλου αποτελούν μια σημαντική εξήγηση της πραγματικότητας. Αν τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να επαληθευθούν ικανοποιητικά, τότε το μοντέλο είναι δυνατό να αποτελέσει θεωρία, που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε παρόμοιες καταστάσεις σε διαφορετικό χώρο ή χρόνο, κάτι που αποτελεί και στόχο – σκοπό της παρούσας διατριβής.

Έτσι παρ' όλο που τα μοντέλα δεν αποτελούν ακριβώς θεωρίες, είναι ένα χρήσιμο στάδιο για την σύλληψη θεωριών. Μιλώντας για μοντέλα αξίζει να προσεχθούν δύο σημεία. Το πρώτο είναι ότι τα μοντέλα και οι θεωρίες μπορεί να αποδειχθούν είτε ότι βρίσκονται σε ακολουθία με τα γεγονότα είτε ότι αναιρούνται από αυτά. Το δεύτερο σημείο είναι ότι η δόμηση των μοντέλων είναι μια διαδικασία που επαναλαμβάνεται. Το πρώτο βήμα στη μοντελοποίηση μπορεί να φέρει αποτελέσματα που διαφέρουν από την πραγματικότητα. Ο ερευνητής για να βρει τις αιτίες για κάτι τέτοιο, πρέπει να διερευνήσει αν έχει προσδιορίσει όλες τις σημαντικές σχέσεις, αν έχει διαλέξει τον καταλληλότερο τύπο μοντέλου, αν υπάρχει λάθος στους υπολογισμούς κλπ. Η διερεύνηση αυτή θα οδηγήσει πιθανά σε τροποποίηση του αρχικού μοντέλου και αυτό μπορεί να γίνει πολλές φορές και κάθε φορά το μοντέλο να πλησιάζει όλο και περισσότερο στην πραγματικότητα, χωρίς να θυσιάζεται η γενικότητά του. Μ' αυτό τον τρόπο των διαδοχικών προσεγγίσεων ένα μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί σε θεωρία.

Με βάση τα παραπάνω, για την προσπάθεια επίτευξης του σκοπού της παρούσας διατριβής ακολούθως παρουσιάζεται η επικύρωση της θεωρίας του RES στην περιοχή που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη” μέσω του εργαλείου Model Builder.

6.8.4. Παράθυρο Δημιουργίας Διαγράμματος Μοντέλου

Η όλη διαδικασία του Model Builder (παρέμβαση του χρήστη για τη δημιουργία και τη διαχείριση του μοντέλου) γίνεται μέσα από το παράθυρο δημιουργίας μοντέλου της οθόνης Model Builder. Πιο συγκεκριμένα, ένα μοντέλο εμφανίζεται σαν ένα διάγραμμα που μοιάζει πολύ με τα γνωστά διαγράμματα ροής (Flow Charts) και επομένως αναπαριστά μια λογική ροή, συγκεκριμένες διαδικασίες - λειτουργίες και τα αποτελέσματά τους, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.8).



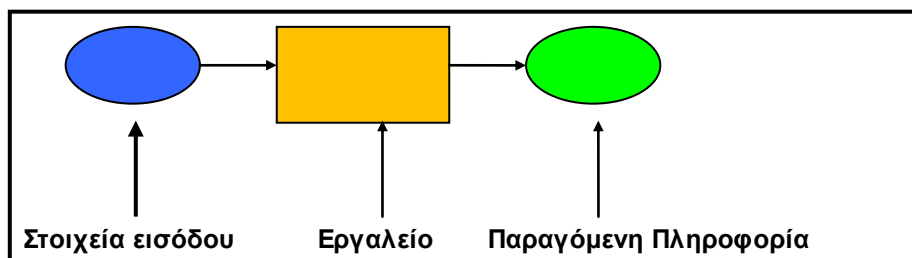
Σχήμα 6.8. Παράδειγμα δημιουργίας μοντέλου Model Builder (Ανδρουλακάκης κ.α., 2009).

6.8.5. Λειτουργία του μοντέλου

ι. Συστατικά του μοντέλου

Γενικά, ένα μοντέλο απεικονίζει την πραγματικότητα, δημιουργώντας μια απλοποιημένη και εύκολα διαχειρίσιμη εικόνα της, που όμως αναπαριστά μόνο τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της. Το μοντέλο αυτό στο ArcGIS παίρνει τη μορφή ενός διαγράμματος και ουσιαστικά αναπαριστά τη γνωστή διαδικασία από στοιχεία σε πληροφορία, όπου βέβαια η πληροφορία σε μια διαδικασία μπορεί να αποτελέσει τα στοιχεία σε μια άλλη. Αποτελείται, επομένως, από μια σειρά διαδικασιών που συνδέονται μεταξύ τους και εκτελούνται ταυτόχρονα όταν το μοντέλο εφαρμόζεται.

Μια διαδικασία με τη σειρά της αποτελείται από τα δεδομένα εισόδου, το εργαλείο που εφαρμόζεται σε αυτά ώστε να δημιουργηθεί η παραγόμενη πληροφορία και τις γραμμές σύνδεσης που δείχνουν τη φορά της διαδικασίας. Τέλος, όλα τα συστατικά της διαδικασίας δημιουργίας ενός μοντέλου έχουν το δικό τους χαρακτηριστικό σχήμα και χρώμα, ώστε να βοηθούν το χρήστη στην ανάγνωση και δημιουργία του μοντέλου. Τα συστατικά αυτά παρουσιάζονται και περιγράφονται περιληπτικά στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9. Τυπική διαδικασία στο ModelBuilder (Ανδρουλακάκης, Κουτσόπουλος, 2004).

- Τα **στοιχεία εισόδου**: αναπαριστώνται με μια μπλε έλλειψη και είναι εξ' ορισμού μεταβλητές
- Το **εργαλείο** αναπαριστάται με κίτρινο παραλληλόγραμμο και εφαρμόζεται πάνω στα στοιχεία εισόδου
- Οι **παραγόμενες πληροφορίες**: αναπαριστώνται με πράσινη έλλειψη και είναι και αυτές μεταβλητές εξ' ορισμού. Τα δεδομένα αυτά δεν υπάρχουν πριν την εφαρμογή του μοντέλου, αλλά δημιουργούνται κατά την διάρκειά της. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η προσθήκη ενός πεδίου με το εργαλείο Add Field. Στην περίπτωση αυτή παραγόμενο και εισαγόμενο αρχείο είναι ταυτόσημα και

διαφέρουν μόνο κατά ένα επιπλέον πεδίο. Τέλος, όλες οι παραγόμενες πληροφορίες μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία εισόδου σε μια άλλη διαδικασία.

- **Ο σύνδεσμος** είναι μια γραμμή, η οποία δείχνει τη φορά της διαδικασίας. Τα στοιχεία εισόδου, τα εργαλεία και οι παραγόμενες πληροφορίες συνδέονται μεταξύ τους με το βέλος του συνδέσμου να δείχνει την κατεύθυνση της διαδικασίας.
- **Η πμή (Value)** αναφέρεται στις παραμέτρους των στοιχείων εισόδου, του εργαλείου και την παραγόμενη πληροφορία και καθορίζονται από τον χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες του μοντέλου.

ii. Πλεονεκτήματα χρήσης του Model Builder

Η δημιουργία ενός μοντέλου με τη βοήθεια της λειτουργίας Model Builder βοηθά:

- Στην αυτοματοποίηση της χωρικής αναλυτικής διαδικασίας,
- Στον πλήρη έλεγχο των διαδικασιών και των δεδομένων (στοιχεία και πληροφορίες). Ειδικά, όταν οι αναλυτικές διαδικασίες που πρέπει να εκτελεστούν είναι πολλές και απαιτούν πειραματισμό με τις παραμέτρους, π.χ. συνεχείς αλλαγές στο μέγεθος μιας ζώνης επιρροής, τότε η χρήση ενός μοντέλου είναι απαραίτητη για τους παρακάτω λόγους:
 - Επιτρέπει να γίνονται αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων κάθε εργαλείου και να αποθηκεύονται οι πληροφορίες αυτές, ώστε κάθε φορά να μπορεί να εφαρμόζεται το εκάστοτε μοντέλο,
 - Οι διαδικασίες και οι σχέσεις μεταξύ των διαδικασιών είναι δυναμικές και κάθε φορά που γίνεται μια αλλαγή, το μοντέλο ανανεώνεται αυτόματα,
 - Μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν διαδικασίες ή να γίνουν αλλαγές στις σχέσεις μεταξύ των διαδικασιών,
 - Μπορεί να γίνει πειραματισμός με τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων των εργαλείων, έτσι ώστε να λαμβάνονται εύκολα αποτελέσματα από τις εναλλακτικές λύσεις,
- Επιτρέπει την εκτέλεση επαναληπτικών διαδικασιών, είτε σε επίπεδο ολόκληρου του μοντέλου, είτε σε περίπτωση ενός μεμονωμένου εργαλείου. Υπάρχει, δηλαδή, η δυνατότητα να «τρέξει» το μοντέλο:
 - Για έναν συγκεκριμένο αριθμό (Count): Αποτελεί την ευκολότερη μορφή επανάληψης ενός μοντέλου ή μιας διαδικασίας του, για ένα συγκεκριμένο

- αριθμό επαναλήψεων που ο χρήστης ορίζει με τον ορισμό μιας μεταβλητής επανάληψης.
- Ανάλογα με την τιμή μιας μεταβλητής (Boolean condition): Στο Model Builder μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια λογική μεταβλητή, έτσι ώστε όλες οι διαδικασίες του μοντέλου να επαναλαμβάνονται μέχρι μια λογική μεταβλητή να είναι αληθής. Αν κάποια στιγμή η μεταβλητή αυτή γίνει ψευδής, τότε οι διαδικασίες του μοντέλου σταματούν.
 - Με ανάδραση όπου το αποτέλεσμα της εξόδου, γίνεται είσοδος μιας προηγούμενης διαδικασίας (Feedback),
 - Ανάλογα με μια μεταβλητή λίστας (Lists), δηλαδή εάν δηλωθεί μια μεταβλητή σαν λίστα, όταν το μοντέλο «τρέξει» και καλέσει αυτή τη μεταβλητή, τότε υπάρχει η δυνατότητα να δηλωθεί μια λίστα τιμών για τις οποίες θα τρέξει το εργαλείο.
 - Ανάλογα με μια μεταβλητή σειράς (series). Μια μεταβλητή σειράς είναι παρόμοια με μια μεταβλητή λίστας μόνο που διαφέρει στο ότι ολόκληρο το μοντέλο τρέχει για κάθε τιμή της σειράς.
- να μοιρασθεί το μοντέλο και σε άλλους χρήστες των ΓΣΠ (Web-GIS),
 - να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο και σε άλλες περιοχές με τα συγκεκριμένα υψομετρικά τους δεδομένα,
 - να γίνει επανάληψη των βαθμονομήσεων με διαφορετικές τιμές, ώστε να διαπιστωθεί πως οι διαφορετικές τιμές επηρεάζουν ποιες περιοχές μπορεί να είναι επιδεκτικές σε κατολίσθηση,
 - να ενσωματωθεί το υπάρχον μοντέλο σε άλλα πιο περίπλοκα μοντέλα,
 - Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της ροής των διαδικασιών ενός μοντέλου, ανάλογα με την τιμή μιας μεταβλητής, στη λογική του IF....THEN...ELSE. Οι διαδικασίες στα περισσότερα μοντέλα έχουν μια σειριακή ακολουθία. Δηλαδή η έξοδος μιας διαδικασίας αποτελεί είσοδο σε μια άλλη διαδικασία και με αυτόν τον τρόπο σειριακά εκτελείται η μια διαδικασία μετά την άλλη. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις που δύο διαδικασίες δεν μπορούν να συνδεθούν, αφού ο τύπος των δεδομένων τους δεν ταιριάζει και πρέπει υποχρεωτικά να τρέξει κάποια διαδικασία προτού τρέξει κάποια άλλη. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, χρειάζεται να γίνει διακλάδωση του μοντέλου σας και ανάλογα το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας, το μοντέλο να σπάσει σε δύο

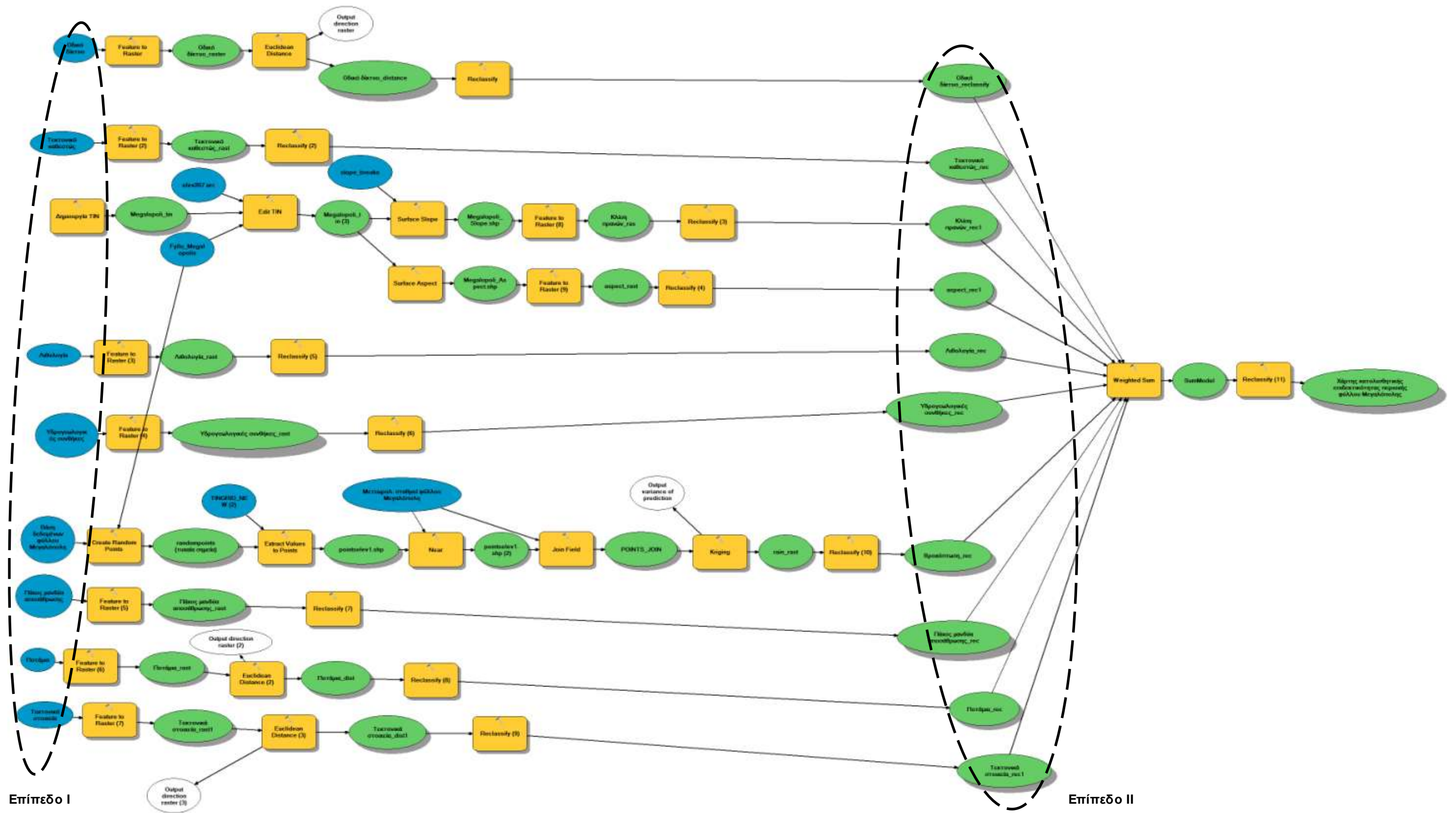
κλάδους και να εκτελεσθούν διαφορετικές διαδικασίες σε κάθε κλάδο.

Προφανώς ένας από τους δύο κλάδους θα εκτελεσθεί.

Συμπερασματικά, με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, αυτοματοποιείται όλη η διαδικασία μια φορά, παραμετροποιείται πάλι μια φορά, ώστε να είναι εφικτό μελλοντικά να αλλαχθούν κάποιες παράμετροι, ή εργαλεία ή διαδικασίες ή επίπεδα, παίρνοντας κάθε φορά και το αντίστοιχο νέο αποτέλεσμα, χωρίς να χρειάζεται να δημιουργηθεί το μοντέλο από την αρχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι το παραγόμενο μοντέλο μπορεί να αποθηκευθεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή σαν ένα πρόγραμμα σε μορφή Python script, Java script ή VB script (γλώσσες προγραμματισμού) και να χρησιμοποιηθεί και μοιρασθεί στο διαδίκτυο, αφού μπορεί να προστεθεί σε εργαλειοθήκη του ArcGIS και να τρέξει μαζί με τα άλλα script του συστήματος).

iii. Παράδειγμα εφαρμογής

Εφαρμογή των παραπάνω, αποτελεί ο εναλλακτικός τρόπος παρουσίασης της διαδικασίας που οδηγεί στον τελικό χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας που παρουσιάσθηκε αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Με βάση τα προαναφερθέντα, στη συνέχεια απεικονίζεται το διάγραμμα ροής των εργασιών (διαδικασία μοντελοποίησης) μέσω του Model Builder για την περιοχή που ορίζεται από το Γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη” (Σχήμα 6.10). Στο συγκεκριμένο σχήμα απεικονίζονται τα ακόλουθα: Στο επίπεδο I (στοιχεία εισόδου), ανήκουν όλα τα αρχικά πρωτογενή δεδομένα (μπλέ χρώματος) που περιγράφηκαν με λεπτομέρεια στην ενότητα 6.6. Η χρήση των παραμέτρων σε χάρτες με βάση τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, βάσει των οποίων γίνεται η μετέπειτα επεξεργασία, στην οποία τα στοιχεία εισόδου με τη βοήθεια των διαφόρων εργαλείων γεωεπεξεργασίας (πορτοκαλί χρώματος) μετατρέπονται σε παραγόμενη πληροφορία (πράσινου χρώματος) και ούτω καθ’ εξής, μέχρι το επίπεδο II. Σε αυτό το επίπεδο, η ανάλυση έχει φθάσει στους τελικούς επιμέρους θεματικούς χάρτες. Αυτοί με τη σειρά τους, μέσω του εργαλείου αλληλεπίθεσης (Weighted Sum) και των σταθμικών συντελεστών που προέκυψαν από την επεξεργασία του μητρώου αλληλεπίδρασης της μεθοδολογίας RES, παράγουν έναν χάρτη (πράσινου χρώματος), ο οποίος μέσω του εργαλείου (reclassify) της επαναταξινόμησης (πορτοκαλί χρώματος), δημιουργεί τον τελικό παραγόμενο χάρτη της κατολισθητικής επιδεκτικότητας.



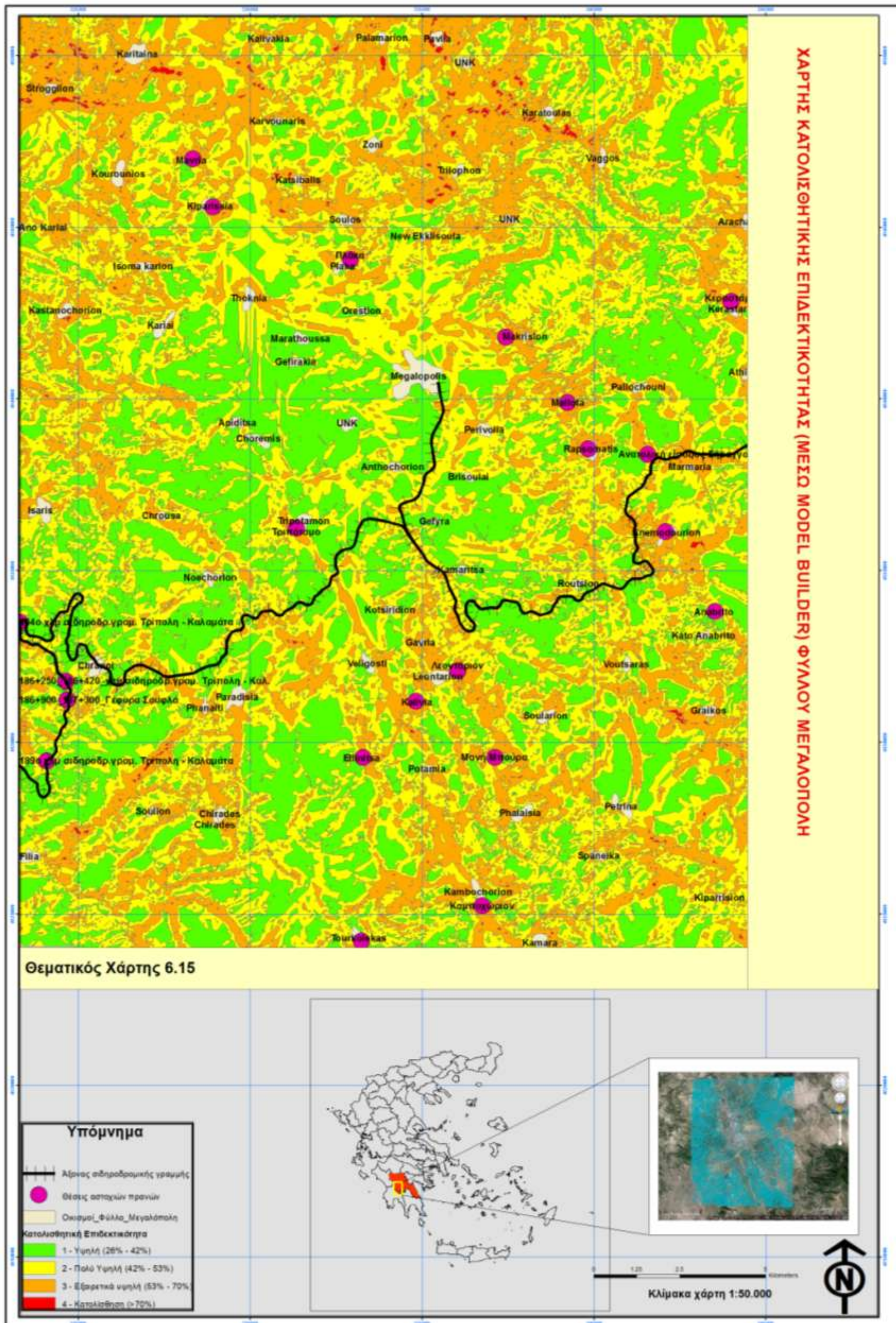
Σχήμα 6.10. Διάγραμμα ροής των διαδικασιών μέσω του μοντέλου Model Builder των ΓΣΠ για την κατασκευή του χάρτη της κατολισθητικής επιδεκτικότητας της περιοχής φύλλου “Μεγαλόπολη”.

Από το Σχήμα 6.10, λοιπόν, προκύπτει ότι ο χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας μέσω του εργαλείου Model Builder (Χάρτης 6.15), δίνει τα ίδια αποτελέσματα, όσον αφορά την τιμή του δείκτη αστάθειας και την ίδια απεικόνιση κατολισθητικής επιδεκτικότητας για την περιοχή που ορίζει το φύλλο “Μεγαλόπολη” με τον χάρτη 6.14.

iv) Συμπέρασμα

Σκοπός της μοντελοποίησης στη γεωτεχνική μηχανική είναι η ύπαρξη δυνατότητας πρόγνωσης. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εύκολο. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι πολύπλοκα συστήματα λόγω της δομής τους, των ασυνεχειών τους, της ανισοτροπίας τους, της ανομοιογένειά τους, της περατότητά τους καθώς και της γεωλογικής τους ιστορίας. Σε αντίθεση με μερικά δυναμικά συστήματα που είναι δυνατόν να περιγραφούν με λίγες παραμέτρους στο σύνολό τους, στη γεωτεχνική μηχανική εμπλέκονται πολλές παράμετροι και μηχανισμοί που καθορίζουν την συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών (Jiao and Hudson, 1995).

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, το μοντέλο είναι μια προσέγγιση της πραγματικότητας και δημιουργείται με σκοπό την επίλυση ενός προβλήματος. Το τεχνικογεωλογικό μοντέλο είναι μια προσέγγιση των κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών και των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν στο υπό κατασκευή έργο και δημιουργείται με σκοπό την επίλυση ενός προβλήματος γεωτεχνικής μηχανικής. Κατά συνέπεια, το μοντέλο είναι μια υπόθεση η οποία ελέγχεται συνήθως υπό μορφή μιας έρευνας. Το μοντέλο δεν είναι συνταγή. Απαιτεί ευστροφία, φαντασία, δημιουργικότητα και κριτική σκέψη, τα οποία με τη βοήθεια της παρατήρησης, του προσδιορισμού του προβλήματος, της έρευνας, των υποθετικών ερωτήσεων και των αντίστοιχών τους προβλέψεων, της εκτίμησης, της ανάλυσης, της αναθεώρησης και επαναξιολόγησης, θα συντελέσουν στο να μειωθεί ο βαθμός της αβεβαιότητας του υπό μελέτη προβλήματος για το οποίο δημιουργείται το μοντέλο (Parry et al., 2014).



Χάρτης 6.15. Χάρτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας φύλλου “Μεγαλόπολη” μέσω της διαδικασίας του εργαλείου Model Builder.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ύστερα από την συνοπτική παρουσίαση των ειδών κατολίσθησης, της αξιολόγησης των κύριων γεωτεχνικών ταξινομήσεων βραχώμαζας, της διερεύνησης μεθοδολογιών (Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, Ασαφής Λογική, Τεχνικά Νευρωνικά Δίκτυα) πρόγνωσης κατολισθητικής επιδεκτικότητας καθώς και την αναλυτική παρουσίαση και εφαρμογή της μεθοδολογίας RES, τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η παρούσα διατριβή είναι τα ακόλουθα:

- 1) Οι απαντήσεις που αναζητεί ένας ερευνητής – μελετητής κατά τη διερεύνηση μιας κατολίσθησης, ξεκινούν αρχικά από την ορθή εκτίμηση – διάγνωση για το είδος και τύπο της εκάστοτε εξεταζόμενης κατολίσθησης. Το τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης Varnes βοηθά στη σωστή διάγνωση βασιζόμενο σε γεωτεχνικούς όρους που συσχετίζονται καλύτερα με την μηχανική συμπεριφορά μιας κατολίσθησης αφού ο σκοπός είναι να τονισθεί το συστατικό που είναι το πιο κρίσιμο στην επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατολίσθησης τόσο κατά, όσο και μετά την αστοχία.
- 2) Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις (για παράδειγμα RQD, RMR, Q, GSI, SMR), αντιπροσωπεύουν εμπειρικές προσεγγίσεις του σχεδιασμού, χρησιμοποιούν λίγες παραμέτρους για τον προσδιορισμό μέτρων σταθεροποίησης και πρέπει να προσαρμόζονται στους γεωλογικούς σχηματισμούς, στη θέση του έργου και στις επί τόπου τεχνικογεωλογικές συνθήκες.
- 3) Πέρα από τις ταξινομήσεις αυτές, παρουσιάσθηκαν μεθοδολογίες που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές για ποικίλες ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν και για τις ανάγκες πρόγνωσης των αστοχιών πρανών, όπως **η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία, η έννοια της ασαφούς λογικής και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**. Διαπιστώνεται ότι ως εργαλεία για την πρόγνωση της κατολισθητικής επικινδυνότητας παρουσιάζουν θετικά στοιχεία αλλά και μειονεκτήματα.
- 4) Έτσι, η διατριβή οδηγήθηκε στην ανάλυση της μεθοδολογίας Rock Engineering System (RES) που είχε, αρχικά, προταθεί για την ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών με στόχο την εφαρμογή της ακόμα και σε εδαφικά πρανή. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται κυρίως στην συσχέπιση των μηχανισμών μεταξύ των κατολισθητικών παραμέτρων δηλαδή πέρα από το να εξετάζεται η κάθε παράμετρος χωριστά, όπως συμβαίνει στα «παραδοσιακά»

γεωτεχνικά συστήματα ταξινόμησης και χρησιμοποιεί παραμέτρους που δυνητικά μπορούν να αναγνωρισθούν κατά την φάση εκπόνησης μιας προμελέτης, οριστικής μελέτης ή μελέτης εφαρμογής ενός τεχνικού έργου. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας RES, ξεκινά με την κατηγοριοποίηση των ευρύτερων επιπέδων (γεωλογικό υλικό, θέση έρευνας, παράμετροι έρευνας), τον προσδιορισμό της προτεραιότητας των παραμέτρων ανάλογα με τον εκάστοτε σκοπό και τη διαμόρφωση των αλληλεπιδράσεων. Η μεθοδολογία σχηματοποιείται χρησιμοποιώντας το μητρώο αλληλεπίδρασης, στο οποίο οι παράμετροι τοποθετούνται στην κύρια διαγώνιο του μητρώου και μελετώνται οι δυαδικές αλληλεπιδράσεις (binary interactions) στο χώρο του μητρώου που βρίσκεται εκτός της κύριας διαγωνίου. Η κωδικοποίηση των παραπάνω αλληλοσυσχετίσεων παράγει δύο έννοιες που συνδέονται με το μητρώο, την ένταση αλληλεπίδρασης και την επικράτηση, οι οποίες προκύπτουν από τις έννοιες «αίτιο» και «αποτέλεσμα».

- 5) Ειδικότερα, παρουσιάσθηκαν και αναλύθηκαν εκείνες οι παράμετροι με τις οποίες γίνεται η επεξεργασία του μητρώου αλληλεπίδρασης, το οποίο αποτελεί τη βάση της μεθοδολογίας RES. Από την έρευνα, εκτιμήθηκε ότι οι σημαντικότερες γεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι που συντελούν στη διαμόρφωση του συγκεκριμένου μητρώου για το θέμα της διατριβής είναι οι ακόλουθες δέκα: i) ανθρώπινη δραστηριότητα (με ειδική αναφορά στην έννοια «απόσταση από δρόμους»), ii) τεκτονικό καθεστώς, iii) κλίση πρανών, iv) προσανατολισμός πρανών, v) λιθολογία, vi) υδρογεωλογικές συνθήκες, vii) υδρομετεωρολογικές συνθήκες (κυρίως βροχόπτωση), viii) πάχος μανδύα αποσάθρωσης, ix) απόσταση από ποτάμια και x) απόσταση από τεκτονικά στοιχεία.
- 6) Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πρόγνωσης αστοχιών πρανών, με βάση το μητρώο αλληλεπίδρασης παραμέτρων κατολισθητικότητας που στηρίζεται στη μεθοδολογία RES και τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών μέσω της χωρικής ανάλυσης δεδομένων για την παραγωγή χάρτη ζωνοποίησης κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Για την ποιότητα του μοντέλου κατολισθητικής επιδεκτικότητας, εκτελέσθηκε η ακόλουθη σειρά διαδικασιών:

- **Προσδιορισμός του βαθμού προσαρμογής του μοντέλου**, δηλαδή πόσο καλά περιγράφει, το μοντέλο, την ήδη γνωστή κατανομή των κατολισθήσεων σε μια περιοχή. Στην διατριβή, με τον υπολογισμό του δείκτη αστάθειας ήδη γνωστών θέσεων αστοχίας στην περιοχή που ορίζεται από το φύλλο “Μεγαλόπολη”, κλίμακας 1:50.000, αποδείχθηκε ο υψηλός βαθμός κατολισθητικής επιδεκτικότητας.
- **Αξιολόγηση του ρόλου των επιλεγμένων παραμέτρων κατολισθησιμότητας στην σχεδίαση του μητρώου αλληλεπίδρασης.** Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης μερικών από τους παράγοντες που ευνοούν στην Ελληνική επικράτεια τις κατολισθήσεις, στο μητρώο αλληλεπίδρασης, από το οποίο προέκυψαν πολύ υψηλοί δείκτες αστάθειας, επιβεβαιώνοντας την κατολισθητικότητα των τεσσάρων γνωστών αστοχιών πρηνών από τον Ελληνικό χώρο (Παναγοπούλα: 82,46%, Μαλακάσα: 80,53%, Τσακώνα: 89,56% και Νεμέα: 84,72%) καθώς και την αντίστοιχη του φύλλου “Μεγαλόπολη”, στην οποία διαπιστώθηκε ότι οι τιμές του δείκτη αστάθειας, μέσω RES, για το 95% των εξεταζόμενων θέσεων είναι πάνω από 54%, δηλαδή αντιστοιχούν στην κατηγορία «εξαιρετικά υψηλή επιδεκτικότητα σε κατολίσθηση».

Για να καταλήξει η παρούσα έρευνα στους ανωτέρω δείκτες αναλύθηκαν, μέσω της μεθοδολογίας RES οι δέκα προαναφερόμενες παράμετροι όπου διαπιστώθηκε ότι: α) στην θέση Παναγοπούλα η παράμετρος «τεκτονικό καθεστώσ» είναι εκείνη με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και ταυτόχρονα εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης λόγω της γειννίας με ενεργές ρηξιγενείς ζώνες, β) στη θέση Μαλακάσα, οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης λόγω της πολύ υψηλής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της παρουσίας πηγών ενώ το τεκτονικό καθεστώσ είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης λόγω του ότι η κατολισθημένη περιοχή αποτελεί τμήμα ενός τεκτονικού παράθυρου, το οποίο συνδέεται με την ύπαρξη ρηξιγενούς συστήματος που έχει παίξει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό της σημερινής μορφολογίας και στην πρόκληση των συνθηκών αστάθειας, γ) στη θέση Τσακώνα η παράμετρος «απόσταση από τεκτονικά στοιχεία» είναι εκείνη με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης και

ταυτόχρονα η παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης λόγω του ότι η συγκεκριμένη περιοχή της κατολίσθησης εντοπίζεται στο όριο μιας νεοτεκτονικής δομής (τεκτονικό κέρασ), που βρίσκεται μεταξύ δύο τεκτονικών βυθισμάτων και πλησίον μιας κύριας ρηξιγενούς ζώνης στο νότιο άκρο της κατολίσθησης, δ) στη θέση Νεμέα, οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι εκείνες με τη μεγαλύτερη ένταση αλληλεπίδρασης λόγω της ύπαρξης υδροφόρων οριζόντων οι οποίοι προκάλεσαν αλλαγή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εκεί απαντούμενων γεωλογικών σχηματισμών προκαλώντας υψηλές πιέσεις πόρων κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Αντίθετα, η παράμετρος με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης είναι η βροχόπτωση, λόγω των έντονων και παρατεταμένων βροχοπτώσεων που επικρατούσαν πριν την εκδήλωση της αστοχίας και μάλιστα θεωρήθηκε ότι η συγκεκριμένη χρονική περίοδος ήταν από τις υγρότερες της 50ετίας (με σημείο αναφοράς το έτος 2003, που συνέβη η συγκεκριμένη αστοχία) με μεγάλο μέσο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Τέλος, όσον αφορά την εξεταζόμενη περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη”, οι περισσότερο αλληλεπιδραστικές παράμετροι είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες και το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης ενώ η παράμετρος «τεκτονικό καθεστώς» είναι εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή επικράτησης, κάτι που αποδεικνύεται από την έντονη παρουσία των ρηγμάτων και εφίππεύσεων – επωθήσεων λόγω των δύο σημαντικών γεωτεκτονικών ζωνών που εμφανίζονται στο γεωλογικό φύλλο “Μεγαλόπολη”.

- **Προσδιορισμός του επιπέδου αβεβαιότητας** με βάση την διερεύνηση της μεταβλητότητας της βαθμονόμησης των επιλεγμένων παραμέτρων στο μητρώο αλληλεπίδρασης τόσο των τεσσάρων περιοχών μεγάλης κλίμακας (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα και Νεμέα), όσο και στο αντίστοιχο για τη διερεύνηση της μεσαίας κλίμακας περιοχής του φύλλου “Μεγαλόπολη”, κλίμακας 1:50.000.
- **Έλεγχος του μοντέλου για την δυνατότητα πρόγνωσης μελλοντικών κατολισθήσεων.** Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με την εξαγωγή δεδομένων από τον γεωλογικό και τοπογραφικό χάρτη του Φύλλου Μεγαλόπολη (κλίμακας 1:50.000) και τη χωρική τους ανάλυση. Οι

πληροφορίες αυτές επιβεβαίωσαν τις εκτιμήσεις τεχνικών εκθέσεων, κυρίως του ΙΓΜΕ, για μελλοντικές αστοχίες στην εξεταζόμενη περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη” και επιπλέον δείχνουν και νέες δυνητικές θέσεις αστοχίας. Ο έλεγχος αυτός βοηθήθηκε επιπρόσθετα με τη χρήση ενός εργαλείου οπτικοποιημένης γλώσσας μοντελοποίησης (Model Builder), το οποίο μπορεί να αυτοματοποιεί τη διαδικασία που οδηγεί στην ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας, να την παραμετροποιεί, ώστε να είναι εφικτό μελλοντικά να αλλαχθούν κάποιες παράμετροι, ή εργαλεία ή διαδικασίες ή επίπεδα, παίρνοντας κάθε φορά και το αντίστοιχο νέο αποτέλεσμα, χωρίς να χρειάζεται να δημιουργηθεί το μοντέλο από την αρχή.

7) Από την παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία, συμπεραίνεται ότι είναι δυνατή:

- η εφαρμογή του RES και σε πρηνή εκτός των βραχωδών (όπως αρχικά το εισήγαγε και το εφάρμοσε ο Hudson).
- η εφαρμογή του RES σε περιοχές μεγάλης κλίμακας (site specific areas) με διαφορετικά γεωλογικά υλικά (εδάφη, μαλακούς βράχους, γεωλογικούς σχηματισμούς με εναλλαγές λιθολογιών όπως ο φλύσχης, αποσαθρωμένες βραχώμαζες με σημαντικό πάχος μανδύα αποσάθρωσης, μεγαλύτερο από τρία μέτρα) και διαφορετικούς τύπους κατολισθήσεων.
- η εφαρμογή του RES σε περιοχή κλίμακας περιφέρειας (1:50.000), όπως αυτή του φύλλου “Μεγαλόπολη”. Σε αυτή την κλίμακα, η προετοιμασία χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι μεγάλου ενδιαφέροντος για μελετητικές εταιρείες και Δημόσιους φορείς σχετικά με προκαταρκτικές μελέτες που αφορούν στον κατολισθητικό κίνδυνο. Εξ’ άλλου, είναι γνωστό ότι οι γεωλογικοί χάρτες κλίμακας 1:50.000 που έχει εκδώσει το ΙΓΜΕ, αποτελούν το «σημείο αναφοράς» της εκκίνησης της γεωλογικής έρευνας και μελέτης όλων των θεμάτων που αφορούν τεχνικά έργα ή αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών. Έτσι, σε μεσαίας κλίμακας χάρτες μπορούν να μελετηθούν μεγάλες περιοχές σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος όσον αφορά την κατολισθητική επιδεκτικότητα. Ειδικότερα, η πρόγνωση αστοχιών πρηνών στη συγκεκριμένη εξεταζόμενη περιοχή αποτελεί πολύτιμο βοήθημα για τις Δημόσιες υπηρεσίες της Περιφέρειας

Πελοποννήσου (Δ/νσεις Τεχνικών Έργων, Πολιτικής Προστασίας, Περιβάλλοντος, Ανάπτυξης και Αγροτικής Οικονομίας) και την ευρύτερη περιοχή της ΝΔ/κής Αρκαδίας, αφού όπως αναλυτικά εξηγήθηκε στο 6ο Κεφάλαιο, η συγκεκριμένη περιοχή συνδέεται με ζωικής σημασίας πόλους ανάπτυξης.

Από τη μελέτη του ανωτέρου χάρτη σε συνδυασμό με τους επιμέρους θεματικούς χάρτες των επιλεγμένων παραμέτρων καθώς και τα στοιχεία-πληροφορίες από τον τοπογραφικό και γεωλογικό χάρτη της περιοχής μελέτης (φύλλο “Μεγαλόπολη”, κλίμακας 1:50.000), προκύπτει ότι:

- Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό είναι ότι οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα, διέρχονται από τους οδικούς άξονες τόσο του Εθνικού όσο και του επαρχιακού δικτύου. Συγκεκριμένα, το 86% των εξεταζόμενων θέσεων αστοχίας βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 50m από τους υφιστάμενους οδικούς άξονες. Τούτο, όμως, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν δυνητικά και άλλες θέσεις (εκτός των γραμμικών αξόνων) που θα μπορούσαν να εκδηλωθούν φαινόμενα αστοχίας.
- Οι θέσεις με δείκτη αστοχιών άνω του 54% βρίσκονται σε περιοχές που είναι τεκτονικά περισσότερο διαταραγμένες σε συνδυασμό ενίοτε με τη λιθολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών (π.χ τεταρτογενείς αποθέσεις, νεογενή, φλύσχης). Συγκεκριμένα, ποσοστό 38% των θέσεων αστοχίας συνδέεται με ισχυρό τεκτονικό καθεστώς, το 24% των θέσεων αντιστοιχεί στο πολύ ισχυρό τεκτονικό καθεστώς και το 33% συνδέεται με εντατικό καθεστώς.
- Όσον αφορά στη σχέση των θέσεων αστοχίας με την κλίση των πρηνών, βρέθηκε ότι ποσοστό 33% ανήκει στην κατηγορία 2 (16° - 30°) και 48% στην κλάση 1 (6° - 15°), λαμβάνοντας υπόψη την παρατήρηση που σημειώνεται στον Πίνακα 5.2.
- Σχετικά με την παράμετρο «Προσανατολισμός πρηνούς», η έρευνα έδειξε ότι ποσοστό 43% των θέσεων αστοχίας ανήκει στην κατηγορία 4 (0° - 45° , 135° – 225°) και ακολούθως 29% εντάσσεται στην κατηγορία 2 (90° - 135° , 275° – 315°).

- Καταγράφεται η σχέση των εξεταζόμενων θέσεων αστοχίας με το γεωλογικό σχηματισμό στον οποίο εδράζονται. Παρατηρείται ότι σε σύνολο 21 θέσεων, έξι (6) θέσεις αστοχίας (ποσοστό 29% επί του συνόλου) σχετίζονται με το φλύσχη, που είναι ο πλέον επιρρεπής σχηματισμός σε κατολισθήσεις. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των νεογενών ιζημάτων και των Τεταρτογενών αποθέσεων σε ποσοστό επίσης 29%, λόγω των μειωμένων γεωμηχανικών χαρακτηριστικών και της σχετικά μεγάλης υδροπερατότητας αποτελούν επίσης δείκτες ασταθών γεωλογικά περιοχών. Ο σχηματισμός της ψαμμιτοσχιστοκερατολιθικής διάπλασης (ποσοστό εμφάνισης 24%) είναι μεν βαθμονομημένος με τη μικρότερη τιμή (1), αλλά ο συνδυασμός του προσανατολισμού της σχιστότητας με ομόρροπη κλίση πρηνούς και κατείσδυση - κυκλοφορία επιφανειακού και υπόγειου νερού αποτελεί δείκτη ασταθούς ισορροπίας για τα πρηνή. Επίσης, τέσσερις θέσεις εδράζονται σε ασβεστολίθους (ποσοστό εμφάνισης 19%) αλλά δεν αποτελούν κρίσιμο παράγοντα οι ασβεστόλιθοι από μόνοι τους για την αστάθεια των συγκεκριμένων θέσεων.
- Σχετικά με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, το 43% των θέσεων αστοχίας ανήκει στην κατηγορία περιορισμένης γεωμηχανικής δράσης του νερού λόγω εμφάνισης του φλύσχη, των σχιστοκερατόλιθων και εν μέρει των ασβεστολίθων. Ακολουθεί ποσοστό της τάξης του 19% που σχετίζεται με την ύπαρξη αλλουβιακών αποθέσεων και ανθρακικών σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας περατότητας. Τέλος, το 29% συνδέεται με την ύπαρξη ανθρακικών σχηματισμών μέσης έως υψηλής περατότητας.
- Όσον αφορά την βροχόπτωση, το 57% των θέσεων αστοχίας βρίσκεται στην κατηγορία 2 (1000 - 1200mm ύψους βροχής), το 29% είναι στην κατηγορία 3 (1200 – 1400mm) ενώ το 14% ανήκει στην κατηγορία 4 (>1400mm).
- Το μεγαλύτερο ποσοστό του πάχους μανδύα αποσάθρωσης (43%) βρίσκεται στην κλάση 3 (1.5 - 3.0m) και ακολουθεί η κατηγορία 4 (>3.0m) με ποσοστό 29%.

- Χαρακτηριστική είναι σε αρκετές θέσεις η συσχέτιση ρεμάτων και θέσεων αστοχίας, λόγω της εντονότερης διάβρωσης των γεωλογικών σχηματισμών σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών και την επιδεκτικότητά αυτών σε ολισθήσεις και γενικά αστοχίες. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι ποσοστό ίσο με 43% ανήκει στην κλάση 4, δηλαδή οι θέσεις αστοχίας βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 50m από τα ρέματα, ακολουθεί ποσοστό ίσο με 33% το οποίο χαρακτηρίζει την κατηγορία 3 (απόσταση πρηνών: 51-100m) και ποσοστό ίσο με 19% που χαρακτηρίζει την κλάση 2 (101-150m).
- Για την παράμετρο «Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία», προέκυψε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των θέσεων αστοχίας (33%) ανήκει στην κατηγορία 3 (απόσταση από τεκτονικά στοιχεία 51-100m) και ακολουθεί ποσοστό ίσο με 29%, το οποίο χαρακτηρίζει δύο κατηγορίες, δηλαδή 0 (>200m) και 4 (μικρότερη των 50m).
- Εκτός των οικισμών και συγκεκριμένων θέσεων ευρύτερων περιοχών που καταγράφηκαν ως περιοχές που είτε έχουν ήδη αστοχήσει είτε δυνητικά μπορεί να αστοχήσουν, βάσει υφιστάμενων τεχνικών εκθέσεων, στον χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας απεικονίζονται και άλλες θέσεις που είναι επικίνδυνες να αστοχήσουν είτε στο άμεσο μέλλον, είτε μακροπρόθεσμα. Τέτοιες θέσεις αφορούν, κυρίως, οικισμούς όπως τους παρακάτω: Στρογγυλό, Καρίταινα, Κουρουνιός, Καλυβάκια, Καρβουνάρης, Άνω Καρυαί, Παλαμάριον, Ζώνη, Κατσίμπαλης, Ίσωμα Καρυών, Καστανοχώρι, Λύκαιον, Κατσίμπαλης, Σούλος, Ίσαρης, Χρούσα, Νεοχώριο, Χράνοι, Φίλια, Χιράδες, Φαναϊτή, Παραδείσια, Καμάρα, Σπαναίικα, Κυπαρίσσιο, Πετρίνα, Γραικός, Φαλαισία, Ποταμιά, Σουλάριο, Κοτσιρίδιο, Γαβριά, Ρούτσιο, Μαρμαριά, Κάτω Αναβρυτό, Βουτσαράς, Παλαιοχούνη, Αθήναιον, Νέα Εκκλησούλα, Καράτουλας, Βάγγος, Παύλια, Απιδίτσα, Σούλιο και Μεγαλόπολη.
- Σε αρκετά μεγάλο τμήμα του παλαιού σιδηροδρομικού δικτύου (από Τρίπολη προς Καλαμάτα) που διασχίζει το φύλλο “Μεγαλόπολη”,

παρατηρείται ότι στις ακόλουθες θέσεις εμφανίζονται δυνητικές θέσεις εξαιρετικά υψηλής κατολισθητικής επιδεκτικότητας με 54-70% δείκτη αστάθειας, όπως: α) στη διαδρομή από Μαρμαριά – Ραφομάτη - Ανεμοδούρι έως και Ρούτσιο, β) νότια της Καμαρίτσας έως και το ύψος του οικισμού Γέφυρα, γ) κατά θέσεις από το ύψος του οικισμού Τριπόταμου έως και τον οικισμό Χράνοι και τέλος κατά θέσεις από τη Μεγαλόπολη έως και το ύψος του οικισμού Γέφυρα.

- Τέλος, το ποσοστό των θέσεων που αφορούν την κατηγορία «Εξαιρετικά υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα» αντιστοιχεί σε τιμή ίση με 95% επί του συνόλου των εξεταζόμενων θέσεων ενώ αυτών που αναφέρονται ως θέσεις με πολύ υψηλή κατολισθητική επιδεκτικότητα ισούνται με 5%.

Από την εφαρμογή του RES τόσο στις τέσσερις περιοχές που έλαβαν χώρα σημαντικές αστοχίες στο παρελθόν (Παναγοπούλα, Μαλακάσα, Τσακώνα, Νεμέα), όσο και στην εξεταζόμενη περιοχή της νοτιοδυτικής Αρκαδίας, συμπεραίνεται ότι ο δείκτης αστάθειας που προκύπτει από το μητρώο αλληλεπίδρασης, αφ' ενός δείχνει να συμφωνεί με τις υφιστάμενες αστοχίες πρηνών, κάτι που αποδεικνύει την αξία της μεθοδολογίας, αφ' ετέρου αποτελεί (για τη νοτιοδυτική Αρκαδία) ένα σημαντικό βοήθημα για την τοπική αυτοδιοίκηση της ευρύτερης περιοχής στα πλαίσια του προγραμματισμού και σχεδίασης διαφόρων τεχνικών έργων, καθώς και στο πλαίσιο του αστικού σχεδιασμού και της βέλτιστης χρήσης γης. Με αυτόν τον τρόπο, το μητρώο αλληλεπίδρασης που παρουσιάζεται από την εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να μοντελοποιηθεί (μέσω και της χρήσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών) και εφαρμοσθεί ανάλογα και σε άλλες δυνητικά υποψήφιες περιοχές, επιδεκτικές σε κατολίσθηση, στην Ελλάδα και όχι μόνο.

- 8) Ανάδειξη νέων εκτιμώμενων πιθανών αστοχιών σε πλήθος οικισμών και περιοχών στην περιοχή που ορίζει το φύλλο «Μεγαλόπολη», όπως αυτές που καταγράφηκαν στο Κεφάλαιο 6.
- 9) Αυτοματοποίηση της ανάλυσης και παρουσίασης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μέσω του εργαλείου γεωεπεξεργασίας «Model Builder» των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών της εταιρείας ESRI, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το μητρώο αλληλεπίδρασης και σε άλλες –

διαφορετικές περιοχές αλλάζοντας είτε τις παραμέτρους είτε τις κλάσεις της βαθμονόμησης είτε και τα δύο.

- 10) Εξ' αιτίας του εύρους των παραμέτρων που συμβάλλουν στην κατολισθήση, μεγάλοι όγκοι δεδομένων πρέπει να επεξεργασθούν και αναλυθούν, άρα η εφαρμογή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για αυτές τις διεργασίες είναι επιτακτική. Στην παρούσα διατριβή, η σύνταξη θεματικών χαρτών των επιμέρους παραμέτρων κατολισθησιμότητας καθώς και του τελικού χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας επιτεύχθηκε αποδοτικότερα με τη χρήση των ΓΣΠ και ειδικότερα τη δημιουργία και χρήση της Γεωγραφικής Βάσης Δεδομένων, η οποία περιέχει γεωλογικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά, τεχνικογεωλογικά, βροχομετρικά και λοιπά δεδομένα για την περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη”. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη γεωβάση μπορεί να εμπλουτισθεί και με επιπλέον στοιχεία, όπως σεισμολογικά, χρήσεων γης, τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, για τους λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, νέων θέσεων αστοχίας πρηνών κ.α. Η γεωγραφική βάση δεδομένων της διατριβής σε συνδυασμό με τη χρήση του ArcIMS, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα διαδικτυακής πρόσβασης στο Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα, δύναται να διατεθεί σε οποιονδήποτε χρήστη. Η διάχυση δεδομένων της γεωβάσης του φύλλου “Μεγαλόπολη”, μπορεί επίσης να επιτευχθεί και μέσω του ελεύθερης χρήσης λογισμικού Google Earth και των kml αρχείων του.

Συμπερασματικά, η μεθοδολογία RES μπορεί να αποτελέσει ένα απλό και εύχρηστο εργαλείο στην εκτίμηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας με την υιοθέτηση εκείνων των παραμέτρων που μπορούν ευκολότερα να ποσοτικοποιηθούν σε σχέση με εκείνες που είναι χρονοβόρες και έχουν σημαντικό οικονομικό κόστος για την απόκτησή τους. Ο σκοπός, λοιπόν, της αξιοποίησης της μεθοδολογίας RES είναι η πρόγνωση των αστοχιών πρηνών είτε για την μελέτη – κατασκευή ενός τεχνικού έργου είτε για την αποτελεσματικότερη προετοιμασία σε θέματα φυσικών καταστροφών όπως οι κατολισθήσεις.

8. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Με βάση την έρευνα που προηγήθηκε, παραθέτονται ακολούθως προτάσεις που προσφέρονται για μελλοντική διερεύνηση όσον αφορά τη διαχείριση των κατολισθητικών φαινομένων βάσει της μεθοδολογίας RES, όπως:

1. Προετοιμασία μέσω του RES και των παραγόμενων χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας για τη σύνταξη μελετών γεωλογικής καταλληλότητας. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια εκπόνησης των μελετών Γενικών Πολεοδομικών Σχεδίων (ΓΠΣ) - Σχεδίων Χωρικής και Οικιστικής Οργάνωσης Ανοικτών Πόλεων (ΣΧΟΟΑΠ) και ειδικότερα των μελετών γεωλογικής καταλληλότητας (σύμφωνα με το ΦΕΚ 1902/14-09-2007, αριθμ. οικ. 37691 «Έγκριση προδιαγραφών για την εκπόνηση Μελετών Γεωλογικής Καταλληλότητας που συντάσσονται στα πλαίσια των μελετών ΓΠΣ-ΣΧΟΟΑΠ»), επιβάλλεται η σύνταξη μελέτης γεωλογικής καταλληλότητας, η οποία εκπονείται σε δύο στάδια:

(α) Κατά την Α΄ Φάση της μελέτης ΓΠΣ – ΣΧΟΟΑΠ εκπονείται η προκαταρκτική μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας. Οι μελέτες αυτές εκπονούνται σε κλίμακα 1:25.000 και γενικά στην ίδια κλίμακα που εκπονείται η Α΄ Φάση της μελέτης ΓΠΣ – ΣΧΟΟΑΠ. Στον χάρτη της μελέτης αυτής που ονομάζεται «Χάρτης κατ' αρχήν Γεωλογικής Καταλληλότητας», οριοθετούνται σε κλίμακα 1:25.000 οι παρακάτω ζώνες: (i) ζώνες σχετικής γεωλογικής καταλληλότητας, (ii) ζώνες ή θέσεις προστασίας, βελτίωσης, ανάδειξης και διατήρησης του γεωπεριβάλλοντος, (iii) ζώνες δυναμικού εκμεταλλεύσιμων γεωλογικών πόρων και το είδος τους, (iv) ζώνες ή θέσεις όπου ειδικές χρήσεις είναι ανεκτές υπό προϋποθέσεις και περιορισμούς.

(β) Κατά την Β1΄ Φάση της μελέτης ΓΠΣ – ΣΧΟΟΑΠ, εκπονείται η μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας, σε κλίμακα 1:5.000 και γενικά στην ίδια κλίμακα που εκπονείται η Β΄ Φάση της μελέτης ΓΠΣ – ΣΧΟΟΑΠ. Στον παραγόμενο χάρτη, χαρακτηρίζονται τα διάφορα τμήματα της προς μελέτη περιοχής ως της την γεωλογική της καταλληλότητα σε τέσσερις κατηγορίες καταλληλότητας: (i) κατάλληλων για δόμηση, (ii) κατάλληλων για δόμηση υπό προϋποθέσεις (π.χ. κατασκευή προτεινομένων προστατευτικών έργων ή λήψη άλλων μέτρων προστασίας), (iii) ακατάλληλων για δόμηση πάντοτε σύμφωνα με τα υπάρχοντα στοιχεία. Για την κατάταξη μιας περιοχής στην κατηγορία

ακατάλληλης για δόμηση, θα πρέπει να υπάρχουν ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες θεμελίωσης (ανεπαρκής ευστάθεια λόγω πιθανών κατολισθήσεων ή μετακινήσεις εδαφικών ή βραχωδών μαζών, υπερβολικά μεγάλες καθιζήσεις κ.λπ.) που δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν ή που η αντιμετώπισή της συνεπάγεται υπερβολικά μεγάλη δαπάνη. Όταν λείπουν βασικά στοιχεία ώστε να μην μπορεί να γίνει ακριβής χαρακτηρισμός ενός ή περισσοτέρων τμημάτων από πλευράς γεωλογικής καταλληλότητας, αυτό επισημαίνεται στην Τεχνική έκθεση και τα τμήματα αυτά κατατάσσονται σε μία τέταρτη κατηγορία, της αμφίβολης καταλληλότητας για δόμηση.

Με βάση τα παραπάνω, η διερεύνηση χρήσης της μεθοδολογίας RES, για την εύρεση των προαναφερόμενων επιμέρους σχετικών θέσεων γεωλογικής καταλληλότητας κρίνεται πολύ ενδιαφέρουσα και πιστεύεται ότι αποτελεί ένα επιπλέον εργαλείο για την ασφαλέστερη και οικονομικότερη τελική πρόταση γεωλογικής καταλληλότητας για μια εξεταζόμενη περιοχή.

2. Η προηγούμενη χρήση του RES, για την εκπόνηση μελέτης γεωλογικής καταλληλότητας, δύναται να οδηγήσει επικουρικά και σε συνδυασμό με τους παραγόμενους χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας, στη σύνταξη χαρτών κινδύνου (landslide hazard maps), τρωτότητας (landslide vulnerability maps) και τελικά σε χάρτες διαχείρισης κατολισθητικής επικινδυνότητας (landslide risk assessment maps), που αποτελούν πολύτιμο βοήθημα για τις τοπικές και περιφερειακές αρχές της Δημόσιας Διοίκησης σε θέματα Πολιτικής Προστασίας. Η σύνταξη τέτοιων χαρτών, βάσει της μεθοδολογίας RES και σε συνδυασμό με τη χρήση ΓΣΠ, συνιστά έναν νέο μεσομακροπρόθεσμο στόχο έρευνας για επόμενο στάδιο έρευνας.
3. Με αφορμή την εξέταση επικύρωσης της μεθοδολογίας RES στην περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη”, θα μπορούσε το προτεινόμενο εργαλείο πρόγνωσης αστοχιών πρηνών να αξιοποιηθεί κατ’ αρχήν σε συνδυασμό με τα έως τώρα ήδη ολοκληρωμένα συγχρηματοδοτούμενα ή μη προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην Περιφέρεια Πελοποννήσου, που αφορούν την εξέταση των κινδύνων για τα εδάφη κατά το πρόσφατο παρελθόν με κυριότερα από αυτά τα ακόλουθα:

MOONRISES (2008) με χρηματοδοτικό εργαλείο το INTERREG III B - ARCHIMED, το οποίο ανέπτυξε και εφήρμοσε στην Αργολίδα ένα μοντέλο

εκτίμησης του κινδύνου ερημοποίησης των εδαφών [στη βάση των αποτελεσμάτων του ερευνητικού προγράμματος MEDALUS (1999), το οποίο αφορούσε την κατανόηση, πρόβλεψη και μετρίασμό της ερημοποίησης στις μεσογειακές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

LANDSLIDES (2011) με χρηματοδοτικό εργαλείο τον ΕΟΧ, το οποίο αξιοποίησε σύγχρονες δορυφορικές μεθόδους για την ανάπτυξη ενός μόνιμου πιλοτικού συστήματος παρακολούθησης περιοχών της Περιφέρειας με προβλήματα αστάθειας πρανών (κατολισθήσεις).

SOILPRO (2014) με χρηματοδοτικό εργαλείο το Life+, το οποίο είναι συμπληρωματικό των προηγούμενων πρωτοβουλιών της περιφερειακής διοίκησης Πελοποννήσου για την εδαφική προστασία και διαχείριση, καθώς αφ' ενός εσπάζει σε διαφορετικό εδαφικό κίνδυνο και συγκεκριμένα στη διάβρωση των εδαφών και αφετέρου επιδιώκει την ανάπτυξη ενός συστήματος συνεργασίας μεταξύ περιφερειακών διοικήσεων και ερευνητικών κέντρων – πανεπιστημίων, με χρήση κατάλληλης διαδικτυακής εφαρμογής Soil Monitoring System (SMS). Το SMS είναι μια web-based εφαρμογή παρακολούθησης του εδάφους, που αναπτύχθηκε από το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ) σε συνεργασία με το CRA ABP (Ερευνητικό Κέντρο Αγρο-βιολογίας και Εδαφολογίας της Φλωρεντίας της Ιταλίας), επικεφαλής εταίρο του έργου.

4. Στο πλαίσιο της Κοινοτικής Οδηγίας 2007/60/EK (για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας), μέσω του παραγόμενου χάρτη κατολισθητικής επιδεκτικότητας για το φύλλο “Μεγαλόπολη” και των δεδομένων που υπάρχουν από ιστορικά σημεία πλημμύρας καθώς και των ζωνών δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας (ΕΓΥ, 2012), για την συγκεκριμένη περιοχή της νοτιοδυτικής Αρκαδίας, προτείνεται η διερεύνηση εφαρμογής του RES στο Σχέδιο Διαχείρισης της Λεκάνης Απορροής του Αλφειού (GR29), τμήμα της οποίας αποτελεί η εξεταζόμενη περιοχή, ώστε να ερευνηθεί πιθανή σύνδεση των ιστορικών σημείων και δυνητικών ζωνών πλημμύρας (με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων) με τις υφιστάμενες αστοχίες πρανών. Όλα τα προαναφερθέντα σημειώνονται, ώστε σε συνδυασμό με αυτά που καταγράφηκαν στην εισαγωγή του 6^{ου} Κεφαλαίου περί ενδεχόμενης εδαφικής διάβρωσης λόγω και των καταστροφικών πυρκαγιών του 2007 στην περιοχή

του φύλλου “Μεγαλόπολη”, να ευαισθητοποιήσουν τις αρμόδιες υπηρεσίες (για παράδειγμα, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υπηρεσίες Περιφέρειας όπως Δ/ση Υδάτων, Δ/ση Πολιτικής Προστασίας, Δ/ση Τεχνικών Έργων), να κάνουν χρήση του περιγραφόμενου πλαισίου της κοινοτικής οδηγίας 2007/60/ΕΚ (για προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, σύνταξη χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας, σύνταξη χαρτών κινδύνων πλημμύρας, σχέδια διαχείρισης πλημμύρας). Με αυτόν τον τρόπο πιστεύεται ότι μπορούν να αξιολογηθούν και διαχειρισθούν οι κίνδυνοι πλημμύρας, να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με αυτές. Επίσης, μπορεί να δοθεί έμφαση, εφόσον κρίνεται σκόπιμο, σε πρωτοβουλίες που δεν αφορούν σε κατασκευαστικά έργα και δράσεις για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας ή/και στη μείωση των πιθανοτήτων επέλευσης πλημμύρας, συμπεριλαμβανομένων της πρόγνωσης πλημμυρών και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, με έμφαση στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα. Σημειώνεται, ότι η χρήση των προαναφερθέντων, μπορεί να συνδυασθεί με τα παραγόμενα αποτελέσματα των προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έχουν εκτελεσθεί για την Περιφέρεια Πελοποννήσου, όπως το **MOONRISES** (2008), το **LANDSLIDES** (2011) και το **SOILPRO** (2014).

5. Επιπλέον, ο συνδυασμός της μεθοδολογίας RES, της χρήσης των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, των προαναφερόμενων ζωνών δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας για την περιοχή του φύλλου “Μεγαλόπολη” καθώς και των αποτελεσμάτων εφαρμογής μελετών γεωλογικής καταλληλότητας, μπορεί να αποτελέσει οδηγό και για την αντίστοιχη χρήση του σε άλλες περιοχές της ελληνικής επικράτειας και όχι μόνο σε θέματα Πολιτικής Προστασίας.
6. Τέλος, η μεθοδολογία RES σχετικά με την πρόγνωση αστοχιών πρανών, προτείνεται να διερευνηθεί περαιτέρω σε συνδυασμό και με τις μεθοδολογίες που παρουσιάσθηκαν όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (ΑΗΡ), η έννοια της Θολής Λογικής (Fuzzy Logic) καθώς η μεθοδολογία των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.

Κλείνοντας αυτή την ερευνητική προσπάθεια, ο γράφων επιθυμεί να ολοκληρωθεί το παρόν συγγραφικό έργο με μια συμβουλή που είχε δώσει ο Leonardo da Vinci πέντε αιώνες νωρίτερα (Cotecchia, 2006) και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει όλο το εγχείρημα της παρούσας διδακτορικής διατριβής:

“First, I shall test by experiment, before I proceed any further, because my intention is to consult experience first, and then, with reasoning, to show why such experience is bound to operate in such a way. And that is the true rule by which those who analyse the effects of nature use to proceed; and, although nature begins with the cause and ends with the experience, we must follow the opposite course, namely, as I said before, begin with the experience and, by means of it, investigate the cause”.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- **Αγγελίδης Χ., 1995.** Γεωτεχνική έκθεση καταγραφής – αποτύπωσης στοιχείων από την κατολίσθηση στη Μαλακάσα στις 27/10/1995.
- **Αναγνωστοπούλου Π., Πογιατζή Ε., 2013.** Δελτίο κατολισθήσεων που εκδηλώθηκαν στην Ελλάδα κατά το έτος 2012. Εθνικό Κέντρο Βιώσιμης και Αειφόρου Ανάπτυξης (Ε.Κ.Β.Α.Α.) – Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών (Ι.Γ.Μ.Ε.Μ.). Δ/ση Τεχνικής Γεωλογίας.
- **Ανδρουλακάκης Ν., Κοντάκος Η., Κουτσόπουλος Κ., 2009.** Πολυκριτηριακή Ανάλυση. Σημειώσεις προχωρημένου επιπέδου GIS σε εξ 'αποστάσεως σεμινάριο στα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα.
- **Αποστολίδης Ε., Κανάρης Δ., Καρφάκης Ι., Κουτσουβέλη Α., Κυνηγαλάκη Μ., Κωνσταντοπούλου Γ., Λουπασάκης Κ., Μπέλλας Μ., Νικολάου Ν., 2007.** Έκθεση πρόδρομης εξέτασης τεχνικογεωλογικών συνθηκών στις πληγείσες, από πυρκαγιές το θέρος 2007, περιοχές του Ελλαδικού χώρου (Ν. Αχαΐας, Ν. Αρκαδίας, Ν. Κορινθίας, Ν. Ηλείας, Ν. Μεσσηνίας, Ν. Λακωνίας, Ν. Ευβοίας, Ν. Κεφαλληνίας, Ν. Μαγνησίας, Ν. Αττικής. ΙΓΜΕ, Αθήνα, Οκτώβριος 2007.
- **Γιαννάτος Γ., 1997.** Η κατολίσθηση της Μαλακάσας. Απόσπασμα από τεχνική έκθεση που βρίσκεται ενσωματωμένη στον Οδηγό Υπαίθρου της εκπαιδευτικής εκδρομής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του ΕΚΠΑ (Μάϊος 1998).
- **Γεωργιάννου Β., 2001.** Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής - Σημειώσεις. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001.
- **Γκαζέτας Γ., Καβουνίδης Σ., Ρόζος Δ., Τσιαμπάος Γ., 2010.** Από το πόρισμα επιτροπής εμπειρογνομόνων για τις καταπτώσεις στα Τέμπη στις 17-12-2009, ΤΕΕ.
- **Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), 2010.** Οριστική μελέτη δασικής οδοποιΐας οδών πρόσβασης στους πυλώνες της γραμμής μεταφοράς υπερυψηλής τάσης 400 Κ.Υ. "ΚΥΤ Πάτρας; - ΚΥΤ Μεγαλόπολης". Τεύχος τεχνικών δεδομένων. Δ/ση Νέων Έργων Μεταφοράς, Τομέας Μελετών Γραμμών Μεταφοράς.
- **Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Α.Ε. (ΔΕΣΦΑ), 2010.** Αγωγός Φυσικού Αερίου Υψηλής Πίεσης από τους Αγ. Θεοδώρους έως τη ΔΕΗ

Μεγαλόπολης. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Κοινοπραξία Penspen Limited, C&M Engineering A.E.

- **Ελευθερίου Α., 1982.** Οι κατολισθήσεις στον Ελληνικό χώρο και το πρόβλημα της αποκατάστασης των κατολισθαίνοντων οικισμών της Ελλάδας, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- **Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ), 2012.** Εφαρμογή οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.
- **Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιφέρειας Πελοποννήσου, 2012.** Στρατηγικός σχεδιασμός.
- **Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα LIFE+ ENV/IT/08/428, 2014.** Τεχνική έκθεση ανάλυσης αποτελεσμάτων από την εφαρμογή μοντέλων επικινδυνότητας στα εδάφη της Περιφέρειας Πελοποννήσου με τη χρήση του λογισμικού SMS. Soil Pro – Monitoring for Soil Protection. Περιφέρεια Πελοποννήσου. Παραδοτέο Π1.
- **Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα LIFE+ ENV/IT/08/428, 2014.** Σχέδιο πολιτικών προστασίας και περιορισμού της υποβάθμισης των εδαφών. Soil Pro – Monitoring for Soil Protection. Περιφέρεια Πελοποννήσου.
- **Ζαχαριάς Ο., 2008.** Ολοκληρωμένη μεθοδολογία διαχείρισης κινδύνου έργων και προγραμμάτων μεγάλης κλίμακας, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων.
- **Ζιούρκας Κ., 1986.** Κατολισθητικές κινήσεις στον Ελληνικό Χώρο: Στατιστικό Απογραφικό Δελτίο, Πρακτικά 3ου Συνεδρίου Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας (Μάϊος, 1986).
- **Ζιούρκας Κ., 1989.** Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Παν. Πατρών.
- **Καββαδάς Μ., 2000.** Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων, για το Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
- **Καββαδάς Μ., 2002.** Στοιχεία Εδαφομηχανικής, ΕΜΠ.
- **Καβουνίδης Σ., Σωτηρόπουλος Η., Βέττας Π., Αυγερόπουλος Π., Μαρίνος Π., 1997.** Η κατολίσθηση της Μαλακάσας: Γενική Παρουσίαση, Πρακτικά 3ου

- Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Πάτρα 20-22 Μαρτίου 1997, Τόμος 2, σελ. 227-236.
- **Κανάρης Δ., Πογιατζή Ε., 2008.** Γεωτεχνική μελέτη κατά μήκος του άξονα αγωγού υψηλής πίεσης φυσικού αερίου στην ευρύτερη περιοχή Μεγαλόπολης. ΙΓΜΕ, Αθήνα, Ιούνιος 2008.
 - **Καραγεωργίου Ε., 1959.** Έκθεση επί της ασφάλειας της Σ.Γ. Κορίνθου – Καλαμών των ΣΠΑΠ περί το 184 χλμ.
 - **Καραγεωργίου Ε., 1968.** Έκθεση γεωτεχνικής έρευνας για την ασφαλή θεμελίωση του ενοριακού ναού της Κοιμήσεως της Θεοτόκου στο χωριό Κεραστάρη Μαντίνειας.
 - **Καραγεωργίου Ε., 1969.** Επί της επιλογής νέας ασφαλούς θέσεως δια την ανέγερσιν του ιερού ενοριακού ναού της Κοιμήσεως της Θεοτόκου της κοινότητας Κερασταρίου Μαντίνειας του Νομού Αρκαδίας.
 - **Καραγεωργίου Ε., 1972.** Η κατολίσθηση του Αγίου Κήρυκου της νήσου Ικαρίας. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας 9, σελ. 515-535, 1972.
 - **Καραπαντελάκης Κ., Μποτσιαλάς Χ., Παντζαρτζής Π., 2001.** Ο φλύσχος του τεκτονικού καλύμματος της βόρειας Πίνδου σαν γεωλογικό περιβάλλον σχεδιασμού και υλοποίησης υπόγειων έργων. Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, 73-80.
 - **Καρφάκης Ι., 2004.** Έκθεση τεχνικογεωλογικής εξέτασης φαινομένων καταπτώσεων στο Δ.Δ. Ποταμιάς του Δήμου Φαλαισίας του Νομού Αρκαδίας. Προγραμματική Συμφωνία Κ.Ε.Δ.Κ.Ε. – ΥΠ. ΕΣ. Δ.Δ.Α – Ι.Γ.Μ.Ε. Παροχής του ΙΓΜΕ υπηρεσιών συμβούλου σε θέματα υδατικών πόρων – γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά. ΙΓΜΕ, Αθήνα, Ιούνιος 2004.
 - **Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ), 2002.** Φωτογραφίες από Θέση Τσακώνα.
 - **Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2007.** Γεωλογία Τεχνικών Έργων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
 - **Κουμαντάκης Ι., 1978.** Κατολισθητικά φαινόμενα σε τμήμα της Εγνατίας οδού, παρά τα Λουτρά Ελευθερών Καβάλας. Πρόταση γεωτεχνικής ταξινόμησης Μολασσών. Δελτίο ΚΕΔΕ τ.3 Αθήνα.
 - **Κουμαντάκης Ι., 1984.** Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας. Μέθοδοι Ερευνών Υπεδάφους, ΕΜΠ.

- **Κουμαντάκης Ι., 1993.** Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας II, ΕΜΠ.
- **Κουμαντάκης Ι., Ρόζος Δ., Μαρκαντώνης Κ., Τσαγγαράτος Π., 2004.** Διερεύνηση των γεωλογικών αστοχιών του τμήματος Χρανών – Διαβολιτσίου της σιδηροδρομικής γραμμής Πελοποννήσου. Προτάσεις αντιμετώπισης. Τεχνικογεωλογική – Υδρογεωλογική έκθεση στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος μεταξύ Σχολής Μεταλλείων – Μεταλλουργών Μηχανικών και Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος Α.Ε.
- **Κουμαντάκης Ι., 2011.** Τα κατολισθητικά φαινόμενα του Μετσόβου. Προτάσεις βελτίωσης συνθηκών. Εκπαιδευτικό Σεμινάριο με θέμα “Οι κατολισθήσεις του Μετσόβου”. Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου “Περιβάλλον και Ανάπτυξη”.
- **Κουμαντάκης Ι., 2012.** Κατολισθητικά φαινόμενα στο Δήμο Κόνιτσας (Περιφέρεια Ηπείρου). Προτάσεις μείωσης της κατολισθητικής επικινδυνότητας.
- **Κουτσόπουλος Κ., 2002.** Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου» Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- **Κουτσόπουλος Κ., Ανδρουλακάκης Ν., 2004.** Εφαρμογές του λογισμικού ArcGIS 9x με απλά λόγια. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- **Λέκκας Ε., Κράνης Χ., 2001.** Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων που Απαντώνται σε Θεμελιώσεις περί τα Ρήγματα, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5–7 Νοεμβρίου, 2008.
- **Μάλιος Ι., 1994.** Η κριτική του ρόλου των εμπειρικών συστημάτων κατάταξης της βραχώμαζας στο σχεδιασμό υπόγειων έργων. Η συμβολή των αναλυτικών μεθόδων στον εν λόγω σχεδιασμό. Γεωλογία Σηράγγων και Υπογείων Έργων. Εμπειρίες από τον Ελληνικό Χώρο. Ελληνική Επιτροπή Τεχνικής Γεωλογίας, 1994.
- **Μαραβέγιας Δ., 1987.** Κατασκευή υδρογέωτρησης για το Δήμο Μεγαλόπολης. ΙΓΜΕ – Παράρτημα Τρίπολης. Νοέμβριος 1987.
- **Μαραβέγιας Δ., 1988.** Υδρογεωλογική έρευνα της Ν.Α. Γορτυνίας και ευρύτερης περιοχής Λεκάνης Μεγαλόπολης και οι ανάγκες του συνδέσμου “Ζωοδόχος Πηγή”. 2^ο στάδιο μελέτης – Αποτελέσματα ερευνητικού γεωτρητικού προγράμματος για το έτος 1987. Ιούνιος 1988.

- **Μαραβέγιας Δ., Βάγιας Δ., 2002.** Τεχνική έκθεση – Υδρογεωλογική αναγνώριση Δήμου Γόρτυνος Ν. Αρκαδίας. Προγραμματική σύμβαση ΚΕΔΚΕ-ΥΠΕΣΔΔΑ-ΙΓΜΕ.
- **Μαραβέγιας Δ., 2009.** Τεχνική έκθεση υδρογεωλογικής αναγνώρισης στα Δ.Δ. Παραδεισίων, Βάγγου, Καράτουλα, Λυκοχίων, Τριλόφου και Χωρεμίου του Δήμου Μεγαλόπολης του Ν. Αρκαδίας. ΙΓΜΕ. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Δ/νση Υδρογεωλογίας.
- **Μαραβέγιας Δ., 2009.** Τεχνική έκθεση υδρογεωλογικής αναγνώρισης στα Δ.Δ. Ακόβου, Λεπτινίου, Καμποχωρίου, Τουρκολέκα και Ανεμοδουρίου του Δήμου Φαισσίας του Ν. Αρκαδίας. ΙΓΜΕ. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Δ/νση Υδρογεωλογίας.
- **Μαραβέγιας Δ., 2010.** Τεχνική έκθεση επί των αποτελεσμάτων της ερευνητικής γεώτρησης στη θέση Νιχώριο του Δ.Δ. Τριλόφου του Δήμου Μεγαλόπολης. Αχαρναί, Δεκέμβριος, 2010.
- **Μαρίνος Γ., 1957.** Πρόδρομος γεωλογική έκθεσις περί της λιγνιτοφόρου λεκάνης Μεγαλοπόλεως – Πελοποννήσου. Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους. Αθήνα.
- **Μαρίνος Π., 1979.** Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας και υποστήριξη σηράγγων. Μια επισκόπηση και μια προσπάθεια ελέγχου και κριτικής στις ασβεστολιθικές μάζες του Παρνασσού – Γκιώνας», Ορυκτός Πλούτος 3/1979.
- **Μαρίνος Π., Κούκης Γ., Στουρνάρας Γ., Σκιάς Σ., 1984.** Τα κατολισθητικά φαινόμενα από τον σεισμό των Αλκυονίδων 1981. Η σύνδεσή τους με τα ενεργά ρήγματα και ο χωροταξικός σχεδιασμός της περιοχής, 2^ο Γεωλογικό Πανελλαδικό Διήμερο: Γεωλογία και Σεισμοί, Ελληνική Γεωλογική Εταιρεία, 31-32, Περίληψη (1984).
- **Μαρίνος Π., 1994.** Επί της εφαρμογής της γεωμηχανικής ταξινόμησης Bieniawski σε ασθενείς και ετερογενείς βραχώμαζες. Ειδική αναφορά στην περίπτωση του πινδικού φλύσχη. Γεωλογία Σηράγγων και Υπογείων Έργων. Εμπειρίες από τον Ελληνικό Χώρο. Ελληνική Επιτροπή Τεχνικής Γεωλογίας, 1994.
- **Μαρίνος Π., 1998.** Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών – Τομέας Γεωτεχνικής.

- **Μαρίνος Π., 1998.** Αστάθεια περί την Χ.Θ. 123 Αυτοκινητόδρομου Κορίνθου – Τριπόλεως. 1^η Έκθεση Συμβούλου. Αδημοσίευτη Έκθεση.
- **Μαρίνος Β., Μαρίνος Π., Hoek Ε., 2004.** Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2004.
- **Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., Ντουινιάς Γ. και Προβιά Α., 2004.** Διερεύνηση των συνθηκών εκδήλωσης της κατολίσθησης στην περιοχή της Χ.Θ. 123+000 του αυτοκινητόδρομου Κορίνθου – Τρίπολης και μέτρα αποκατάστασης. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη, Απρίλιος 2004.
- **Μαρίνος Π., 2005.** Σημειώσεις για το μάθημα «Τεχνική Γεωλογία Υπόγειων Έργων», του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων”, ΕΜΠ.
- **Μαρίνος Β., 2007.** Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής.
- **Μπαντής Σ., 2007.** Προγνωστικά μοντέλα φυσικών κινδύνων, Πολυμήχανο, τεύχος 20, Περιοδική έκδοση της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ.
- **Μπαντής Σ., 2011.** Χωρο – χρονική πρόβλεψη φυσικών κινδύνων: τάσεις εφαρμοσμένης έρευνας. Ημερίδα – Περιβάλλον: από την εκπαίδευση στη δράση. ΑΠΘ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής.
- **Μπαρδάνης Μ., Ντουινιάς Γ., Καβουνίδης Σ., 2006.** Αριθμητική Προσομοίωση του Καθεστώτος των Πιέσεων Πόρων σε Υλικά Κατολίσθησης Χαμηλής Διαπερατότητας με Υποστράγγιση, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Μποτσιαλάς Κ., 2007.** Ανάλυση, ερμηνεία και εκτίμηση του υδρογεωλογικού και τεχνικογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών. Εφαρμογή στο σχιστολιθικό σύστημα της νήσου Τήνου. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

- **Μπουτίνια Ν., 2012.** Ανάλυση των κατολισθητικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο που ενεργοποιούνται από βροχοπτώσεις. Πτυχιακή εργασία του Τμήματος Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- **Νικολάου Ν., 1988.** Έκθεση γεωτεχνικής εξέτασης κατολισθητικών φαινομένων στη κοινότητα Τριπόταμου, του Ν. Αρκαδίας. ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1988.
- **Νικολάου Ν., Κυνηγαλάκη Μ., 2008.** Τεχνικογεωλογική αναγνώριση στο Δ.Δ. Χωρεμίου, Δήμου Μεγαλόπολης, Ν. Αρκαδίας. ΙΓΜΕ, Αθήνα, Νοέμβριος 2008.
- **Ντουινιάς Γ., Μπελόκας Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., 2006.** Η μεγάλη κατολίσθηση της Τσακώνας στην Ε.Ο. Τρίπολης – Καλαμάτας, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Ντουινιάς Γ., Φικίρης Ι., Κολλιός Α., Καββαδάς Μ., Μαρίνος Π., 2006.** Η Κατολίσθηση της Νεμέας. Μηχανισμός Αστοχίας – Μέτρα Σταθεροποίησης, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Ξειδάκης Γ.Σ., 2006.** Αστοχίες Θαλασσίων Πρανών σε Ημι-λιθοποιημένα Εδάφη των Ακτών της Θράκης. Μέρος Α. Μηχανισμοί διάβρωσης και Μορφές Αστοχιών, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Οδηγία 2007/60/ΕΚ, 2007.** Κοινοτική Οδηγία “για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας” (Directive of the European Parliament and of the Council “on the assessment and management of flood risks”).
- **Παπαδόπουλος Π., 1997.** Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50.000 – Φύλλο ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΙΣ. ΙΓΜΕ.
- **Παπαδόπουλος Β., 2004.** Σημειώσεις του μαθήματος Σχεδιασμός Υπογείων Έργων για το Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Τομέας Γεωτεχνικής ΕΜΠ.
- **Παπακυριακόπουλος Π., Κουδουμάκης Π., Ξειδάκης Γ., 2006.** Γεωτεχνικά Προβλήματα στο Επαρχιακό Οδικό Δίκτυο του Β. Έβρου. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Παπανικολάου Δ., Μαριολάκος Η., Λέκκας Ε., Λόζιος Σ., 1986.** Μορφοτεκτονικές παρατηρήσεις στη λεκάνη Ασωπού και την παραλιακή ζώνη

- Ωρωπού. Συμβολή στη νεοτεκτονική της Βόρειας Αττικής. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Πρακτικά 3^{ου} συνεδρίου, Τόμος XX, σελ. 251-267, Αθήνα.
- **Παπατόλιος Κ., 2005.** Υπόγειο νερό και συνθήκες ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρηνών στην Εγνατία Οδό. Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου υδρογεωλογικού συνεδρίου, Αθήνα.
 - **Ρόζος Δ., Αγγελίδης Χρ., Πογιατζή Ε. και Καρφάκης Ι., 1995.** Τεχνικογεωλογικός χάρτης περιοχής κατολισθήσης Μαλακάσας κλίμακας 1:1000, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
 - **Ρόζος Δ. και Αποστολίδης Ε., 2004.** Τεχνικογεωλογική διερεύνηση των αστοχιών πρηνών στο Παλαιό Μικρό Χωριό Ν. Ευρυτανίας για την ασφαλή οικιστική ανάπτυξή του. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τόμος XXXVI, 2004, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2004.
 - **Ρόζος Δ., 2005.** Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Ι. 6^η διάλεξη, Κατολισθήσεις – Ευστάθεια πρηνών – Καθιζήσεις Α. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας.
 - **Ρόζος Δ., 2007.** Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας Ι. ΕΜΠ – Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών – Τομέας Γεωλογικών Επιστημών – Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας.
 - **Ρόζος Δ., Ηλία Ι., Τσαγγαράτος Π., 2013.** Εκτέλεση και αξιολόγηση αποκλισημετρήσεων στο χώρο κατολισθήσης του οικισμού Μακρυσίου του Δήμου Μεγαλόπολης. Ερευνητικό Πρόγραμμα Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας – Υδρογεωλογίας, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
 - **Σακελλαρίου Α., Λυκούσης Β., Ρουσάκης Γ., Γεωργίου Π., 2001.** Φαινόμενα ολισθήσεων σε υποθαλάσσια ενεργά ρηξιγενή πρηνή: Περιοχή Παναγοπούλας, Δ. Κορινθιακός Κόλπος. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τόμος XXXIV/5, 1723 – 1731, 2001, Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2001.
 - **Σακελλαρίου Μ., Κοναξή Φ., Παπασπηλιωτοπούλου Φ., 2005.** Διερεύνηση της επιρροής του υετού και του σεισμού στην ευστάθεια των πρηνών.

- Εφαρμογή στον Ν. Ευρυτανίας και στον Ν. Αχαΐας. 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005.
- **Σακουμπέντα Ε., 2007.** Διαχείριση διακινδύνευσης κατολισθήσεων. Μεταπτυχιακή εργασία για το ΠΜΣ με τίτλο “Διοίκηση και Διαχείριση Τεχνικών Έργων”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.
 - **Σταματόπουλος Κ., Σταματόπουλος Α., Πετρίδης Μ., 2006.** Απώλεια Ευστάθειας Πρανούς Υπό την Επίδραση Ισχυρής Βροχής, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
 - **Σταυρακάκης Γ., 2003.** Υπολογισμός σεισμικής επικινδυνότητας στη θέση της κατολίσθησης στην περιοχή Τσακώνα της Ν.Ε.Ο. Τρίπολης – Καλαμάτας. Αδημοσίευτη Έκθεση.
 - **Σχινάς Κ., Ζιάγκας Ε., Νάκος Γ., 1989.** Εδαφολογικός Χάρτης της Ελλάδας. Χάρτης Γαιών Μεγαλόπολης (Κλίμακας 1:50.000). Υπουργείο Γεωργίας – Δασική Υπηρεσία.
 - **Σωτηρόπουλος Λ., Λυμπέρης Ε., Σιγάλας Α., Ντουρούπη Α., Προβιά Κ. & Ντουνιάς Γ., 2004.** Κατολίσθηση στην περιοχή της Τσακώνας Ν. Αρκαδίας: Γεωλογικές συνθήκες και μηχανισμός ενεργοποίησης. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
 - **Τζιτζιρας Α., 1985.** Γεωτεχνικές συνθήκες στο χώρο θεμελίωσης του ιερού ναού Κοιμήσεως της Θεοτόκου Μονής Μπούρας Φαλαισίας, Μεγαλόπολη. Αθήνα, Σεπτέμβριος 1985.
 - **Τζιτζιρας Α., 2001.** Γεωτεχνική αναγνώριση στα χωριά Τριπόταμος και Χωρέμη του Δήμου Μεγαλόπολης». Αθήνα, Ιούνιος 2001.
 - **Τζιτζιρας Α., 2002.** Έκθεση γεωλογικής - γεωτεχνικής αναγνώρισης στα χωριά Καρβουνιάρης, Μαυριά και Κυπαρίσσια του Δήμου Γόρτυνος Καρύταινας. ΙΓΜΕ, Αθήνα 2002.
 - **Τζιτζιρας Α., 2003.** Έκθεση γεωλογικής – γεωτεχνικής αναγνώρισης κατολισθητικών φαινομένων στα χωριά Μακρύσι, Ραφομάτη και Πλάκα του Δήμου Μεγαλόπολης Νομού Αρκαδίας. Προγραμματική συμφωνία ΚΕΔΚΕ-ΥΠΕΣΔΔΑ-ΙΓΜΕ. Παροχής του ΙΓΜΕ υπηρεσιών συμβούλου σε θέματα υδατικών πόρων, γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά.

- **Τζιτζιρας Α., 2003.** Έκθεση γεωλογικής – γεωτεχνικής αναγνώρισης κατολισθητικών φαινομένων στα χωριά Λεοντάρι, Άκοβος, Καμποχώρι και σε τμήματα του επαρχιακού δρόμου Γουπάτα-Άκοβο-Λεπτίни του Δήμου Φαλαισίας Νομού Αρκαδίας. Προγραμματική συμφωνία ΚΕΔΚΕ-ΥΠΕΣΔΔΑ-ΙΓΜΕ. Παροχής του ΙΓΜΕ υπηρεσιών συμβούλου σε θέματα υδατικών πόρων, γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά.
- **Τσιαμπάος Γ., Σαμπατακάκης Ν., Τέλλη Δ., 1994.** Εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης βραχώμαζας σε πρηνή εισόδων σηράγγων σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Γεωλογία Σηράγγων και Υπογείων Έργων. Εμπειρίες από τον Ελληνικό Χώρο. Ελληνική Επιτροπή Τεχνικής Γεωλογίας, 1994.
- **Τσέργα Δ., 2007.** Συγκριτική θεώρηση μοντέλων πρόβλεψης φυσικών κινδύνων. Μεταπτυχιακή εργασία για το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο “Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη” του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- **Υπουργείο Γεωργίας / Δνση Τεχνικών μελετών και κατασκευών, 1994.** Μελέτη μικρών λιμνοδεξαμενών Ν. Αρκαδίας. Οριστική Μελέτη φράγματος Τάνου. Γεωλογική Μελέτη. Ανάδοχος Α. Λέτσιος.
- **Υπουργείο Γεωργίας / Διεύθυνση Υδρογεωλογίας (2015).** Προσωπική επικοινωνία με τον Γεωλόγο της Υπηρεσίας κ. Τσαρμπό.
- **ΥΠΕΧΩΔΕ/ΔΜΕΟ, ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΕ, ΠΡΙΣΜΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΤΕ, 1999.** Μελέτη σχεδιασμού των έργων οριστικής αποκατάστασης της κατολίσθησης από Χ.Θ. 122+850 ΕΩΣ Χ.Θ. 123+300 του τμήματος Κ. Σολωμού - Είσοδος Σήραγγας Αρτεμισίου του αυτοκινητόδρομου Κορίνθου – Τρίπολης», Γεωτεχνική Μελέτη.
- **ΥΠΕΧΩΔΕ/ΓΓΔΕ/Ε.Υ.Δ.Ε. ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ Π.Α.Θ.Ε., 2002.** Αναγνωριστική γεωλογική μελέτη / τεχνική έκθεση (περιοχή κατολίσθησης Παναγοπούλας) του έργου: “Μελέτη αναγνώρισης οδοποιίας και υποστηρικτικές μελέτες – έρευνες στα πλαίσια της μετατροπής του οδικού άξονα Κόρινθος – Πάτρα σε αυτοκινητόδρομο.
- **ΥΠΟΜΕΔΙ ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ / ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ / ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΕΥΔΕ) / ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ**

- ΥΠΟΔΟΜΩΝ (ΚΣΣΥ), 2016.** Η γέφυρα της Τσακώνας. Ημερίδα της 11^{ης} Μαΐου 2016. Αθήνα.
- **Φαρμακάκη Α., 2012.** Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδας. Μεταπτυχιακή εργασία του Δ.Π.Μ.Σ. “Περιβάλλον & Ανάπτυξη”, ΕΜΠ.
 - **ΦΕΚ 1902/14-09-2007, αριθμ. οικ. 37691, 2007.** Έγκριση προδιαγραφών για την εκπόνηση Μελετών Γεωλογικής Καταλληλότητας που συντάσσονται στα πλαίσια των μελετών ΓΠΣ -ΣΧΟΟΑΠ.
 - **Φερεντίνου Μ., 2004.** Εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
 - **Φουντούλης Ι., 2003.** Για τον χαρακτηρισμό της τεκτονικής ασυνέχειας στη νότια πλευρά της κατολίσθησης στην Εθνική Οδό Τρίπολης – Καλαμάτας στην περιοχή της Τσακώνας. Αδημοσίευτη Έκθεση.
 - **Φουντούλης Ι., Λαδάς Ι., Σπυρίδωνος Ε., και Μαριολάκος Η., 2004.** Η σημασία της Τεκτονικής και της Υδρογεωλογίας για την κατολίσθηση της Τσακώνας Αρκαδίας. Πρακτικά 10ου Συνεδρίου της Ελλ. Γεωλ. Ετ., 15-17 Απριλίου 2004, Θεσσαλονίκη, XXXVI/4, σ. 1872 – 1881.
 - **Φυτρολάκης Ν., Αντωνιάδης Δ., 1974.** Κατολισθήσεις και γεωλογικές συνθήκες επί της Εθνικής Οδού Κορίνθου – Πατρών περιοχής Ψαθόπυργου, Μεταλλειολογικά Μεταλλουργικά Χρονικά (20/1974).
 - **Χατούπης Θ. και Φουντούλης Ι., 2004.** Νεοτεκτονική παραμόρφωση της Βόρειας Πάρνηθας. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004. Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.

B. ΔΙΕΘΝΗΣ

- **Aleotti P. and Chowdury R., 1999.** Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 21- 44.
- **American Society for Testing and Materials, 1988.** Rock Mass Classification Systems for Engineering Purposes, STP 984, p. 26.
- **Ardizzone F., Cardinali M., Carrara A., Guzzetti F., Reichenbach,P., 2002.** Uncertainty and errors in landslide mapping and landslide hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2 (1-2), 3-14.
- **Arnold P. N., 1993.** The Development of a Rock Engineering Systems Methodology. PhD Thesis, Rock Engineering, Imperial College, London, UK p. 377.
- **Ayalew L., Yamagishi H. and Ugawa N., 2004.** Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano river, Niigata Prefecture, Japan, *Landslides* 1: 73-81.
- **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(1–2), 15–31.
- **Baills A., Desramaut N., Ullrich T., 2012.** 7th Framework Programme - SafeLand –Deliverable D3.6: Database of human activity factors affecting the local landslide risk at selected sites.
- **Baroň I., Supper R. & Ottowitz D., 2012.** 7th Framework Programme - SafeLand Deliverable D4.6. Report on evaluation of mass movement indicators. Work Package 4.3 – Evaluation and development of reliable procedures and technologies for early warning.
- **Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J., 1974.** Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- **Benardos A., Kaliambakos D., 2004.** A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling – illustrated by the Athens Metro, Greece, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41 (2004) 987–999.
- **Bieniawski Z.T., 1989.** Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.

- **Bonham – Carter G.F. 1994.** Geographic Information System for Geoscientists: modelling with GIS, Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994.
- **Borgatti L., Soldati M., 2008.** Landslides as Proxies of Climate Change: Evidence from Past Activity Records in the Dolomites (Italy). The First World Landslide Forum, 2008, Tokyo.
- **Brabb, E., Bonilla, M.G., Pampeyan, E., 1972.** Landslide susceptibility in San Mateo County, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies, Map MF-360, scale 1:62,500 (reprinted in 1978).
- **Brabb E., 1984.** Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: Proceedings of the 14th ISL, Toronto, vol 1, pp 307-324.
- **Brabb E., 1996.** Hazard map are not enough. In: Chacon J., Irigaray C (eds) Proceedings of the Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional sobre Riesgos Naturales, Ordenacion del Territorio y Medio Ambiente 1, S.E.G.A.O.T. Granada, Spain.
- **Burrough P. A., 1986.** Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment, Oxford University Press, Oxford, pp. 193.
- **Calcaterra D., Parise M., 2010.** Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 23, 1–4. DOI: 10.1144/EGSP23.1
- **Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., 1992.** Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal 2, 172-183.
- **Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F. and Reichenbach P., 1995.** GIS-based techniques for mapping landslide hazard, In A. Carrara and F. Guzzetti (eds), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Publications, Dordrecht, The Netherlands, 135–176.
- **Chacon J., Irigaray C., Fernandez T., Hamdouni R., 2006.** Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology (2009) – Volume 65 (341-411).
- **Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E., 2008.** GIS-analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). Geomorphology 94: 325-339.

- **Corominas J., Mavrouli O., 2011.** 7th Framework Programme (SafeLand) – Cooperation Theme 6 Environment (including climate change), Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards. Deliverable D2.4. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning - Work Package 2.1: Harmonisation and development of procedures for quantifying landslide hazard.
- **Corominas J., Mavrouli O., 2011.** 7th Framework Programme (SafeLand) - Cooperation Theme 6 Environment (including climate change), Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards. Deliverable D2.8. Recommended procedures for validating landslide hazard and risk models and maps – Work Package 2.3: Development of procedures for Quantitative Risk Assessment at regional scale and European scale.
- **Corominas J., Van Western C., Frattini P., Cascini L., Malet J., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervas J., Smith J., 2014.** Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bull Eng Geol Environ 73: 209-263.
- **Coyle G., 2004.** The Analytical Hierarchy Process.
- **Crosta G. B., Agliardi F., Frattini P., Sosio R., 2012.** 7th Framework Programme - SafeLand - Deliverable 1.1: Landslide triggering mechanisms in Europe – Overview and State of the Art. Work Package 1.1 – Identification of mechanisms and triggers.
- **Crozier M.J., 1986.** Landslides: cause, consequences and environment. Croom Helm Ltd, 252 pp.
- **Cruden D., Varnes D., 1996.** Landslides types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides investigation and mitigation, Spec. Rep. 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, pp.36-75.
- **Cruden D., Couture R., 2011.** The Working Classification of Landslides: material matters. Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- **Dai F.C., Lee C.F., Zhang X.H., 2001.** GIS based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. Eng Geol 61: 257-271.
- **Dai F.C., Lee C.F. and Ngai Y.Y., 2002.** Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, 64 (1), 65-87.

- **De Bano L.F., Neary D.G., Folliott P.F., 1998.** Fire's Effects on Ecosystems. Wiley, New York.
- **Demir G., Aytekin M., Akgün A., İközler 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*. February 2013, Volume 65, Issue 3, pp 1481–1506.
- **Dietrich W., Reiss R., 1995.** A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological processes*, Vol. 9, 383 – 400.
- **Durgin P.B., 1977.** Landslides and the weathering of granitic rocks. *Reviews in Engineering Geology*, 3 127 – 131.
- **EL 0071, 2012.** System development on Monitoring Slope Stability for the Prevention of Landslides and Training of Local Public Authorities in the Region of Peloponnisos. Supported by a grant (50%) from Iceland, Liechtenstein and Norway through the EEA financial mechanism and a grant (50%) from the public investments programme of the Hellenic Republic.
- **ESRI (Environmental Systems Research Institute).** <http://www.esri.com/>
- **Forman E., Gass S., 2001.** The Analytic Hierarchy Process – An Exposition.
- **Galanakis D., Mettos A., Mataragas D., Triantafyllis M., 1997.** Landslide of Malakasa area, geological and tectonic regime. *Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Athens, Greece, June 23-27, 1997, *Engineering Geology and the Environment*, vol 1-3, pp 665-670.
- **Ganas A., Oikonomou A., Tsimi C., 2013.** National Observatory of Athens Faults: A digital database for active faults in Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. XLVII 2013. *Proceedings of the 13th International Congress*, Chania, Sept. 2013.
- **Glade T., Anderson M., Crozier M.J., 2005.** *Landslide Hazard and Risk*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 802pp.
- **Gokceoglu C., Sonmez H., Nefeslioglu H.A., Duman T.Y., Can T., 2005.** The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity, *Engineering Geology*, 81 (1), 65-83.

- **Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999.** Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, *Geomorphology*, 31, 181–216.
- **Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., 2006.** Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81 (2006) 166-184.
- **Hack R., 2002.** «An evaluation of slope stability classification», Keynote Lecture, Proceedings ISRM EUROCK 2002, Madeira, Portugal.
- **Hencher S., Lee Su Gon, Malone A., 2008.** Back Analysis of Landslides to Allow the Design of Cost-effective Mitigation Measures, Ching Cheung Road Landslide, Hong Kong. The First World Landslide Forum, 2008, Tokyo.
- **Hervás J., Delattre M., 2010.** 7th Framework Programme - SafeLand, Cooperation Theme 6 Environment (including climate change), Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards. “Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change and risk management strategies”. Deliverable D0.1: Living with landslides – European and International dimensions of the project SafeLand.
- **Highland L., Bobrowsky P., 2008.** The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides. U.S. Geological Survey.
- **Hoek E., 1999.** Support for very weak rock associated with faults and shear zones. Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia, 14-19 March, 1999.
- **Hoek E., Marinos P., 2000.** Predicting Tunnel Squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December, 2000.
- **Hudson J., 1992.** *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*.
- **Hudson J., Harrison J., 1997.** *Engineering Rock Mechanics. An introduction to the principles*. Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, UK.
- **Hudson J., 2013.** A review of Rock Engineering Systems (RES) applications over the last 20 years. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College, London, UK.

- **Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., 2014.** The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 2014 11: 167 – 194.
- **Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.** IPCC Fourth Assessment Report, www.ipcc.ch.
- **Keefer D., 2000.** Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution —the 1989 Loma Prieta, California event. *US Geological Survey. Engineering Geology* 58 (2000) 231–249.
- **Koukis G, Ziourkas C., 1991.** Slope instability phenomena in Greece: a statistical analysis. *Bull IAEG* 43:47–60.
- **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. *Bull Eng. Geol. Environ* (2009) 68: 215-229. DOI 10.1007/S10064-008-0184-8.
- **Lebourg T., Bedoui S., Hernandez M., 2009.** Control of slope deformations in high seismic area: Results from the Gulf of Corinth observatory site (Greece). *Engineering Geology* 108: 295-303.
- **Jaedicke C., Sverdrup-Thygeson K., Smebye H., Syre E, Vangelsten B. Nadim F., Kalsnes B., 2010.** 7th Framework Programme - SafeLand - Deliverable D2.10. Identification of landslide hazard and risk "hotspots" in Europe.
- **Jiao Y., Hudson J., 1995.** The fully-coupled model for rock engineering systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 32, No. 5, pp. 491-512, 1995.
- **Mancini F., Ceppi C., Ritrovato G., 2010.** GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1851-1864.
- **Manoj K. A., Anbalagan R., 2010.** 7th Framework Programme - SafeLand - Deliverable D2.2b: Harmonisation and development of procedures for quantifying landslide hazard. A Report on Overview of Landslide Hazard and Risk Practices in India.
- **Marinos P., Yannatos G., Sotiropoulos H., Cavounidis S., 1997.** Increasing the stability of a failed slope by pumping, Malakasa Landslide, Athens Greece,

Proceedings of an International Symposium of IAEG: Engineering Geology and the Environment, vol.2.

- **Marinos P. and Hoek E., 2000.** GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.
- **Marinos V., Marinos P., Hoek E., 2005.** The geological strength index: applications and limitations. Bull Eng Geol Environ (2005) 64: 55-65. DOI 10.1007/S10064-004-0270-5.
- **Mazzoccola D., Hudson J., 1996.** A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 37-56.
- **Migon P., Lidmar-Bergstrom K.L., 2001.** Weathering mantles and their significance for geomorphological evolution of central and northern Europe since the Mesozoic. Earth-Science Reviews, v. 56, 285-324.
- **Miller S., Harris N., William S., Bhalai S., 2007.** Landslide susceptibility assessment for St. Thomas, Jamaica, using geographical information system and remote sensing methods. In: Teeuw RM (ed) Mapping hazardous terrain using remote sensing. Geological Society, vol 283. London, Special Publications, pp 77-91.
- **Miller S., Brewer T., Harris N., 2009.** Rainfall thresholding and susceptibility assessment of rainfall-induced landslides: application to landslide management in St Thomas, Jamaica. Bull Eng Geol Environ, 68, 539-550.
- **Nadim F., Høydal Ø., Haugland H., McLean A., 2011.** 7th Framework Programme - SafeLand - Deliverable D1.6: Analysis of landslides triggered by anthropogenic factors in Europe.
- **Nagarajan R., Roy A., Vinod Kumar R., Mukherjee A., Khire M.V., 1999.** “Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions”, Bull Eng Geol Env (2000) 58: 275–287.
- **Parry S., Baynes F., Culshaw M., Eggers M., Keaton J., Lentfer K., Novotny J., Paul D., 2014.** Engineering geological models: an introduction: IAEG commission 25. Bull Eng Geol Environ (2014) 73: 689 – 706. DOI 10.1007/s10064-014-0576-x.

- **Pedrozzi G., 2004.** Triggering of landslides in Canton Ticino (Switzerland) and prediction by the rainfall intensity and duration method. *Bull Eng Geol Environ* (2004) 63:281–291.
- **Picarelli L., Olivares L., Comegna L., Damiano E., Rianna G., 2010.** 7th Framework Programme - SafeLand. Deliverable 1.2: Geomechanical modelling of slope deformation and failure processes driven by climatic factors: shallow landslides, deep landslides and debris flows.
- **Pitilakis K., Fotopoulou S., Argyroudis S., Pitilakis D., Senetakis K., Treulopoulos K., Kakderi K., Riga E., 2011.** 7th Framework Programme (SafeLand). Deliverable 2.5: Physical vulnerability of elements at risk to landslides: Methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines.
- **Pourghasemi H. R., Moradi H. R., Fatemi Aghda S. M., 2013.** Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Nat Hazards* DOI 10.1007/s11069-013-0728-5.
- **Pradhan B., Sezer E., Gokceoglu C., Buchroithner M., 2010.** Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide – prone area (Cameron Highlands, Malaysia). *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 4, No 12, December 2010.
- **Prete M. Del, Guadagno F. M., Hawkins A. B., 1998.** Preliminary report on the landslides of 5 May 1998, Campania, southern Italy. *Bull Eng Geol Env* (1998) 57: 113–129.
- **Rapp A., 1960.** Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, Northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, Vol. 42, No. 2-3, pp.71 – 199.
- **Romana M., 1985.** New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM*, p. 49 – 53.
- **Rozos D., Tsagaratos P., Markantonis C., Skias S., 2006.** An application of Rock Engineering System (R.E.S.) method for ranking the instability potential of natural slopes in Achaia County, Greece. *Society for Mathematical Geology, XIth International Congress, Université de Liège – Belgium.*

- **Rozos D., Pyrgiotis L., Skias S., Tsagaratos P., 2008.** An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County. *Landslides* (2008) 5: 261-270.
- **Rozos D., Bathrellos G., Skillodimou H., 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. *Environ Earth Sci* (2011) 63: 49-63.
- **Saaty T., 1980.** *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.* ISBN 0-07-054371-2, McGraw-Hill.
- **Sabatakakis N., Tsiambaos G., Rondoyanni Th., Papanakli S., Kavoura K., 2015.** Deep-seated structurally controlled landslides of Corinth gulf rift zone, Greece: The case of Panagopoula landslide. *ISRM Congress 2015, Proceedings – The 13th International Congress of Rock Mechanics, Montreal, Canada.*
- **Sassa K., 1996.** Prediction of earthquake induced landslides. In: *Proceedings of 7th International Symposium on Landslides, A.A. Balkema, Trondheim, 17-21 June, 1, 115-132.*
- **Scherthanner H., 2005.** Fuzzy logic Method for Landslide Susceptibility Mapping, “Rio Blanco”, Nicaragua”. Unpublished Master Thesis for the Institute of Geography, Paris University of Salzburg.
- **Sdao F., Lioi D., Pascale S., Caniani D., Mancini I., 2013.** Landslide susceptibility assessment by using a neuro-fuzzy model: a case study in the Rupestrian heritage rich area of Matera. *Natural Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 395-407.
- **Segoni S., Leoni L., Benedetti A., Catani F., Righini G., Falorni G., Gabellani S., Rudari R., Silvestro F., Rebori N., 2009.** Towards a definition of a real-time forecasting network for rainfall induced shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 2119-2133, 2009. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/2119/2009.

- **Segoni S., Rossi G., Catani F., 2012.** Improving basin scale shallow landslide modelling using reliable soil thickness maps. *Nat Hazards* (2012) 61: 85 – 101. DOI 10.1007/s11069-011-9770-3.
- **Singh B., Goel R., 1999.** *Rock Mass Classification: A practical approach in Civil Engineering.*
- **Soeters R., Van Western C.J., 1996.** Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: Turner A, Shuster R (eds) *Landslides: investigation and mitigation.* National Academy Press, Washington D C, pp 129-177.
- **Steiguer J.E, Duberstein J., Lopes V., 2003.** *The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management.*
- **Skempton A.W., Hutchinson J.N., 1969.** Stability of natural slopes and embankment foundations. *Proc., 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art. Vol.,* pp.291-340.
- **Tavoularis N., Koumantakis I., Rozos D., Koukis G., 2015.** An implementation of rock engineering system (RES) for ranking the instability potential of slopes in Greek territory. An application in Tsakona area (Peloponnese - prefecture of Arcadia). *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XLIX, 38 - 58, 2015. <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.11049>.
- **Tavoularis N., Koumantakis I., Rozos D., Koukis G., 2017.** The contribution of landslide susceptibility factors through the use of Rock Engineering System (RES) to the prognosis of slope failures. An application in Panagopoula and Malakasa landslide areas in Greece. *Geotechnical and Geological Engineering, International Journal* DOI 10.1007/s10706-017-0403-9 (<http://rdcu.be/yiK7>).
- **Tavoularis N., Koumantakis I., Rozos D., Koukis G., 2017.** Landslide susceptibility mapping using the Rock Engineering System approach and GIS technique: an example from southwest Arcadia (Greece). *European Geologist Journal* 44 (<https://eurogeologists.eu/journal/>).
- **Tsangaratos P., Koumantakis I., Rozos D., 2005.** Landslide phenomena in granitic formations environments, geotechnical approach and classification, Eastern Aegean islands of Ikaria and Naxos, Greece. *Geoline 2005, Lyon, France, 23-25 May 2005.*

- **Tsangaratos P., Rozos D., 2013.** Producing landslide susceptibility maps by applying expert knowledge in a GIS – based environment. Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII 2013. Proceedings of the 13th International Congress, Chania, Sept. 2013.
- **Uromeihy A., Mahdaviifar M.R., 1999.** Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. Bull Eng Geol Env (2000) 58: 207–213.
- **Vacondios I., Konstantopoulou G., Karadassi St., 2007.** The contribution of clay minerals in the landslides occurrence within Pindos flysch formation. Bulletin of Geological Society of Greece, Vol. XXXX, Proceedings of 1st International Congress, Athens, May 2007.
- **Van Westen, C.J., Rengers N., Terlien M. T. J., Soeters R., 1997.** Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. International Journal of Earth Sciences.
- **Van Westen, C.J., Fan X., Huang R., 2010.** 7th Framework Programme - Safeland – Deliverable D2.2: Examples of international practice in landslide hazard and risk mapping. Assessing the state of art of landslide hazard and risk assessment in the P.R. of China. Work Package 2.1: Harmonisation and development of procedures for quantifying landslide hazard.
- **Varnes D., 1978.** Slope movement types and processes. In special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds), TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 12-33.
- **Varnes D., IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984.** Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO Press, Paris. 63 pp.
- **Wikipedia.** www.google.gr
- **WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1990.** A suggested method for reporting a landslide. Bulletin International Association for Engineering Geology, 41: 5-12.
- **Yalcin A., Bulut F., 2007.** Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). Nat Hazards 41:201-226, DOI 10.1007/s11069-006-9030-0.
- **Zadeh A., 1965.** Fuzzy sets. Information and control 8, pp: 338-353.

- **Zaruba Q., Menci V., 1969.** Landslides and Their Control. Elsevier, New York, and Academia, Prague, 205 pp.
- www.geoengineer.org
- www.google.com/earth
- www.usgs.gov – Γεωλογική Υπηρεσία Η.Π.Α