

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙ-ΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέποντες Καθηγητές : Δρ. Σταυροπούλου Μ., Δρ. Νάστος Π., Δρ. Λόζιος Σ.

Τίτλος : Μοντελοποίηση Ενεργοποίησης Κατολίσθησης με Χρήση Κατοφλιών Βροχόπτωσης



Φοιτήτρια : Φλίντρα Αικατερίνη

A.M. : 21313

<u>Αθήνα, Ιούλιος 2016</u>

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τα φαινόμενα κατολίσθησης στην περιοχή X.Θ. 6 + 380 έως X.Θ. 7 + 750 στο τμήμα 2.4 της χάραξης της Εγνατίας Οδού. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει έντονη κινητικότητα, της τάξης των 10 mm/έτος, μετατρέποντάς την σε μια περιοχή έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συνθέτουν τη γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης, είναι ο σχηματισμός του φλύσχη και οι οφιόλιθοι, όπου σύμφωνα με τις μελέτες κατά την Αλπική Ορογένεση η ζώνη Ωλονού – Πίνδου επωθήθηκε στην Ιόνιο ζώνη, και οι οφιόλιθοι επωθήθηκαν στον πινδικό φλύσχη. Οι έντονες αυτές τεκτονικές διεργασίες είχαν άμεση επίδραση στα πετρώματα, αναπτύσσοντας έτσι μια σημαντική υδροφορία ακόμη και σε πετρώματα που θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατα, ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό τις εδαφικές αστάθειες στην περιοχή μελέτης.

Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις γεωτεχνικές συνθήκες και ευνοούν την εκδήλωση φαινομένων κατολίσθησης στην περιοχή είναι η μορφολογία του ανάγλυφου, το υδρογραφικό δίκτυο, το γεωλογικό υπόβαθρο, οι κλιματολογικές συνθήκες, οι υδρογεωλογικές συνθήκες αλλά και οι ανθρώπινες δραστηριότητες.

Όλα τα παραπάνω συνθέτουν πολύ σημαντικούς λόγους για την μελέτη της περιοχής, μέσα από μοντέλα που θα επιτρέψουν μελλοντικά την πρόβλεψη των μετατοπίσεων της περιοχής, βάση των παραπάνω παραγόντων. Έτσι λοιπόν και εδώ, έγινε μια προσπάθεια για την προσομοίωση της κίνησης του εδάφους με βάση τα βροχομετρικά στοιχεία των τελευταίων ετών της περιοχής.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, έδωσε σημαντικά αποτελέσματα αναφορικά με τη χρονική στιγμή που ένα κατολισθητικό φαινόμενο πρόκειται να συμβεί, γεγονός που ενδέχεται, μέσα από τη σωστή ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, να βοηθήσει καταλυτικά, όχι μόνο τον τοπικό πληθυσμό, αλλά και την ασφαλή πραγματοποίηση σημαντικών έργων υποδομής στην περιοχή μελέτης.

Ειδικότερα, μέσα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με γνωστά δεδομένα μετακινήσεων στην περιοχή, διαπιστώθηκε πως υπάρχει πολύ καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων με την πραγματικότητα, γεγονός πολύ ενθαρρυντικό για την πιθανή μελλοντική χρήση παρόμοιων μοντέλων για την πρόβλεψη φαινομένων κατολίσθησης.

<u>Λέξεις κλειδιά:</u> κατολίσθηση, βροχόπτωση, Εγνατία Οδός, μοντέλο προσομοίωσης, γεωλογικοί σχηματισμοί

Abstract

This thesis studies the landslide phenomena in the region K.P. 6 + 380 to K.P. 7 + 750 of the section 2.4 of Egnatia Odos. This region presents intense moving activity, of about 10 mm / year, turning it into an area of intense scientific interest.

The geological formations that make up the geological structure of the study area, are the formations of flysch and ophiolites, where, according to the studies, during the Alpine orogenesis the Olonos - Pindos zone moved to the Ionian zone, and ophiolites were moved to the Pindos flysch. These intense tectonic processes had a direct influence on the area's rocks, thus developing an important aquifer even in rocks considered practically impermeable intensifying thus soil instabilities in the study area.

The main factors which influence the geotechnical conditions and favoring the onset of landslide phenomena in the region, is the morphology of the relief, the hydrographic network, the bedrock, climate conditions, hydrogeological conditions and, of course, human activities.

All the above consist very important reasons for the study of the region, through mathematical models which future may allow forecasting landslides in the region, based on the above factors. Thus, an attempt was made, in this thesis, to simulate the ground motion based on the rainfall data of recent years in the area.

The analysis carried out, gave significant results with respect to the time of a landslide may occur, which may, through the correct interpretation and evaluation of results, help significantly, not only the local population, but also the safe realization of major infrastructure projects in the study area.

In particular, through the comparison of the results of this study with those of already known displacements in the region, it was found that there is a very good match with the data recorded, which is very encouraging for the potential future use of similar models for predicting landslide phenomena.

<u>Key words</u>: landslide, rainfall, Egnatia Odos, simulation model, geological formations

Περιεχόμενα

	2
	3
γα	4
ιενα εικόνων	6
μενα σγημάτων	7
	0
ιενα χαρτων	9
ιενα πινάκων	10
': Εισαγωγή	11
Γενικά	11
Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας	12
Διάρθρωση της εργασίας	13
?: Γεωλογικά χαρακτηριστικά του ελληνικού χώρου	14
Γεωλογική και Τεκτονική Δομή	14
Γεωμορφολογικές συνθήκες	17
Ενότητα Πίνδου	18
3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί ζώνης Ωλονού – Πίνδου	21
Ιόνιος ζώνη	22
4.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί Ιόνιας ζώνης	27
Σεισμικότητα	28
Κλιματολογικές συνθήκες – Βροχοπτώσεις	32
: Κατολισθήσεις	34
Κατολισθήσεις	34
Αίτια κατολισθήσεων	36
Είδη κατολισθήσεων	37
3.1 Ταξινόμηση	37
3.1.1 Πτώσεις (Falls)	38
3.1.2 Ανατροπές (Topples)	38
	να

3.3.1.3 Ολισθήσεις (slides)	38
3.3.1.4 Εκτάσεις (Spreads)	40
3.3.1.5 Ροές (Flows)	41
3.3.1.6 Σύνθετες μετακινήσεις μαζών (Composite slides)	41
3.4 Κατολισθήσεις και ταχύτητα μετακίνησης	42
3.5 Κατολισθήσεις στην ελληνικό χώρο	44
Κεφάλαιο 4: Γεωλογική δομή περιοχής μελέτης	45
4.1 Γεωμορφολογικά – γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά	46
4.2 Συνθήκες ευστάθειας	51
4.3 Ποσοτικά στοιχεία κατολισθήσεων	55
Κεφάλαιο 5: Μοντέλο προσομοίωσης	56
5.1 Θεωρητικό μοντέλο	56
5.2 Δεδομένα περιοχής	60
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης	62
6.1 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική	
απόσταση 10 λεπτών	62
6.2 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική	
απόσταση 1 λεπτού	67
6.3 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική	
απόσταση 1 μήνα	72
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	80
Βιβλιογραφία	82
Παράρτημα	85

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1: Ψηφιακό μοντέλου εδάφους της Ηπείρου (Πηγή: ΜΕ.Δ.Κ.Ε Ε.Μ.Π	.)18
Εικόνα 2: Μοντέλο στο οποίο απεικονίζεται η ζώνη της Πίνδου επωθημένη στη	ν Ιόνιο
ζώνη. Απεικονίζονται επίσης υποθαλάσσια ριπίδια σχηματισθέντα μεταζύ Ηωκά	χίνου
και Ολιγοκαίνου (Πηγή: ME.Δ.K.E Ε.Μ.Π.)	21
Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά κατολίσθησης (Πηγή: Βανδαράκης et al., 2013)	35
Εικόνα 4: Ταζινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)	38
Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση ειδών κατολίσθησης (Πηγή: Βανδαράκης et al.,	2013)
	40
Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση ειδών κατολίσθησης (Πηγή: Arkansas Geolog	gical
Survey, 2016)	42
Εικόνα 7: Ρωγμές σε τοίχους αντιστήριζης της Εθνικής Οδού που διέρχεται από	ό την
περιοχή μελέτης (Πηγή: Μπίσα, 2011)	54
Εικόνα 8: Περιοχές δυνητικών μετακινήσεων, βάση των αποτελεσμάτων της έρ	ευνας,
στην περιοχή μελέτης	79
Εικόνα 9: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης	87
Εικόνα 10: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης με σήμανση των εν δυνάμει	
κατολισθήσεων	89
Εικόνα 11: Γεωλογικός χάρτης υποβάθρου	91
Εικόνα 12: Χάραξη Εγνατίας Οδού	93
Εικόνα 13: Χωροθέτηση επιφανειακών μαρτύρων στην περιοχή μελέτης	95
Εικόνα 14: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες ολίσθησης στην περιοχή μελέτης	97
Εικόνα 15: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υποβάθρου περιοχής μελέτης	99
Εικόνα 16: Ισοπαχείς καμπύλες των χαλαρών και ολισθημένων υλικών των υπο) μελέτη
περιοχών Α και Β	101
Εικόνα 17: Γεωλογικό υπόβαθρο υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης	103

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 1: Στρωματογραφική διάρθρωση ζώνης Ωλονού – Πίνδου (Πηγή: Μουντράκ	ης,
ΑΠΘ)	_22
Σχήμα 2: Παλαιογεωγραφική εζέλιζη των Εζωτερικών γεωτεκτονικών ζωνών (κατό	έ
Aubouin, 1959, με τροποποιήσεις) (Πηγή: Σπυρόπουλος, 2005)	_24
Σχήμα 3: Τεκτονικός χάρτης της Ηπείρου (Ιόνια ζώνη και Πινδικό τεκτονικό κάλυμ	μα)
(Πηγή Ι.Γ.Ε.Υ. και Γαλλικό Ινστιτούτο Πετρελαίου, 1966)	_26
Σχήμα 4: Στρωματογραφική διάρθρωση Ιόνιας ζώνης (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)_	_27
Σχήμα 5: Απεικόνιση των δύο επιφανειών ολίσθησης, στο κατάντη και στο ανάντη	
τμήμα της περιοχής μελέτης (Μαυρομμάτη et al., 2005)	_52
Σχήμα 6: Διάγραμμα τομής μιας άπειρης κλίσης με τις ενεργές δυνάμεις που τη	
χαρακτηρίζουν (Πηγή: Wu et al., 2015)	_57
Σχήμα 7: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Ιωαννίνων (10 λεπτά)	_63
Σχήμα 8: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Μετσόβου (10 λεπτά)	_64
Σχήμα 9: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Πράμαντα (10 λεπτά)	_65
Σχήμα 10: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Τρίστενο (10 λεπτά)	_66
Σχήμα 11: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Ιωαννίνων (1 λεπτό)	_68
Σχήμα 12: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Μετσόβου (1 λεπτό)	_69
Σχήμα 13: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Πράμαντα (1 λεπτό)	_70
Σχήμα 14: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Τρίστενο (1 λεπτό)	_71
Σχήμα 15: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Ιωαννίνων (1 μήνας)	_73

Σχήμα 16: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Μετσόβου (1 μήνας)	_74
Σχήμα 17: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από την Σταθμό	
Πράμαντα (1 μήνας)	_75
Σχήμα 18: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό	
Τρίστενο (1 μήνας)	_76

Περιεχόμενα χαρτών

Χάρτης 1: Οι γεωτεκτονικές ενότητες των Ελληνίδων (Πηγή: Papanikolaou, 1989a) 16
Χάρτης 3: Η γεωλογική ενότητα της Πίνδου (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)20
Χάρτης 4: Η γεωλογική ενότητα του Ιονίου (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)23
Χάρτης 5: Σεισμική δράση στην περιοχή μελέτης κατά τα έτη 1964 – 2016 (Πηγή:
Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών, 2016)28
Χάρτης 6: Σεισμοτεκτονικός χάρτης και επίκεντρα ιστορικών σεισμικών γεγονότων που
έχουν καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή του έργου (κλίμακα 1:500.000. Πηγή:
I.Г.М.Е.)29
Χάρτης 7: Σεισμική δράση στον ελληνικό χώρο (Πηγή: Παπαζάχος, 1997)30
Χάρτης 8:Σεισμικές ζώνες ελληνικού και ευρύτερου γεωγραφικού χώρου (Πηγή:
Παπαζάχος et al., 1997)31
Χάρτης 9: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (Πηγή: Ο.Α.Σ.Π., 2000)32
Χάρτης 10: Κατανομή βροχοπτώσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Κούκης et al., 2007)34
Χάρτης 11: Συχνότητα κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο (Μπλιώνα, 2008)45
Χάρτης 12: Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Πηγή: orykta.gr, 2016)47
Χάρτης 13: Χάρτης των τ. πεδίων των Ελληνίδων (Πηγή: Papanikolaou, 1997)48
Χάρτης 14: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ι.Γ.Μ.Ε.)49

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1: Πιθανές βλάβες από φαινόμενα κατολίσθησης	42
Πίνακας 2: Εδαφικές μετακινήσεις στην περιοχή μελέτης με βάα	τη τις καταγραφές των
εγκατεστημένων αποκλισιομέτρων (Πηγή: Κουτάλια, 2006)	71

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι κατολισθήσεις συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών, ως αποτέλεσμα της κατάλυσης ισορροπίας των βραχωδών ή εδαφικών πρανών, είτε αυτά είναι φυσικά είτε τεχνητά. Η εκδήλωση φαινομένων κατολίσθησης μπορεί να έρθει ως απόρροια της αλλαγής των γεωμορφολογικών, υδρολογικών, γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών μιας περιοχής, λόγω της δράσης γεωδυναμικών καθεστώτων, της επίδρασης της βλάστησης, της σεισμικής δραστηριότητας, των ανθρωπογενών παρεμβάσεων, αλλά και όλων εκείνων των παραγόντων που μπορούν να διαμορφώσουν το γεωπεριβάλλον.

Οι κατολισθήσεις μπορούν να έχουν δυσχερείς επιπτώσεις τόσο στο φυσικό όσο και στο δομημένο περιβάλλον, με συνέπειες κοινωνικές αλλά και οικονομικές, όπως για παράδειγμα την κατασκευή έργων υποδομής, τη βιωσιμότητα οικισμών, τη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντος κ.ά.

Τα φαινόμενα κατολίσθησης είναι συχνά σε ορεινές περιοχές εξαιτίας του έντονου γεωμορφολογικού αναγλύφου αλλά και του αυξημένου ύψους των βροχοπτώσεων. Στην Δυτική Ελλάδα ιδιαίτερα, οι γεωλογικές συνθήκες ευνοούν την εκδήλωση τέτοιων κατολισθητικών φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται αυξημένα στη οροσειρά της Πίνδου. Στην περιοχή αυτή επικρατούν οι σχηματισμοί του φλύσχη, των αργιλομαργών και των σχιστοκερατόλιθων, με εφιππευμένα ασβεστολιθικά λέπια των αργιλικών σχιστόλιθων, των πλευρικών κορημάτων κ.ά. οι οποίοι είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στις κατολισθήσεις. Επιπλέον δε, η παρουσία της οροσειράς της Πίνδου, επηρεάζει τα επίπεδα βροχόπτωσης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για αυξημένα επίπεδα βροχής στην δυτική πλευρά της χώρας, σε αντίθεση με την ανατολική, όπου τα επίπεδα βροχόπτωσης είναι ιδιαίτερα χαμηλά.

Η περιοχή μελέτης, της παρούσας εργασίας, βρίσκεται πάνω στην οροσειρά της Πίνδου, σε μια περιοχή όπου χαρακτηρίζεται από σχετικά απότομα πρανή, με κλίσεις ≥ 28°, από πλήθος μικρορεμάτων και από έντονα φαινόμενα διάβρωσης. Η έντονη καταπόνηση του φλύσχη της περιοχής σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές συνθήκες (έντονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις, μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος) βοηθούν στην ανάπτυξη σημαντικού πάχους εδαφικού μανδύα αποσάθρωσης, πάνω στο οποίο έχουν αναπτυχθεί δέντρα επιφανειακού ριζικού συστήματος (Μπίσα, 2011). Χαρακτηριστικό επίσης των επιφανειακών υλικών του μανδύα αποσάθρωσης του φλύσχη, είναι η χαμηλή συνοχή και η μικρή διατμητική αντοχή, οι οποίες αποκτούν μικρότερες τιμές όταν εμποτιστούν με νερό. Επιπλέον οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, όπως η βελτίωση των οδικών δικτύων, δημιουργούν ακόμη πιο απότομα πρανή και μεγαλύτερες ποσότητες επιχωμάτων. Ο βασικότερος παράγοντας κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή, αλλά και γενικότερα, είναι το νερό, επιφανειακό ή υπόγειο, με οποιαδήποτε μορφή προέλευσης, για παράδειγμα τη διήθηση. Η διήθηση προκαλεί αύξηση του βάρους της μάζας των επιρρεπών σχηματισμών, ενώ μειώνεται ο συντελεστής τριβής στην επιφάνεια ολίσθησης, λόγω της πλαστικότητας του αργίλου. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, με την ανάπτυξη σχεδόν επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα αλλά και την εκδήλωση μικροπηγών διαλείπουσας ροής, εντείνουν τις εδαφικές αστοχίες. Η υδροφορία αναπτύσσεται στα υδροπερατά εδαφικά υλικά που καλύπτουν το υγιές φλυσχικό υπόβαθρο. Στα εδαφικά υλικά και σε επιχώματα, καταλήγει μεγάλο μέρος των νερών των βροχών και των πηγών, με συνέπεια να ελαττώνονται οι ήδη χαμηλές διατμητικές αντοχές τους (Μπίσα, 2011).

Η εξέλιξη της τεχνολογίας όμως, έχει βοηθήσει στην ανάπτυξη εργαλείων που βοηθούν την μελέτη τέτοιων φαινομένων ή και ακόμα επιτρέπουν, στο πλαίσιο του δυνατού φυσικά, την πρόβλεψη τους. Η επιστημονική κοινότητα έχει διαμορφώσει διάφορα μοντέλα προσομοίωσης που επιτρέπουν, με την χρήση κάποιων συγκεκριμένων δεδομένων, για να εξάγουν συμπεράσματα για φαινόμενα όπως αυτό της κατολίσθησης.

Η συνεργασία λοιπόν κλάδων όπως είναι γεωλογικός και ο μαθηματικός με τον κλάδο της πληροφορικής, αναμένεται να μας δώσουν σπουδαία στοιχεία και μια καινούρια αντίληψη πολλών φαινομένων που θεωρούσαμε ότι γνωρίζαμε μέχρι σήμερα.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία μια προσομοίωσης των φαινομένων κατολίσθησης στο τμήμα 2.4 της χάραξης της Εγνατίας Οδού, μέσα από ένα μοντέλο, που έχει χρησιμοποιηθεί για τους ίδιους σκοπούς σε άλλες περιοχές του πλανήτη, μέσα από το οποίο θα υπάρξει η δυνατότητα να επαληθευτεί η χρονική στιγμή των συμβάντων κατολίσθησης, Η προσομοίωση αυτή θα λάβει υπόψη της δεδομένα της περιοχής μελέτης όπως τα βροχομετρικά στοιχεία, που κατέχουν πρωτεύοντα ρόλο στο φαινόμενο, τη γεωλογική δομή της περιοχής, την κλίση του εδάφους κ.ά.

Η προσομοίωση αυτή, εφόσον επαληθευτεί, θα μπορέσει μελλοντικά πιθανόν να δώσει αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τον χρόνο που αναμένεται να συμβεί μια κατολίσθηση στην περιοχή μελέτης, έχοντας γνωστά τα στοιχεία του αναφέρθηκαν παραπάνω. Θα μπορέσει δηλαδή να γίνει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, αν όχι για την αποφυγή, για την μελέτη τέτοιων φαινομένων, αλλά και την λήψη μέτρων αναφορικά με το δομημένο περιβάλλον της περιοχής αλλά την μελλοντική υλοποίηση μεγάλων, οικονομικά και κοινωνικά, έργων υποδομής στην περιοχή.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 7 Κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω και στα οποία περιλαμβάνονται συνοπτικά τα ακόλουθα:

Στο παρόν **Πρώτο κεφάλαιο** της εργασίας δίνονται ορισμένα γενικά στοιχεία εισαγωγικά αναφορικά με τις κατολισθήσεις αλλά και τα μοντέλα προσομοίωσης.

Στο Δεύτερο κεφάλαιο δίνεται η γενική γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Επίσης παρουσιάζονται βιβλιογραφικά κυρίως στοιχεία αναφορικά με τη σεισμικότητα και τη σεισμική επικινδυνότητα της ευρύτερης περιοχής μελέτης, καθώς και κάποια στοιχεία για τις βροχοπτώσεις στην περιοχή.

Στο **Τρίτο κεφάλαιο** δίνονται κάποια αναλυτικότερα στοιχεία αναφορικά με τα φαινόμενα των κατολισθήσεων.

Στο **Τέταρτο κεφάλαιο** δίνονται τα γεωμορφολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, με έμφαση κυρίως στα μορφολογικά χαρακτηριστικά του βόρειου Πρανούς του ποταμού Μετσοβίτικου.

Στο **Πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης, μέσα από τις μαθηματικές εκφράσεις που το συγκροτούν.

Στο **Έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση και επεξεργασία του μοντέλου προσομοίωσης.

Τέλος στο Έβδομο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα από τη υλοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης και της μελέτης την περιοχής ενδιαφέροντος.

^{1.4} Κεφάλαιο 2: Γεωλογικά χαρακτηριστικά του ελληνικού χώρου

2.1 Γεωλογική και Τεκτονική Δομή

Ο ελληνικός χώρος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί από τη σύνθετη γεωλογική δομή του καθώς επίσης και από την έντονη τεκτονική καταπόνηση, ως αποτέλεσμα των επάλληλων ορογενετικών κινήσεων που συνεχίζονται μέχρι τις ημέρες μας. Σημαντικό ρόλο στη σημερινή γεωλογική διαμόρφωση της χώρας μας, διαδραματίζει η αλπική ορογένεση που είναι υπαίτια για τον σχηματισμό των Ελληνίδων οροσειρών, καθώς και οι μετακινήσεις του Τεταρτογενούς που συνδέονται άμεσα με την έντονη σεισμικότητα που υπάρχει στην περιοχή.

Ειδικότερα σύμφωνα με τη θεωρία του Αλπικού γεωσύγκλινου από τον Aubouin (1959), οι Ελληνίδες οροσειρές υποδιαιρούνται σε ισοπικές ζώνες με βάση το δυαδικό σύστημα αυλάκων – ράχεων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το Ελληνικό γεωσύγκλινο, που άρχισε να λειτουργεί από το Τριαδικό σαν τμήμα του αλπικού γεωσυγκλίνου, είχε στον πυθμένα του μικρές και μεγάλες υποθαλάσσιες ράχες που διαχώριζαν βαθιές και βαθύτερες αύλακες (Σπυρόπουλος, 2005).

Η Ελλάδα, με βάση τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτή, χωρίζεται σε δώδεκα μικρότερες γεωτεκτονικές ζώνες, οι λιθοστρωματογραφικές ενότητες των οποίων αποκαλύπτουν τόσο την γεωλογική όσο και τεκτονική εξέλιξη του χώρου (Χάρτης 1).

Τα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά (Μπλιώνα, 2008) των επιμέρους ζωνών και οι τεχνικογεωλογικές τους συνθήκες, σύμφωνα με τον Παπανικολάου (1989α) δίνονται ως εξής:

Ζώνη Ροδόπης (Rh) – Σερβομακεδονική (Sm) – Περιροδοπική (CR)

Η μάζα Ροδόπης γεωγραφικά καταλαμβάνει το βορειοανατολικό μέρος της ηπειρωτικής Ελλάδας και βρίσκεται ανατολικά του ποταμού Στρυμόνα. Η Σερβομακεδονική ζώνη βρίσκεται δυτικά του Στρυμόνα και μαζί με την Περιροδοπική ζώνη στα δυτικά της καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της Χαλκιδικής χερσονήσου.

Ζώνη Αξιού (Παιονίας, Πάικου, Αλμωπίας) (Pe, Pa, Al)

Η γεωτεκτονική της εξέλιξη προσδίδει ποικίλο μορφολογικό χαρακτήρα στη ζώνη αυτή. Παλαιογεωγραφικά εξεταζόμενη μπορεί να χωριστεί σε τρεις υποζώνες από τα ανατολικά προς τα δυτικά:

- Παιονίας, που αντιπροσωπεύει αύλακα
- Πάικου, που αντιπροσωπεύει ύβωμα
- Αλμωπίας, που αντιπροσωπεύει αύλακα

Ζώνη Πελαγονική (Pl)

Κύριο χαρακτηριστικό της ζώνης αυτής είναι η ακαμψία του προαλπικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα τα αλπικά ιζήματα να εμφανίζονται λιγότερο πτυχωμένα συγκριτικά με τους σχηματισμούς παρακείμενων ζωνών.

> Ζώνη Ανατολικής Ελλάδας (Υποπελαγονική) (Sp)

Χαρακτηρίζεται μορφολογικά από ορεινό – ημιορεινό ανάγλυφο. Χαρακτηρίζεται από μικτή τεκτονική, με τους παλαιότερους σχηματισμούς να επιτρέπουν πτύχωση κατά ευρέα αντίκλινα και σύγκλινα και τους υψηλότερους ορίζοντες να είναι πολυπτυχωμένοι και συχνά κατακεκλιμένοι.

Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας (Pk)

Μορφολογικά στη ζώνη αυτή επικρατεί ο έντονος ορεινός χαρακτήρας. Το προαλπικό υπόβαθρο συνιστούν οι σχιστόλιθοι, ενώ οι αλπικοί σχηματισμοί αποτελούνται από δολομιτικούς παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους του Τριαδικού, ακολουθεί ανθρακική ιζηματογένεση του Κρητιδικού και η απόθεση του φλύσχη.

Ζώνη Ωλονού - Πίνδου (P)

Το προαλπικό υπόβαθρο στη ζώνη αυτή δεν έχει αποκαλυφθεί, ενώ το αλπικό υπόβαθρο συνθέτουν δολομίτες, ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι σε εναλλαγές με αργιλικούς σχιστόλιθους, μάργες, ψαμμίτες, λατυποπαγή, φλύσχης, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι.

Ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως (G)

Το μορφολογικό ανάγλυφο της ζώνης , λόγω των έντονων τεκτονικών γεγονότων και της δράσης των διαβρωτικών παραγόντων, εμφανίζει πολυσχιδή ανάγλυφο με επικράτηση του ορεινού ή ημιορεινού.

Ζώνη Ιόνιος (Ι)

Χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο στο βόρειο και κεντρικό τμήμα, ενώ στο νότιο η μορφολογία είναι η πλέον ήπια.

Ζώνη Παξών (Px)

Στη γεωλογική δομή συμμετέχουν ανθρακικά ιζήματα του Κρητιδικού και Ηωκαίνου, νεογενή (μάργες, άμμοι, ημισυνεκτικοί ψαμμίτες) και τεταρτογενή μικτών φάσεων.



Χάρτης 1: Οι γεωτεκτονικές ενότητες των Ελληνίδων (Πηγή: Papanikolaou, 1989a)

2.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες

Η μορφολογική εικόνα του Ελληνικού χώρου, όπως έχει διαμορφωθεί σε μια μακρά περίοδο εκατομμυρίων ετών, θεωρείται αρκετά πολύπλοκη, καθώς είναι αποτέλεσμα των ορογενετικών κινήσεων που έχει υποστεί, και συγκεκριμένα του οριζόντιου και κατακόρυφου διαμελισμού, κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας. Στη μορφολογία του Ελληνικού χώρου περιλαμβάνονται τόσο η ηπειρωτική χώρα, όσο και τα πολυάριθμα, αλλά μικρής έκτασης, νησιά του.

Όσον αφορά το ανάγλυφο της, η χώρα μας χαρακτηρίζεται από τον έντονο ορεινό της χαρακτήρα. Οι πεδινές περιοχές, δηλαδή αυτές με υψόμετρο μικρότερο των 200 μέτρων, αγγίζουν μόλις το 34,60% της συνολικής έκτασης, ενώ αντίθετα το ορεινό τμήμα της χώρας καταλαμβάνει το 64,40%.

Πρωταρχικό στοιχείο της μορφολογικής αυτής γένεσης είναι η ενεργή τεκτονική δράση, στην οποία οι ανοδικές κινήσεις προκαλούν ανύψωση του βασικού επιπέδου του υδρογραφικού δικτύου με αποτέλεσμα εντατικότερους ρυθμούς διάβρωσης. Επιπλέον, πολύ σημαντική είναι η συμβολή των εξωγενών παραγόντων στη διαμόρφωση του ανάγλυφου της χώρας, όπως η δράση τω παγετώνων στο Πλειστόκαινο, η διαβρωτική ενέργεια των επιφανειακών νερών και η δράση των κυμάτων της θάλασσας. Σήμερα τον κύριο ρόλο στη διαμόρφωση του ανάγλυφου κατέχουν οι επιφανειακές υδάτινες απορροές που χαρακτηρίζονται από έντονο χειμαρρικό χαρακτήρα (Μπλιώνα, 2008).



Εικόνα 1: Ψηφιακό μοντέλου εδάφους της Ηπείρου (Πηγή: ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.)

2.3 Ενότητα Πίνδου

Η Πίνδος είναι το πιο τυπικότερο παράδειγμα καλύμματος ην Ελλάδα, καθώς η κίνηση της ήταν τεράστια. Πρόκειται για το αλλόχθονο κάλυμμα, πάνω από τη σχετικά αυτόχθονη εξωτερική ανθρακική πλατφόρμα. Οι σχηματισμοί που προήλθαν από το χώρο αυτό έχουν επωθηθεί προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, με μορφή ενός τεράστιου τεκτονικού καλύμματος το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις έχει φτάσει ακόμα δυτικότερα και στην Ιόνια ζώνη. Περιλαμβάνει στο μεγαλύτερο μέρος της την οροσειρά της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα καθώς επίσης και περιοχές της Κρήτης και των Δωδεκανήσων (Papanikolaou et al., 2004). Ειδικότερα για την περιοχή της Ηπείρου η ζώνη Ωλονού - Πίνδου, εμφανίζεται στις ανατολικές περιοχές της περιφέρειας όπως τα Αθαμανικά όρη και ο Λάκμος ενώ επιπλέον παρουσιάζει μεγάλες εναλλαγές στην ιζηματογένεση (ανθρακική, πυριτική, κλαστική) (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.). Παλαιογεωγραφικά η παραπάνω ζώνη διακρίνεται σε τρεις υποζώνες (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.):

- την υπερπινδική (ανατολική),
- την αξονική (ενδιάμεση)
- και την εξωτερική (δυτική).

Αναφορικά με την προέλευση και εξέλιξη της ενότητας υπάρχουν διάφορες απόψεις. Ο παλαιογεωγραφικός χώρος της ενότητας της Πίνδου ήταν μια βαθιά αύλακα μεταξύ του υβώματος της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης (δυτικά) και του υβώματος της Πελαγονικής ενότητας στα δυτικά μέχρι το Μαιστρίχτιο ή Κ. Ηώκαινο ή σύμφωνα με τις νεότερες απόψεις του υβώματος Κόζιακα - Τρίλοφου - Πεντεορίων – Γερανείων – Τραπεζώνας (Stampfli et al. 2003; Papanikolaou et al., 2004; Σπυρόπουλος, 2005).

Ωστόσο υπήρξε και η άποψη ότι η αύλακα της Πίνδου δεν εξελίχθηκε σε πραγματικό ωκεανό, δηλαδή σε βαθιά θάλασσα με ωκεάνιο φλοιό αλλά ότι ο ηπειρωτικός φλοιός της Πινδικής περιοχής λεπτύνθηκε σημαντικά κατά το Μεσοζωικό χωρίς όμως ποτέ η περιοχή αυτή να αποκτήσει ωκεάνιο πυθμένα (Κουτάλια, 2005).

Πήρε το όνομά της από τον Philipson (1892) από το βουνό Ωλονός (Ερύμανθος) της Πελοποννήσου και της οροσειράς της Πίνδου. Από τεκτονική άποψη αποτελεί επωθησιγενές κάλυμμα πάνω στα ιζήματα της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης, της οποίας καλύπτει ένα μεγάλο τμήμα. Τα επάλληλα τεκτονικά λέπια, κυρίως στη μετωπική περιοχή του καλύμματος, τα οποία προκαλούνται εξαιτίας της έντονης τεκτονικής δράσης, χαρακτηρίζουν από τεκτονική πλευρά τη ζώνη αυτή (Σπυρόπουλος, 2005). Χαρακτηριστικές επίσης τεκτονικές δομές είναι οι ορεινοί όγκοι των Τζουμέρκων και το Περιστέρι (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.).

Η ηλικία τεκτονισμού του ωκεάνιου πεδίου της ζώνης Ωλονού - Πίνδου έχει υπολογιστεί σε Α. Κρητιδική – Ηωκαινική, όταν πραγματοποιήθηκε το κλείσιμο του τότε ωκεανού το οποίο είχε σαν αποτέλεσμα μεγάλα τμήματα να επωθηθούν προς τα δυτικά πάνω στις εξωτερικότερες ενότητες. Η υποβύθιση της Πίνδου έχει υπολογιστεί ότι διάρκεσε ένα εύλογο χρονικό διάστημα και δεν έλαβε χώρα ταυτόχρονα σε όλα τα τμήματα της (Papanikolaou et al., 2004). Αυτό φαίνεται και από την ηλικία έναρξης της φλυσχογένεσης, η οποία στη Κρήτη έγινε πολύ αργότερα από ότι στην ηπειρωτική Ελλάδα, αφού πελαγικά ανθρακικά αποτίθονταν εκεί μέχρι και το Ανώτερο Ηώκαινο (Ενότητα Εθιάς). Σήμερα αυτά αποτελούν ένα μεγάλο τεκτονικό κάλυμμα που στην Ηπειρωτική Ελλάδα εμφανίζεται ενιαίο (Papanikolaou et al., 2004).



Χάρτης 2: Η γεωλογική ενότητα της Πίνδου (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)

Οι σχηματισμοί της Πίνδου, εμφανίζονται έντονα πτυχωμένοι και λεπιωμένοι, σε περιοχές του δυτικού τμήματος της ζώνης αυτής και εν γένει στο μέτωπο του Πινδικού τεκτονικού καλύμματος, εξαιτίας της πλαστικότητας που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό τους. Ανεξάρτητα λοιπόν του γεγονότος ότι ολόκληρη η ζώνη αποτελεί ένα τεράστιο κάλυμμα με μεγάλη μετακίνηση συνολικά, χαρακτηρίζεται επιπλέον και από πάρα πολλές πτυχές, κλειστές, ανεστραμμένες κ.α. καθώς και εφιππεύσεις. Βασικό γνώρισμα αποτελεί η δομή κατά λέπη και αναφέρεται στο σύνολο της λιθολογικής ακολουθίας που σχηματίστηκε από το Ανώτερο Τριαδικό έως και το Ηώκαινο. Διαπιστώνεται με τον τρόπο αυτό ότι υφίστανται διαδοχικές εναλλαγές της ακολουθίας των ιζημάτων που χαρακτηρίζονται από την μεταξύ τους τεκτονική σχέση (Παπανικολάου, 1986). Η αποκόλληση και διάρρηξη των λεπίων της ζώνης που αναφέρθηκαν παραπάνω πραγματοποιείται (Κουτάλια, 2005):

- 1) στη βάση της όπου αναπτύσσεται η κλαστική σειρά του Τριαδικού,
- στη βάση των Ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων ακριβώς πάνω από τον πρώτο Φλύσχη (Αρκαδικό κάλυμμα της Πίνδου στην Πελοπόννησο) και
- στη βάση του φλύσχη που εμφανίζεται σαν ανεξάρτητο κάλυμμα στην Βόρεια Πίνδο.

Όταν το κάλυμμα της Πίνδου έλαβε την τελική τεκτονική του θέση, η πτυχωμένη και

κερματισμένη μάζα δέχτηκε την επίδραση νεότερων ρηγματώσεων. Ο εκτεταμένος αυτός υστεροτεκτονισμός με ρήγματα αποκόλλησης μικρής κλίσης που επηρεάζουν και τα υποκείμενα εξωτερικά τεκτονικά καλύμματα έλαβε χώρα σε όλη τη διάρκεια του Ολιγόκαινου – Μειόκαινου (Lister et. al., 1994; Gautier et al., 1993, Jolivet et al., 1996; Papanikolaou et al., 2004).



Εικόνα 2: Μοντέλο στο οποίο απεικονίζεται η ζώνη της Πίνδου επωθημένη στην Ιόνιο ζώνη. Απεικονίζονται επίσης υποθαλάσσια ριπίδια σχηματισθέντα μεταξύ Ηωκαίνου και Ολιγοκαίνου (Πηγή: ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.)

2.3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί ζώνης Ωλονού - Πίνδου

Η ζώνη Ωλονού - Πίνδου περιλαμβάνει τη γνωστή πελαγική ακολουθία με μικριτικούς ασβεστόλιθους και ραδιολαρίτες από το Ανώτερο Τριαδικό μέχρι το Κρητιδικό και το φλύσχη στο Μαιστρίχτιο – Δάνιο (Papanikolaou et al., 2004).

Η στρωματογραφική διάρθρωση των σχηματισμών της ζώνης Ωλονού - Πίνδου από τους παλαιότερους (βάση) προς τους νεότερους (κορυφή) φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1).

Η βασική στρωματογραφική διάρθρωση της ζώνης Ωλονού - Πίνδου μπορεί να περιγραφεί ως εξής (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.):

- 1) Κλαστικοί τριαδικοί σχηματισμοί.
- 2) Εναλλαγές ανθρακικών πυριτικών σχηματισμών (Αν. Τριαδικό Σενώνιο).
- 3) Μεταβατικά στρώματα Μαιστριχτίου Παλαιοκαίνου
- 4) Φλύσχης Αν. Ηωκαίνου

Βασικό χαρακτηριστικό της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, όπως φαίνεται και από το σχήμα, είναι το γεγονός ότι οι σχηματισμοί αποτελούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις διαφορετικών υλικών. Οι επιμέρους φάσεις παρουσιάζουν παρόμοια πετρολογικά χαρακτηριστικά και αντιπροσωπεύουν τον τρόπο με τον οποίο

εξελίχθηκε η ιζηματογένεση σε κάθε διαφορετική γεωλογική περίοδο. Έτσι στο πλαίσιο της βασικής ιζηματογένεσης κάθε γεωλογικής περιόδου, μπορούμε να διακρίνουμε και στρώσεις διαφορετικών υλικών οι οποίες προϊδεάζουν τη βαθμιαία μετάβαση από τη μία φάση στην επόμενη, όπου επικρατεί μία νέα βασική ιζηματογένεση (Παπανικολάου, 1986).



Σχήμα 1: Στρωματογραφική διάρθρωση ζώνης Ωλονού – Πίνδου (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)

2.4 Ιόνιος ζώνη

Η Ιόνιος ζώνη υπήρξε κομμάτι μιας υποθαλάσσιας αύλακας (sillon), που παρεμβαλλόταν ανάμεσα στο υποθαλάσσιο ύβωμα της Απουλίας ζώνης (δυτικά) και στο ύβωμα της ενότητας Γαβρόβου - Τρίπολης (ανατολικά) (Σχήμα 2). Γενικά στο σύνολό της η Ιόνιος ζώνη εφιππεύει δυτικά τη ζώνη Παξών (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.) ενώ ειδικότερα στην περιοχή των νησιών του Ιονίου, η ζώνη βρίσκεται επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη των Παξών, ενώ προς τα ανατολικά πάνω στη ζώνη αυτή βρίσκεται επωθημένη η ζώνη του Ωλονού – Πίνδου (Παπανικολάου, 1986; Κουτάλια, 2005).

Σύμφωνα με τους Papanikolaou et al. (2004), η ευρύτερη περιοχή ανήκει στην πλατφόρμα των Εξωτερικών Ελληνίδων, οι οποίες αποτελούν βασικό τμήμα της Νότιας Τηθύος, με πλευρικές προεκτάσεις τόσο προς βορρά, στις Δειναρίδες όσο και προς ανατολικά, στις Ταυρίδες, και αποτελείται από παχιές μεσοζωικές ανθρακικές ακολουθίες των αμεταμόρφωτων ενοτήτων των Παξών (Προαπούλια), του Καστελόριζου, της Ιόνιας, του Γαβρόβου και της Τρίπολης. Περιλαμβάνει επίσης τις γειτονικές μεταμορφωμένες ομόλογες ενότητες Μάνης, Δυτικής Κρήτης – Τρυπαλίου, Αμοργού, Ολύμπου, Αλμυροποτάμου και Κερκετέα.



Χάρτης 3: Η γεωλογική ενότητα του Ιονίου (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)

Σύμφωνα με τις μελέτες, η ιζηματογένεση στον παλαιογεωγραφικό χώρο της Ιόνιας ζώνης υπήρξε συνεχής από τον Τριαδικό αιώνα μέχρι και την απόθεση του φλύσχη (Ανώτερο Ηώκαινο - Κατώτερο Μειόκαινο), με μόνη εξαίρεση την κατά τόπους και για μικρό χρονικό διάστημα χέρσευση της περιοχής κατά το Μέσο - Ανώτερο Ιουρασικό, που έχει σαν αποτέλεσμα, σε ορισμένες περιοχές, μιας στρωματογραφικής ασυμφωνίας στην ακολουθία των στρωμάτων της Ιόνιας ζώνης (σε εκτεταμένες περιοχές στο χώρο της Ηπείρου).



Σχήμα 2: Παλαιογεωγραφική εξέλιξη των Εξωτερικών γεωτεκτονικών ζωνών (κατά Aubouin, 1959, με τροποποιήσεις) (Πηγή: Σπυρόπουλος, 2005)

Αναφορικά με τη στρωματογραφική ακολουθία της Ιόνιας ζώνης μπορούμε να διακρίνουμε δύο χαρακτηριστικά όρια, τα οποία με τη σειρά τους τη χωρίζουν σε τρεις περιόδους (Papanikolaou et al., 2004):

- μία περίοδο βιοχημικής ιζηματογένεσης που χαρακτηρίζει την προ ορογενετική περίοδο και με τη σειρά της διακρίνεται σε δύο υποπεριόδους:
 - τη νηριτική ανθρακική ιζηματογένεση από το Αν. Τριαδικό μέχρι το Αν. Λιάσιο «Φάση Παντοκράτορα», και
 - την πελαγική ανθρακική ιζηματογένεση μέχρι το Αν. Ηώκαινο και

μία περίοδο κλαστικής ιζηματογένεσης (φλύσχης) μέχρι το Κ. Βουρδιγάλιο, που χαρακτηρίζει την συνορογενετική περίοδο, ενώ το μέσο Μειόκαινο αντιπροσωπεύεται τοπικά από μολασσικά ιζήματα.

Η μετάβαση από τον ένα κύκλο ιζηματογένεσης στον άλλο, όπως φαίνεται από τις μελέτες, δεν πραγματοποιήθηκε εν μία νυκτί αλλά μέσα από εναλλαγές και διαφοροποιήσεις που χαρακτηρίζονται σαν μεταβατικά στρώματα.

Όσον αφορά τις προαναφερθείσες ιζηματογενείς φάσεις, η Ιόνια ζώνη μπορεί να ενταχθεί στην αξονική ζώνη της εξωτερικής πλατφόρμας των Ελληνίδων στην οποία κυριαρχεί η πελαγική ιζηματογένεση από το Ανώτερο Λιάσιο, και η οποία διαδέχθηκε μία ανωτριαδική – λιάσια νηρητική πλατφόρμα. Η διαφοροποίηση αυτή της αξονικής περιοχής έχει να κάνει με φαινόμενα ταφρογένεσης τα οποία αποτελούσαν αντανάκλαση ενός συνολικού εφελκυσμού που υπέστη το τ. Πεδίο (H1) και η διάνοιξη των ωκεάνιων λεκανών της ανατολικής Μεσογείου στα νότια και του ωκεανού Πίνδου - Κυκλάδων στα βόρεια (Papanikolaou et al., 2004).

Η τελική ανάδυση της περιοχής της Ιόνιας ζώνης πραγματοποιήθηκε ύστερα από την ολοκλήρωση της απόθεσης του φλύσχη. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επίκληση της θάλασσας (στα όρια Βουρδιγάλιου – Μέσου Μειόκαινου στην περιοχή της Εξωτερικής Ιόνιας ζώνης και στο Βουρδιγάλιο (νωρίτερα) στην Κεντρική Ιόνια ζώνη) με παράλληλη απόθεση θαλάσσιων μολασσικών ιζημάτων (κυρίως μάργες και λιγότερο ψαμμίτες με ενστρώσεις ασβεστόλιθων) (Παπανικολάου, 1986).

Βασικό χαρακτηριστικό της Ιόνιας ζώνης αποτελεί η αλλαγή στις παλαιογεωγραφικές συνθήκες κατά την εξέλιξή της ζώνης από Τριαδικό μέχρι το Ανώτατο Ολιγόκαινο -Μειόκαινο. Η συγκεκριμένη αποτελεί τη μοναδική ζώνη που άλλαξε το βασικό παλαιογεωγραφικό της χαρακτήρα από νηρητικό σε πελαγικό κατά τη διάρκεια της προορογενετικής εξέλιξης του αλπικού κύκλου. Αυτή η αλλαγή καθορίζεται χρονικά στο τέλος του Λιασίου. Την περίοδο εκείνη η ενιαία πλατφόρμα στον ωκεανό της Τιθύος "έσπασε" (ταφροποίηση) και βάθυνε, γεγονός που συνδέεται και με τη διάνοιξη του ωκεανού και τη δημιουργία των τυπικών οφιολίθων στις εσωτερικότερες ζώνες. Ο μηχανισμός της ταφροποίησης έγινε με τη δημιουργία κάποιων συνιζηματογενών ρηγμάτων, που ξεκίνησαν να βυθίζουν σταδιακά ένα τμήμα της μέχρι τότε ενιαίας πλατφόρμας. Ο παλαιογεωγραφικός χώρος της Ιόνιας ζώνης διαφοροποιήθηκε περισσότερο με τη δράση, κυρίως υποθαλάσσιων, ρηγμάτων, σε επί μέρους αύλακες και υποθαλάσσια υβώματα. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής (Λιάσιο - Μέσο Ιουρασικό) ορισμένα επιμήκη επιμέρους υβώματα ή εκτεταμένα τμήματά τους αναδύθηκαν και χέρσευσαν, με αποτέλεσμα τα ιζήματα που αποτέθηκαν αργότερα, με την επαναθαλάσσευση αυτών των περιοχών να βρίσκονται ασύμφωνα πάνω στους παλαιότερους σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης (Papanikolaou et al., 2004).

Στη Δυτική Ελλάδα, η Ιόνια ζώνη διακρίθηκε σε τρεις επί μέρους ζώνες, με βάση τις διαφορές τις οποίες παρουσιάζει στη στρωματογραφική της ακολουθία τόσο στην

αξονική περιοχή όσο και στις περιοχές των παρυφών της, από τα δυτικά προς τα ανατολικά (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.):

- Την εξωτερική Ιόνια ζώνη, η οποία διακρίθηκε στην Δυτική Εξωτερική και στην Ανατολική Εξωτερική Ιόνια,
- ii. Την Κεντρική Ιόνια ζώνη και
- iii. Την Εσωτερική Ιόνια ζώνη.

Στην περιφέρεια της Ηπείρου τα ιζήματα έχουν διαμορφωθεί σε μεγάλα σύγκλινα και αντίκλινα (Σχήμα 3) (Παπανικολάου, 1986; Κουτάλια, 2005):

- Το σύγκλινο Ηπείρου Ακαρνανίας με ιζήματα φλύσχη σημαντικού πάχους. Ένα μέρος του σύγκλινου αυτού καλύπτεται από το επωθημένο κάλυμμα της Πίνδου.
- 2) Το εσωτερικό αντίκλινο του Πετουσίου
- Το σύγκλινο της Βοτσάρας, στον πυρήνα του οποίου υπάρχουν ιζήματα φλύσχη
- 4) Το αντίκλινο των ζωνών Σουλίου Παραμυθιάς
- Το σύγκλινο της Παραμυθιάς, που εφιπεύεται από το αντίκλινο του Σουλίου -Παραμυθιάς
- 6) Το εξωτερικό αντίκλινο, που αποτελείται από τις επωθημένες ζώνες του Μαργαριτίου και Πάργας, οι οποίες συνεχίζονται και στην Κέρκυρα



Σχήμα 3: Τεκτονικός χάρτης της Ηπείρου (Ιόνια ζώνη και Πινδικό τεκτονικό κάλυμμα) (Πηγή Ι.Γ.Ε.Υ. και Γαλλικό Ινστιτούτο Πετρελαίου, 1966).

2.4.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί Ιόνιας ζώνης

Η στρωματογραφική διάρθρωση των σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης από τους παλαιότερους (βάση) προς τους νεότερους (κορυφή) φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4).

Η βασική στρωματογραφική ακολουθία της Ιόνιας ζώνης μπορεί να περιγραφεί ως εξής (ΜΕ.Δ.Κ.Ε. - Ε.Μ.Π.):

- 1) Εβαποριτική σειρά και τριαδικά λατυποπαγή (Περμο Τριαδικό).
- 2) Ανθρακική σειρά (Ανώτερο Τριαδικό Ανώτερο Ηώκαινο).
- 3) Φλύσχης αδιαίρετος (Ανωτ. Ηώκαινο Ακουϊτάνιο).



Σχήμα 4: Στρωματογραφική διάρθρωση Ιόνιας ζώνης (Πηγή: Μουντράκης, ΑΠΘ)

2.5 Σεισμικότητα

Η ευρύτερη περιοχή της Ηπείρου δεν παρουσιάζει ισχυρή αυτόχθονη σεισμική δραστηριότητα. Σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για το χρονικό διάστημα 1964 - 2016 καταγράφηκαν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (μέχρι και ακτίνα 50 χιλιομέτρων από τη θέσης του έργου) μόνο 7 σεισμικές δονήσεις μεγέθους πάνω από 5 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ (ΕΑΑ, 2016). Σε αποστάσεις μέχρι 100 χιλιόμετρα, η σεισμική δραστηριότητα επικεντρώνεται στην περιοχή των Ιωαννίνων, Κέρκυρας, Δέλβινου, Αργυρόκαστρου και Κοζάνης (Μπίσα, 2011).



Χάρτης 4: Σεισμική δράση στην περιοχή μελέτης κατά τα έτη 1964 – 2016 (Πηγή: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών, 2016)



Χάρτης 5: Σεισμοτεκτονικός χάρτης και επίκεντρα ιστορικών σεισμικών γεγονότων που έχουν καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή του έργου (κλίμακα 1:500.000. Πηγή: Ι.Γ.Μ.Ε.)

Κατά τη διάρκεια των δύο προηγούμενων αιώνων στην ευρεία περιοχή ενδιαφέροντος σημειώθηκαν 3 κύρια σεισμικά γεγονότα όπως απεικονίζονται στον παρακάτω χάρτη (Burton et al., 2004):



Χάρτης 6: Σεισμική δράση στον ελληνικό χώρο (Πηγή: Παπαζάχος, 1997)

- Το 1812, μεγέθους M = 6,5 και έντασης στην κλίμακα Mercali VIII, δηλαδή με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 340 cm/sec² και μέγιστη ταχύτητα 25 cm/sec.
- Το 1919, μεγέθους M = 6,3 με εκτεταμένες ζημιές και έντασης στην κλίμακα Mercali VIII
- Το 1995, στην Κοζάνη, μεγέθους M = 6,6

Όμως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ευρύτερη περιοχή επηρεάζεται σημαντικά από το ισχυρό σεισμικό κέντρο των Ιονίων νήσων, που βρίσκεται σε μικρή σχετικά απόσταση (περίπου 130 χλμ. ΝΝΔ). Η ισχυρή σεισμική δραστηριότητα του κέντρου αυτού εκδηλώνεται με συχνούς σεισμούς μεγέθους $M \approx 6 R$ και άνω με μικρή περίοδο επανάληψης, που καταπονούν τόσο την περιοχή των Ιονίων νήσων όσον και το δυτικό τμήμα της ηπειρωτικής Ελλάδος και Πελοποννήσου (Παπαζάχος et al, 1997).

Με βάση σεισμολογικά δεδομένα σε συνδυασμό με γεωλογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία έγινε διαχωρισμός του ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών σε 67 σεισμικές ζώνες επιφανειακών σεισμών (Παπαζάχος et al, 1997). Ο διαχωρισμός αυτός καθίσταται αναγκαίος προκειμένου να προσδιοριστεί η σεισμική

επικινδυνότητα μιας περιοχής από επιφανειακούς σεισμούς σε αυτές τις σεισμικές ζώνες. Στον χάρτη που ακολουθεί απεικονίζονται αυτές οι σεισμικές ζώνες (Παπαζάχος et al, 1997).



Χάρτης 7:Σεισμικές ζώνες ελληνικού και ευρύτερου γεωγραφικού χώρου (Πηγή: Παπαζάχος et al., 1997)

Με βάση τον παραπάνω χάρτη, η υπό μελέτη περιοχή ανήκει στη ζώνη 23 με τις εξής σεισμικές παραμέτρους (Παπαζάχος et al, 1997):

- περιοχή επιρροής: 8940 km
- μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος σεισμού: M_{max} = 6,4
- ετήσιος ρυθμός για σεισμούς μεγέθους M ≥ 5,0: 0,468

Σύμφωνα με τα στοιχεία του νέου Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (Ο.Α.Σ.Π, 2000) (Χάρτης 9) που συνοδεύει τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2000) και τέθηκε σε εφαρμογή το 2004, η Ελλάδα διακρίνεται από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας σε 3 ζώνες (Ι, ΙΙ, ΙΙΙ). Καταργείται η ζώνη χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας και εφαρμόζεται ενιαία τιμή σεισμικής επιτάχυνσης g σε κάθε καποδιστριακό δήμο.



Χάρτης 8: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (Πηγή: Ο.Α.Σ.Π., 2000)

Κάθε ζώνη σεισμικής Επικινδυνότητας συνοδεύεται από μία τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους

$$A = \alpha * g$$

(όπου g = επιτάχυνση της βαρύτητας)

όπως δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (Ο.Α.Σ.Π., 2000):

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	1.00	п	ш
α	0,16	0,24	0,36

Η περιοχή της μελέτης, από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας, κατατάσσεται στη Ζώνη Ι, με εδαφική σεισμική επιτάχυνση 0.16g = 1.57 m/sec².

2.6 Κλιματολογικές συνθήκες - Βροχοπτώσεις

Οι χώρες των ακτών τις Μεσογείου έχουν τον ίδιο τύπο κλίματος, το Μεσογειακό, που χαρακτηρίζεται από βροχές κατά την ψυχρή περίοδο του έτους και σχετική ανομβρία με υψηλές θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες. Η Ελλάδα ανήκει σε αυτό τον τύπο, όμως λόγω της συνεχούς εναλλαγής ξηράς και θάλασσας, καθώς και της τοπογραφικής διαμόρφωσης, παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία κλίματος στο εσωτερικό της.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι διακυμάνσεις στην κατανομή των βροχοπτώσεων, όπως αυτές απεικονίζονται στον Χάρτη 10. Το ετήσιο ύψος βροχής ελαττώνεται κατά κανόνα από τα δυτικά προς τα ανατολικά, ενώ κάτι ανάλογο παρατηρείται και από τα βόρεια προς τα νότια. Οι βροχομετρικές καμπύλες ακολουθούν το ανάγλυφο της χώρας και τη γενικότερη διάταξη των κύριων ορεινών όγκων που υπάρχουν σε αυτή.

Το ετήσιο ύψος βροχής μεταβάλλεται ανά έτος, ενώ η ένταση των βροχοπτώσεων μεταβάλλεται ανά περιοχή αλλά και κατά τη διάρκεια του έτους. Γεγονός είναι ότι σε πολλές περιοχές του ελληνικού χώρου καταγράφεται μια τάση μείωσης του μέσου ετήσιου ύψους των βροχοπτώσεων, ενώ αντίθετα η ένταση έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, κυρίως λόγω της παρουσίας έντονων καιρικών φαινομένων (Μπλιώνα, 2008).



Χάρτης 9: Κατανομή βροχοπτώσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Κούκης et al., 2007)

Κεφάλαιο 3: Κατολισθήσεις

3.1 Κατολισθήσεις

Με τον όρο Μετακίνηση Μαζών (Mass Wasting ή Mass Movement) χαρακτηρίζονται όλες οι βαρυτικές μετακινήσεις αποσαθρωμένων πετρωμάτων προς τα κατάντη ενός πρανούς. Η κατολίσθηση εκφράζει το αποτέλεσμα μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους και είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την πλήρη παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου (Ρίσβα, 2012). Επιπλέον, το φαινόμενο της κατολίσθησης μπορεί να παρατηρηθεί τόσο στη ξηρά όσο και μέσα σε θάλασσες, λίμνες και ταμιευτήρες (Μπλιώνα, 2008).

Τα βασικά σημεία που διέπουν μια κατολίσθηση είναι τα παρακάτω (Ρίσβα, 2012):

- i. **Το κυρίως μέτωπο:** Είναι η απότομη επιφάνεια που δημιουργείται στο αδιατάρακτο έδαφος που περιβάλλει την κατολίσθηση.
- ii. **Δευτερεύοντα μέτωπα:** Είναι απότομες επιφάνειες εντός του διαταραγμένου υλικού της κατολίσθησης.
- iii. Κεφαλή: Βρίσκεται στην κορυφή της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα των υλικών που κατολίσθησαν.
- iv. Πόδας της κατολίσθησης: Είναι το ακραίο, χαμηλότερο συνήθως τμήμα του κώνου.
- ν. Δάκτυλος: Είναι το τμήμα των υλικών που έχουν κατολισθήσει στη μεγαλύτερη απόσταση από το κύριο μέτωπο της κατολίσθησης.
- vi. **Κορυφή:** Είναι το ουσιαστικά αδιατάρακτο υλικό που βρίσκεται στα ψηλότερα σημεία του κύριου μετώπου.
- vii. Επιφάνεια διάρρηξης: Είναι η επιφάνεια αποχωρισμού των υλικών που κατολισθαίνουν από το σταθερό υπόβαθρο.
- viii. Επιφάνεια ολισθήσεως: Είναι η επιφάνεια εκείνη πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα ή μετακίνηση των μαζών που κατολίσθησαν.
- ix. Κώνος ή σωρός της κατολίσθησης: Σχηματίζεται από τη συσσώρευση των υλικών, τα οποία αφού μετακινήθηκαν κατά μία διαδρομή, σταμάτησαν και συγκεντρώθηκαν στη θέση στην οποία η κινητική ενέργεια μηδενίστηκε, δηλαδή στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης.



Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά κατολίσθησης (Πηγή: Βανδαράκης et al., 2013)

3.2 Αίτια κατολισθήσεων

Δύο είναι οι δυνάμεις που καθορίζουν αν κάποιο πρανές θα κινηθεί ή θα παραμείνει σταθερό, η διατμητική τάση και η διατμητική αντοχή, οι οποίες είναι αντίρροπες μεταξύ τους.

Οι βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ενεργότητα του πρανούς είναι οι ακόλουθοι (Ρίσβα, 2012):

- Η κλίση του πρανούς. Η μεγαλύτερη συχνότητα κατολισθήσεων (65, 6%) εντοπίζεται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο ενώ σε περιοχές με ήπιο ανάγλυφο το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό (2, 9%). Η κλίση καθορίζεται είτε από φυσικά αίτια είτε από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Στα πρώτα συγκαταλέγονται οι κατακόρυφες τεκτονικές κινήσεις μιας περιοχής, η ποτάμια διάβρωση, καθώς και ο ποτάμιος κυματισμός, ενώ στις δεύτερες, τα έργα οδοποιίας, οι μεταλλευτικές δραστηριότητες και άλλα τεχνικά έργα.
- 2) Η σύσταση και η δομή του πρανούς. Ένα πρανές αποτελείται συχνά από μια ποικιλία πετρωμάτων, αποσαθρωμένου μανδύα και εδάφους με διάφορες ποσότητες φυτοκάλυψης καθώς και περιεκτικότητας σε νερό. Όταν το πρανές αποτελείται αποκλειστικά από συνεκτικά πετρώματα τότε είναι δυνατόν να σχηματίζονται έως και κατακόρυφα πρανή. Κάθε πέτρωμα αφενός μεν αποσαθρώνεται, σχηματίζοντας έναν μανδύα αποσάθρωσης, αφετέρου δε φέρει στο εσωτερικό του επιφάνειες ασυνέχειας (στρώσεις, διαρρήξεις, φυλλώσεις) οι οποίες, όταν η κλίση τους είναι ομόρροπη με αυτή του πρανούς, προκαλούν ολισθήσεις και συμβάλουν στο σχηματισμό των κορημάτων. Η σταθερότητα αυτών των κορημάτων εξαρτάται από τρείς παράγοντες: το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των επί μέρους κλαστικών υλικών τους. Θεωρητικά είναι διαπιστωμένο πως κορήματα με μεγάλους, γωνιώδεις και ακανόνιστους κόκκους διατεταγμένους χαοτικώς σχηματίζουν πρανή μεγαλύτερων κλίσεων από ότι κορήματα με μικρούς και αποστρογγυλωμένους κόκκους διατεταγμένους σε παράλληλα επίπεδα.
- 3) Η σεισμική φόρτιση. Σε πρανή που αποτελούνται κυρίως από χαλαρά ή μικρής συνεκτικότητας υλικά, επέρχεται μείωση της συνοχής κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης και το πρανές οδηγείται κατά αυτόν τον τρόπο σε αστοχία.
- 4) Το νερό. Το νερό, είτε επιφανειακό είτε υπόγειο, διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην εκδήλωση κατολισθήσεων με μηχανισμούς όπως ο κορεσμός και η φόρτιση των υλικών, η δημιουργία υδροστατικών πιέσεων, η αυξομείωση της πίεσης των πόρων, η εσωτερική διάβρωση, οι υποσκαφές, οι διαβρωτικές αποσαθρωτικές διεργασίες, η χαλάρωση του πετρώματος κατά μήκος των επιφανειών ασυνέχειας με τη συνεχή διεύρυνση τους και η μεταβολή του όγκου στην περίπτωση δημιουργίας παγετού κλπ. Το νερό συμβάλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής των πετρωμάτων όταν βρίσκεται σε μικρές
ποσότητες στους πόρους τους, γεγονός που συμβαίνει γιατί τα μόρια του νερού στο λεπτό υδάτινο περίβλημα κάθε κόκκου ασκούν έλξη το ένα με το άλλο. Η έλξη αυτή ονομάζεται εφελκυσμός επιφάνειας και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνεκτικότητας του πετρώματος. Η συνεχόμενη αύξηση της περιεκτικότητας νερού ενός πετρώματος το καθιστά αρχικά πλαστικό. Αν προστεθεί επιπλέον νερό τότε αρχίζουν σιγά σιγά οι κόκκοι του πετρώματος να χάνουν την επαφή μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το πέτρωμα να χάνει τη διατμητική του αντοχή και να μεταβαίνει στην υγρή φάση. Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται ρευστοποίηση και είναι βασικό χαρακτηριστικό των αργίλων.

3.3 Είδη κατολισθήσεων

3.3.1 Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση του Varnes (1978) είναι η πλέον διεθνώς αναγνωρισμένη και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την περιγραφή όλων των εδαφικών μετακινήσεων, καθώς είναι γνωστή για την ευελιξία της και την προσαρμογή της στις εκάστοτε φυσικές συνθήκες. Ο ίδιος πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων που περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις με εξαίρεση τις καθιζήσεις.

Τα βασικά κριτήρια που διέπουν την ταξινόμηση αυτή είναι (Μπλιώνα, 2008; Ρίσβα, 2012):

- ο τύπος μετακίνησης, που διακρίνεται σε καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές ερπυσμούς, και
- το είδος του μετακινούμενου υλικού, που διακρίνεται σε κινήσεις που εκδηλώνονται στο βραχώδες υπόβαθρο, στους χονδρόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα) και στους λεπτόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς (γαίες).

Τα είδη κατολισθητικών κινήσεων σύμφωνα με την ταξινόμηση του **Varnes (1978)** είναι τα ακόλουθα (Μπλιώνα, 2008; Ρίσβα, 2012; Βανδαράκης et. al., 2013):

		Τύπ	ος υλικού
Τύπος κίνησης	Υπόβαθρο]	Εδάφη
		Κορήματα	Γαίες
Πτώσεις	Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
Ανατροπές	Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις - κυκλικές μεταθετικές	καθίζηση βράχων Ολίσθηση βράχων	Καθίζηση κορημάτων Ολισθήσεις κορημάτων	Καθίζηση γαιών Ολισθήσεις γαιών
Πλευρικές Εκτάσεις	Έκταση βράχων	Έκταση κορημάτων	Έκταση γαιών
Ροές	Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών (ή ροή ιλύος)
Σύνθετες	Συνδυασμός	δύο ή περισσότερων κύριων	τύπων μετακινήσεων

Εικόνα 4: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)

3.3.1.1 Πτώσεις (Falls)

Αναφέρεται στην αποκόλληση τμήματος εδάφους ή βράχου από ένα απότομο πρανές κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Η κίνηση του υλικού πραγματοποιείται μέσω κύλισης και αναπήδησης.

3.3.1.2 Ανατροπές (Topples)

Η κίνηση αυτή οφείλεται σε τάσεις οι οποίες προκαλούν περιστροφή του εδαφικού υλικού προς τα εμπρός, γύρω από ένα σημείο ή άξονα που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους της βραχώδους ή εδαφικής μάζας που επηρεάζεται. Στη συνέχεια τμήματα αποχωρίζονται από την υπόλοιπη μάζα, αναπηδώντας και πέφτοντας προς τα κατάντη του πρανούς. Το φαινόμενο μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε πτώση ή ολίσθηση της μετακινούμενης μάζας, ανάλογα με την γεωμετρία της επιφάνειας αποχωρισμού, και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

3.3.1.3 Ολισθήσεις (slides)

Η ολίσθηση είναι η προς τα κάτω κίνηση εδαφικής ή βραχώδους μάζας και πραγματοποιείται κυρίως κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή σχετικά λεπτών ζωνών διάτμησης. Αρχικά, η εκδήλωση της κίνησης δεν είναι ταυτόχρονη σε όλη την επιφάνεια αστοχίας. Ο όγκος της μετακινούμενης μάζας μεγεθύνεται από την αρχική περιοχή τοπικής αστοχίας. Συχνά τα πρώτα σημάδια μετακίνησης είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος της οποίας θα διαμορφωθεί το κύριο μέτωπο της ολίσθησης. Η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει πέρα από τον πόδα της επιφάνειας θραύσης, καλύπτοντας την αρχική εδαφική επιφάνεια στο πρανές, η οποία τελικά μεταπίπτει σε επιφάνεια διαχωρισμού (Ρίσβα, 2012). Ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης και το μηχανισμό μετακίνησης διακρίνουμε τα παρακάτω είδη ολισθήσεων (Μπλιώνα, 2008; Ρίσβα, 2012):

Περιστροφικές Ολισθήσεις (rotational slides)

Οι περιστροφικές ολισθήσεις ή κυκλικές ολισθήσεις μετακινούνται κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας αστοχίας η οποία είναι κοίλη προς τα πάνω. Όταν η επιφάνεια αστοχίας έχει προφίλ κυκλικό ή κυκλοειδές, η μετακινούμενη μάζα θα κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης έχοντας υποστεί μικρή εσωτερική παραμόρφωση, ενώ ο άξονας της κυκλικής επιφάνειας είναι παράλληλος στον άξονα γύρω από τον οποίο η μάζα ολισθαίνει. Η παραπάνω αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή ολίσθησης και δίνεται συνήθως με τον όρο *slump*. Συνήθως οι παραπάνω ολισθήσεις, πραγματοποιούνται σε ομοιογενή υλικά και κυρίως σε επιχώματα. Τα φυσικά πρανή συνήθως αποτελούνται από μη ομοιογενή υλικά, συνεπώς σε τέτοια υλικά η κίνηση ακολουθεί προϋπάρχουσες επιφάνειες ανομοιογένειας, ή επιφάνειες ασυνεχειών. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την εκδήλωση του φαινομένου, η πρώτη ένδειξη για την μελλοντική εξέλιξη, είναι η εμφάνιση εδαφικών τοξοειδών ρωγμών, κατά μήκος των οποίων αναμένεται να αναπτυχθεί η κύρια κατακρήμνιση.

Μεταθετικές Ολισθήσεις (translational slides)

Οι μεταθετικές ολισθήσεις αναφέρονται σε μια μετακινούμενη μάζα η οποία ολισθαίνει κατά μήκος, και συγκεκριμένα προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω, μιας επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας θραύσης. Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι γενικά μικρότερου βάθους από τις περιστροφικές.

Οι μεταθετικές ολισθήσεις σε βραχώδη πρανή καλούνται ολισθήσεις τεμαχών ή επίπεδες ολισθήσεις. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να δημιουργείται από δύο ασυνέχειες οι οποίες προκαλούν τη μετακίνηση της μάζας που περικλείεται από αυτές προς τα κατάντη κατά μήκος του ίχνους τομής τους, σχηματίζοντας μία σφήνα. Παρόμοιας μορφής μετακινούμενες μάζες μπορεί να ορίζονται από μία ασυνέχεια η οποία διαμορφώνει το κύριο μέτωπο της ολίσθησης, και μια άλλη η οποία διαμορφώνει την αστοχία επίπεδης μορφής. Ο τύπος της κίνησης εξαρτάται τελικά από τον προσανατολισμό της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς και τη σχέση της με τις ασυνέχειες της βραχόμαζας (Hocking, 1976; Cruden, 1978).

Μια διαφορά που αξίζει να σημειωθεί μεταξύ των παραπάνω υποδιαιρέσεων είναι ότι οι περιστροφικές ολισθήσεις, με την κίνησή τους τείνουν να ισορροπήσουν και πάλι τη μετακινούμενη μάζα, ενώ οι μεταθετικές ολισθήσεις συνεχίζουν ανεξέλεγκτα, ιδιαίτερα αν η επιφάνεια αποκόλλησης έχει μεγάλη κλίση. Με την εξέλιξη της μεταθετικής ολίσθησης, η μετακινούμενη μάζα μπορεί να σπάσει, ιδιαίτερα αν υπάρξει αύξηση είτε της ταχύτητα είτε της περιεκτικότητας σε νερό.



3.3.1.4 Εκτάσεις (Spreads)

Είναι κινήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από πλευρικές εκτάσεις συνεκτικών υλικών, τα οποία υπέρκεινται μαλακών υλικών. Στις πλευρικές εξαπλώσεις επικρατούν κινήσεις που οδηγούν στην πλευρική διάσταση του εδαφικού υλικού μέσα από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές, και διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους (Μπλιώνα, 2008):

Εξάπλωση τεμαχών (block spreads)

Στην περίπτωση αυτή συναντούμε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς, που βρίσκονται πάνω από άλλους ασθενέστερους, και διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε επιμέρους τεμάχια. Στην περίπτωση αυτή το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται. Η μετατόπιση στη συνέχεια κατανέμεται σε όλη την μάζα και τις περισσότερες φορές λαμβάνει χώρα με εξαιρετικά αργό ρυθμό.

Εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads)

Στην κατηγορία αυτή οι εξαπλώσεις δημιουργούνται κυρίως σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες, οι οποίες, σε περίπτωση που διαταραχθούν, εμφανίζουν απώλεια στην αντοχής τους. Η θραύση, όταν αυτή συμβαίνει, είναι βαθμιαία και συνήθως αρχίζει σαν εκτεταμένη καθίζηση με αντίστροφη προοδευτική επέκταση (δηλαδή ξεκινά από την αρχική θραύση και κινείται προς τα πίσω). Η κίνηση ξεκινάει απροειδοποίητα με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Σύνθετη πλευρική εξάπλωση (complex spreads)

Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα σαν έντονες παραμορφώσεις οριζόντιων σκληρών και διερρηγμένων στρωμάτων που βρίσκονται πάνω από ρωγματωμένες αργίλους ή μαλακούς σχιστόλιθους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων κινήσεων έχουν καταγραφεί σε πολλές κοιλάδες της Αγγλίας κατά την κατασκευή φραγμάτων, όμως ο μηχανισμός της μετακίνησης αυτής δεν έχει ακόμη αποσαφηνιστεί.

3.3.1.5 Ροές (Flows)

Οι ροές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε χαλαρά υλικά όπου η μετακινούμενη μάζα υφίσταται έντονες παραμορφώσεις, ενώ στη περίπτωση που χαρακτηρίζονται από πολύ έως εξαιρετικά αργή ταχύτητα μετακίνησης τότε ταξινομούνται στην κατηγορία του ερπυσμού (creep). Στον ερπυσμό η μετατόπιση είναι δυσδιάκριτη, ενώ το φαινόμενο αυτό αναγνωρίζεται κυρίως από την κλίση δέντρων, στύλων ή ακόμα και από τη χαρακτηριστική θέση θραυσμάτων κάποιου γεωλογικού ορίζοντα.

Με τον όρο «ροές του βραχώδους υποβάθρου» αναφερόμαστε σε παραμορφώσεις τις βραχόμαζας που κατανέμονται ανάμεσα σε ρωγμές ή διακλάσεις, χωρίς όμως να εντοπίζεται κάποια μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας μελέτης. Εν αντιθέσει, στα χαλαρά υλικά, οι ροές είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμες, αφού οι μετατοπίσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες και πολύ πιο ευκρινείς. Στην περίπτωση του χονδρόκοκκου υλικού, οι παραπάνω αναφέρονται ως *ροές κορημάτων* και στην περίπτωση του λεπτόκοκκου σαν *ροές γαιών, και* οι οποίες με την αύξηση του ποσοστού αργιλικού υλικού εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη έκταση και ένταση (Μπλιώνα, 2008).

3.3.1.6 Σύνθετες μετακινήσεις μαζών (Composite slides)

Ο Varnes πρότεινε την κατηγορία αυτή για να κατατάξει τις κινήσεις εκείνες οι οποίες συνδυάζουν δύο ή περισσότερες από τις πέντε προαναφερθείσες κατηγορίες. Αποτελούν ουσιαστικά συνδυασμό των μετακινήσεων αλλά και των υλικών που περιγράφηκαν παραπάνω, και εκδηλώνονται είτε στα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης είτε στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας (Μπλιώνα, 2008).



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση ειδών κατολίσθησης (Πηγή: Arkansas Geological Survey, 2016)

3.4 Κατολισθήσεις και ταχύτητα μετακίνησης

Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολίσθησης αποτελεί βασική παράμετρο με άμεση συσχέτιση των συνεπειών που δημιουργεί σε ανθρώπινες ζωές, βλάβες κτιρίων και έργων υποδομής, καθώς και σε απώλεια γης. Αξίζει να αναφερθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μιας μετακίνησης, τόσο πιο μεγάλες θα είναι οι απώλειες και οι επιπτώσεις. Σύμφωνα με τους Cruden et al. (1996), οι πιθανές βλάβες που μπορούν να προκληθούν από κατολισθητικά φαινόμενα διακρίνονται στις επτά παρακάτω κατηγορίες (Ρίσβα, 2012; Βανδαράκης et al., 2013; Λυκούδη, 2005):

Πίνακας 1: Πιθανές βλάβες από φαινόμενα κατολίσθησης

Κλάση ταχύτητας	Περιγραφή	Ταχύτητα	Πιθανές επιπτώσεις
1*	Εξαιρετικά αργή	1,5 cm/έτος	Αμυδρή κίνηση ανιχνεύσιμη μόνο με όργανα. Οι κατασκευές είναι δυνατές με μέτρα προφύλαξης.
2*	Πολύ αργή	1,6 m/έτος	Ορισμένες μόνο μόνιμες κατασκευές μπορεί να παραμένουν χωρίς ζημιές.
3*	Αργή	13 m/μήνα	Είναι δυνατόν να γίνονται επιδιορθωτικές εργασίες. Μη ευαίσθητες κατασκευές μπορεί να διατηρούνται με συχνή συντήρηση εφόσον δεν υπάρχουν περιοδικές εξάρσεις στην ταχύτητα μετακίνησης.
4	Μέτρια	1,8 m/ώρα	Μερικές προσωρινές και μη ευαίσθητες κατασκευές μπορεί να διατηρηθούν προσωρινά.
5	Γρήγορη	3 m/λεπτό	Δυνατή η διαφυγή. Καταστροφή κατασκευών, εγκαταστάσεων και εξοπλισμού.
6**	Πολύ γρήγορη	300 m/λεπτό	Μερικώς θανατηφόρες επιπτώσεις. Μη εφικτή η ολική διαφυγή (βάδισμα ανθρώπου ≈ 70 m/min).
7**	Εξαιρετικά γρήγορη		Μείζονος βιαιότητας καταστροφές. Αδύνατη η διαφυγή. Καταστροφές κατασκευών επίσης από πρόσκρουση κατολισθαίνοντων υλικών.

3.5 Κατολισθήσεις στην ελληνικό χώρο

Η γεωμορφολογική και γεωλογική πολυμορφία αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά του ελληνικού χώρου. Σε αυτό οφείλεται και ο μεγάλος αριθμός κατολισθήσεωνκαθιζήσεων (μόνο κατά μήκος του οδικού δικτύου έχουν καταγραφεί επίσημα πάνω από 500 περιπτώσεις τα τελευταία 50 χρόνια).

Ειδικότερα για την Ελλάδα, οι βασικότερες αιτίες που οδηγούν σε συχνή εμφάνιση κατολισθήσεων - καθιζήσεων είναι (Ρίσβα, 2012):

- 1) Οι μεγάλες μορφολογικές κλίσεις σε πολλά σημεία της χώρας.
- 2) Η έντονη τεκτονική παραμόρφωση. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και συνδέεται και με την υψηλή σεισμικότητα της χώρας μας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων συνδέεται με σεισμικά γεγονότα (π.χ. Κυλλήνη 1988, Μήλος 1992, Πύργος 1993, Γρεβενά 1995, Αθήνα 1999).
- Τα μικρά μεγέθη των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών.
- 4) Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες συχνά γίνονται αλόγιστα και χωρίς μελέτη ή προγραμματισμό και οδηγούν στην αποψίλωση των δασών, στην άστοχη διαμόρφωση πρανών ή στην αφαίρεση της υποστήριξης των πρανών, στην υπεράντληση των υδροφόρων οριζόντων κ.α.

Σύμφωνα με μια βάση δεδομένων που επεξεργάστηκε και εφάρμοσε πρώτα η Μπλιώνα (2008), η συχνότητα των κατολισθήσεων στην Ελλάδα για την περίοδο 1999 – 2003 δίνεται αναλυτικά στον παρακάτω χάρτη:



Χάρτης 10: Συχνότητα κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο (Μπλιώνα, 2008)

Κεφάλαιο 4: Γεωλογική δομή περιοχής μελέτης

Το τμήμα 2.4 της Εγνατίας Οδού (ποταμός Άραχθος – Περιστέρι, Χ.Θ. 6 + 380 έως Χ.Θ. 9 + 110), αποτελεί την ευρύτερη περιοχή μελέτης, αρχίζει αμέσως μετά τη γέφυρα της αρτηρίας στον ποταμό Άραχθο και τελειώνει στην αρχή του τμήματος 3.1 της Εγνατίας Οδού (Περιστέρι – Ανθοχώρι), με συνολικό μήκος 8,7 χιλιόμετρα. Κατά μήκος αυτού του τμήματος, η Εγνατία Οδός διέρχεται επί επιχωμάτων, οπλισμένων ή κοινών, ανάλογα της θέσης κατά μήκος της οδού. Το τμήμα έχει χωριστεί σε επιμέρους περιοχές, όμως η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στην περιοχή **Χ.Θ. 6 + 380 έως Χ.Θ. 7 + 750**, εξαιτίας των έντονων κατολισθητικών φαινόμενων (1 mm/ημέρα). Αυτή η περιοχή βρίσκεται περίπου 25 χιλιόμετρα δυτικά του Μετσόβου και εκτείνεται κατά μήκος της κοιλάδας του ποταμού Μετσοβίτικου, κοντά στον οικισμό Πρινότοπα.

Εδαφικές αστάθειες του τμήματος είχαν εντοπιστεί από το 1998, τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο πρανές της κοιλάδας του Μετσοβίτικου ποταμού. Το τμήμα δημοπρατήθηκε στα τέλη του 2001, ενώ παράλληλα υπήρχε σε εξέλιξη πρόγραμμα παρακολούθησης επιφανειακών και βαθιών μετακινήσεων στην περιοχή της γέφυρας T9, όπου επισημάνθηκαν σοβαρά προβλήματα εδαφικών μετακινήσεων προς τον Μετσοβίτικο ποταμό. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν ερπυστικές μετακινήσεις προς τον ποταμό, της τάξης των 15 – 20 mm το χρόνο, σε βάθος 30 μέτρων στη θέση της γέφυρας T9. Επομένως η εν λόγω περιοχή προέκυψε περισσότερο προβληματική από το αναμενόμενο.

4.1 Γεωμορφολογικά - γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά

Ο Μετσοβίτικος ποταμός αποτελεί τον κύριο μορφογενετικό παράγοντα της ευρύτερης περιοχής, με διεύθυνση ροής από Δ έως ΝΔ προς Α έως ΒΑ. Η μακρόχρονη και έντονη διαβρωτική διεργασία του είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας βαθιάς κοιλάδας με απότομα πρανή στην περιοχή και άρα την ανάπτυξη ασταθειών στα αντερείσματα της κοιλάδας και την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων φερτών υλικών στο ποτάμι. Στις ημέρες μας, τα φαινόμενα διάβρωσης έχουν περιορισθεί κυρίως στα ανάντι του ποταμού και σε ορισμένα άλλα τμήματα, όπου τα υλικά των παλαιότερων ασταθειών φθάνουν μέχρι τις όχθες του ποταμού. Στο υπόλοιπο τμήμα της κοιλάδας, ο Μετσοβίτικος ποταμός διαβρώνει και μεταφέρει προς τα κατάντι τα υλικά των παλαιότερων αποθέσεών του.

Το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής συμπληρώνεται από ένα πυκνό σύστημα μικρών ρεμάτων, τα οποία εκβάλλουν στον ποταμό Μετσοβίτικο. Έντονα διαβρωτικά φαινόμενα εμφανίζονται σε όλα τα ρέματα της περιοχής.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης αποτελείται από τους σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης και τους σχηματισμούς της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, οι οποίοι βρίσκονται επωθημένοι στους φλυσχικούς σχηματισμούς της Ιονίου. Το όριο της επώθησης βρίσκεται περιμετρικά της περιοχής μελέτης, έτσι ώστε η περιοχή μελέτης να αποτελεί ένα «τεκτονικό παράθυρο». Πρόκειται για το σημαντικότερο γεωλογικό και τεκτονικό γεγονός της περιοχής.

Γενικά, η περιοχή καλύπτεται από μεγάλης έκτασης και πάχους χαλαρά υλικά. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις περιορισμένες εμφανίσεις βράχου, προέκυψε ότι, οι φλυσχικοί σχηματισμοί έχουν γενική διεύθυνση από $B\Delta$ – Nα έως Ba – NΔ, η διεύθυνση βύθισης είναι από BA έως $B\Delta$, η γωνία κλίσης είναι μικρή της τάξης των 20° – 40° και τοπικά μόνο γίνεται μεγαλύτερη μέχρι 85° . Επιπλέον, η υποκείμενη βροχομάζα είναι πτυχώμενη, με γενική διεύθυνση των αξόνων πτύχωσης σχεδόν B – N και εμφανίζεται μόνο τοπικά και σε μικρή έκταση (Μπίσα, 2011).



Χάρτης 11: Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Πηγή: orykta.gr, 2016)

Η μελέτη περιοχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από ιζήματα δύο βασικών γεωτεκτονικών ενοτήτων της Ελλαδικής επικράτειας: της ζώνης Ωλονού -Πίνδου και της Ιόνιας ζώνης. Επίσης, σύμφωνα με την ανάλυση των Ελληνίδων σε τεκτονοστρωματογραφικά πεδία (Παπανικολάου, 1988-1995; Papanikolaou et al., 2004), η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται στα όρια των τ. πεδίων H1 και H2, τα οποία ανήκουν στις εξωτερικές Ελληνίδες.



Χάρτης 12: Χάρτης των τ. πεδίων των Ελληνίδων (Πηγή: Papanikolaou, 1997).

Για την καλύτερη και αρτιότερη παρουσίαση της ευρύτερης γεωλογίας της περιοχής παρατίθεται το παρακάτω απόσπασμα του γεωλογικού Χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (φύλλο Πράμαντα (Χάρτης 14). Με βάση αυτόν, η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε γειτνίαση με τη ζώνη επώθησης όπου και συναντάται ως επι τω πλείστων ο φλύσχης της Ιονίου ζώνης.



Χάρτης 13: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ι.Γ.Μ.Ε.)

Ειδικότερα η γεωτεκτονική ζώνης του Ωλονού – Πίνδου, η οποία βρίσκεται στα υψηλότερα τμήματα της περιοχής, αποτελείται από το γεωλογικό σχηματισμό του φλύσχη, από ασβεστολιθικούς και κερατολιθικούς σχηματισμούς και από μαγματικά (ανδεσιτικά και σπηλιτικά) πετρώματα. Η ηλικία αυτών των σχηματισμών, είναι Τριτογενής έως Τριαδική, σύμφωνα με τα στοιχεία που αποτυπώνονται στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε..

Η Ιόνιος ζώνη βρίσκεται κάτω από το κάλυμμα των εδαφικών υλικών στην περιοχή μελέτης, και αποτελείται από τους Ηωκαινικής – Ολιγοκαινικής ηλικίας φλυσχικούς σχηματισμούς. Ο σχηματισμός του φλύσχη στην εν λόγω περιοχή, αποτελείται από φακούς κροκαλοπαγών, με κροκάλες που προέρχονται από τα πετρώματα της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, γεγονός που δηλώνει τη μετάβαση του Ιόνιου φλύσχη στο φλύσχη της γεωτεκτονικής ζώνης του Γαβρόβου (Μπίσα, 2011).

Οι φλυσχικοί σχηματισμοί της ζώνης της Ιονίου καλύπτονται στη μεγαλύτερη έκτασή τους από τα υλικά κατολίσθησης, τα υλικά των πλευρικών αποσαθρωμάτων και από τις σύγχρονες – παλαιότερες ποτάμιες αποθέσεις της κοίτης του Μετσοβίτικου και τις κοίτες των πλευρικών ρεμάτων. Το εδαφικό κάλυμμα της περιοχής, συμπληρώνεται από προϊόντα εκσκαφής αποτεθειμένα στο πρανές της υφιστάμενης Εθνικής Οδού (Μπίσα, 2011).

Ειδικότερα στην περιοχή μελέτης μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω λιθοστρωματογραφικούς χαρακτήρες (Μπίσα, 2011; Εμμανουηλίδης et al., 2003):

1) Προϊόντα εκσκαφής από την Εγνατία Οδό: Αποτελούνται από επιφανειακά εδαφικά υλικά και υλικά φλυσχικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής, που

επικαλύπτουν τα ελεύθερα τμήματα του αντερείσματος, και εμφανίζονται από το επίπεδο της Εθνικής Οδού έως την κοίτη του ποταμού Μετσοβίτικου.

- 2) Αποθέσεις (υφιστάμενες και σύγχρονες) του Μετσοβίτικου ποταμού: Αποτελούν ουσιαστικά αργιλώδεις άμμους και κροκάλες ασβεστολιθικών, ψαμμιτικών και κερατολιθικών πετρωμάτων, με πάχος που έχει υπολογιστεί από παλαιότερες μετρήσεις στην περιοχή 28,9 μέτρων. Ο αποθέσεις από τον ποταμό Μετσοβίτικο καθώς και από τα μεγάλα πλευρικά ρέματα καλύπτουν την ευρύτερη κοίτη του ποταμού.
- 3) Πλευρικά αποσαθρώματα κορήματα και υλικά παλαιότερων αποθέσεων: Πρόκειται για εδαφικά υλικά και τεμάχια φλυσχικών, ως επί τω πλείστων, κροκαλοπαγών και ψαμμιτικών σχηματισμών, με πάχος που έχει υπολογιστεί από 1 μέχρι 5 μέτρα και καλύπτουν μέρος των αντερεισμάτων. Στην περιοχή των εδαφικών ασταθειών, υπάρχει δυσκολία στην διάκριση των υλικών αυτών από τα αντίστοιχα κατολισθήσεων.
- 4) Υλικά κατολίσθησης: Αποτελούνται από άργιλο ιλυώδη έως άμμο ιλυώδη υλικά, ποικίλου πάχους, με διασπορά κροκάλων, χαλίκων και γωνιωδών τεμαχίων ψαμμιτικής κυρίως, και λιγότερο ασβεστολιθικής, σύστασης. Επι μέρους βρίσκονται διάσπαρτοι ογκόλιθοι ασβεστολιθυκής που προέρχονται είτε από καταπτώσεις του ασβεστολιθικού όγκου της δυτικής πλευράς, είτε από κατολισθητικά φαινόμενα στο νότιο αντέρεισμα. Η επώθηση των φλυσχικών σχηματισμών της ζώνης Ωλονού Πίνδου προς τους σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης, υπάρχουν έντονα διατμημένοι έως αργιλοποιημένοι ιλυόλιθοι, χρώματος ερυθρού και γκρι, με έντονη διασπορά κροκάλων, χαλίκων και τεμαχίων ψαμμίτη.
- 5) Φλυσχικοί σχηματισμοί της ζώνης Ιονίου: Αποτελούν το εδαφικό υπόβαθρο της περιοχής, στο οποίο υπάρχει εναλλαγή ψαμμιτών και κρακαλοπαγών, με ενδιάμεσες ενστρώσεις ιλυολίθων. Τα κροκαλοπαγή, κυρίως παχυστρωματώδη, με ιλυοαμμώδες υλικό μάζας, συναντώνται υπό τη μορφή ενιαίας ζώνης στο δυτικό άκρο της περιοχής μελέτης, και με τη μορφή ενστρώσεων στην υπόλοιπη περιοχή. Η βροχομάζα, εμφανίζεται εμφανώς κατακερματισμένη και αποσαθρωμένη στην επιφανειακή ζώνη χαλάρωσης, με μήκος περίπου 40 μέτρα. Κάτω από τα υλικά αυτά υπάρχουν σαφώς καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά εκτροπής Υδροηλεκτρικού (περιογή σήραγγας Εργοστασίου ποταμού Μετσοβίτικου). Τα κροκαλοπαγή, δε που εμφανίζονται κάτω από τα χαλαρά ή έντονα διατμημένα υλικά, εμφανίζονται υγιή, μέτρια κατακερματισμένα με ενστρώσεις ψαμμίτη.

Οι ψαμμίτες εμφανίζονται χονδρόκοκκοι έως μεσόκοκκοι, με ενστρώσεις είτε ιλυολοθικού υλικού, είτε με αραιές ενστρώσεις κροκαλοπαγούς. Μέσα στην ψαμμιτική μάζα, εμφανίζονται επίσης σε διάσπαρτη μορφή κροκάλες και/ή χάλικες. Η βροχομάζα είναι μέτρια έως έντονα κατακερματισμένη από την ανάπτυξη των επιφανειών στρώσης, με κλίση 20° – 30°. Οι ιλυόλιθοι, με τη μορφή ψαμμούχων ιλυολίθων, εμφανίζονται μέσα στους ψαμμίτες ή στα κροκαλοπαγή με μικρή ανάπτυξη. 6) Φλυσχικοί σχηματισμοί της ζώνης Ωλονού – Πίνδου: Πρόκειται για εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών, γκρι και/ή ερυθρού χρώματος, με ενστρώσεις κροκαλοπαγών, οι οποίες συναντώνται στο υψηλότερο τμήμα του αντερείσματος. Οι σχηματισμοί αυτοί, λόγω των επωθητικών κινήσεων της περιοχής, είναι έντονα καταπονημένοι, με συχνές ζώνες διάτμησης, κατακερματισμένοι και αποσαθρωμένοι.

4.2 Συνθήκες ευστάθειας

Η ευρύτερη περιογή που μελετάται στην εν λόγω εργασία, αποτελεί μία περιογή με εκτεταμένα κατολισθητικά φαινόμενα, που συνέβησαν στο παρελθόν και συνεχίζουν ακόμη και σήμερα, τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο αντέρεισμα του ποταμού Μετσοβίτικου, το οποίο καλύπτεται από υλικά κατολισθήσεων, αποτελούμενα από ασβεστολιθικούς ογκόλιθους, τεμάχη φλύσγη και λεπτοκλαστικά υλικά (Εμμανουηλίδης et al., 2003). Τα φαινόμενα κατολίσθησης εκδηλώνονται με επιφανειακές μετακινήσεις, είναι πλάτους, σύμφωνα με παλαιότερες μετρήσεις, 670 μέτρων (παράλληλα στον άξονα της Εγνατίας Οδού), μήκους από 400 έως 540 μέτρα (στη διεύθυνση κίνησης, πρακτικά κάθετη στο πρανές και τον άξονα της Εγνατίας Οδού), με επιφάνεια ολίσθησης σε μέγιστο βάθος 37 - 40 μέτρα περίπου από την επιφάνεια του εδάφους (περιοχή X. Θ ., 7 + 065) (Μαυρομμάτη et al., 2003).

Μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή, δεν έχει παρατηρηθεί μια ενιαία επιφάνεια ολίσθησης που να είναι και ταυτόχρονα κινηματικά δυνατή. Αντίθετα φαίνεται να υπάρχει μία επιφάνεια ολίσθησης στο κατάντη τμήμα, με πόδα στο ποτάμι και φρύδι πιθανόν ανάντη της υφιστάμενης Εθνικής Οδού Ιωαννίνων - Μετσόβου (χωρίς όμως σαφείς ενδείξεις στην επιφάνεια του εδάφους σήμερα) και μία δεύτερη επιφάνεια ολίσθησης, στο ανάντη τμήμα του πρανούς, με φρύδι στη θέση της οδού προς Πρινότοπα και πόδα στην υφιστάμενη Εθνική Οδό (χωρίς πάλι σαφείς ενδείξεις στην επιφάνεια). Φαίνεται ότι, τμήμα της ανάντη επιφάνειας ολίσθησης, διέρχεται από τμήμα της κατάντη κατολίσθησης, όμως συμβαδίζει με την εξελικτική πορεία των κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή, σύμφωνα πάντα με τα γεωλογικά στοιχεία, τη μορφολογία του υπόβαθρου και τις ενδείξεις κίνησης στα κλισιόμετρα, που βρίσκονται τοποθετημένα στην περιοχή και τα οποία επιβεβαιώνουν την οπισθοδρομική προς τα ανάντη φύση (retrogressive) της κατολίσθησης, με διαδοχικά τεμάχη που αποκόπτονται ξεκινώντας από τα κατάντη, με πόδα στον ποταμό και ακολουθούνται από τα άλλα τεμάχη ανάντη, που αρχίζουν την ολίσθησή τους μετά την ολίσθηση των πρώτων (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011) (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Απεικόνιση των δύο επιφανειών ολίσθησης, στο κατάντη και στο ανάντη τμήμα της περιοχής μελέτης (Μαυρομμάτη et al., 2005).

Ειδικότερα, για την περιοχή μελέτης, η οποία βρίσκεται στο βόρειο αντέρεισμα του ποταμού Μετσοβίτικου, έχουν προκύψει τα παρακάτω ύστερα από την ανάλυση των δεδομένων της περιοχής:

- i. Δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης: Αποτελείται από σχηματισμούς της επωθημένης ζώνης Ωλονού - Πίνδου στην υψηλότερη περιοχή (υψόμετρο > 665 μέτρα) και σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης στη χαμηλότερη περιοχή (υψόμετρο < 665 μέτρα). Στην περιοχή αυτή, δεν υφίστανται ενδείξεις στην επιφάνεια για κατολισθητικά φαινόμενα τόσο του παρελθόντος ή νεότερα. Στο χαμηλότερο τμήμα της περιοχής και εντός των κροκαλοπαγών σχηματισμών, έχουν διανοιχτεί όλα τα υπόγεια έργα της Δ.Ε.Η. και, σύμφωνα με προφορικές μαρτυρίες των γεωλόγων της Δ.Ε.Η., δεν υπάρχουν προβλήματα εδαφικών ασταθειών στο υπόψη τμήμα. Παρόλα αυτά, στην ευρύτερη περιοχή του τμήματος αυτού, έχουν καταγραφείς σε μικρό βαθμό κατολισθητικά φαινόμενα, τα οποία μπορεί να έχουν επηρεάσει την υποκείμενη βραχομάζα. Ένδειξη στην περιογή, αποτελεί επιφανειακός μάρτυρας που έγει εγκατασταθεί και στον οποίο καταγράφεται επιφανειακή μετατόπιση 11 mm (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011).
- ii. Κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης: Στο τμήμα αυτό έχουν εκδηλωθεί και βρίσκονται σε εξέλιξη κατολισθητικά φαινόμενα σε σημαντικά βάθη. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από συχνές εναλλαγές τμημάτων, με ήπιο και απότομο ανάγλυφο. Συναντώνται υλικά κατολίσθησης, έντονα διατμημένοι και αργιλοποιημένοι ιλυόλιθοι, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως «εν δυνάμει» κατολισθήσιμα υλικά και οι υποκείμενοι, μη μετακινούμενοι βραχώδεις σχηματισμοί.

Η υδροφορία, επιπλέον, των σχηματισμών της περιοχής θεωρείται υψηλή έως πολύ υψηλή. Η στάθμη του υπογείου νερού βρίσκεται συνήθως είτε εντός των υλικών της ζώνης κατολίσθησης, είτε στη διεπιφάνεια μεταξύ των ζωνών με τα υλικά κατολισθήσεων και της υποκείμενης αυτής, με τους έντονα

αργιλοποιημένους ιλυόλιθους. Στο χαμηλότερο τμήμα του αντερείσματος, μετά τη διάτρηση της ζώνης των κροκάλων, η στάθμη που καταγράφεται στις ερευνητικές γεωτρήσεις βρίσκεται λίγο ψηλότερα από τη στάθμη του ποταμού (Μπίσα, 2011).

Από τις κλισιομετρικές μετρήσεις έχουν καταγραφεί κατολισθητικά φαινόμενα, τα οποία εξελίχθηκαν σταδιακά τόσο με το βάθος όσο και οριζοντιογραφικά, προς το ψηλότερο τμήμα του πρανούς. Οι επιφανειακές ολισθήσεις παρουσιάζουν κλίσεις από 12° έως 14° στο μεσαίο τμήμα και 10° έως 13° στο χαμηλότερο τμήμα της κεντρικής περιοχής. Η κίνηση που έχει καταγραφεί είναι από 1,5 mm έως 10 mm σε ετήσια βάση, ενώ η διεύθυνση κίνησης είναι κυρίως N - NA έως NA (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011). Οι επιφανειακοί μάρτυρες που έχουν τοποθετηθεί στην περιοχή, δείχνουν ότι βρίσκεται σε εξέλιξη μία κίνηση, ερπυστικού χαρακτήρα, των επιφανειακών εδαφικών μαζών.

Οι παραπάνω ενδείξεις επιβεβαιώνονται από την εμφάνιση συχνά ρωγμών στους μικρού ύψους τοίχους αντιστήριξης (Εικόνα 7), καθώς και σε άλλα τεχνικά έργα της Οδού καθώς επίσης και στην υφιστάμενη οδό Ιωαννίνων – Καλαμπάκας. Κατά καιρούς έχουν παρατηρηθεί ρωγμές, σύμφωνα με τις μετρήσεις, από 5 έως 10 εκατοστά στους αρμούς των τοίχων αντιστήριξης, από 30 έως 50 εκατοστά στους τοίχους των οχετών και από 5 έως 30 εκατοστά στο οδόστρωμα της Εθνικής Οδού. Παρόμοιες ρωγμές, παραμορφώσεις ή θραύσεις στην επιφάνεια του εδάφους, δεν έχουν παρουσιαστεί στην υψηλότερη περιοχή, εκτός από ορισμένα κτίσματα στην περιοχή του οικισμού Πρινότοπα (Μπίσα, 2011).



Εικόνα 7: Ρωγμές σε τοίχους αντιστήριξης της Εθνικής Οδού που διέρχεται από την περιοχή μελέτης (Πηγή: Μπίσα, 2011).

iii. Ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης: Εκτείνεται από τη χαμηλότερη περιοχή, με υψομέτρο + 625 μέτρα, προς την περιοχή του οικισμού Πρινότοπα (με υψόμετρο που κυμαίνεται από + 720 έως 740 μέτρα) και προς την ακόμα υψηλότερη περιοχή με υψόμετρο + 800 μέτρα. Αποτελείται από τους σχηματισμούς της επωθημένης ζώνης Ωλονού - Πίνδου στην υψηλότερη περιοχή (υψόμετρο > + 740 μέτρα) και από τους σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης στη χαμηλότερη περιοχή (υψόμετρο < + 740 μέτρα). Η περιοχή αυτή, βρίσκεται μεταξύ δύο κατολισθημένων περιοχών σε οριακή ισορροπία μεταξύ τους, της κεντρικής και της ανατολικότερης, η οποία με την πάροδο του χρόνου έχει διαταραχτεί, προκαλώντας ζημιές στην υπάρχουσα Εθνική Οδό Ιωαννίνων - Μετσόβου. Η κατολίσθηση της περιοχής αυτής εκτείνεται σε μήκος περίπου 200 μέτρων παράλληλα με τη διεύθυνση κίνησής της και περίπου 250 μέτρα κάθετα σε αυτήν, με μέγιστα βάθη καταγραφόμενων μετακινήσεων της τάξης των 20 μέτρων (Καβουνίδης et al., 2005).</p>

Οι αδιατάραχτοι φλυσχικοί σχηματισμοί της εν λόγω περιοχής, βρίσκονται σε βάθος μεταξύ 7 και 14 μέτρων στο υψηλότερο τμήμα, 3 έως 5 μέτρων στο μεσαίο τμήμα και στα 13 μέτρα στο χαμηλότερο τμήμα της περιοχής (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011).

Η υδροφορία των πετρωμάτων θεωρείται υψηλή και εντοπίζεται σε βάθος από 3 έως 6 μέτρα τόσο στο υψηλότερο όσο και στο μεσαίο τμήμα της περιοχής και σε βάθος 17 μέτρων στο χαμηλότερο τμήμα της περιοχής (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011).

Συγκριτικά με την κεντρική περιοχή, αναπτύσσονται κατολισθητικά φαινόμενα σε μικρότερο βάθος και με μικρότερη ένταση (Μπίσα, 2011).

Οι περισσότερες μετακινήσεις στην περιοχή μελέτης καταγράφονται μέσα στη ζώνη έντονων διατμημένων – αργιλοποιημένων ιλυόλιθων, καθώς και στη διεπιφάνεια αυτής της ζώνης με την υπερκείμενή της, η οποία αποτελείται από υλικά κατολισθήσεων και παλαιότερων αναβαθμίδων, υποβοηθούμενες από την παρουσία επιφανειακού και υπογείου νερού (Μπίσα, 2011).

4.3 Ποσοτικά στοιχεία κατολισθήσεων

Η επιφάνεια της κατολισθημένης κεντρικής περιοχής, μετά από μετρήσεις, αγγίζει τα 300.000 m² και το μέσο πάχος των εδαφικών υλικών και των υποκείμενων διατμημένων – αργιλοποιημένων φλυσχικών σχηματισμών είναι 16 μέτρα στο υψηλότερο τμήμα, 24 μέτρα στο μεσαίο τμήμα και 38 μέτρα στο χαμηλότερο τμήμα της περιοχής, Το μέσο πάχος των παραπάνω υλικών, για όλη την έκταση της κατολισθημένης κεντρικής περιοχής εκτιμήθηκε ότι αγγίζει τα 28 μέτρα (Μπίσα, 2011). Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, ο όγκος των κατολισθημένων, καθώς και των «εν δυνάμει» κατολισθήσιμων, υλικών στην κεντρική περιοχή ανέρχεται σε 8,4 x 10^6 m³ (επιφάνεια = 300.000 m² x μέσο πάχος υλικών = 28 m) (Εμμανουηλίδης et al., 2003; Μπίσα, 2011).

Κεφάλαιο 5: Μοντέλο προσομοίωσης

Η βροχόπτωση, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες που μπορούν να ενεργοποιήσουν ένα κατολισθητικό φαινόμενο. Έρευνες και μελέτες έχουν δείξει ότι υπάρχει ένα χρονικό σημείο στις βροχοπτώσεις που αποτελεί το κατώτερο όριο για την ενεργοποίηση των κατολισθήσεων και θεωρείται απαραίτητο για την πρόβλεψη τους, εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχει μια εμπειρική σχέση που συνδέει το όριο των βροχοπτώσεων με τις κατολισθήσεις. Τα φυσικά μοντέλα παρέχουν τον καλύτερο τρόπο για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος καθώς είναι θέση να προβλέψουν τη στιγμή της πιθανής εμφάνισης φαινομένων κατολίσθησης, αλλά και την τοποθεσία τους. Μοντέλα αυτού του τύπου, επίσης, λαμβάνουν υπόψη τις δεσπόζουσες μηχανικές διαδικασίες των κατολισθήσεων, εμπλέκοντας μηχανικές παραμέτρους, όπως η συνοχή και γωνία τριβής.

Με βάση το σκεπτικό αυτό οι Wu et al. (2015) ανέπτυξαν ένα φυσικό μοντέλο υπολογισμού των κατολισθητικών φαινομένων, λαμβάνοντας υπόψη τα βροχομετρικά δεδομένα από την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Στόχος τους ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου όπου θα υπολογίζεται το όριο της βροχόπτωσης καθώς η ίδια η βροχόπτωση θα αλλάζει. Στη συνέχεια: α) μέσα από τη μείωση της ασκούμενης έντασης και δύναμης, που προέργεται σαν αποτέλεσμα της πίεσης των πόρων, και υποθέτοντας ότι το όριο της βροχόπτωσης συνδέεται με την αναλογία ύψους της κορεσμένης ζώνης με το ύψος της επιφάνειας που ολισθαίνει και β) από το γεγονός ότι το νερό μπορεί να διεισδύσει εύκολα στο έδαφος μέσα από τους μακροπόρους και τις ρωγμές, μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο το όριο της βροχόπτωσης σε διάφορα χρονικά και χωροταξικά σημεία.

5.1 Θεωρητικό μοντέλο

Στις αβαθής κατολισθήσεις, η επιφάνεια που ολισθαίνει θεωρείται περίπου παράλληλη στην επιφάνεια κλίσης και το υπόστρωμα μπορεί να θεωρηθεί αδιαπέραστο, ενώ το νερό που εισχωρεί στους πόρους των πετρωμάτων, αλλάζοντας την πίεση, θεωρείται σημαντικός παράγοντας ενεργοποίησης.

Το παρακάτω μοντέλο λαμβάνει υπόψη μια άπειρη κλίση του εδάφους, και οι μαθηματικές του εκφράσεις δίνονται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 6: Διάγραμμα τομής μιας άπειρης κλίσης με τις ενεργές δυνάμεις που τη χαρακτηρίζουν (Πηγή: Wu et al., 2015)

Ως Συντελεστής Ασφάλειας (Fs), ορίζεται ο λόγος της σταθεροποιητικής δύναμη Fr προς την αποσταθεροποιητική δύναμη Fd. Η σταθεροποιητική δύναμη Fr υπολογίζεται από το κριτήριο αντοχής Mohr - Coulomb, και η αποσταθεροποιητική δύναμη Fd είναι το άθροισμα των βαρυτικών δυνάμεων κατά μήκος της πλαγιάς και της δύναμης διαρροής. Η μαθηματική έκφραση για τον Συντελεστή Ασφάλειας είναι:

$$F_S = \frac{F_r}{F_d} = \frac{N'^{\tan\varphi} + C'}{G\sin\beta + F'} \quad (1)$$

Όπου:

Ν' = η κανονική αποτελεσματική δύναμη,

C' = είναι η αποτελεσματική συνοχή,

φ = η γωνία τριβής,

G = το βάρος του ολισθαίνοντος σώματος, συμπεριλαμβανομένων του εδάφους και του νερού,

β = η κλίση της επιφάνειας ολίσθησης και

F' = η δύναμη διαρροή.

Η μαθηματική έκφραση του G, στο πλαίσιο της υπόθεση ότι η αποτελεσματική πίεση είναι ίση με τη συνολική πίεση, είναι:

$$G = \gamma_w * \cos\beta * H * \Delta_s * [m(n-1) + G_s(1-n) + n * S_r(1-m)]$$
(2)

Όπου:

Η = το πάχος του ολισθαίνοντος σώματος,

 $\Delta s = \eta \epsilon \pi i \varphi d \nu \epsilon i a \tau \eta \zeta \epsilon \pi i \varphi d \nu \epsilon i a \zeta o \lambda i \sigma \theta \eta \sigma \eta \zeta$,

m = το πάχος (χωρίς διαστάσεις) του κορεσμένου στρώματος, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1,

n= το πορώδες,

Gs = το ειδικό βάρος και

Sr = o βαθμός κορεσμού του εδάφους.

Στη συνέχεια, η μαθηματική έκφραση για το Ν' είναι:

$$N' = G * \cos\beta = \gamma_w * \cos^2\beta * H * \Delta_s * [m(n-1) + G_s(1-n) + n * S_r(1-m)] (3)$$

Η δύναμη διαρροή Γ' μπορεί να εκφραστεί ως:

 $F' = \gamma_w * \sin\beta * \cos\beta * m * H * \Delta_s \quad (4)$

όπου $\gamma_w = \eta$ μονάδα βάρος του νερού.

Η αποτελεσματική συνεκτική δύναμη εκφράζεται ως:

 $C' = c' * \Delta_s \quad (5)$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2), (3), (4) και (5) στην εξίσωση (1), προκύπτει:

$$F_{s} = \frac{\cot\beta * [m(n-1) + G_{s}(1-n) + n * S_{r}(1-m)] * \tan\varphi + \frac{2C}{\sin 2\beta * H * \gamma_{w}}}{[m(n-1) + G_{s}(1-n) + n * S_{r}(1-m)] + m}$$
(6)

Όταν μια κατολίσθηση είναι σε κρίσιμη κατάσταση, δηλαδή ισχύει $F_s = 1$, το κρίσιμο αδιάστατο πάχος του κορεσμένου στρώματος m_{cr} δίνεται από τον τύπο:

$$m_{cr} = \frac{(\cot\beta \tan\varphi - 1) * [G_s * (1 - n) + n * S_r] + \frac{2c'}{\sin 2\beta * H * \gamma_w}}{n * (1 - S_r) - [n * (1 - S_r) - 1] * \cot\beta \tan\varphi}$$
(7)

H κλίση είναι σταθερή όταν m < m_{cr} και ασταθής όταν m > m_{cr}. Δεδομένου ότι $0 \le m \le 1$, η κλίση θα είναι πάντα σταθερή κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες βροχόπτωσης εφόσον m_{cr} > 1, ενώ η κλίση θα είναι ασταθής ακόμη και υπό ξηρές συνθήκες, εφόσον m_{cr} < 0.

~ /

Σε πραγματικές καταστάσεις, καθώς το βάθος των βροχοπτώσεων (h_i) καταγράφηκε κατά το διάστημα Δt και κυμαίνεται συνήθως είτε σε l ώρα είτε σε l d, το m μπορεί να εκφραστεί από κάθε προσαύξηση του βάθους της βροχόπτωσης (h_i). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο που υιοθετεί τον νόμο του Darcy για τον υπολογισμό της εξέλιξης του m κατά τη διαδικασία της βροχόπτωσης. Στο μοντέλο, αν υποτεθεί ότι η τρέχουσα χρονική στιγμή είναι t₀ και το αδιάστατο πάχος του κορεσμένου στρώματος τη χρονική στιγμή t₀ είναι m₀, η συνεισφορά της βροχόπτωσης στο χρόνο t_i μέχρι το m₀, το οποίο υποδηλώνεται από το m_{i,0}, θα είναι:

$$m_{i,0} = \frac{h_{i-1,i}}{n * H * (1 - S_r)} \exp\left[-k * \frac{\sin\beta}{n * (1 - S_r)}(t_0 - t_i)\right], (\iota = 0, -1, -2, \dots)$$
(8)

όπου k είναι ο ρυθμός διείσδυσης.

Η εξίσωση αυτή υποδηλώνει ότι η συνεισφορά των βροχοπτώσεων μεταξύ t_{i-1} και t_i με m_0 μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ t_i και t_0 . Λαμβάνοντας το άθροισμα όλων των $m_{i,0}$, προκύπτει:

$$m_{0} = \sum_{i_{-} - \infty}^{0} m_{i,0} = \sum_{i_{-} - \infty}^{0} \frac{h_{i-1,i}}{n * H * (1 - S_{r})} \exp\left[-k * \frac{\sin\beta}{n * (1 - S_{r})}(t_{0} - t_{i})\right]$$
(9)

Το αρνητικό άπειρο παραπάνω σημαίνει ότι το σύνολο των βροχοπτώσεων πριν από την τρέχουσα χρονική στιγμή έχει συμβάλει στην διαμόρφωση του m_0 . Ωστόσο, τα αποτελέσματα των τελευταίων βροχοπτώσεων στο m_0 θεωρούνται αμελητέα εξαιτίας του αρνητικού εκθέτη στην εξίσωση (8).

Έτσι μετατρέποντας την εξίσωση (9) προκύπτει:

$$m_0 = m_{0,0} + \sum_{i_- -\infty}^{-1} m_{i,0}$$
(10)

Αν λοιπόν αναμένεται μια κρίσιμη κατάσταση για την κατολίσθηση την χρονική στιγμή t₀, θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω προϋπόθεση:

$$m_0 = m_{cr} - \sum_{i_{-\infty}}^{-1} m_{i,0}$$
 (11)

Με άλλα λόγια, αν γνωρίζουμε το ιστορικό των βροχοπτώσεων πριν από τη χρονική στιγμή t_1 , μπορεί να υπολογιστεί η βροχόπτωση μεταξύ του χρόνου t_1 και t_0 ($h_{-1,0}$) που απαιτείται για την εισέλθει σε κρίσιμη κατάσταση η κατολίσθηση στον χρόνο t_0 . Η εξίσωση για τον υπολογισμό της κρίσιμης βροχόπτωσης μεταξύ του χρόνου t_1 και t_0 προκύπτει από την αντικατάσταση της εξίσωσης (11) στην εξίσωση (8):

$$h_{-1,0} = n * H * (1 - S_r) * \left(m_{cr} - \sum_{i=\infty}^{-1} m_{i,0} \right)$$
(12)

Για τις παραπάνω μεταβλητές, που χρησιμοποιήθηκαν θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι το πορώδες (n) δίνεται από την εξίσωση:

$$n=\frac{e}{1+e} \quad (a)$$

Όπου e = το ποσοστό των κενών του πετρώματος.

Το ειδικό βάρος των κόκκων του εδάφους (G_s) δίνεται από τον τύπο:

$$G_s = \frac{\gamma * (1+e)}{\gamma_w * (1+w)} \quad (\beta)$$

Όπου w = το περιεχόμενο νερό στα πετρώματα.

Τέλος ο βαθμός κορεσμού (Sr) δίνεται από τον τύπο:

$$S_r = \frac{w * G_s}{e} \quad (\gamma)$$

5.2 Δεδομένα περιοχής

Για την προσομοίωση των παραπάνω εκφράσεων, θα πρέπει να είναι γνωστή η βροχόπτωση της περιοχής. Τα στοιχεία αυτά είναι διαθέσιμα από το Εθνικό Αστεροσκοπείο και διατέθηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Ειδικότερα επεξεργάστηκαν τα στοιχεία από τέσσερις σταθμούς μέτρησης, των Ιωαννίνων, του Μετσόβου, της Πράμαντα και του Τρίστενου.

Επιπλέον στοιχεία αναφορικά με την περιοχή μελέτης, όπως οι κλίσεις του εδάφους, η επιφάνεια, γεωλογικά και υδρολογικά στοιχεία είναι διαθέσιμα από το Ι.Γ.Μ.Ε. καθώς και από υφιστάμενες μελέτες για την εν λόγω περιοχή.

Όλα τα παραπάνω επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του Microsoft Excel για την εξαγωγή των συμπερασμάτων αναφορικά με τα φαινόμενα κατολίσθησης στη περιοχή μελέτης.

Ειδικότερα έγινε η μαθηματική προσομοίωση του παραπάνω μοντέλου για τα βροχομετρικά στοιχεία των τεσσάρων διαφορετικών σταθμών ξεχωριστά, από τα οποία και προέκυψαν τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκαν οι αρχικές μεταβλητές, που χρησιμοποιήθηκαν τελικά στην προσομοίωση. Συγκεντρωτικά δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή	Τιμή
Πορώδες (n)	0,25
Φαινόμενο βάρος (γ)	24,3 kN/m ³
Ενεργή παράμετρος αντοχής (c')	100 kPa
Ενεργή παράμετρος αντοχής (φ')	33°
Μέτρο ελαστικότητας	2 Mpa
Συντελεστής υδροπερατότητας (k)	2,4 * 10 ⁻⁶ mm
Ειδικό βάρος νερού (γw)	10 kN/m ³
Ποσοστό κενών του πετρώματος (e)	0,33
Ειδικό βάρος των κόκκων του εδάφους (Gs)	0,2025 kg
Βαθμός κορεσμού (Sr)	9,1125
Υψος (Η)	70 m
Γωνία κλίσης (β)	28°
Υγρασία του εδάφους (w)	15%

5.3 Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από διάφορες πηγές, όπως για παράδειγμα τα βροχομετρικά στοιχεία και τα εδαφολογικά στοιχεία της περιοχής, σύμφωνα με το μοντέλο που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξήχθησαν ενδιαφέροντα δεδομένα αναφορικά με την συμβατότητα ενός τέτοιου μοντέλου στην περιοχή μελέτης.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του Microsoft Excel, μας έδωσαν τη χρονική στιγμή, όπου με βάση τα δοθέντα στοιχεία για την περιοχή μελέτης, αναμένεται να πραγματοποιηθεί η κατολίσθηση.

6.1 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική απόσταση 10 λεπτών

Οι παρακάτω αναλύσεις βασίστηκαν, όπως προαναφέρθηκε στα βροχομετρικά στοιχεία παρελθόντων ετών με μετρήσεις ανά δέκα λεπτά της ώρας, και αφορούν τους τέσσερις πλησιέστερους σταθμούς της περιοχής.

Έτσι λοιπόν με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα για κάθε σταθμό μέτρησης είναι τα εξής:

 Σταθμός μέτρησης Ιωαννίνων: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 23/12/2006 έως 22/3/2008. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή αναμένεται κατολίσθηση τη χρονική στιγμή t = 18,78 που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή 23/12/2006 μεταξύ 20:20 και 20:40 την ημέρας αυτής.

	~ ~ ~	<u>.</u>	~	-	-		-			
		Δεδομ	ένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
	n	0,25		н	70	m				
	c'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	٥				
	σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	0,933143	
	φ	33	0			-				
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	-0,13234	
)	k	0,0000024	mm							
L			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	18,78764	
Ļ	Sr	9,1125]							



Σχήμα 7: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Ιωαννίνων (10 λεπτά)

2) Σταθμός μέτρησης Μετσόβου: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 14/3/2011 έως 10/3/2012. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομείωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

		Δεδομ	ιένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση <mark>6</mark>	Fs =	223,2345	N
_	n	0,25		н	70	m				
	c'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	0				
	σc	16	Мра	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	3,4E-06	
	φ	33	0			-				
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800803	
)	k	0,0000024	mm							
L			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,689	
4	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	
5										



Σχήμα 8: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Μετσόβου (10 λεπτά)

3) Σταθμός μέτρησης Πράμαντα: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 26/6/2011 έως 23/9/2012. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλσμα της προσομείωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

		-	-	-	-		-			-
		Δεδο	ομένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2344861	N
	n	0,25		н	70	m				
	с'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806296	
	Y	24,3	kN/m³	β	28	0				
	σc	16	Мра	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	3,3554E-06	
	φ	33	0							
	Λέτρο ελαστικότητα	2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800802941	
)	k	0,0000024	mm							
L			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,6889925	
4	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	
5										

Πράμαντα (10 λεπτά)



Σχήμα 9: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Πράμαντα (10 λεπτά)

4) Σταθμός μέτρησης Τρίστενο: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 1/10/2008 έως 31/12/2009. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή αναμένεται κατολίσθηση τη χρονική στιγμή t = 2100,71 που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή 16/10/2008 τη χρονική στιγμή μεταξύ 20:40 και 20:50 περίπου της ημέρας αυτής.

\equiv		~	~	-	-		~			
		Δεδομά	να							
:						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
	n	0,25		н	70	m				
	c'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	o				
•	σc	16	Мра	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	15,5978	
;	φ	33	0			-				
1	Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	-14,797	
С	k	0,0000024	mm	2,4*10^-6						
1			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	2100,711	
4	Sr	9,1125								
5										





Σχήμα 10: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Τρίστενο (10 λεπτά)

Τα παραπάνω αποτελέσματα μας δείχνουν ότι δύο διαφορετικά κατολισθητικά φαινόμενα, σε διάρκεια δύο ετών έχουν συμβεί στην περιοχή μελέτης.

Τα δύο επίσης απορριφθέντα στοιχεία, υποδηλώνουν ότι κάποιο κατολισθητικό φαινόμενο δεν συνέβη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, παρόλα αυτά η πιθανότητα να έχει συμβεί πριν ή μετά τις μετρήσεις είναι μαγάλη. Επίσης αυτή η αστοχία πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο σταθμοί μέτρησης του Αστεροσκοπείου Αθηνών, και ιδιαίτερα αυτός της Πράμαντα, δεν βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με την περιοχή μελέτης, ή δεν επηρεάζεται από αυτούς, άρα τα αποτελέσματά τους δεν μπορούν να συσχετιστούν με την μελέτη μας.

Επιπλέον, όσον αφορά τα γραφήματα που παρατίθενται παραπάνω, σε αυτά γίνεται αναλυτική καταγραφή της υφιστάμενης βροχόπτωσης (σε χιλιοστά) από κάθε σταθμό μέτρησης. Η συσχέτιση γίνεται αντίστοιχα για όλες τις χρονικές περιόδους (10 λεπτά, 1 λεπτό και 1 μήνας) που μελετούνται στην παρούσα εργασία.

Στα γραφήματα, γίνεται επιπλέον καταγραφή των τυχόν μετακινήσεων (σε mm) που προκύπτουν στην περιοχή μελέτης, με βάση το υπολογιστικό μοντέλο μελέτης. Συγκεκριμένα το γράφημα παρουσιάζει τις αστάθειες του εδάφους (θετικές και αρνητικές) έτσι όπως επηρεάζονται από την υφιστάμενη βροχόπτωση, ενώ στην περίπτωση όπου υπάρχει μετακίνηση, το γράφημα δίνει υπέρβαση στην θετική πλευρά του άξονα των μετακινήσεων.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για όλα τα γραφήματα που προηγήθηκαν αλλά και που ακολουθούν.

6.2 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική απόσταση 1 λεπτού

Η δεύτερη αυτή προσομοίωση βασίστηκε σε βροχομετρικά στοιχεία παρελθόντων ετών από την περιοχή μελέτης σε χρονική απόσταση 1 λεπτού μεταξύ τους. Επίσης τα έτη των δεδομένων στην προσομοίωση αυτή, συμπίπτουν, στο πλαίσιο του δυνατού, με τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν στην περιοχή από την Κουτάλια (2006), για να διαπιστωθεί αν όντος το μοντέλο προσομοίωσης που μελετάται στην εργασία αυτή παράγει αποτελέσματα που μπορούν να συγκριθούν με τα ήδη καταγεγραμμένα από την παραπάνω μελέτη.

Έτσι λοιπόν με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα για κάθε σταθμό μέτρησης είναι τα εξής:

 Σταθμός μέτρησης Ιωαννίνων: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή αναμένεται κατολίσθηση τη χρονική στιγμή t = 1091,81 που αντιστοιχεί περίπου σε χρονική στιγμή τον 9/2003.

	~		<u> </u>		L		0		1	, ,
		Δεδομ	ένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
	n	0,25		н	70	m				
1	C'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
i.	γ	24,3	kN/m³	β	28	o				
1	σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	8,491267	
1	φ	33	0			-				
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	-7,69046	
Э	k	0,0000024	mm							
1			-				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	1091,805	
4	Sr	9,1125								
5										



Σχήμα 11: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Ιωαννίνων (1 λεπτό)

2) Σταθμός μέτρησης Μετσόβου: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα, επίσης, από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

	-	-	-	-			••	•	-
	Δεδομ	ένα]				
m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
n	0,25		н	70	m				
C'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
γ	24,3	kN/m³	β	28	0				
σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	3,16E-05	
φ	33	0							
Μέτρο ελαστικότητας	2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800775	
k	0,0000024	mm							
						Εξίσωση 10			
e	0,3333333	%							
Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,685	
Sr	9,1125]					h _{-1,0} =	0	



Σχήμα 12: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Μετσόβου (1 λεπτό)

3) Σταθμός μέτρησης Πράμαντα: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

	~	U	C C	v	L	1	U		1	5
		Δεδ	ομένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2344861	N
	n	0,25		н	70	m				
	с'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806296	
	Y	24,3	kN/m³	β	28	٥				
	σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	3,07127E-05	
	φ	33	0			_				
	/έτρο ελαστικότητα	ι 2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800775583	
)	k	0,0000024	mm							
L			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,6851086	
4	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	
5										



Σχήμα 13: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Πράμαντα (1 λεπτό)

4) Σταθμός μέτρησης Τρίστενο: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 1/2004 έως 3/2005. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή αναμένεται κατολίσθηση τη χρονική στιγμή t = 22030,32 που αντιστοιχεί σε χρονική στιγμή τον 6/2004.

	Δεδομ	ένα							
m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
n	0,25		н	70	m				
с'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
γ	24,3	kN/m³	β	28	o				
σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	155,978	
φ	33	0			-				
Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	-155,177	
k	0,0000024	4 mm	2,4*10^-6						
		_				Εξίσωση 10			
е	0,333333	3 %							
Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	22030,32	
Sr	9,1125								



Σχήμα 14: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Τρίστενο (1 λεπτό)

Τα αποτελέσματα της δεύτερης αυτής προσομοίωσης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς βρίσκονται πολύ κοντά στα ήδη καταγεγραμμένα στοιχεία μετακινήσεων της μελέτης της Κουτάλια (2006).

Κάνοντας μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, με αυτά που έχουν καταγραφεί (Πίνακας 2) μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι:

Η μετακίνηση που καταγράφεται στην σταθμό των Ιωαννίνων συμπίπτει χρονικά με την μετακίνηση που έχει καταγραφεί στην περιοχή Α τον Σεπτέμβριο του 2003 (9/2003) από το αποκλισιόμετρο N1.

Επιπλέον η μετακίνηση του καταγράφηκε για τον σταθμό του Τριστένου συμπίπτει χρονικά με την καταγραφή του αποκλισιομέτρου N9 στην περιοχή B, η οποία ήταν ιδιαίτερα ενεργή το διάστημα Μάιος έως Αύγουστος του 2004, αλλά και είναι πολύ κοντά χρονικά (μόλις ένας μήνας διαφορά) από τις μετακινήσεις που έχουν καταγραφεί τον Μάιος του 2004 στην περιοχή A από το αποκλισιόμετρο N2, και στην περιοχή B από τα αποκλισιόμετρα N24, N7, N8 και N20.

Περιο	χή Α	Περιοχή Β					
Αποκλισιόμετρο	Ημερομηνία	Αποκλισιόμετρο	Ημερομηνία				
N1	9/2003	N9	5-8/2004				
N3	5/2004	N10	6/2002-6/2003				
B2	11/2004	N24	5/2004 3/2005				
B4	11/2004	B24	3/2005				
BE1	9/2004	B25	3/2005				
N1	2/2004	N7	5/2004				

Πίνακας 2: Εδαφικές μετακινήσεις στην περιοχή μελέτης με βάση τις καταγραφές των εγκατεστημένων αποκλισιομέτρων (Πηγή: Κουτάλια, 2006)

N2	5/2004	N8	5/2004
B4	11/2004	N20	5/2004
B6	11/2004	B8	3/2005
B7	9/2004	B10	3/2005
		B12A	11/2004
		B15	3/2005
		B16	3/2005
		B17	3/2005
		B20	3/2005

6.3 Προσομοίωση με χρήση βροχομετρικών δεδομένων με χρονική απόσταση 1 μήνα

Η τρίτη αυτή προσομοίωση βασίστηκε σε βροχομετρικά στοιχεία παρελθόντων ετών από την περιοχή μελέτης σε χρονική απόσταση 1 μηνός μεταξύ τους. Επίσης τα έτη των δεδομένων στην προσομοίωση αυτή, συμπίπτουν, με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην δεύτερη προσομοίωση. Έτσι λοιπόν με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα για κάθε σταθμό μέτρησης είναι τα εξής:

 Σταθμός μέτρησης Ιωαννίνων: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

11										
		Δεδομέ	ένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
_	n	0,25		н	70	m				
	C'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	o				
	σc	16	Мра	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	0,000218	
_	φ	33	0							
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800588	
I	k	0,0000024	mm							
							Εξίσωση 10			
-	e	0,3333333	%							
	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,658	
	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	


Σχήμα 15: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Ιωαννίνων (1 μήνας)

2) Σταθμός μέτρησης Μετσόβου: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα, επίσης, από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

-		-	-	-	-	-	-			-
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
	n	0,25		Н	70	m				
	c'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	0				
	σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	7,94E-10	
	φ	33	0			-				
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Мра				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800806	
)	k	0,0000024	mm							
L			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
3	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,689	
ţ	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	
5										



Σχήμα 16: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Μετσόβου (1 μήνας)

3) Σταθμός μέτρησης Πράμαντα: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 9/2003 έως 12/2004. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

-			1							
		Δεδα	ομένα							
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2344861	N
	n	0,25		н	70	m				
	c'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806296	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	o				
	σc	16	Мра	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	7,84477E-10	
	φ	33	0			-				
	Λέτρο ελαστικότητο	ι 2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,800806295	
)	k	0,0000024	mm							
			_				Εξίσωση 10			
2	e	0,3333333	%							
}	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,6894687	
ł	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	
5]									



Σχήμα 17: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από την Σταθμό Πράμαντα (1 μήνας)

4) Σταθμός μέτρησης Τρίστενο: Οι μετρήσεις στον σταθμό αυτό αφορούσαν το διάστημα από 1/2004 έως 3/2005. Βάση των στοιχείων αυτών και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο προσομοίωσης, στην περιοχή δεν αναμένεται κατολίσθηση καθόλο το διάστημα των μετρήσεων, καθώς το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν ένα μηδενικό, άρα μη αποδεκτό, αποτέλεσμα.

4		-	-	-	-		-			-
						-				
	m	0,3		γw	10	kN/m³	Εξίσωση 6	Fs =	223,2345	N
	n	0,25		н	70	m				
	C'	100	kPa	Δs		m²	Εξίσωση 7	m _{cr} =	0,800806	
	γ	24,3	kN/m³	β	28	0				
	σc	16	Mpa	w	15	%	Εξίσωση 9	m _o =	0,003611	
	φ	33	0			-				
	Μέτρο ελαστικότητας	2	Mpa				Εξίσωση 11	m _{0,0} =	0,797196	
	k	0,0000024	1 mm	2,4*10^-6						
			_				Εξίσωση 10			
	e	0,3333333	3 %							
	Gs	0,2025	kg				Εξίσωση 12	h _{-1,0} =	-113,177	
	Sr	9,1125						h _{-1,0} =	0	



Σχήμα 18: Διάγραμμα συσχέτισης βροχόπτωσης και μετακινήσεων από τον Σταθμό Τρίστενο (1 μήνας)

Τα αποτελέσματα της τρίτης αυτής προσομοίωσης δείχνουν ότι το χρονικό διάστημα των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ μεγάλο για την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτό το διάστημα, όπως φάνηκε και από τα αρνητικά αποτελέσματα, δεν μπορεί να συμβαδίσει με το μοντέλο μας, άρα συμπεραίνουμε ότι απαιτούνται μικρότερα χρονικά διαστήματα για την σωστή λειτουργία του μοντέλου μας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν πως το μοντέλο προσομοίωσης που μελετάται στην παρούσα εργασία, μπορεί να δώσει αποτελέσματα πολύ κοντά στις πραγματικές συνθήκες που έχουν ή θα καταγραφούν στο μέλλον. Η εικόνα αυτή είναι πολύ ενθαρρυντική για την μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων, και ίσως είναι η αρχή για την δημιουργία κάποιων παρόμοιων μοντέλων πρόβλεψης των φαινομένων αυτών.

Δυστυχώς το μοντέλο μας, όμως, δεν είναι σε θέση να μας δώσει και πιθανά αποτελέσματα αναφορικά με την απόσταση της μετακίνησης, που θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα στα πλαίσια της μελέτης μας. Παρόλα αυτά, τέτοια στοιχεία μπορούν να αναζητηθούν από τα αποκλισιομέτρα που βρίσκονται τοποθετημένα στην περιοχή, στα πλαίσια άλλων ερευνητικών εργασιών.

Γενικά πάντως μπορούμε να συμπεράνουμε πως τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, εάν λάβουμε υπόψη το παρελθόν της περιοχής σε τέτοιες καταστάσεις. Γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία πως μετακινήσεις σαν τις παραπάνω, μεγέθους μέχρι 10 χιλιοστά ανά έτος, έχουν καταγραφεί πολλές φορές στην περιοχή, οπότε τα παραπάνω όχι μόνο δεν αποτελούν έκπληξη, αλλά επιβεβαιώνουν και τα όσα ήδη γνωρίζουμε. Σε πρόσφατη ερευνητική εργασία μάλιστα, είχε πραγματοποιηθεί αναλυτική καταγραφή των μετακινήσεων στην υφιστάμενη περιοχή μελέτης από μια πλειάδα αποκλισιομέτρων. Οι μετρήσεις έδειξαν πως η περιοχή ήταν αρκετά ενεργή αναφορικά με το θέμα των κατολισθήσεων, ενώ καταγράφηκαν διάφορα μεγέθη κινήσεων, άλλες φορές μικρότερα άλλες φορές μεγαλύτερα. Τα παραπάνω έρχονται σε πλήρη συμφωνία και με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, επιβεβαιώνοντας τον ασταθή χαρακτήρα της περιοχής.



Εικόνα 8: Περιοχές δυνητικών μετακινήσεων, βάση των αποτελεσμάτων της έρευνας, στην περιοχή μελέτης.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων δεν μπορεί να θεωρηθεί μονοσήμαντο. Συνδέεται άμεσα με την παρουσία υπόγειων ή/ και επιφανειακών υδάτων, με τις κλιματικές συνθήκες, τα ακραία ατμοσφαιρικά φαινόμενα (έντονες βροχοπτώσεις, παρατεταμένες χιονοπτώσεις, διάρκεια παγετού), τις γεωλογικές συνθήκες αλλά και τις ανθρώπινες δραστηριότητες κάθε περιοχής.

Ειδικότερα τα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής μελέτης αποδίδονται στην παρουσία τεκτονισμένου και αποσαθρωμένου φλύσχη, οφιολίθων και αργιλικών εδαφών συνδυαστικά με τις υδρολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε πως βασική αιτία των κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης, από γεωλογική σκοπιά, αποτελούν ο σχηματισμός του φλύσχη, ο μανδύας αποσάθρωσης και οι αποθέσεις των ποταμών και χειμάρρων της περιοχής.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως η περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής, λόγω των εκτενών κατολισθητικών φαινομένων που έχουν καταγραφεί, αλλά και εξακολουθούν να καταγράφονται, έχει μελετηθεί αρκετά από την επιστημονική κοινότητα. Με βάση λοιπόν και τη δική μας μελέτη αναφορικά με τα φαινόμενα κατολίσθησης εκεί, με τη χρήση ενός απλού μοντέλου προσομοίωσης των φαινομένων κατολίσθησης σε συνδυασμό με την καταγεγραμμένη βροχόπτωση της περιοχής, μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το μοντέλο προσομοίωσης μας έδειξε πως ακόμη και σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα, η περιοχή μελέτης παρουσιάζει έντονα φαινόμενα κατολίσθησης. Αυτό οφείλεται, τόσο στην γεωλογική σύσταση της περιοχής, όσο και στα έντονα και τακτικά φαινόμενα κατακρημνίσεων που καταγράφονται εκεί.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση των βροχομετρικών δεδομένων της περιοχής μελέτης με τα ήδη καταγεγραμμένα από παλαιότερες μελέτες, έδειξαν πως υπάρχει μια πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις καταγραφές από τα αποκλισιόμετρα της περιοχής.
- Το μοντέλο προσομοίωσης θα ήταν αποτελεσματικότερο, εάν συνδεόταν άμεσα με την επιφάνεια της περιοχής μελέτης, ώστε να υπάρχει άμεση, στο πλαίσιο του δυνατού, αποτύπωση των φαινομένων κατολίσθησης στην ή στις περιοχές του συμβάντος και με τις ανάλογες διαστάσεις τους.
- Το μοντέλο μελέτης δεν συμβαδίζει σωστά με την χρήση βροχομετρικών δεδομένων που έχουν ληφθεί με μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ τους, και απαιτεί όσο το δυνατόν πιο κοντινά χρονικά δεδομένα (π.χ. σε επίπεδο λεπτού).

Η περιοχή μελέτης χρήζει περαιτέρω εξέτασης, λόγω του ιστορικού της και επιπλέον εξαιτίας της διέλευσης της Εγνατίας Οδού, ενός έργου υποδομής πολύ σημαντικού για τη χώρα, από την εν λόγω περιοχή.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως το νερό διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, και επηρεάζει τα τεχνικά έργα και τις κατασκευές σε μια περιοχή. Τα υψηλά ποσοστά βροχοπτώσεων, οι γεωλογικοί σχηματισμοί και το μεγάλο υψόμετρο ενισχύουν την επιφανειακή απορροή στην περιοχή μελέτης. Η χρήση λοιπόν μοντέλων για την μελέτη της πιθανής μελλοντικής διαμόρφωσης καθίσταται αναγκαία.

Βιβλιογραφία

- Burton, P.W., Xu Y., Qin C., Tselentis G-Akis, Sokos E., (2004), A catalogue of seismicity in Greece and the adjacent areas for the twentieth century, Tectonophysics 390, 117–127
- Cruden D.M., (1978), Discussion of G. Hocking's paper "A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 15, 217
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996), Landslides Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Academy Press, WA, 36 - 75.
- Gautier P., Brunn J.P., Jolivet L., (1993), Structure and kinematics of Upper Cenozoic extensional detachment on Naxos and Paros (Cyclades islands, Greece), Tectonics 12, 1180 - 1194.
- Hocking G., (1976), A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 13, 225 – 226.
- Jolivet L., Goffé B., Monié P., Truffert Luxey C., Patriat M., Bonneau M., (1996), Miocene detachment in Crete and exhumation P-T-t paths of high pressure metamorphic rocks, Tectonics 15, 1129 – 1153
- 7) Lister G.S., Banga G., Feenstra A., (1984), *Metamorphic core complexes of cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece*, Geology 12, 221 225
- 8) Papanikolaou D., Bargathi H., Dabovski C., Dimitriu R., El-Hawat A., Ioane D., Kranis H., Obeidi A., Oaie G, Seghedi A., Zagorchev I., (2004), *The TRANSMED Atlas, Transect VII, A publication of the Mediterranean Consortium for the 32nd International Geological Congress*, Florence, Italy
- Papanikolaou, D., (1989a), Are the Medial Crystalline Massifs of the Eastern Mediterranean drifted Gondwanan fragments?, Geol. Soc. Greece, Spec. Publ., 1, 63 - 90.
- 10) Papanikolaou, D., (1997), The tectonostratigraphic terranes of the Hellenides, Ann. Geol. Soc. Hellen., 37, 495 - 514.

- Stampfli, G.M., Vavassis, I., De Bono, A., Rosselet, F., Matti, B., Belini, M., (2003), *Remnants of the Paleotethys oceanic suture-zone in the western Tethyan area*, In: G. Cassinis and F.A. Decandia, (Eds.): Regional Reports and General Correlation, Boll. Soc. Geol. It., Volume speciale 2, 1 - 23.
- Varnes D.J., (1978), Slope movement: Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster and R. Kriezek), TRB, National Research Council, Washington D.C., 11 - 33.
- 13) Wu Y- M., Lan H X., Gao X., Li L P., Yang Z H., (2015), A simplified physically based coupled rainfall threshold model for triggering landslides, Engineering Geology 195, 63–69
- 14) Βανδαράκης Δ., Παυλόπουλος Κ., (2013), Κατολισθήσεις Παραδείγματα από την Εγνατία Οδό, Διδακτικές Σημειώσεις, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα
- 15) Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (2016), Επίκεντρα σεισμών στην περιοχή της Ηπείρου
- 16) Εμμανουηλίδης Γ., Φώτη Σ., Καφέτσης Γ., Παπαγιάννης Ι., Μποσινάκου Π.,
 (2003), Οριστική Γεωτεχνική Γεωλογική μελέτη παραποτάμιας χάραξης από Χ.Θ. 6 + 380 έως Χ.Θ. 9 + 110, Έδαφος Ε.Π.Ε. – Γεωλογική Υποστήριξη Ε.Π.Ε. Εγνατία Οδός, Ποταμός Άραχθος – Περιστέρι
- 17) Καβουνίδης Σ., Ντούνιας Γ., Μπαρδάνης Μ., (2005), Χαράσσοντας οδούς μέσα από κατολισθήσεις, Έδαφος Ε.Π.Ε. – 2° Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος
- 18) Κουτάλια Χ., (2005), Ανάλυση συνθηκών ευστάθειας της Εγνατίας Οδού στην έξοδο της σήραγγας Τ8 (Χ.Θ. 6 + 380 έως 7 + 750), Μεταπτυχιακή διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- 19) Λυκούδη Ε., (2005), Κατολισθήσεις Ταζινόμηση κατολισθήσεων, Διδακτικές σημειώσεις, Αθήνα
- 20) Μαυρομμάτη Χ., Καβουνίδης Σ., (2003), Εκθεση εκτίμησης έργου, Έδαφος
 Ε.Π.Ε. Εγνατία Οδός: Ποταμός Άραχθος Περιστέρι
- 21) Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Δ.Κ.Ε.) Ε.Μ.Π., Συνοπτική αναφορά στη γεωλογία της Ηπείρου (τελ. Πρόσβαση 20/4/2016 http://www.ntua.gr/MIRC/db/epirus_db/GEOLOGIA_HPEIROY/Geologia_Hpeirou.htm)
- 22) Μουντράκης Δ., Συνοπτική γεωτεκτονική εξέλιζη του ευρύτερου ελληνικού χώρου, Διδακτικές σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

- 23) Μπίσα Σ., (2011), Τα προβλήματα των κατολισθήσεων στην ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μέτσοβο
- 24) Μπλιώνα Μ., (2008), Ανάπτυζη βάσης δεδομένων κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα
- 25) Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας (2000), Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
- 26) Παπαζάχος Β., Παπαϊωάννου Κ., (1997), Atlas of Isoseismal Maps for Strong Shallow Earthquakes in Greece and Surrounding Area 426 BC-1995, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- 27) Παπανικολάου Δ. (1986), Γεωλογία της Ελλάδας, εκδόσεις Επτάλοφος ABEE, Αθήνα
- 28) Ρίσβα Ι., (2012), Κατολισθητικές κινήσεις στην περιοχή Προυσού Ευρυτανίας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα
- 29) Σπυρόπουλος Α. (2005), Διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο Νομό Αχαΐας σχετικά με την αναζήτηση αδρανών υλικών για διάφορες χρήσεις, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών

Παράρτημα

Στο παρακάτω παράρτημα δίνονται όλοι οι τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής μελέτης με ενδεικτική επεξήγηση της απεικόνισης, επεξεργασμένοι με τέτοιον τρόπο ώστε να απεικονίζονται οι δυνητικές περιοχές κατολίσθησης, σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομείωσης που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 9: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης

Χαρτογραφική προβολή της συνολικής καταγραφής της γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 10: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης με σήμανση των εν δυνάμει κατολισθήσεων

Χαρτογραφική προβολή της συνολικής καταγραφής της γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης με ταυτόχρονη απεικόνιση των περιοχών δυνητικών μετακινήσεων (με πορτοκαλί χρώμα).

Στον χάρτη απεικονίζονται όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί με διαφορετική χρωματική απόδοση για την βέλτιστη κατανόηση.



Εικόνα 11: Γεωλογικός χάρτης υποβάθρου

Χαρτογραφική προβολή της γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης με έμφαση στο υπόβαθρο. Ο χάρτης, με επίκεντρο τις περιοχές των μετακινήσεων (με πορτοκαλί χρώμα) καταγράφει λεπτομερώς το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής χρησιμοποιώντας διαφορετική χρωματική απόδοση για κάθε σχηματισμό.



Εικόνα 12: Χάραξη Εγνατίας Οδού

Χαρτογραφική απεικόνιση της χάραξης της Εγνατίας Οδού, με ταυτόχρονη απεικόνιση των δυνητικών περιοχών μετακίνησης.

Μέρος της χάραξης γειτνιάζει με την μία περιοχή μετακινήσεων (περιοχή B), ενώ ένα δεύτερο διατρέχει την δεύτερη περιοχή μετακινήσεων (περιοχή A).



Εικόνα 13: Χωροθέτηση επιφανειακών μαρτύρων στην περιοχή μελέτης

Χαρτογραφική απεικόνιση των εγκατεστημένων επιφανειακών μαρτύρων, από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες, στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στον χάρτη απεικονίζονται επίσης οι δυνητικές περιοχές μετακινήσεων (με πορτοκαλί χρώμα) όπως προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 14: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες ολίσθησης στην περιοχή μελέτης

Χαρτογραφική απεικόνιση της διαμόρφωσης των ισοπιεζομετρικών καμπυλών των χαλαρών και ολισθημένων υλικών στην περιοχή μελέτης, με έμφαση στις δυνητικές περιοχές μετακινήσεων (με πορτοκαλί χρώμα).



Εικόνα 15: Ισοπιεζομετρικές καμπύλες υποβάθρου περιοχής μελέτης

Χαρτογραφική απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών καμπυλών υποβάθρου στην περιοχή μελέτης, τόσο κατά την διάρκεια όσο και μετά το πέρας της υγρής περιόδου. Στον χάρτη απεικονίζονται και οι περιοχές των εν δυνάμει μετακινήσεων για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της πίεσης στα κατολισθητικά φαινόμενα της περιοχής.



Εικόνα 16: Ισοπαχείς καμπύλες των χαλαρών και ολισθημένων υλικών των υπο μελέτη περιοχών Α και Β

Χαρτογραφική απεικόνιση των ισοπαχών καμπυλών των χαλαρών και ολισθημένων υλικών που ταυτίζονται με τις ευρύτερες περιοχές των εν δυνάμει μετακινήσεων (A & B) (με πορτοκαλί χρώμα) στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 17: Γεωλογικό υπόβαθρο υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης

Χαρτογραφική προβολή με καταγραφή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής κατά την ξηρή περίοδο. Στον χάρτη απεικονίζονται οι δυνητικές περιοχές μετακινήσεων με άμεση απεικόνιση της

επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα.