

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

# Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση ευστάθειας διαμορφωμένων ορυγμάτων οδοποιίας υπό λειτουργία με τη χρήση LiDAR. Εφαρμογή σε τεχνητά πρανή της Εγνατίας Οδού.

ΜΕΝΕΛΑΟΣ ΒΑΚΑΛΟΠΟΥΛΟΣ

AEM:5088

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΜΑΡΙΝΟΣ

# ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ.



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της διπλωματικής εργασίας κύριο Βασίλειο Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή του καθ'όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης, τον κύριο Γεώργιο Παπαθανασίου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ για την βοήθειά του στην εργασία υπαίθρου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εγνατία Οδό Α.Ε. για τη διάθεση όλων των απαραίτητων στοιχείων που αφορούν την περιοχή μελέτης.



Eι	Ευρετήριο Εικόνων		
Eι	υρετήρι	ο Πινάκων	5
Eι	υρετήρι	ο Σχημάτων	7
	Περίλη	ψη	9
1	Εισα	<b>χ</b> γωγή	12
2	2 Κατολισθήσεις		
	2.1 Γενικά		14
	2.2	Ταξινόμηση Κατολισθήσεων	14
	2.3	Αίτια Κατολισθήσεων	17
	2.4	Ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών	18
	2.5	Παρακολούθηση κατολισθήσεων με χρήση LIDAR	21
	2.5.2	L Εισαγωγή	21
	2.5.2	2 Αρχή λειτουργίας	21
	2.5.3	3 Ακρίβεια Μετρήσεων	22
	2.5.4	4 Δημιουργία τρισδιάστατης δομής	22
	2.5.5	5 Χρήση LIDAR στη παρακολούθηση βραχοκαταπτώσεων	24
3	Γεω	λογία Περιοχής Μελέτης	25
	3.1	Γεωτεκτονική θέση	25
	3.2	Λιθοστρωματογραφία	27
	3.3	Μαγματισμός	28
	3.4	Τεκτοορογενετική εξέλιξη	28
	3.4.2	Ι Η λεκάνη του Στρυμώνα	29
	3.5	Γεωλογία Γνευσίου	30
	3.5.2	L Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά Γνευσίων	31
	3.6	Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης	32
	3.7	Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής μελέτης	33
4	Τεχν	/ικογεωλογική αξιολόγηση	36
	4.1	Σύστημα Ταξινόμησης	36
	4.2	Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βραχωδών σχηματισμών	38

Ψηφιακή Βιβλι	ή συλλα <b>Οθή</b> Ι	рућ К <b>Л</b>	
"OEOTP	AT	ΤΟΣ"	_
4.3	Δεδ	δομένα από μητρώα γεωτρήσεων4 Ινίας	0
4.4	Τ.Τεχ	νικογεωλογική Αξιολόγηση Ορυγμάτων4	6
4.	.4.1	Όρυγμα 1	6
4.	.4.2	Όρυγμα 2	.8
4.	.4.3	Όρυγμα 35	0
5 Ν παρούσ	Λεθοδα α εργα	ολογία επεξεργασίας δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων στ σία5	η 2
5.1	Μέ	θοδος επεξεργασίας δεδομένων5	2
5.	.1.1	Εφαρμογή Facets5	2
5.	.1.2	Εφαρμογή Compass5	3
5.2 εφαρ	Επε μογών	εξεργασία και αξιολόγηση Τεκτονικών διαγραμμάτων με τη χρήση τω Facets και Compass που περιέχονται στο λογισμικό Cloud Compare5	۷۷ 3
5.	.2.1	Τεκτονικές μετρήσεις για όρυγμα 15	4
5.	.2.2	Τεκτονικές μετρήσεις για Όρυγμα 36	0
5.3	Σύγ	κριση των μετρήσεων για το Όρυγμα 16	5
5.4	Σύγ	κριση των μετρήσεων για το Όρυγμα 36	5
5.5	Αξιά	ολόγηση των ψηφιακών μετρήσεων στο σύνολο των ορυγμάτων 6	6
6 Π σύνολο	Ιαρουσ των Ορ	είαση αποτελεσμάτων από την ογκομέτρηση βραχωδών τεμαχών στ ουγμάτων	:0 8
6.1	Με	θοδολογία6	8
6.	.1.1	Αστοχίες Ορύγματος 16	8
6.	.1.2	Αστοχίες Ορύγματος 27	0
6.	.1.3	Αστοχίες Ορύγματος 37	1
7 A	νάλυσ	η ευστάθειας για το Όρυγμα 37	4
7.1	1° M	Μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας7	5
7.2	2° M	Μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας7	6
8 Σ	υμπερ	άσματα7	9
Βιβλιο	γραφία	α8	1



Εικόνα 1.1 Οι θέσεις των Ορυγμάτων που μελετήθηκαν στον οδικό	άξονα της
Εγνατίας Οδού στη περιοχή της Ασπροβάλτας	13
Εικόνα 3.1 Περιοχή Μελέτης	30
Εικόνα 4.1 Οι γεωτρήσεις σε σχέση με το Όρυγμα 2 της μελέτης	40
Εικόνα 4.2 Όρυγμα 1	47
Εικόνα 4.3 Όρυγμα 2 (με οριοθετημένη την επιφάνεια της αστοχίας)	49
Εικόνα 4.4 Όρυγμα 3	50
Εικόνα 5.1 Φωτογραφία του Ορύγματος 1	54
Εικόνα 5.2 Φωτογραφία του Ορύγματος 3	60
Εικόνα 7.1 Φωτογραφία της υπο μελέτη σφηνοειδούς ολίσθησης	74



Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)	15
Πίνακας 3.1 Μεγέθη ενδεικτικών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔ	ΟΣ
A.E.)	34
Πίνακας 4.1 Συνοπτική παρουσίαση γεωτρήσεων	41
Πίνακας 4.2 Γεώτρηση ΓΣ1	41
Πίνακας 4.3 Γεώτρηση ΓΣ6	42
Πίνακας 4.4 Γεώτρηση ΓΣ3	42
Πίνακας 4.5 Γεώτρηση ΓΣ4	43
Πίνακας 4.6 Γεώτρηση ΓΣ5	43
Πίνακας 4.7 Γεώτρηση ΓΣ5Α	44
Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών	45
Πίνακας 5.1 Στοιχεία ασυνεχειών από πυξίδα για το Όρυγμα 1	54
Πίνακας 5.2 Τεκτονικές Μετρήσεις Ασυνεχειών με Χρήση εφαρμογής Compass	για
το όρυγμα 1	57
Πίνακας 5.3 Στοιχεία ασυνεχειών από πυξίδα για το Όρυγμα 1	60
Πίνακας 5.4 Τεκτονικές μετρήσεις μέσω Compass για όρυγμα 3	63
Πίνακας 6.1 Μετρήσεις αστοχίας (τριών αναβαθμών) στην αριστερή πλευρά τ	του
Ορύγματος 1 (Σχήμα 7.1)	69
Πίνακας 6.2 Μετρήσεις από μικρή αστοχία στη δεξιά πλευρά του Ορύγματο	ς1
(Σχήμα 7.2)	69
Πίνακας 6.3 Μετρήσεις από το κάτω μέρος της κύριας αστοχίας του Ορύγματο	ς2
(Σχήμα 7.3)	71
Πίνακας 6.4 Μετρήσεις σημαντικής αστοχίας (τριών αναβαθμών) στα δεξιά τ	του
Ορύγματος 3 (Σχήμα 7.4)	72
Πίνακας 6.5 Μεγάλη αστοχία ενός αναβαθμού στο αριστερό μέρος του Ορύγμα	τος
3 (Σχήμα 7.5)	72
Πίνακας 7.1 Αρχικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για χωρίς ποσοστό υδάτ	ων
για το Μοντέλο 1	75
Πίνακας 7.2 Τιμές συντελεστή ασφαλείας με ποσοστό υδάτων 43% για το Μοντέ	έλο
1	75
Πίνακας 7.3 Μηδενικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για ποσοστό υδάτων 4	4%
για το Μοντέλο 1	76
Πίνακας 7.4 Αρχικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για χωρίς ποσοστό υδάτ	ων
για το Μοντέλο 2	77
Πίνακας 7.5 Μεσαίες και οριακές τιμές του συντελεστή ευστάθειας για διάφο	ρα
ποσοστά υδάτων στο Μοντέλο 2	77
Πίνακας 7.6 Μηδενικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για ποσοστό υδάτ	ων
80%-82% για το Μοντέλο 2	78





Σχήμα 2.1Κατάπτωση Βραχών από (Novotný, 2013)16
Σχήμα 2.2 Ανατροπή βράχων από (Novotný, 2013)
Σχήμα 2.3 Επίπεδη ολίσθηση από (Novotný, 2013)
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Mohr από Wyllie& Mah, 2005
Σχήμα 2.5 Ανάλυση ευστάθειας σε ολισθαίνων βραχώδες τέμαχος ( Wyllie&Mah,
2005)
Σχήμα 2.6 Ανάλυση ευστάθειας με την ύπαρξη νερού (Wyllie &Mah, 2005) 20
Σχήμα 2.7 Αρχές λειτουργίας σταθερού LIDAR για την απόκτηση
δεδομένων(Jaboyedoff et al., 2012)
Σχήμα 2.8 Διαφορά μεταξύ ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM) και ψηφιακού
μοντέλου εδάφους (DTM) πηγή: www.charim.net (2017)
Σχήμα 3.1Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Κατά Mountrakis et al. 1983)
με βέλος υποδεικνύεται η περιοχή μελέτης
Σχήμα 3.2 Γεωγραφική θέση των ενοτήτων που αποτελούν τη Σερβομακεδονική
μάζα (Μουντράκης, 2010)
Σχήμα 3.3 Σχηματική τομή του ορίου Σερβομακεδονικής-Ροδόπης όπου φαίνεται η
εφελκυστική τεκτονική της περιοχής (Kilias et al 1999)
Σχήμα 3.4 Υδρολιθολογικός χάρτης Υ.Δ.Α. (GR11, Κοινοπραξία Σχεδιών
Διαχειρησης των λεκανών απορροής ποταμών του Υ.Δ Ανατολικής Μακεδονίας,
2013)
Σχήμα 3.5 Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας (Πηγή: http://portal.tee.gr)
Σχήμα 4.1 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI
Σχήμα 4.2 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI για Γνευσιακές βραχόμαζες
Σχήμα 4.3 Απόκομμα από τον γεωλογικό χάρτη του φύλλου Σταυρός (κλίμακα
1:50.000) όπου με ρόζ χρώμα παρουσιάζονται τα γνευσιακά πετρώματα της
περιοχής και με βέλος υποδεικνύεται η περιοχή της Ασπροβάλτας (Ι.Γ.Μ.Ε.)
Σχήμα 4.4 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 1
Σχήμα 4.5 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 2
Σχήμα 4.6 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 3
Σχήμα 5.1 Το νέφος σημείων που προέκυψε από τις σαρώσεις του LiDAR μετά από
επεξεργασία με το λογισμικό cloud compare για το Όρυγμα 1
Σχήμα 5.2 Δίκτυο Schmidt κύριων ασυνεχειών από μετρήσεις υπαίθρου για
Όρυγμα 1
Σχήμα 5.3 Στερεόγραμμα από την εφαρμογή Facets όπου φαίνεται η κύρια
συγκέντρωση των μετρήσεων στο Όρυγμα 1
Σχήμα 5.4 Πόλοι κύριας συγκέντρωσης μετρήσεων στο όρυγμα 1 από εφαρμογή
Facets

Σχήμα 5.5 Δίκτυο Schmidt των κύριων ασυγεχειών που εξάχθηκαν από Facets για
το Όρυνμα 1
Σχήμα 5.6 Κύρια συγκέντρωση πόλων από μετρήσεις μέσω εφαρμογής Compass
για το ορογμα τη δελατική της μετοάσεις τεκτονικών στοιχείων με χράση της
$2\chi_{1}\mu_{\alpha}$ 3.7 $\Delta \kappa compass via to ćouvia 1$
Σχάμα 5.8 Το νέφος αρμείων που πορέκτυμε από τις σαρώσεις του LiDAR μετά από
$2\chi_{1}$ $\mu_{0}$ 3.8 TO very $\zeta$ of $\mu_{0}$ $\mu_{0}$ $\lambda_{0}$ $\lambda_{0}$ $\mu_{0}$ $\lambda_{0}$
2χημα 5.9 Δικτύο Schmidt κυρίων ασυνεχείων από μετρήσεις υπαιθρού για
OpUγμα 3 $61$
2χημα 5.10 Στερεογραμμα από εφαρμογη Facets όπου φαινεται η κυρια
συγκεντρωση των μετρησεων για ορυγμα 3
Σχημα 5.11 Οι συγκεντρωσεις των πολων που προεκυψαν από τις μετρησεις του
Facets για το Όρυγμα 3
Σχήμα 5.12 Δίκτυο Schmidt που προέκυψε από τις μετρήσεις του Facets για το
όρυγμα 3
Σχήμα 5.13 Κύρια συγκέντρωση πόλων από μετρήσεις μέσω της εφαρμογής
Compass για Όρυγμα 3
Σχήμα 5.14 Δίκτυο Schmidt από τις μετρήσεις που έγιναν με την εφαρμογή
Compass για Όρυγμα 3
Σχήμα 6.1 Σημαντική αστοχία τριών αναβαθμών στην αριστερη πλευρά του
Ορύγματος 1
Σχήμα 6.2 Μικρή αστοχία ενός αναβαθμού στο Όρυγμα 1
Σχήμα 6.3 Το νέφος σημείων (point cloud) το ορύγματος 2
Σχήμα 6.4 Μεγάλος όγκος αστοχίας στο Όρυγμα 2
Σχήμα 6.5 Σημαντική αστοχία τριών αναβαθμών στη δεξιά πλευρά του Ορύγματος
3
Σχήμα 6.6 Μεγάλη αστοχία ενός αναβαθμού στο αριστερό μέρος του Ορύγματος 3
Σχήμα 7.1 Αναπαράσταση της σφήνας που δημιουργείται στο μοντέλο ανάλυσης
ευστάθειας 1
Σχήμα 7.2 Αναπαράσταση της σφήνας που δημιουργείται στο μοντέλο ανάλυσης
ευστάθειας 2 σε σχέση με την πραγματική του εικόνα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Η παρούσα εργασία αφορά τη Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση ευστάθειας διαμορφωμένων ορυγμάτων οδοποιίας υπό λειτουργία με τη χρήση LiDAR σε πρανή του κύριου οδικού άξονα της Εγνατίας Οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν τρία ορύγματα τα οποία είχαν διαμορφωθεί σε γνευσιακά πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας.

Για να εξαχθούν πληροφορίες για την ευστάθεια των Ορυγμάτων και να πραγματοποιηθεί η τεχνικογεωλογική αξιολόγησή τους χρησιμοποιήθηκε συσκευή LiDAR μέσω της οποίας δημιουργήθηκε τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο απεικόνισης του αναγλύφου για κάθε όρυγμα πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες μετρήσεις τεκτονικών και γεωμετρικών στοιχείων με τη χρήση των εφαρμογών Facets και Compass του λογισμικού Cloud compare. Οι μετρήσεις που εξήχθησαν από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου συμπληρώθηκαν από τεκτονικές μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο. Έπειτα από τις μετρήσεις αυτές δημιουργήθηκαν δίκτυα Schmidt για όλα τα ορύγματα από τα οποία αξιολογήθηκε η ευστάθεια τους και συγκρίθηκαν και οι διαφορές και οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων από το πεδίο με αυτές του LiDAR. Τέλος για το όρυγμα 3 πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευστάθειας σε υφιστάμενη αστοχία για να διαπιστωθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες συνέβη.



This thesis concerns the engineering geological evaluation and stability assessment of existing under operation road cuts on the main axis of Egnatia Odos with the use of LiDAR. During the thesis 3 road cuts were studied in Asprovalta district which all were constructed on gneiss geological formations.

In order to obtain all the necessary information for the engineering geological evaluation all the road cuts were scanned with the use of a LIDAR device and three Digital Terrain Models (DTMs) were constructed (one for each road cut) based on the data acquired. Also field engineering geology evaluation took place and tectonic measurements were made in the field.

The DTMs were processed in order to extract structural and geometrical measurements with the use of Cloud compare software and two specialized plug-ins (Facet and Compass). In addition all measurements were compared with the field measurements and some corrections made where needed. As a result tectonic diagrams were created for each one of the road cuts from which their engineering geological condition were evaluated. In the end a slope stability analysis was carried out for the third road cut on an existing failure in order to evaluate the conditions under which it happened.



Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση ευστάθειας διαμορφωμένων ορυγμάτων οδοποιίας υπό λειτουργία με τη χρήση LiDAR. Εφαρμογή σε τεχνητά πρανή της Εγνατίας Οδού.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της ευστάθειας διαμορφωμένων ορυγμάτων με τη χρήση συσκευής LiDAR. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν τρία ορύγματα τα οποία βρίσκονται στον κύριο άξονα της Εγνατίας Οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας και έχουν ανορυχθεί σε περιβάλλον γνευσιακών πετρωμάτων (Εικόνα 1.1).

Η περιοχή της Ασπροβάλτας βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα στο βορειοανατολικό άκρο του νομού Θεσσαλονίκης. Γεωτεκτονικά ανήκει στη Σερβομακεδονική μάζα η οποία στο σύνολο της αποτελείται από ισχυρά μεταμορφωμένα πετρώματα. Συγκεκριμένα στο κομμάτι της υπό μελέτη περιοχής το πέτρωμα που απαντάται είναι αποκλειστικά ο γνεύσιος.

Ο γνεύσιος είναι ένας ισχυρά μεταμορφωμένος γεωλογικός σχηματισμός όπου το πέτρωμα από το οποίο προέρχεται δεν είναι σταθερό αλλά ποικίλλει. Η ορυκτολογική του σύσταση αποτελείται κυρίως από αστρίους, χαλαζία και μαρμαρυγίες και πολλά άλλα δευτερεύοντα ορυκτά. Τεχνικογεωλογικά θεωρείται ως ένα ανθεκτικό γεωυλικό το οποίο ανάλογα με τις συνθήκες τεκτονισμού και αποσάθρωσης που έχει υποστεί μπορεί να παρουσιάζει από πολύ καλά έως πολύ κακά ποιοτικά χαρακτηριστικά που ενίοτε προσεγγίζουν αυτά του εδάφους.

Η μέθοδος που επιλέχτηκε για την μελέτη της παραπάνω περιοχής ήταν μέσω της χρήσης συσκευής LiDAR η οποία αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο τηλεπισκόπησης. Το LiDAR (Light Detection and Ranging) είναι μία συσκευή που αποστέλλει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς για να μετρήσει αποστάσεις στην επιφάνεια της γης. Από αυτούς τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς κατασκευάζεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση της γήινης επιφάνειας η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν τρία τρισδιάστατα μοντέλα απεικόνισης του αναγλύφου, ένα για κάθε όρυγμα που επιλέχθηκε, προκειμένου να μελετηθεί και να αξιολογηθεί η τεχνικογεωλογική κατάσταση και η ευστάθεια των ορυγμάτων. Παράλληλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το LiDAR εμπλουτίστηκαν από επιπλέον δεδομένα που συλλέχτηκαν από εργασία στο πεδίο (τεκτονικές μετρήσεις, φωτογραφίες επί τόπου παρατηρήσεις) και από βιβλιογραφικές πληροφορίες.

Με βάση τα παραπάνω τα ορύγματα ταξινομήθηκαν ως προς τα τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά με χρήση του δείκτη γεωλογικής ταξινόμησης GSI. Από την επεξεργασία των δεδομένων με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού Cloud Compare προέκυψαν τεκτονικά δίκτυα Schmidt μέσω τον οποίων αξιολογήθηκε από γεωμετρική σκοπιά η ευστάθεια των ορυγμάτων. Παράλληλα πάνω στο τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης αναγλύφου μετρήθηκαν οι όγκοι διαφόρων βραχωδών τεμαχών τα οποία είτε έχουν αστοχήσει είτε τείνουν να αστοχήσουν.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ειδικότερη ανάλυση ευστάθειας για μία υφιστάμενη αστοχία στην επιφάνεια του τρίτου ορύγματος τύπου σφηνοειδούς ολίσθησης. Σκοπός αυτής της ανάλυσης ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών (ποσοστό υδάτων) κάτω από τις οποίες συνέβη η συγκεκριμένη αστοχία.

Για την σάρωση των ορυγμάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή LiDAR ILRIS της Optech ιδιοκτησία του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ. Η συσκευή τοποθετήθηκε στο απέναντι ρεύμα από τα προς διερεύνηση ορύγματα και σε όσα υπήρχε η δυνατότητα σε υπερυψωμένη θέση (ορύγματα 2 και 3). Η απόσταση μεταξύ του Ορύγματος 1 και του LiDAR ήταν 36m του Ορύγματος 2 45m και του Ορύγματος 3 31m. Η χωρική ανάλυση που επιλέχθηκε για όλες τις σαρώσεις είναι της τάξεως των 20mm. Σε κάθε όρυγμα πραγματοποιήθηκε μία σάρωση. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία των σαρώσεων ελήφθησαν κάποιες τεκτονικές μετρήσεις από τα βραχώδη ορύγματα (2 και 3) με χρήση γεωλογικής πυξίδας για να μπορεί να γίνει σύγκριση και επαλήθευση των τεκτονικών μετρήσεων που θα εξάγονταν από το νέφος σημείων του LiDAR. Επίσης πάρθηκε μεγάλος αριθμός φωτογραφιών για καλύτερη αποτύπωση της περιοχής και δημιουργία φωτομωσαικών απεικονίσεων με τη χρήση του λογισμικού Agisoft Photoscan.

Τέλος αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα δεδομένα από το αρχείο της Εγνατίας Οδού Α.Ε. για την όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση της γεωλογίας της περιοχής. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούσαν κυρίως αρχεία γεωτρήσεων, γεωλογικές μελέτες και μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας.



Εικόνα 1.1 Οι θέσεις των Ορυγμάτων που μελετήθηκαν στον οδικό άξονα της Εγνατίας Οδού στη περιοχή της Ασπροβάλτας



# 2.1 Γενικά

Σύμφωνα με τους (Cruden and Varnes, 1996) όρος κατολίσθηση περιγράφει μία μεγάλη κατηγορία διεργασιών που έχουν ως αποτέλεσμα την κίνηση των υλικών που σχηματίζουν μία πλαγιά προς τα κατάντη. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι βραχώδη, εδαφικά, τεχνητές επιχώσεις ή ένας συνδυασμός αυτών.

# 2.2 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων

Ο Varnes (1978) δημιούργησε ένα σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων το οποίο διαχωρίζει τους διάφορους τύπους βασιζόμενο σε δύο κριτήρια:

- 1. Το είδος του υλικού που κατολισθαίνει, το οποίο χωρίζεται σε:
  - a. Βραχώδες υπόβαθρο (Bedrock)
  - b. Μηχανικά εδάφη (engineering soils) που διακρίνονται σε κορήματα (debris) και γαίες (earth)
- 2. Τον τύπο της ολίσθησης που συντελείται, οι οποίοι χωρίζονται σε:
  - a. Πτώση (fall)
  - b. Ανατροπή (toppling)
  - c. Ολίσθηση (slide)
  - d. Εξάπλωση (spread)
  - e. Ροή (Flow)

Τύπος κίνησης		Τύπος Μετακινούμενου υλικού			
	70	Βραχώδες	Μηχανικά εδάφη		
		υπόβαθρο	Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα	
Κατά	ιπτωση	Κατάπτωση	Κατάπτωση	Κατάπτωση	
		βράχων	Κορημάτων	Γαιών	
Avo	τροπή	Ανατροπή	Ανατροπή	Ανατροπή	
		βράχων	Κορημάτων	Γαιών	
Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική	Περιστροφική	Περιστροφική	
		Ολίσθηση	Ολίσθηση	Ολίσθηση Γαιών	
		Βραχώδους	Κορημάτων		
		Υποβάθρου			
	Μεταθετική	Μεταθετική	Μεταθετική	Μεταθετική	
		Ολίσθηση	Ολίσθηση	Ολίσθηση Γαιών	
		Βραχώδους	Κορημάτων		
		Υποβάθρου			
Πλευρικι	ἡ Εξάπλωση	Πλευρική	Πλευρική	Πλευρική	
		Εξάπλωση	Εξάπλωση	Εξάπλωση Γαιών	
		Βραχώδους	Κορημάτων		
		Υποβάθρου			
I	Ροή	Ροή	Ροή	Ροή Γαιών	
		βραχώδους	Κορημάτων		
		υποβάθρου			
		(ερπυσμός)			
Σύ	νθετη	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων			

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η κατολίσθηση που μελετάμε συντελείται σε βραχώδες υπόβαθρο και οι τύποι κίνησης που παρατηρούνται είναι οι εξής:

1. Κατάπτωση Βράχων (Rockfall) κατά την οποία τεμάχοι (βράχοι και ογκόλιθοι) αποσπώνται βίαια από την επιφάνεια απότομων βραχωδών πρανών ή πλαγίων. Ο αποχωρισμός του τεμάχους συντελείται πάνω στην επιφάνεια μίας ή περισσότερων ασυνεχειών και η κίνηση συντελείται με ελεύθερη πτώση, αναπήδηση ή κύλιση. Οι καταπτώσεις επηρεάζονται έντονα από τη βαρύτητα, τη μηχανική αποσάθρωση καθώς και τη παρουσία νερού σε ανοιχτές ασυνέχειες (υδροστατικές πιέσεις) (Σχήμα 2.1).

2. Ανατροπή κατά την οποία τεμάχοι ανατρέπονται περιστροφικά προς τα εμπρός εξαιτίας έντονων ασυνεχειών που βυθίζονται με μεγάλη κλίση αντίρροπα στο μέτωπο του πρανούς. Οι δυνάμεις που ωθούν την αστοχία είναι η βαρύτητα και η ύπαρξη νερού μέσα στην ασυνέχεια (Σχήμα 2.2).



3. Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου (επίπεδη ολίσθηση) κατά την οποία ο αποχωρισμός του βραχώδους τεμάχους συντελείται πάνω σε μία κύρια επιφάνεια ολίσθησης. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.1Κατάπτωση Βραχών από (Novotný, 2013)



Σχήμα 2.2 Ανατροπή βράχων από (Novotný, 2013)



Σχήμα 2.3 Επίπεδη ολίσθηση από (Novotný, 2013)

Στη Ορύγματα που μελετήθηκαν οι κύριοι τύποι αστοχίας που απαντήθηκαν και μελετήθηκαν είναι η επίπεδη ολίσθηση και η σφηνοειδής ολίσθηση η οποία αποτελεί μία υποκατηγορία της επίπεδης ολίσθησης.

# 2.3 Αίτια Κατολισθήσεων

Σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών (USGS) τα αίτια των κατολισθήσεων διαχωρίζονται και ταξινομούνται ως εξής (Highland, 2004):

#### 1. Γεωλογικά Αίτια:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- a. Υλικό ευαίσθητο ή χαμηλής αντοχής
- b. Διαβρωμένο υλικό
- c. Διατμημένο πτυχωμένο ή αποδιοργανωμένο (ασύνδετο) υλικό
- d. Δυσμενής προσανατολισμός ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, επιφάνεια ρήγματος, επιφάνεια επαφής κ.τ.λ.)
- e. Αντίθεση ανάμεσα στη διαπερατότητα και τη σκληρότητα του υλικού

# 2. Γεωμορφολογικά Αίτια

- a. Τεκτονική ή ηφαιστειακή ανύψωση
- b. Μετά-παγετώδης ανύψωση
- C. Ποτάμια, θαλάσσια (κυματική) ή παγετώδης διάβρωση στο πόδι του πρανούς
- d. Υπόγεια διάβρωση
- e. Απόθεση φορτίου στο φρύδι του πρανούς
- f. Αφαίρεση βλάστησης (από φωτιά ή ξηρασία)
- g. Παγόλυση
- h. Αποσάθρωση από πάγωμα-ξεπάγωμα εδαφών
- i. Αποσάθρωση από συρρίκνωση-διόγκωση εδαφών

# 3. Ανθρωπογενή Αίτια

- Εκσκαφή του πρανούς
- b. Εναπόθεση φορτίου στο φρύδι του πρανούς
- c. Απότομη μείωση της στάθμης ταμιευτήρων φραγμάτων
- d. Αποψίλωση δασών
- e. Μετανάστευση
- f. Εξορύξεις
- g. Τεχνητές Δονήσεις
- h. Διαρροές νερού από εγκαταστάσεις

Στα υπό μελέτη ορύγματα τα αίτια που οδήγησαν στη δημιουργία αστοχιών είναι κυρίως γεωλογικά και σχετίζονται με την ευαισθησία του υλικού, το επίπεδο της διάβρωσης του, τον δυσμενή προσανατολισμό ορισμένων ασυνεχειών καθώς και τη χαμηλή διαπερατότητά των σχηματισμών.

#### 2.4 Ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ευστάθεια των βραχωδών πρανών εξαρτάται από τη διατμητική δύναμη που ασκείται πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Για όλους τους τύπους διατμητικής αστοχίας τα βραχώδη τεμάχοι μπορούν να αντιμετωπίζονται ως υλικό Mohr-Coulomb όπου η διατμητική τάση εκφράζεται ως συνάρτηση της συνοχής c και της γωνίας τριβής  $\varphi$ . Για μία επιφάνεια ολίσθησης στην οποία ασκείται μία ενεργή τάση  $\sigma'$  (ως ενεργή τάση ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ολικής τάσης  $\sigma$  και της πίεσης πόρων u,  $\sigma'=\sigma$ -u) η διατμητική τάση  $\tau$  που αναπτύσσεται στην επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

τ = c + σ'tanφ Εξίσωση 1

Η συγκεκριμένη σχέση εκφράζεται γραφικά ως γραμμική συνάρτηση μεταξύ της δατμητικής και της ενεργής τάσης Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Mohr από *Wyllie& Mah, 2005*.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Mohr από Wyllie& Mah, 2005

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας απαιτείται η ανάλυση των δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης σε παράλληλες και κάθετες συνιστώσες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Αν η γωνία βύθισης του υπό μελέτη τεμάχους ορίζεται ως ψ<sub>p</sub>, το εμβαδόν του ως Α και το βάρος του ως W τότε η διατμητική τάση **r** και η ολική τάση **σ** δίνονται από τις σχέσεις:

$$oldsymbol{\sigma} = rac{W cos \psi_p}{A}$$
 Εξίσωση 2

$${m au}_s = rac{Wsin \psi_p}{A}$$
 Εξίσωση 3

Επίσης η  $\tau = c + \sigma' tan \phi$  Εξίσωση 1 μπορεί να εκφραστεί ως:



 $au_{s}A = Wsin \psi_{p}$  Εξίσωση 5 $au A = cA + Wcos \psi_{n} tan arphi$  Εξίσωση 6

Ο συντελεστής ευστάθειας ορίζεται από τη σχέση:

Οι δυνάμεις που ωθούν την ολίσθηση του βραχώδους τεμάχους υπολογίζονται από την  $\tau sA = Wsin\psi_p$  Εξίσωση 5 ενώ οι δυνάμεις που συγκρατούν την ολίσθηση υπολογίζονται από τη  $\tau A = cA + Wcos\psi_p tan\phi$  Εξίσωση 6. Άρα ο συντελεστής ευστάθειας μπορεί να οριστεί ως:

$$FS = \frac{cA + Wcos\psi_p tan\varphi}{Wsin\psi_p}$$

Σε περίπτωση που στο υπό μελέτη τέμαχος παρατηρούνται εφελκυστικές ρωγμές πρέπει να υπολογιστούν και οι δυνάμεις που ασκεί το νερό, δηλαδή οι υδροστατικές πιέσεις *V* και οι πιέσεις πόρων *U*. Αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V=rac{1}{2} oldsymbol{\gamma}_W \, oldsymbol{h}_W^2$$
 Εξίσωση 7 $U=rac{1}{2} oldsymbol{\gamma}_W oldsymbol{h}_W A$  Εξίσωση 8

Όπου γ<sub>w</sub> είναι το μοναδιαίο βάρος του νερού και h<sub>w</sub> το ύψος της υδάτινης στήλης μέσα στην εφελκυστική ρωγμή. Οπότε επειδή το νερό δρα ως υδροστατική πίεση *V* στη εφελκυστική ρωγμή και ως πίεση πόρων *U* στην επιφάνεια ολίσθησης ο συντελεστής ασφαλείας μετασχηματίζεται ως εξής (Σχήμα 2.6):

$$FS = \frac{cA + (Wcos\psi_p - U - Vsin\psi_p)tan\varphi}{Wsin\psi_p + Vcos\psi_p}$$

Η ευστάθεια ενός βραχώδους τεμάχους εξαρτάται από την αναλογία των δυνάμεων που συγκρατούν την ολίσθηση σχετικά με αυτές που ωθούν προς αυτή. Αν ο αριθμός των δυνάμεων που συγκρατούν την ολίσθηση είναι μεγαλύτερος από αυτές που την ωθούν τότε ο συντελεστής ευστάθειας είναι μεγαλύτερος της μονάδας (FS>1) και επιτυγχάνεται η ευστάθεια. Όταν οι δυνάμεις που ωθούν την ολίσθηση είναι μεγαλύτερες αριθμητικά σε σχέση με αυτές που συγκρατούν τότε ο συντελεστής ευστάθειας είναι μικρότερος της μονάδας και FS<1) και το τέμαχος κινδυνεύει να καταρρεύσει. Στη περίπτωση που ο συντελεστής ευστάθειας ισούται με τη μονάδα (FS=1) τότε θεωρείται ότι επιτυγχάνεται οριακή ευστάθεια (Hoek, 2007).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.5 Ανάλυση ευστάθειας σε ολισθαίνων βραχώδες τέμαχος (Wyllie&Mah, 2005)



Σχήμα 2.6 Ανάλυση ευστάθειας με την ύπαρξη νερού (Wyllie & Mah, 2005)

# 2.5 Παρακολούθηση κατολισθήσεων με χρήση LIDAR

# 2.5.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ονομασία LIDAR προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Detection And Ranging και πρόκειται για μία συσκευή η οποία εκπέμπει μία ευθεία, παραλληλισμένη, συνεκτική και καθορισμένης φάσης δέσμη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Jaboyedoff *et al.*, 2012). Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται στη καταγραφή μεγάλων ποσοτήτων τρισδιάστατης πληροφορίας με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό.

Η καταγραφή των δεδομένων μπορεί να γίνει είτε επίγεια είτε από ψηλά με τη χρήση ιπτάμενων μέσων γι' αυτό και οι συσκευές LIDAR χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα αερομεταφερόμενα ALS (Aerial Laser Scanner) και τα σταθερά TLS (Terrestrial Laser Scanner). Στη παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τα σταθερά (TLS) (Σχήμα 2.7).





#### 2.5.2 Αρχή λειτουργίας

Η συσκευή LIDAR αποτελείται από ένα πομπό/δέκτη δέσμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (laser) και μία συσκευή σάρωσης (scanning device). Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόστασης: η μέθοδος μέτρησης φάσης και η μέθοδος μέτρησης παλμών. Η πρώτη έχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά μπορεί να καλύψει περιορισμένη απόσταση ενώ η δεύτερη καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις γι' αυτό και χρησιμοποιείται κατά κόρον στις γεωεπιστήμες (Jaboyedoff et al., 2012).

Όλες οι συσκευές LIDAR αποστέλλουν ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς και λαμβάνουν ανακλάσεις από τις επιφάνειες διαφόρων επιφανειών. Η μετρούμενη απόσταση μεταξύ του πομπού και της επιφάνειας ανάκλασης(*d*) υπολογίζεται από το χρόνο που απαιτείται από τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό να διανύσει τη

συγκεκριμένη απόσταση πολλαπλασιαζόμενο με τη ταχύτητα του φωτός (c)και όλο διαιρούμενο με 2 ή αλλιώς:

$$d = \frac{c \times \Delta t}{2}$$

Στη συνέχεια γνωρίζοντας τις συντεταγμένες (x, y, z) και τον προσανατολισμό σάρωσης της συσκευής LIDAR υπολογίζονται συντεταγμένες της μετρούμενης επιφάνειας. Οι ακριβείς συντεταγμένες της τοποθεσίας σάρωσης δίνονται από συσκευή GPS που υπάρχει συνήθως εγκατεστημένη στη συσκευή LIDAR. Οι συντεταγμένες των σημείων της μετρούμενης επιφάνειας υπολογίζονται ως εξής (x+Δx, y+ Δy, z+Δz), όπου Δx, Δy, Δz η απόσταση του εκάστοτε σημείου από τη τοποθεσία της συσκευή, με ακρίβεια της τάξεως των 1.5cm.

Η πλειοψηφία των LIDAR λαμβάνει από το δέκτη τη πλήρη κυματομορφή των ανακλώμενων παλμών η οποία παρέχει πληροφορίες για τη σύνθεση της επιφάνειας ανάκλασης. Είναι εφικτό να απομονωθεί ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών από αυτή την κυματομορφή έτσι ώστε να φιλτραριστούν/διαχωριστούν ανακλάσεις από ανεπιθύμητα αντικείμενα (βλάστηση, πουλιά, ανθρώπινες κατασκευές κ.α.) και να παραμείνει μόνο το εύρος των ανακλάσεων που θεωρείται χρήσιμο για τη μελέτη. Στη παρακολούθηση κατολισθήσεων ο τελευταίος παλμός είναι συνήθως και ο επιθυμητός γιατί απεικονίζει την ανάκλαση του εδαφικού ανάγλυφου απαλλαγμένο από τη βλάστηση και άλλα ανεπιθύμητα αντικείμενα. Ωστόσο, εάν η βλάστηση είναι πολύ πυκνή και το πάχος της μεγάλο το κύμα δε θα φτάσει ποτέ στην επιφάνεια του εδάφους.

#### 2.5.3 Ακρίβεια Μετρήσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

А.П.С

Η μέση τυπική ακρίβεια των συσκευών LIDAR είναι ±1.5 cm με μέγιστη απόσταση από την επιφάνεια σάρωσης 800-1000 m. Βέβαια αν στη περιοχή παρακολούθησης επικρατούν μη ευνοϊκές συνθήκες όπως επιφάνειες χαμηλής ανάκλασης, πολύ τραχείες επιφάνειες, παράλληλες γωνίες πρόσπτωσης και κακές καιρικές συνθήκες (βροχή, ομίχλη) η ακρίβεια μειώνεται.

Η πυκνότητα των σημείων μέτρησης για τα σταθερά LIDAR (TLS) κυμαίνεται από 50 ως 10.000 pts/m<sup>2</sup>. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του υλικού (χρώμα, τραχύτητα, ικανότητα ανάκλασης), την υγρασία του εδάφους, τη γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος της δέσμης.

# 2.5.4 Δημιουργία τρισδιάστατης δομής

Η διαδικασία της δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου απεικόνισης ξεκινάει με τη σύνθεση ενός νέφους σημείων (point cloud). Κάθε σημείο περιέχει μία μεταβλητή με πληροφορία για το σχετικό υψόμετρο του στο νέφος (Mcinerney, Kempeneers, & Data,). Η σύνθεση του νέφους γίνεται ως εξής: αρχικά μία οπτική αναγνώριση και ομαδοποίηση των ομόλογων σημείων και στη συνέχεια μία επαναληπτική διαδικασία ευθυγράμμισης και βελτιστοποίησης των σημείων αυτών (Jaboyedoff et al., 2012).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (Digital Elevation Model) ή DEM. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει γενικά μία οποιαδήποτε τρισδιάστατη απεικόνιση σε μορφή κανάβου (raster format), κάτι που επιτρέπει τη περαιτέρω επεξεργασία της δομής αυτής με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

Η διαδικασία της δημιουργίας ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (DEM) εμπεριέχει τις διεργασίες του φιλτραρίσματος και της παρεμβολής (filtering and interpolation). Το φιλτράρισμα αφαιρεί τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις, π.χ. για τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Terrain Model) DTM απαιτούνται μόνο οι ανακλάσεις από το έδαφος άρα οι υπόλοιπες πρέπει να φιλτράρονται. Αντιστρόφως, για ένα ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (Digital Surface Model) DSM οι ανακλάσεις του εδάφους είναι αυτές που πρέπει να φιλτράρονται (Σχήμα 2.8). Από την άλλη διεργασία της παρεμβολής είναι απαραίτητη για να γεμίζει τα κελιά του κανάβου που δεν έχουν κάποια επιστροφή σήματος (Mcinerney, Kempeneers and Data, no date).

Η διαδικασία αυτή έρχεται εις πέρας με τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων και λογισμικών που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική και επεξεργαστική ισχύ από πλευράς ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 2.8 Διαφορά μεταξύ ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM) και ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) πηγή: <u>www.charim.net</u> (2017)

#### 2.5.5 Χρήση LIDAR στη παρακολούθηση βραχοκαταπτώσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η χρήση τόσο σταθερών όσο και αερομεταφερόμενων LIDAR στη μελέτη βραχωδών πρανών έχει συνεισφέρει πολλά στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση φαινομένων βραχοκαταπτώσεων. Η ευστάθεια των ορυγμάτων αυτών εξαρτάται από δομές, όπως ασυνέχειες, διακλάσεις, επιφάνειες σχιστότητας, στρώσης ρηγμάτων, που αποτελούν πιθανές επιφάνειες ολίσθησης και μπορεί να έχουν μεγάλη εξάπλωση στο χώρο και κοινό προσανατολισμό.

Με τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM) από τα δεδομένα του LIDAR και τη χρήση κατάλληλων λογισμικών αυτές οι δομές μπορούν να εντοπιστούν και να εξακριβωθεί η γεωγραφική τους εξάπλωση και ο προσανατολισμός τους με πολύ μεγάλη ακρίβεια ,της τάξεως μερικών εκατοστών, για μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση.



# 3.1 Γεωτεκτονική θέση

Σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις ο ελληνικός χώρος χωρίζεται σε 12 γεωτεκτονικές ζώνες οι οποίες αναφέρονται παρακάτω από τα ανατολικά προς τα δυτικά:

- 1. Η μάζα της Ροδόπης (Rh)
- 2. Η Σερβομακεδονική μάζα (Sm)
- 3. Η Περιροδοπική ζώνη (CR)
- 4. Η ζώνη Αξιού (Ax)
- 5. Η Πελαγονική ζώνη (Pl)
- 6. Η Αττικό-Κυκλαδική ζώνη (ΑC)
- 7. Η Υποπελαγονική ζώνη (Sp)
- 8. Η ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας (Pk)
- 9. Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου (Ρ)
- 10. Η ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης (G)
- 11. Η Αδριατικοιόνιος ζώνη (Ι)
- 12. Η ζώνη Παξών ή Προαπούλια (Px)



Σχήμα 3.1Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Κατά Mountrakis et al. 1983) με βέλος υποδεικνύεται η περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην μάζα της Σερβομακεδονικής (Σχήμα 3.1) η οποία εκτείνεται δυτικά του ποταμού Στρυμώνα, ο οποίος αποτελεί το ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής με τη μάζα της Ροδόπης, έως το ασαφές όριο Σερβομακεδονικής-Περιροδοπικής ζώνης στα δυτικά το οποίο τοποθετείται ως μία νοητή γραμμή από τα σύνορα Ελλάδας-Σκοπίων μέχρι ανατολικά του κορμού της χερσονήσου της Σιθωνίας.

Η Σερβομακεδονική μάζα μαζί με αυτή της Ροδόπης θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν ηπειρωτικό φλοιό πιθανόν τμήμα της Ευρασίας. Τα πετρώματα από τα οποία αποτελούνται και οι δύο μάζες είναι αποκλειστικά κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή (Μουντράκης, 2010).



- 1. Ενότητα Κερδυλλίων: που θεωρείται η κατώτερη και αρχαιότερη ενότητα
- 2. Ενότητα Βερτίσκου: που θεωρείται η ανώτερη και νεώτερη ενότητα



Σχήμα 3.2 Γεωγραφική θέση των ενοτήτων που αποτελούν τη Σερβομακεδονική μάζα (Μουντράκης, 2010)

Η ενότητα Κερδυλλίων ,στην οποία βρίσκεται και η περιοχή μελέτης (Σχήμα 3.2), εκτείνεται μεταξύ των εκβολών του ποταμού Στρυμώνα και του Στρατωνίου Χαλκιδικής. Το πάχος της κυμαίνεται περίπου στα 3000m και τα πετρώματά της θεωρείται ότι αποτελούν τα βαθύτερα πετρώματα της Ελλάδας. Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται είναι μιγματιτικοί βιοτιτικοί γνεύσιοι, γρανατούχοι διμαρμαρυγιακοί γνεύσιοι, αμφιβολίτες, αμφιβολιτιωμένοι εκλογίτες και μάρμαρα. Πιο αναλυτικά οι λιθολογικές εναλλαγές της ενότητας Κερδυλλίων από τις ανώτερες στις κατώτερες είναι (Μουντράκης, 2010):

1. Ορίζοντας ανώτερου μαρμάρου πάχους 30-300m με παρεμβολές βιοτιτικών γνευσίων, βιοτιτικών-κεροστιλβικών γνευσίων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, επιδοτιτικών-ακτινολιθικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών.



- Ορίζοντας ενδιάμεσου μαρμάρου πάχους 10-200m με παρεμβολές αμφιβολιτικών γνεύσιων.
- 4. Ορίζοντας βιοτιτικών γνευσίων πάχους 100m, με παρεμβολές αμφιβολιτών και ασβεστοπυριτικών πετρωμάτων.
- 5. Ορίζοντας κατώτερου μαρμάρου πάχους 150m.
- 6. Ορίζοντας βιοτιτικών γνευσίων πάχους περίπου 700m αποτελούμενος από μιγματιτικούς γνευσίους και ορθοαμφιβολίτες.

# 3.3 Μαγματισμός

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Μεγάλοι όγκοι πυριγενών πετρωμάτων διεισδύουν μέσα στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας οι οποίοι προέρχονται από διάφορες εκδηλώσεις μαγματισμού κατά τη γεωλογική ιστορία. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται τρεις εκδηλώσεις μαγματισμού η πρώτη συνέβη κατά την Ερκύνια ορογένεση στο Α. Παλαιοζωικό (~300m.y) και ήταν γρανιτικής σύστασης. Η επόμενη συνέβη κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού (212-135 m.y). Ενώ η τελευταία θεωρείται μετα-ορογενετική έλαβε χώρα κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο (60-25 m.y) και η σύστασή της θεωρείται όξινη πλουτωνική.

# 3.4 Τεκτοορογενετική εξέλιξη

Η Σερβομακεδονική μάζα έχει δεχτεί την επίδραση πολλών τεκτονικών γεγονότων τα οποία διαμόρφωσαν τη σημερινή της μορφή.

Ως πρώτο κύριο τεκτονικό γεγονός θεωρείται μια προ-Άνω Παλαιοζωική φάση κατά την οποία πτυχώθηκαν και μεταμορφώθηκαν τα πετρώματα της Σερβομακεδονικής. Το επόμενο τεκτονικό γεγονός συνέβη κατά την Ερκύνια ορογένεση (~300m.y) και συνδέεται με ισοκλινείς πτυχές με διεύθυνση βύθισης προς το βορά. Κατά το Ιουρασικό έλαβε χώρα μία δεύτερη φάση πτύχωσης με ισοκλινείς πτυχές με άξονες ΒΔ-ΝΑ που δημιούργησε και τη κύρια σχιστότητα της Σερβομακεδονικής. Με το πέρας του Κρητιδικού έλαβε χώρα η Τριτογενής Αλπική πτύχωση αποτέλεσμα της τελικής ηπειρωτικής πτύχωσης Απουλίας-Ευρασίας δημιουργώντας μεγάλου μήκους λεπιώσεις, επωθήσεις και αναστροφές στρωμάτων. Τέλος κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο μέχρι και κ. Μειόκαινο παρατηρείται έντονη εφελκυστική τεκτονική με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Αποτέλεσμα της Ροδόπης ως μεταμορφικός πυρήνας (metamorphic core complex) (Kilias et al 1999) όπως επίσης και η δημιουργία της λεκάνης του Στρυμώνα κατά τη περίοδο Μειοκαίνου-Πλειοκαίνου από κανονικά ρήγματα μεσαίων και μεγάλων κλίσεων.

#### 3.4.1 Η λεκάνη του Στρυμώνα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πρόκειται για μία τεκτονική λεκάνη με διεύθυνση BBΔ-NNA με πάχος ιζημάτων ~3000m όπου η δημιουργία της θεωρείται αποτέλεσμα της εφελκυστικής τεκτονικής του Τριτογενούς. Πιο συγκεκριμένα κατά τη περίοδο Μειόκαινου-Πλειόκαινου υπήρξε μια μεταβολή στη τεκτονική από ημι-πλαστική (semi-ductile) σε θραυσιγενής (brittle) με έντονη κινητικότητα προς τα NΔ η οποία δημιούργησε τη τεκτονική γραμμή Στρυμώνα το όριο δηλαδή μεταξύ των μαζών Ροδόπης και Σερβομακεδονικής το οποίο πληρώθηκε με τα ανάλογα ιζήματα. Αναλυτικότερα η ιζηματογένεση άρχισε στο Μέσο Μειόκαινο με ποταμοχειμάρια ιζήματα, ακολούθησε μία φάση θαλάσσιας ιζηματογένεσης τη περίοδο Μειοκαίνου-Κατώτερου Πλειοκαίνου η οποία μεταβλήθηκε σε λιμναία κατά το Πλειόκαινο και η ιζηματογένεση τελείωσε με απόθεση χερσαίων ιζημάτων κατά το Πλειστόκαινο.



Σχήμα 3.3 Σχηματική τομή του ορίου Σερβομακεδονικής-Ροδόπης όπου φαίνεται η εφελκυστική τεκτονική της περιοχής (Kilias et al 1999)



Εικόνα 3.1 Περιοχή Μελέτης

# 3.5 Γεωλογία Γνευσίου

Η περιοχή όπου διεξάγεται η παρούσα μελέτη αποτελείται αποκλειστικά από Γνευσιακά πετρώματα.

Με τον όρο Γνεύσιοι περιγράφονται πετρώματα συμπαγή, κοκκώδη, με ατελή σχιστότητα, μεσόκοκκα ή κάποιες φορές και αδρόκοκκα πλούσια σε αστρίους, κάποιες φορές χαλαζία και επί των πλείστον σε μαρμαρυγίες. Επίσης συνήθως στη σύστασή τους περιλαμβάνεται πλήθος ορυκτών όπως: κεροστίλβη, γρανάτης, επίδοτο, σταυρόλιθος, ανδαλουσίτης, κυανίνης και διάφορα άλλα. Η σύσταση της πλειοψηφίας των Γνευσίων είναι γρανιτική ή γρανοδιοριτικοί μπορεί όμως να είναι και διοριτική ή ακόμα και γαββρική. Ο όρος γνεύσιος αναφέρεται κυρίως στα μακρο-ιστολογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και πολύ λιγότερο στα ορυκτολογικά (Δημητριάδης, 1988).

Τα γνευσιακά πετρώματα είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τη μακροσκοπική κατανομή, τη διάταξη, και το σχετικό μέγεθος των κόκκων. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Στρωματώδεις Γνεύσιοι: έχουν τυπική μακροσκοπική γνευσιακή υφή με κατά στρώματα κατανομή των συστατικών τους.

- Οφθαλμώδεις ή φακοειδείς Γνεύσιοι: κυριαρχούνται από τη παρουσία φακοειδών συγκεντρώσεων αστρίων ή χαλαζία.
  - **3. Γρανιτικοί Γνεύσιοι**: έχουν ομογενή όψη και μοιάζουν στην όψη με γρανιτικά πετρώματα από τα οποία προέρχονται κιόλας.
  - Μιγματιτικοί Γνεύσιοι: χαρακτηρίζονται από την παρουσία ακανόνιστων φλεβικών ή μαζωδών συγκεντρώσεων λευκογρανιτικού, πηγματιτικού ή απλιτικού υλικού.

#### 3.5.1 Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά Γνευσίων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα γνευσιακά πετρώματα χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες διακυμάνσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Αυτά εξαρτώνται κυρίως από την τεκτονική καταπόνηση που έχουν δεχτεί και από το βαθμό της αποσάθρωσής τους. Τα αρχικά τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά χαρακτηρίζονται ως υψηλά, έτσι μία άθικτη γνευσιακή βραχόμαζα μπορεί να παρουσιάζει αντοχές σε μονοαξονική θλίψη που ξεπερνούν τα 250 MPa (σ<sub>ci</sub>>250 MPa) (Μαρίνος, 2016).

Ωστόσο, γνευσιακές βραχόμαζες που βρίσκονται σε περιβάλλοντα έντονου τεκτονισμού μπορεί να παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Τέτοιες βραχόμαζες απαντώνται σε περιβάλλοντα που έχουν υποστεί έντονες τεκτονικές διεργασίες για μεγάλες γεωλογικές περιόδους, όπως ακριβώς και η Σερβομακεδονική μάζα οι γνευσιακοί σχηματισμοί της οποίας μελετήθηκαν ενδελεχώς κατά την κατασκευή των σηράγγων της Εγνατίας Οδού. Σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα ευνοείται η διάβρωση των γνευσιακών σχηματισμών η οποία δε συναντάται μόνο στα επιφανειακά στρώματα αλλά σε όλο το βάθος του σχηματισμού με ένταση που ποικίλει.

Η πολυπλοκότητα των γνευσιακών σχηματισμών σε περιβάλλοντα με έντονο τεκτονισμό έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι έχουν υποστεί έντονη διάβρωση λόγω της οποίας έχουν εξαλλοιωθεί τα αστριούχα ορυκτά των σχηματισμών σε αργιλικά και σε συνδυασμό με την έντονη ρωγμάτωση που έχουν υποστεί έχουν δημιουργήσει πλήθος από επιφάνειες ασυνεχειών χωρίς σταθερό προσανατολισμό οι οποίες είναι πληρωμένες με αυτά τα αργιλικά υλικά. Συγκεκριμένα σε ζώνες διάτμησης που έχουν υποστεί έντονη θραυσιγενή τεκτονική μπορεί να σχηματιστούν ζώνες αποσαθρωμένου υλικού με πάνω από 10m πάχος πληρωμένες με αργιλο-αμμώδη υλικά. Επιπλέον, τα γνευσιακά πετρώματα μπορούν να παραμορφωθούν και πλαστικά όταν η αρχική τους δομή είναι σχιστώδης και βρεθούν σε περιβάλλον πολύ υψηλών πιέσεων (τέτοιες δομές έχουν συναντηθεί στις σήραγγες στη βάση των Άλπεων).

Συμπερασματικά, η έντονη ετερογένεια που παρουσιάζουν τα γνευσιακά πετρώματα οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της εξαλλοίωσης των περιεχόμενων αστριούχων ορυκτών εξαιτίας του φαινομένου της διάβρωσης σε συνδυασμό με την τεκτονική καταπόνηση που έχουν δεχτεί. Ο συνδυασμός των δύο αυτών παραγόντων μπορεί να οδηγήσει γνευσιακές βραχόμαζες με πολύ υψηλά αρχικά μηχανικά χαρακτηριστικά σε πολύ φτωχά δημιουργώντας μεγάλα προβλήματα σε τεχνικά έργα που λαμβάνουν χώρα σε αυτά τα περιβάλλοντα (Marinos, 2010).

# 3.6 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η περιοχή που μελετάμε βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Μακεδονίας (GR11). Οι υδροφόροι ορίζοντες που αναπτύσσονται στη περιοχή αυτή διακρίνονται στις εξής κατηγορίες σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ανατολικής Μακεδονίας (GR11, Κοινοπραξία Σχεδιών Διαχειρησης των λεκανών απορροής ποταμών του Υ.Δ Ανατολικής Μακεδονίας, 2013):

- Προσχωματικά υδροφόρα συστήματα: Υδροφόροι κοκκωδών σχηματισμών που αναπτύσσονται σε Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις με μεγάλα πάχη.
- Καρστικά υδροφόρα συστήματα: που σχηματίζονται στα μάρμαρα και τους ασβεστόλιθους των ορεινών όγκων του Αγκίστρου, του Μενοικίου, του Παγγαίου και του Φαλακρού
- 3. Υδροφόροι συνεκτικών σχηματισμών: οι οποίοι σχηματίζονται στα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα του υδατικού διαμερίσματος και χαρακτηρίζονται από μικρή υδροπερατότητα. Μόνο τοπικά σε σημεία έντονα τεκτονισμένα και κερματισμένα παρατηρείται δημιουργία υπόγειας υδροφορίας. Η δυναμικότητα των συγκεκριμένων υδροφόρων θεωρείται μικρή ως μέτρια. Ο συντελεστής κατείσδυσης των μεταμορφωμένων και πυριγενών πετρωμάτων υπολογίζεται περίπου στο 3-8%. Αυτού του είδους την υδροφορία συναντάμε και στη περιοχή διεξαγωγής της παρούσας μελέτης όπως φαίνεται και από τον χάρτη στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 Υδρολιθολογικός χάρτης Υ.Δ.Α. (GR11, Κοινοπραξία Σχεδιών Διαχειρησης των λεκανών απορροής ποταμών του Υ.Δ Ανατολικής Μακεδονίας, 2013)

Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τα υδρογεωλογικά στοιχεία της Εγνατίας Οδού Α.Ε. για λογαριασμό του έργου Ασπροβάλτα-Στρυμώνας (11.2-11.3) Σήραγγα C&C2, το οποίο βρίσκεται εξαιρετικά κοντά στη περιοχή που μελετάμε, η υδρογεωλογική συμπεριφορά των πετρωμάτων που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή εξαρτάται από τη λιθολογική τους σύσταση, τη κοκκομετρία τους, τον τεκτονισμό τους και το βαθμό αποσάθρωσής τους.

Ανεξάρτητα των παραπάνω συνθηκών το κρυσταλλοσχιστώδες των Κερδυλλίων συμπεριφέρεται γενικά ως αδιαπέρατος σχηματισμός. Εξαίρεση αποτελούν μόνο οι λεπτοπλακώδεις ενστρώσεις μαρμάρων που εμφανίζονται κατά θέσεις. Στις επαφές μεταξύ μαρμάρων-γνευσίων αναμένεται πιθανή μικρή εποχιακή κυκλοφορία ή συσσώρευση ύδατος η οποία όμως στη θέση του αναφερόμενου έργου δεν προκαλεί προβλήματα λόγω της μικρής έκτασης των μαρμάρων.

Επίσης αναφέρεται ότι σε γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη θέση του έργου την περίοδο Μαΐου-Ιουνίου 1999 σημειώθηκε απουσία υδροφορίας.

# 3.7 Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής μελέτης

Ο Ελληνικός χώρος κατανέμεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας. Οι τιμές εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού είναι 0,16g (ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g) για την πρώτη ζώνη, 0,24g για τη δεύτερη ζώνη και 0,36g για την τρίτη ζώνη. Η περιοχή όπου διεξάγεται η παρούσα μελέτη βρίσκεται στη δεύτερη ζώνη όπως φαίνεται και στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (Σχήμα 3.5) όπου η τιμή σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους είναι 0,24g και η πιθανότητα υπέρβασης αυτού 10% στα 50 έτη.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επίσης σύμφωνα με τη μελέτη σεισμικότητας της Εγνατίας Οδού Α.Ε. για λογαριασμό του έργου Ασπροβάλτα-Στρυμόνας (11.2-11.3)-Σήραγγα C&C2, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή μελέτης, η περιοχή της Ασπροβάλτας η οποία γεωτεκτονικά ανήκει στην Σερβομακεδονική μάζα βρίσκεται στη πιο ενεργή ζώνη της βόρειας Ελλάδας. Στον Πίνακας 3.1 παρουσιάζονται σεισμοί μεγέθους M<sub>s</sub> >4.5 που έγιναν κατά το χρονικό διάστημα 1900-1985 με επικεντρική απόσταση από την περιοχή μικρότερη από 120 km. Από τη μικροσεισμική μελέτη προκύπτει ότι η μέση περίοδος επανάληψης των σεισμών που γίνονται αισθητοί στη περιοχή και προκαλούν μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μεγαλύτερη από 0.15g είναι 33 χρόνια.

Χρονολογία	Μέγεθος σεισμού Μ₅	Τοποθεσία
1902	6.6	Άσσηρος
1931	6.7	Valandovo
1932	7.0	Ιερισσός
1932	6.2	Σοχός
1932	6.2	Σοχός
1978	6.5	Στίβος

Πίνακας 3.1 Μεγέθη ενδεικτικών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.)



Σχήμα 3.5 Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας (Πηγή: http://portal.tee.gr)

35


## 4.1 Σύστημα Ταξινόμησης

Στη παρούσα εργασία για την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των βραχωδών σχηματισμών χρησιμοποιείται το σύστημα ταξινόμησης, δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI (Geological Strength Index) (Marinos and Hoek, 2001) το οποίο βασίζεται στη περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών μέσω ενός αριθμητικού συστήματος βαθμονόμησης (Σχήμα 4.1). Τονίζεται ότι το σύστημα αξιολόγησης GSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον χαρακτηρισμό βραχωδών υλικών (όχι εδαφικών) και αφορά βραχόμαζες που τείνουν να αστοχήσουν ισότροπα δηλαδή οι πιθανές αστοχίες δεν ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες. Πιο συγκεκριμένα για να έχει εφαρμογή ο δείκτης GSI σε κάποιο λιθολογικό σχηματισμό θα πρέπει σ' αυτόν να εφαρμόζεται το κριτήριο Hoek-Brown:



#### Σχήμα 4.1 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI

Ψηφιακή συλλογή

Για την λεπτομερέστερη περιγραφή και χαρακτηρισμό της υπό μελέτη βραχόμαζας αναπτύχθηκε περαιτέρω ο δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI για να ανταποκρίνεται στον ακριβέστερο χαρακτηρισμό συγκεκριμένων τύπων βραχόμαζας οι οποίες μπορεί να έχουν είτε πιο πολύπλοκη δομή είτε χαμηλότερη αντοχή. Ένας από τους τύπους βραχόμαζας στους οποίους επεκτάθηκε ο δείκτης GSI είναι ο γνεύσιος (Marinos, 2010) Σχήμα 4.2.



Ψηφιακή συλλογή

Σχήμα 4.2 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI για Γνευσιακές βραχόμαζες

Στη παρούσα εργασία επειδή το σύνολο των υπό μελέτη σχηματισμών είναι γνευσιακού τύπου θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI για γνευσίους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

# 4.2 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βραχωδών σχηματισμών

Η ευστάθεια της βραχόμαζας εξαρτάται και καθορίζεται κυρίως από την ύπαρξη και τον προσανατολισμό γεωλογικών ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις, ρήγματα). Από τις ασυνέχειες προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό η μηχανική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών επομένως η σημασία τους είναι πολύ μεγάλη και η μελέτη τους μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τον μηχανισμό αστοχίας τους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ

Σύμφωνα με τη Διεθνή Εταιρεία Βραχομηχανικής (ISRM) οι παρακάτω παράμετροι πρέπει ελέγχονται για την ορθή περιγραφή των ασυνεχειών από (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002):

- Προσανατολισμός: Περιγράφεται από τη διεύθυνση και τη φορά κλίσης του επιπέδου της ασυνέχειας.
- Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών: Περιγράφεται ως η μέση κάθετη απόσταση μεταξύ ασυνεχειών και ελέγχει το μέγεθος των τεμαχών στα οποία αποχωρίζεται η βραχομάζα.
- Εμμονή: Ο παράγοντας αυτός καθορίζει κατά πόσο μία ασυνέχεια τέμνει σε όλη της την έκταση τη βραχόμαζα
- Τραχύτητα: Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αντοχή σε διάτμηση της βραχόμαζας και εξαρτάται από τη μορφή που παρουσιάζουν οι επιφάνειες των ασυνεχειών της.
- Άνοιγμα: Η κάθετη απόσταση μεταξύ των γειτονικών τοιχωμάτων μίας ασυνέχειας. Μία ασυνέχεια μπορεί να είναι ανοιχτή, κλειστή ή επουλωμένη με υλικά πλήρωσης.
- 6. Υλικό πλήρωσης: Υλικά όπως άμμος, ιλύς, άργιλος μπορεί να παρεμβάλλονται μεταξύ των τοιχωμάτων μίας ασυνέχειας επηρεάζοντας τη μηχανική και την υδραυλική συμπεριφορά της βραχόμαζας.
- 7. Αντοχή τοιχωμάτων: Είναι η ισοδύναμη θλιπτική αντοχή του πετρώματος και των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Αποτελεί σημαντική συνιστώσα της διατμητικής αντοχής εφόσον τα πετρώματα βρίσκονται σε επαφή. Μπορεί έμμεσα να προσδιοριστεί με τη χρήση σφύρας Schmidt.
- Συνθήκες υπόγειου νερού: Το νερό που κυκλοφορεί στις ασυνέχειες του πετρώματος προκαλεί υδραυλικές, φυσικές, μηχανικές και χημικές δράσεις οι οποίες αποτελούν σημαντικούς παράγοντες στη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας.

Όσον αφορά τις γνευσιακές βραχόμαζες οι οποίες είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας μεγάλη σημασία για τη διατμητική αντοχή της βραχόμαζας έχει η ύπαρξη ή όχι αργιλικού υλικού πλήρωσης ανάμεσα στα τοιχώματα των ασυνεχειών το οποίο προέρχεται, ως επί των πλείστων, από την εξαλλοίωση των αστριούχων ορυκτών του γνευσίου. Η ύπαρξη ή όχι αργιλικού υλικού παίζει καθοριστικό ρόλο στη κυκλοφορία των υδάτων μέσω των διακλάσεων άρα και στο καθεστώς πιέσεων που επικρατούν στο εσωτερικό της βραχόμαζας.

Επίσης βασική παράμετρος για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών είναι η βασική γωνία τριβής φ<sub>b</sub> που συμπίπτει με την παραμένουσα

γωνιά τριβής φ<sub>r</sub>. Η βασική γωνία τριβής υπολογίζεται με την εκτέλεση της αντίστοιχης δοκιμής διάτμησης ασυνεχειών σε προκατασκευασμένες συνήθως ομαλές επιφάνειες ασυνεχειών πετρωμάτων. Για τα γνευσιακά πετρώματα η βασική γωνία τριβής έχει υπολογιστεί φ<sub>b</sub>=26°-49° (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

# 4.3 Δεδομένα από μητρώα γεωτρήσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια μητρώα από γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή μελέτης τις περιόδους Μαΐου-Ιουνίου 1999 και Φεβρουαρίου 2003 κατά τη κατασκευή του κύριου άξονα της Εγνατίας Οδού. Τονίζεται ότι οι γεωτρήσεις δεν έχουν πραγματοποιηθεί στα ορύγματα που μελετώνται στη παρούσα εργασία αλλά σε κοντινές τοποθεσίες και προσεγγίζουν κυρίως το γεωλογικό περιβάλλον όπου κατασκευάστηκε το δεύτερο όρυγμα (Όρυγμα 2) που μελετάται (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Οι γεωτρήσεις σε σχέση με το Όρυγμα 2 της μελέτης

Παρακάτω παρατίθενται κάποιοι πίνακες με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία από τις συγκεκριμένες γεωτρήσεις.

μήμα Γεωλογίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πίνακας 4.1 Συνοπτική παρουσίαση γεωτρήσεων

88

Γεώτρηση	Στάθμη κεφαλής (m)	Βάθος (m)	Στάθμη πυθμένα (m)
ΓΣ1	149,02	61	88,02
ΓΣ3	92,78	50	42,78
ΓΣ4	79,93	40	39,93
ΓΣ5	72,73	42	30,73
ΓΣ5Α	56,55	18,2	38,35
ΓΣ6	120,58	30	90,58

Πίνακας 4.2 Γεώτρηση ΓΣ1

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΣ1			
ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ		
0-10,24	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τςκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά		
10,25-53,13	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών		
53.14-57	Παρεμβολές αδροκρυσταλικών, λευκών, παχυστρωματωδών μαρμάρων εντός των γνευσιακών πετρωμάτων		
57-60,7	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών		

× "OE	Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη Πίνακας 4.3 Γεώτρηση ΓΣ6	" "
X220	Α.Π.Θ	ΙΕΩΤΡΗΣΗ ΙΣ6
ON ISSA	ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	0-5,49	Υλικά κατολισθήσεων. Χαλαρά υλικά λατύπων, αργίλων, άμμων, προιόντων εξαλλίωσης και κερματισμού
	5,5-30,0	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών

#### Πίνακας 4.4 Γεώτρηση ΓΣ3

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΣ3		
ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	
0-6,80	Υλικά κατολισθήσεων. Χαλαρά υλικά λατύπων, αργίλων, άμμων, προιόντων εξαλλίωσης και κερματισμού	
6,82-30,40	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών	
30,42-37,8	Παρεμβολές αδροκρυσταλικών, λευκών, παχυστρωματωδών μαρμάρων εντός των γνευσιακών πετρωμάτων	
38-50	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών	



ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΣ4		
ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	
0-5,52	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τεκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά	
5,55-12,5	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών	
12,5-40	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τεκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά	

#### Πίνακας 4.6 Γεώτρηση ΓΣ5

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΣ5		
ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	
0-2	κενό	
2-12,4	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τςκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά	
12,5-35	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών	
35,1-42,1	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τςκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά	

"OE	Βιβλιοθήκη Πίνακας 4.7 Γεώτρηση ΓΣ5Α	
8	А.П.Ө /с	ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΣ5Α
	ΒΑΘΟΣ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	0-1,6	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών
	1,6-2,6	Εντόνως εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι εξαιτίας της υδροθερμικής δράσης και της τςκτονικής καταπόνησης. Προσομοιάζουν με εδαφικά κορηματικά υλικά
	2,6-14,0	Γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι. Βιοτιτικοί γνεύσιοι εντόνως κερματισμένοι με παρεμβολές αμφιβολιτών. Διακόπτονται συχνά από μεγάλο αριθμό πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών

. .

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Α.Π.Θ Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμίων				
Γεώτρηση	Βάθος δοκιμίου	Περιγραφή	Γωνία Τριβής	Συνοχή
	(m)	υλικού	( <b>\$</b> ®)	(KPa)
ΓΣ1	31,9-32,3	Ιλυώδεις χάλικες με άμμο	18,5	11,5
ΓΣ3	6,4-6,6	Ιλυώδεις χάλικες με άμμο	19,5	2,7
ΓΣ3	12,6-12,8	Ιλυώδεις χάλικες με άμμο	27	3,4
ΓΣ4	18,5-18,8	Ιλυώδεις χάλικες με άμμο	22	3,4
ΓΣ4	25,3-25,06	Ιλυώδης άμμος με χαλίκια	16	0
ΓΣ4	30,4-30,6	Αμμώδης, Ιλυώδης άργιλος	26,5	4,3
ΓΣ4	35,2-35,5	Αμμώδης Ιλύς	18,5	8,3
ΓΣ5	12,4-12,6	Ιλυώδης άμμος με χαλίκια	16,5	5,9
ΓΣ5	40,6-40,8	Ιλυώδης άμμος με χαλίκια	20	14,5

Όπως διαπιστώνεται από τις περιγραφές των δειγμάτων των παραπάνω γεωτρήσεων η παρούσα αστοχία πρόκειται για τυπική αστοχία εδαφικού τύπου. Το υλικό το οποίο απαρτίζει την κατολισθαίνουσα μάζα είναι κυρίως εδαφοποιημένοςκερματισμένος γνεύσιος. Πιο συγκεκριμένα κοντά στην επιφάνεια επικρατούν κυρίως υλικά κατολισθήσεων και πλευρικά κορήματα τα οποία όπως υποδεικνύεται από τα δεδομένα των γεωτρήσεων εκτείνονται στα ανώτερα 5-10m, προχωρώντας βαθύτερα απαντάται ο μανδύας αποσάθρωσης, ενώ το υγείες πέτρωμα το οποίο αποτελείται από γνευσίους, γνευσιοσχιστόλιθους και παρεμβολές μαρμάρων βρίσκεται βαθύτερα (~30m). Επίσης μέσα στα εδαφικά υλικά περιέχονται μεγάλα τεμάχη υγιούς γνευσίου.

Τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται να προσομοιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις συνθήκες που επικρατούν στο Όρυγμα 2 που μελετάται στη παρούσα εργασία. Οι λόγοι που οδηγούν σε αυτό το συμπέρασμα είναι η ομοιότητα στο τύπο της αστοχίας, η εξίσου μεγάλη έκταση της αστοχίας και η μικρή γεωγραφικά απόσταση μεταξύ των δύο αστοχιών γεγονότα που υποδεικνύουν παρόμοιο γεωλογικό περιβάλλον.

# 4.4 Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση Ορυγμάτων

Τα ορύγματα που μελετώνται στη παρούσα εργασία ανήκουν στον κύριο οδικό άξονα της Εγνατίας Οδού Α.Ε και βρίσκονται στη περιοχή της Ασπροβάλτας και όπως φαίνεται και από τον γεωλογικό χάρτη κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου σε γνευσιακά πετρώματα (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Απόκομμα από τον γεωλογικό χάρτη του φύλλου Σταυρός (κλίμακα 1:50.000) όπου με ρόζ χρώμα παρουσιάζονται τα γνευσιακά πετρώματα της περιοχής και με βέλος υποδεικνύεται η περιοχή της Ασπροβάλτας (Ι.Γ.Μ.Ε.)

## 4.4.1 Όρυγμα 1

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η βραχόμαζα στο όρυγμα 1 χαρακτηρίζεται ως μέτρια αποσαθρωμένη, κυρίως επιφανειακά, χωρίς έντονο κερματισμό. Αν και παρατηρείται κάποια εμμένουσα σχιστότητα στο χώρο ο προσανατολισμός της δεν είναι ευνοϊκός ώστε να δημιουργεί μεγάλες επιφάνειες επικίνδυνες προς ολίσθηση. Παρατηρούνται κάποιες τοπικές αστοχίες τη μορφή μικρών βραχοκαταπτώσεων (λόγω επιφανειακής αποσάθρωσης) οι οποίες όμως είναι μεμονωμένες και τα υλικά της αστοχίας συγκρατούνται από τους αναβαθμούς του ορύγματος ή την βραχοπαγίδα. Με βάση τα παραπάνω τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά η βραχόμαζα θεωρείται μετρίως αποσαθρωμένη (τύπου 3)και από άποψη δομής πολύ τεμαχώδης εώς διαταραγμένη στρωματώδης άρα στο γεωλογικό δείκτη GSI βαθμονομείται με μία τιμή μεταξύ 30-40.



Εικόνα 4.2 Όρυγμα 1



Σχήμα 4.4 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 1

## 4.4.2 Όρυγμα 2

Ψηφιακή συλλογή

Στο όρυγμα 2 παρατηρείται μία γενικευμένη πολύ μεγάλου μήκους ισότροπη αστοχία. Η βραχόμαζα φαίνεται να αστόχησε περιστροφικά και η σημερινή δομή της είναι πλήρως αποδιοργανωμένη με πολύ χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Το υλικό χαρακτηρίζεται ως πλήρως αποσαθρωμένο (τύπου 5) καθώς έχει αποσυντεθεί πλήρως. Με βάση τα παραπάνω τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά η βραχόμαζα βαθμονομείται πολύ χαμηλά στον δείκτη GSI με τιμή 10. Επίσης μπορεί να αντιμετωπιστεί ως υπολειμματικό έδαφος και να μελετηθεί με τις αρχές της εδαφομηχανικής. Το γεγονός ότι πρόκειται για αστοχία εδαφικού τύπου επιβεβαιώνεται και από τα δεδομένα των γεωτρήσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και επιβεβαιώνουν αυτού του είδους την αστοχία σε γειτονικό όρυγμα.



Εικόνα 4.3 Όρυγμα 2 (με οριοθετημένη την επιφάνεια της αστοχίας)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) FOR GNEISS			100	essive signifi	l l	or o <sub>c</sub> and m
OR PETROGRAPHICALLY RELATIVE ROCK MASSES From the structure and the weathering degree of the rock mass, estimate the average value GSI from the contours. Do not try to be too precise, Quoting a range from 31 to 37 is more realistic than stating that GSI=35. The determination of the structure and the weathering degree of the rock mass may range between two adjacent fields. Note that the Hoek - Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities (like sheared bedding planes) are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for moderately, highly and completely weathered. Water pressure does not change the value of GSI and it is deait with by using effective stress analysis. <b>Applicable for granite rock masses for the types</b> <b>"Intact" until "Very Blocky" and "Disintegrated"</b> .	NEATHERING DEGREE	<ol> <li>T. FRESH No visible sign of weathering or faintly weathered with weathering Imitted to surfaces of major discontinuities</li> </ol>	1. SLIGHTLY WEATHERED Freetrative weathering on open discontinuity surfaces, but only slight weathering of rock material	III. MODERATELY WEATHERED Weathering extends throughout rock mass, but rock material is a frable	B.V. HIGHLY WEATHERED S Weathering extends throughout rock mass and rock material is n pathy frable	V. COMPLETELY WEATHERED Rock mass is decomposed and friable, but rock texture and structure preserved
INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	-	90		Geologically not possible	Geologically not possible	Geologically not possible
BLOCKY Very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	ECES		70		Geologically not possible	Geologically not possible
VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	ING OF ROCK PIL		5	40	Geologically not possible	Geologically not possible
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	ING INTERLOCK			30	20	Geologically not possible
DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	DECREAS				$V   \zeta$	licable field
LAMINATED/FOLLATED/SHEARED Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)	+	Geologically not possible				GST not app

Σχήμα 4.5 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 2

# 4.4.3 Όρυγμα 3

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο όρυγμα 3 η βραχόμαζα θεωρείται ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένη, κυρίως λόγω επιφανειακής αποσάθρωσης, και δεν παρατηρείται κάποια εμμένουσα σχιστότητα στον χώρο μόνο κατά θέσεις. Η δομή της χαρακτηρίζεται ως πολύ τεμαχώδης καθώς υπάρχουν πολλές οικογένειες ασυνεχειών που ορίζουν διάφορα βραχώδη τεμάχη οι οποίες όμως δεν έχουν μεγάλη εμμονή στο χώρο. Δεν παρατηρείται κάποια γενικευμένη αστοχία στο όρυγμα 3 μόνο μικρές κατά θέσεις βραχοκαταπτώσεις οι οποίες αναστέλλονται από τους υπάρχοντες αναβαθμούς και την βραχοπαγίδα. Με βάση αυτά τα τεχκικογεωλογικά χαρακτηριστικά η βραχόμαζα βαθμονομείται στο δείκτη GSI με μία τιμή 40-50 καθώς όπως προαναφέρθηκε ο βαθμός της αποσάθρωσης που παρουσιάζει είναι χαμηλός (μεταξύ τύπου 2 και 3) και η δομή της πολύ τεμαχώδης.



Εικόνα 4.4 Όρυγμα 3



Σχήμα 4.6 Εύρος τιμών GSI για το όρυγμα 3

Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων στη παρούσα εργασία

# 5.1 Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η επεξεργασία του νέφους σημείων έγινε με τη χρήση του λογισμικού ανοιχτής πηγής (open source) Cloud compare (<u>http://cloudcompare.org</u>). Από την επεξεργασία του νέφους προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες για τη γεωμορφολογία των ορυγμάτων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη τεχνικογεωλογική αξιολόγηση τους. Επίσης έγιναν τεκτονικές μετρήσεις πάνω στις επιφάνειες των ορυγμάτων από τις οποίες προέκυψαν τεκτονικά διαγράμματα και τέλος μετρήθηκε ο όγκος ορισμένων τεμαχών τα οποία είτε παρουσιάζουν τάση προς ολίσθηση είτε έχουν ήδη ολισθήσει. Για εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την κλίση και τη διεύθυνση κλίσης των διαφόρων ασυνεχειών κ επιφανειών των ορυγμάτων χρησιμοποιήθηκαν 2 εφαρμογές που προσφέρονται εντός του περιβάλλοντος του cloud compare. Η πρώτη ονομάζεται Facets και η δεύτερη Compass. Έπειτα οι πληροφορίες αυτές εισήχθησαν στην εφαρμογή Dip της Rockscience από την οποία προέκυψαν τα δίκτυα Schmidt.

# 5.1.1 Εφαρμογή Facets

Η γενική προσέγγιση της εφαρμογής Facets συνίσταται στην τμηματοποίηση του νέφους σημείων με βάση κάποια κοινά χαρακτηριστικά των επιφανειών τα οποία δίνονται από των χρήστη όπως το πλήθος των σημείων από τα οποία θα ορίζεται μία επιφάνεια και μέχρι πόσες μοίρες διαφορά μπορούν να έχουν οι επιφάνειες αυτές μεταξύ τους. Επομένως οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός των επιφανειών τείνουν στο άπειρο. Η εφαρμογή για να πετύχει τον διαχωρισμό του χώρου υλοποιεί έναν αλγόριθμο προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων. Αφού ο χώρος διαχωριστεί σε στοιχειώδες επίπεδο οι επιφάνειες ομαδοποιούνται με κριτήρια παραλληλότητας. Η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την μέθοδο με τον οποία θα γίνει ο διαχωρισμός των επιφανειών. Δίνονται δύο επιλογές η μέθοδος k-d tree και η μέθοδος fast marching. Το αποτέλεσμα και των δύο μεθόδων είναι ο χώρος να χωρίζεται σε επίπεδα πολύγωνα τα οποία προσαρμόζονται στο αρχικό νέφος σημείων. Κάθε πολύγωνο ορίζεται ως ένα πλέγμα με συγκεκριμένη περίμετρο, έκταση και συντεταγμένες. Οι επιφάνειες μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τον προσανατολισμό τους σε οικογένειες επιφανειών (Plugins > Facet/fracture detection > Classify facets by orientation). Έπειτα οι επιφάνειες αυτές μπορούν να εμφανιστούν με μορφή στερεογράματος, δηλαδή ένα κυκλικό ιστόγραμμα όπου τοποθετούνται οι επιφάνειες με βάση τη κλίση και την κατεύθυνση κλίσης ενώ η πυκνότητα των επιφανειών σε κάθε κατεύθυνση αντιπροσωπεύεται με την ανάλογη απόχρωση συγκεκριμένης χρωματικής κλίμακας. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη

φιλτράρει τις μετρήσεις για να δει μία συγκεκριμένη ομάδα επιφανειών που των ενδιαφέρει. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον χώρο των γεωεπιστημών (Dewez et al., 2016).

## 5.1.2 Εφαρμογή Compass

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η εφαρμογή Compass είναι ένα σύνολο εργαλείων Τεκτονικής Γεωλογίας για την ερμηνεία και ανάλυση εικονικών τρισδιάστατων μοντέλων με δυνατότητα λήψης πραγματικών μετρήσεων πάνω σ' αυτά τα μοντέλα. Ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία της εφαρμογής ,που χρησιμοποιήθηκε κατά κόρων στη παρούσα εργασία, είναι το εργαλείο *Plane tool* που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του προσανατολισμού μίας συγκεκριμένης επιφάνειας που επιλέγεται από των χρήστη. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται με την προσαρμογή μίας επίπεδης επιφάνειας σε οποιοδήποτε εξέχον σημείο επιλέξει ο χρήστης. Το μέγεθος της επιφάνειας ορίζεται επίσης από τον χρήστη. Έπειτα αφού η επιφάνεια προσαρμοστεί σε όλα σημεία του νέφους που αποτελούν τη προς μέτρηση γεωλογική δομή, μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, δίνεται η κλίση και η κατεύθυνση κλίσης της. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση οποιασδήποτε γεωλογικής επιφανειακής δομής όπως επιφάνειες ασυνεχειών, στρώσης ή σχιστότητας (Thiele, 2017).

# 5.2 Επεξεργασία και αξιολόγηση Τεκτονικών διαγραμμάτων με τη χρήση των εφαρμογών Facets και Compass που περιέχονται στο λογισμικό Cloud Compare

Κατά την εργασία πεδίου μετρήθηκαν στο πεδίο ορισμένα τεκτονικά στοιχεία, όπως επιφάνειες ασυνεχειών και επιφάνειες στρώσεις, που θεωρήθηκαν ότι έχουν μεγάλη εξάπλωση στον χώρο ή/και ορίζουν ορισμένα βραχώδη τεμάχη που έχουν ολισθήσει ή τείνουν προς ολίσθηση. Οι εργασίες αυτές έλαβαν χώρα στα ορύγματα 1 και 3 γιατί είναι τα μόνα βραχώδη.

Έπειτα από επεξεργασία του νέφους σημείων με χρήση των εφαρμογών, του λογισμικού Point Cloud, facets και compass έγινε προσπάθεια να μετρηθούν τα ίδια τεκτονικά στοιχεία που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο με σκοπό την συσχέτιση και σύγκριση δύο των μεθόδων. Συγκεκριμένα, και στα δύο ορύγματα με την εφαρμογή facets μετρήθηκαν οι όψεις των ορυγμάτων όπου σαρώθηκαν κάθετα από τη συσκευή LiDAR για μεγαλύτερη ακρίβεια σχετικά με τη διεύθυνση κλίσης των επιφανειών. Από τα νέφη σημείων αφαιρέθηκε η βλάστηση όπου ήταν δυνατόν από για να μειωθούν οι περιττές επιφάνειες πρόσπτωσης. Επίσης επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι (ελάχιστος αριθμός σημείων που ορίζουν μία επιφάνεια και μέγιστη διαφορά γωνίας κλίσης επιφανειών) ώστε να αποφευχθούν όσο είναι δυνατόν περιττές επιφάνειες με μικρή γεωγραφική εξάπλωση που αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Έπειτα με την εφαρμογή Compass έγινε προσπάθεια να μετρηθούν κάποιες από τις επιφάνειες που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο και στη συνέχεια μετρήθηκαν επιλεκτικά κάποιες επιφάνειες ασυνεχειών που θεωρήθηκε ότι έχουν μεγάλη εξάπλωση στο νέφος σημείων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δίκτυα Schmidt για κάθε μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για εξαγωγή τεκτονικών μετρήσεων τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω (Κεφάλαια 5.2.1, 5.2.2). Για τη δημιουργία αυτών των δικτύων χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγός οι μετρήσεις που πάρθηκαν στο ύπαιθρο και με βάση αυτές έγινε ένα φιλτράρισμα στα αποτελέσματα των ψηφιακών μετρήσεων. Τέλος έγινε σύγκριση των τριών αυτών δικτύων Schmidt για να αξιολογηθεί η απόκλισή τους από τη πραγματικότητα.

# 5.2.1 Τεκτονικές μετρήσεις για όρυγμα 1

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Εικόνα 5.1 Φωτογραφία του Ορύγματος 1

Διεύθυνση (Dip)	Διεύθυνση κλίσης (Dip Direction)	Τύπος Ασυνέχειας
48	80	S1
63	340	S2
55	189	S3
89	128	S4
59	78	S1
65	330	S2
75	205	S3
51	328	S2
64	88	S1
89	215	S3

Πίνακας 5.1 Στοιχεία ασυνεχειών από πυξίδα για το Όρυγμα 1

Ψηφισκή συλλογή Βιβλιοθήκη		
85	215	S3
μ89ια Γεωλογίας	187	S3
А.П.О /о		



Σχήμα 5.1 Το νέφος σημείων που προέκυψε από τις σαρώσεις του LiDAR μετά από επεξεργασία με το λογισμικό cloud compare για το Όρυγμα 1



Σχήμα 5.2 Δίκτυο Schmidt κύριων ασυνεχειών από μετρήσεις υπαίθρου για Όρυγμα 1



Σχήμα 5.3 Στερεόγραμμα από την εφαρμογή Facets όπου φαίνεται η κύρια συγκέντρωση των μετρήσεων στο Όρυγμα 1



Σχήμα 5.4 Πόλοι κύριας συγκέντρωσης μετρήσεων στο όρυγμα 1 από εφαρμογή Facets



Σχήμα 5.5 Δίκτυο Schmidt των κύριων ασυνεχειών που εξάχθηκαν από Facets για το Όρυγμα 1

#### Πίνακας 5.2 Τεκτονικές Μετρήσεις Ασυνεχειών με Χρήση εφαρμογής Compass για το όρυγμα 1

111	Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη	10
十七日	Κλίση Γμήμα Γεωλογία	Διεύθυνση Κλίσης
10	78 <b>А.П.</b> О	141
	69	137
	56	147
	59	127
	65	116
	42	136
	55	336
	65	135
	78	176
	25	122
	72	352
	60	109
	78	198
	88	343
	51	158
	63	187
	85	322
	73	346
	42	155
	74	349



Σχήμα 5.6 Κύρια συγκέντρωση πόλων από μετρήσεις μέσω εφαρμογής Compass για το Όρυγμα 1



Σχήμα 5.7 Δίκτυο Schmidt από τις μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων με χρήση της εφαρμογής compass για το όρυγμα 1

Από τα παραπάνω Δίκτυα Schmidt (Σχήμα 5.2, Σχήμα 5.5, Σχήμα 5.7) συμπεραίνουμε ότι στο όρυγμα 1 δε πληρούνται οι προϋποθέσεις για οποιουδήποτε τύπου αστοχία καθώς το σύνολο των ασυνεχειών δε ικανοποιεί τα απαιτούμενα κριτήρια.



Εικόνα 5.2 Φωτογραφία του Ορύγματος 3

Πίνακας 5.3 Στοιχεία ασυνεχειών από πυξίδα για το Όρυγμα 1

Dip	Dip Direction	Τύπος Ασυνέχειας
35	184	S1
84	328	S2
80	51	S3
50	96	S4
88	272	S2
58	002	
60	104	S4
72	100	S4
61	308	S2
62	039	S3
66	108	S4
32	227	Σχιστότητα
30	215	Σχιστότητα
67	101	S4
46	180	S2



Σχήμα 5.8 Το νέφος σημείων που προέκυψε από τις σαρώσεις του LiDAR μετά από επεξεργασία με το λογισμικό Cloud Compare για το Όρυγμα 3



Σχήμα 5.9 Δίκτυο Schmidt κύριων ασυνεχειών από μετρήσεις υπαίθρου για Όρυγμα 3



Σχήμα 5.10 Στερεόγραμμα από εφαρμογή Facets όπου φαίνεται η κύρια συγκέντρωση των μετρήσεων για όρυγμα 3



Σχήμα 5.11 Οι συγκεντρώσεις των πόλων που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Facets για το Όρυγμα 3



Σχήμα 5.12 Δίκτυο Schmidt που προέκυψε από τις μετρήσεις του Facets για το όρυγμα 3

Κλίση (Dip)	Διεύθυνση	Κλίσης	(Dip
	Direction)		
76	194		
66	150		
71	146		
63	144		
70	136		
41	159		
56	195		
54	204		
84	355		
89	181		
86	342		
60	162		
57	197		
40	182		
50	162		
40	184		
56	185		
48	172		
89	354		

Πίνακας 5.4 Τεκτονικές μετρήσεις μέσω Compass για όρυγμα 3



Σχήμα 5.13 Κύρια συγκέντρωση πόλων από μετρήσεις μέσω της εφαρμογής Compass για Όρυγμα 3



Σχήμα 5.14 Δίκτυο Schmidt από τις μετρήσεις που έγιναν με την εφαρμογή Compass για Όρυγμα 3

Από τα παραπάνω δίκτυα Schmidt (Σχήμα 5.9, Σχήμα 5.12, Σχήμα 5.14) συμπεραίνουμε ότι στην επιφάνεια του Ορύγματος 3 υπάρχουν κάποιες ασυνέχειες

που πληρούν τις προϋποθέσεις για να προκαλέσουν κάποιες πιθανές αστοχίες. Συγκεκριμένα η ασυνέχεια S1 εμφανίζεται σε όλα τα δίκτυα Schmidt που δημιουργήθηκαν και φαίνεται να σχηματίζει μία επιφάνεια για πιθανή αστοχία τύπου επίπεδης ολίσθησης. Επίσης οι ασυνέχειες S2, S3, S4 καθώς και η επιφάνεια της σχιστότητας διασταυρώνονται με την ασυνέχεια S1 σε αρκετά σημεία της επιφάνειας του ορύγματος και δημιουργούν τις συνθήκες για πιθανές αστοχίες τύπου σφηνοειδούς ολίσθησης.

# 5.3 Σύγκριση των μετρήσεων για το Όρυγμα 1

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 5.1, Σχήμα 5.4, Σχήμα 5.6) οι μετρήσεις που έγιναν στο ύπαιθρο δε μπορούν να συσχετιστούν πλήρως με αυτές που εξήχθησαν με τα ψηφιακά μέσα από το νέφος σημείων. Στις ψηφιακές μετρήσεις παρουσιάζεται απόκλιση τόσο στην ποικιλία των μετρήσεων όσο και στην ακρίβειά τους σε σχέση με αυτές του πεδίου.

Πιο αναλυτικά, αν συγκρίνουμε τις μετρήσεις που έγιναν με την εφαρμογή Facets σε σχέση με αυτές του πεδίου για το όρυγμα 1 σε αυτές της εφαρμογής θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει μία κύρια συγκέντρωση πόλων ασυνεχειών στο βορειοδυτικό τμήμα του δικτύου Schmidt (με κλίση NA) (Σχήμα 5.3) όπου συμπίπτει σε ικανοποιητικό βαθμό με την ασυνέχεια S1 που μετρήθηκε στο πεδίο. Επίσης από την ίδια συγκέντρωση (Σχήμα 5.3) προκύπτει μία ακόμα ασυνέχεια η οποία δε συμπίπτει με καμία από αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο αλλά συμπίπτει αρκετά μικρή συγκέντρωση πόλων στα νότια-νοτιοανατολικά του πρανούς (με κλίση BBΔ) (Σχήμα 5.3) την οποία μπορούμε να τη θεωρήσουμε ως την ασυνέχεια S2 αν και υπάρχει απόκλιση της τάξεως των 20° στην κλίση και στη διεύθυνση κλίσης του στοιχείου.

Όσον αφορά τις μετρήσεις της εφαρμογής Compass, συγκρίνοντας τις μετρήσεις που έγιναν από την εφαρμογή με αυτές του πεδίου θα διαπιστώσουμε ότι οι αποκλίσεις στην ποικιλία αλλά και την ακρίβεια είναι αρκετά μικρότερες (Σχήμα 5.1, Σχήμα 5.6). Η μόνη σημαντική διαφορά παρουσιάζεται στην ασυνέχεια S4 όπου παρουσιάζεται μία απόκλιση ~25° της ψηφιακής μέτρησης από την πραγματική.

# 5.4 Σύγκριση των μετρήσεων για το Όρυγμα 3

Παρατηρώντας τα δίκτυα Schmidt (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.10, Σχήμα 5.12) που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο ύπαιθρο και από τις τεκτονικές μετρήσεις στο νέφος σημείων παρατηρούμε ότι και εδώ, όπως και στο όρυγμα 1, υπάρχουν ορισμένες αποκλίσεις σχετικά με την ύπαρξη αλλά και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών που μετρήθηκαν ψηφιακά σε σχέση με αυτές στο πεδίο.

Αρχικά, συγκρίνοντας τις μετρήσεις του πεδίου με αυτές που εξήχθησαν από την εφαρμογή Facets (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.10) παρατηρούμε μία μεγάλη συγκέντρωση

πόλων στα βόρεια του δικτύου Schmidt με παρόμοιο προσανατολισμό και κλίση με αυτή του πρανούς. Βέβαια, σε αυτό το πρανές αυτή συγκέντρωση συμπίπτει με την ασυνέχεια S1 που μετρήθηκε στο ύπαιθρο. Έπειτα παρατηρούνται δύο αραιότερες συγκεντρώσεις πόλων στα Ανατολικά, Δυτικά και Νότια του δικτύου Schmidt. Οι οι συγκεντρώσεις Ανατολικά και Δυτικά συμπίπτουν αρκετά με τις ασυνέχειες S2 και S4 που μετρήθηκαν στο πεδίο αν και μεταξύ της ψηφιακής και της πραγματικής μέτρησης για την S2 υπάρχει μία απόκλιση 30°. Τέλος η ασυνέχεια S3 και η σχιστότητα δεν εμφανίζονται πουθενά στις ψηφιακές μετρήσεις αντιθέτως εμφανίζεται μία μέτρηση με κατεύθυνση βόρεια που δεν μετρήθηκε πουθενά στο ύπαιθρο (Σχήμα 5.12).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όσον αφορά τις μετρήσεις που έγιναν στο νέφος σημείων με την εφαρμογή Compass σε σύγκριση με αυτές που έγιναν στο πεδίο (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.12) μπόρεσαν να μετρηθούν μόνο οι ασυνέχειες S1 και S4 με μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές. Πάλι η σχιστότητα και η ασυνέχεια S3 απουσίαζαν ενώ μετρήθηκε ασυνέχεια με κλίση προς βόρεια παρόμοια με αυτή που είχε μετρηθεί με την εφαρμογή Facets η οποία όμως δεν επαληθεύεται από τις μετρήσεις στο πεδίο (Σχήμα 5.10).

# 5.5 Αξιολόγηση των ψηφιακών μετρήσεων στο σύνολο των ορυγμάτων

Από τις τεκτονικές μετρήσεις που έγιναν πάνω στο νέφος σημείων κάποιες από αυτές συνέπεσαν ακριβώς με αυτές του πεδίου, κάποιες άλλες είχαν μικρές αποκλίσεις, ενώ αρκετές είχαν μεγάλες αποκλίσεις ή δεν μπόρεσαν να βρεθούν καθόλου. Είναι γεγονός ότι οι μετρήσεις που έγιναν με την χρήση των εφαρμογών Facets και Compass έχουν απόκλιση σε σχέση με αυτές που έγιναν στο πεδίο και σε πολλά σημεία σημαντική.

Συγκεκριμένα, στις μετρήσεις που έγιναν με την εφαρμογή Facets παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των τεκτονικών μετρήσεων είχε την τάση να συγκλίνει με την γενική κλίση και την διεύθυνση κλίσης του πρανούς. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η κυρίαρχη κλίση και προσανατολισμός των επιφανειών που μετρώνται από την εφαρμογή είναι αυτά του πρανούς οπότε στατιστικά είναι αυτοί που υπερισχύουν στο χώρο. Επίσης η τραχύτητα του αναγλύφου δεν έχει αποτυπωθεί στο νέφος σημείων με την απαιτούμενη ένταση με αποτέλεσμα οι επιφάνειες με διαφορετικές κλίσεις να μην μπορούν να μετρηθούν ή/και να έχουν μικρή γεωγραφική εμφάνιση στο νέφος σημείων άρα και στατιστικά να χάνονται. Επίσης πολλές από τις επιφάνειες των ασυνεχειών βρίσκονται σε σκιασμένα σημεία ή βρίσκονται στο εσωτερικό των κυρίαρχων επιφανειών όπου αναπτύσσονται σχεδόν παράλληλα με τη γωνία πρόσπτωσης των ακτινών του LiDAR και έχουν μικρή έκταση κάτι που κάνει την καταγραφή τους σχεδόν αδύνατη άρα και τη μέτρησή τους στο νέφος σημείων το ίδιο. Σε ότι αφορά τις μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση της εφαρμογής Compass, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να επιλέγει μόνος του την επιφάνεια που θα μετρήσει πάνω στο νέφος σημείων αντίθετα με την εφαρμογή Facets που σαρώνει όλο το νέφος, επειδή αυτές ήταν στοχευμένες σε συγκεκριμένα σημεία είχαν και μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτή, όπως και η εφαρμογή Facets, βασίζεται πολύ έντονα στην τραχύτητα του αναγλύφου για να μπορέσει να εξάγει ακριβείς μετρήσεις. Άρα αν η επιφάνεια δεν έχει σαφή γεωμετρική μορφή στο νέφος ή τα σημεία που την ορίζουν είναι πολύ αραιά τότε δεν μπορεί και να μετρηθεί ή η μέτρηση που εξάγεται δεν είναι ακριβής. Αυτό στη παρούσα μελέτη συνέβη με κάποιες από τις επιφάνειες που είχαν μετρηθεί στο ύπαιθρο. Δηλαδή, ενώ τα τεκτονικά τους στοιχεία ήταν γνωστά δε μπόρεσαν να επαληθευτούν στο νέφος σημείων γιατί οι επιφάνειες αυτές δεν ορίζονταν πάνω σ' αυτό είτε λόγω φτωχής απεικόνισης του αναγλύφου είτε λόγω χαμηλής πυκνότητας του νέφοις σημείων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ωστόσο, έχοντας ως οδηγό τις μετρήσεις υπαίθρου μπόρεσαν να εξαχθούν αρκετές από τις κύριες ασυνέχειες των ορυγμάτων ιδιαίτερα αυτές που συμπίπτανε με την γενικότερη κλίση και διεύθυνση κλίσης του πρανούς και για κάποιες άλλες με διαφορετικές κλίσεις και διευθύνσεις κλίσεως υπήρχαν μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μελέτη τεκτονικών στοιχείων με τη χρήση του LiDAR όταν συνδυάζεται με μετρήσεις στο πεδίο μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την εξάπλωση κάποιων τεκτονικών στοιχείων στο χώρο. Κάτι που μπορεί να μειώσει πολύ τον χρόνο πεδίου μίας γεωλογικής έρευνας. Επίσης βελτιώνοντας την ποιότητα του νέφους σημείων κάνοντας κάποιες αλλαγές στη διαδικασία λήψης των δεδομένων ή/και εμπλουτίζοντας τα δεδομένα μας με πολλαπλές και επαναλαμβανόμενες λήψεις είναι δυνατό να βελτιωθεί Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την ογκομέτρηση βραχωδών τεμαχών στο σύνολο των Ορυγμάτων.

# 6.1 Μεθοδολογία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Το λογισμικό Cloud Compare δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να μετρήσει αποστάσεις μεταξύ δύο σημείων πάνω στο νέφος, οι ακρίβεια των οποίων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων που εισήχθησαν δηλαδή του νέφους σημείων. Γνωρίζοντας την υψηλή ποιότητα των σαρώσεών που επιτεύχθηκαν, από πλευράς χωρικής ανάλυσης, με τη συσκευή LiDAR στο πεδίο επιχειρήθηκε η μέτρηση κάποιων όγκων βραχωδών τεμαχών μέσα στο νέφος σημείων πάνω στα Ορύγματα που σαρώθηκαν.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία είναι σχετικά απλή: μετρήθηκαν τα γεωμετρικά στοιχεία μήκος, πλάτος και βάθος τεμαχών που παρουσίαζαν τάση προς ολίσθηση ή είχαν ήδη ολισθήσει σε διάφορες θέσεις στο χώρο, έπειτα υπολογίστηκαν κάποιες μέσες τιμές για τα παραπάνω στοιχεία. Στη συνέχεια με τη χρήση απλών γεωμετρικών τύπων (εμβαδόν ορθογωνίου παραλληλογράμμου και όγκος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου ) υπολογίστηκαν το εμβαδόν και ο όγκος που κατείχαν τα συγκεκριμένα τεμάχη. Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες όπου παρουσιάζουν αναλυτικά τα μεγέθη κάθε τεμάχους καθώς και φωτο-μωσαϊκές αποτυπώσεις που δημιουργήθηκαν με χρήση του λογισμικού Agisoft Photoscan και αναπαριστούν αυτά τα τεμάχη.

# 6.1.1 Αστοχίες Ορύγματος 1

Στο Όρυγμα 1 δε παρατηρήθηκαν σημαντικές αστοχίες μόνο δύο αν και η έκτασή τους ήταν περιορισμένη (τύπου σφηνοειδούς ολισθήσεως). Τα υλικά τους φαίνεται να ανασχέθηκαν από τη βραχοπαγίδα (Σχήμα 6.1, Σχήμα 6.2).

Πίνακας 6.1 Μετρήσεις αστοχίας (τριών αναβαθμών) στην αριστερή πλευρά του Ορύγματος 1 (Σχήμα 6.1)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

μήμα Γεωλογίας

Μέσο Μήκος (m)	Μέσο πλάτος (m)	Μέσο Βάθος (m)	Εμβαδόν (m²)	Όγκος (m³)	Μέρος του όγκου που μετράται
5,54	3,395	1,35	30,3038	40,91013	Κάτω αναβαθμός
3,32	1,845	1,2	9,6612	11,59344	Μεσαίος αναβαθμός
4,28	2,565	1,3	18,8748	24,53724	Άνω αναβαθμός



Σχήμα 6.1 Σημαντική αστοχία τριών αναβαθμών στην αριστερη πλευρά του Ορύγματος 1

Μέσο Μήκος (m)	Μέσο πλάτος (m)	Μέσο Βάθος (m)	Εμβαδόν (m²)	Όγκος (m³)	Μέρος του όγκου που μετράται
5025	3,535	1	28944	28944	1 Αναβαθμός

Πίνακας 6.2 Μετρήσεις από μικρή αστοχία στη δε	εξιά πλευρά του Ορύγματος 1 (Σχήμα 6.2)
--	---



Σχήμα 6.2 Μικρή αστοχία ενός αναβαθμού στο Όρυγμα 1

# 6.1.2 Αστοχίες Ορύγματος 2

Το Όρυγμα 2 αποτελεί σχεδόν σε όλη του την έκταση μία μεγάλη κυκλική αστοχία εδαφικού χαρακτήρα. Ο όγκος του χωρίστηκε σε δύο μέρη προκειμένου να μετρηθεί (Σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3 Το νέφος σημείων (point cloud) το ορύγματος 2

Πίνακας 6.3 Μετρήσεις από το κάτω μέρος της κύριας αστοχίας του Ορύγματος 2 (Σχήμα 6.4)					
Μέσο Μήκος (m)	Μέσο πλάτος (m)	Μέσο Βάθος (m)	Εμβαδόν (m²)	Όγκος (m³)	Μέρος του όγκου που μετράται
38,79	52	8	2017,08	16136,64	Κάτω κύριος όγκος
31,83	24,955	5,23	794,3177	4154,281	Άνω κύριος όγκος
Συνολικός όγκος αστοχίας (m³)			202	90,92	



Σχήμα 6.4 Μεγάλος όγκος αστοχίας στο Όρυγμα 2.

# 6.1.3 Αστοχίες Ορύγματος 3

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο Όρυγμα 3 παρουσιάζονται δύο κύριες αστοχίες με σημαντική σχετικά έκταση (τύπου σφηνοειδούς ολισθήσεως). Τα υλικά και των δύο φαίνεται ότι ανασχέθηκαν από τη βραχοπαγίδα (Σχήμα 6.5, Σχήμα 6.6).
Πίνακας 6. Μέσο μήκος (m)	4 Μετρήσεις σι Μέσο πλάτος (m)	μαντικής αστο Μέσο Βάθος (m)	χίας (τριών αναβαθ Εμβαδόν (m²)	μών) στα δεξιά τοι Όγκος (m³)	ο Ορύγματος 3 (Σχήμα 6 Μέρος του όγκου που μετράται
9,68	6,96	2,07	67,3728	139,4617	Κάτω αναβαθμός
9,94	4,375	1,24	43,4875	53,9245	Μεσαίος αναβαθμός
10,27	4,545	1,45	46,67715	67,68187	Άνω αναβαθμός
Συνολικό	ς Όγκος Τεμ	άχους		261,0681	

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 6.5 Σημαντική αστοχία τριών αναβαθμών στη δεξιά πλευρά του Ορύγματος 3

Πίνακας 6.5 Μεγάλη α	ιστοχία ενός αναβαθμού	στο αριστερό μέρος του	Ορύγματος 3 (Σχήμα 6.6)
----------------------	------------------------	------------------------	-------------------------

Μέσο μήκος (m)	Μέσο πλάτος (m)	Μέσο Βάθος (m)	Εμβαδόν (m²)	Όγκος (m³)	Μέρος του όγκου που μετράται
7	10,68	1,89	74,76	141,29	Κάτω αναβαθμός



Σχήμα 6.6 Μεγάλη αστοχία ενός αναβαθμού στο αριστερό μέρος του Ορύγματος 3



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την ανάλυση των τεκτονικών διαγραμμάτων του Ορύγματος 3 και κυρίως από αυτό που δημιουργήθηκε με στοιχεία από τις υπαίθριες μετρήσεις αναγνωρίστηκαν οι επιφάνειες που δημιούργησαν τη μία μεγάλη αστοχία (Σχήμα 6.6). Η αστοχία αυτή δημιουργείται από 2 ομάδες ασυνεχειών στη 1<sup>η</sup> ομάδα η αστοχία ορίζεται από την επιφάνεια S1 και τη σχιστότητα ενώ στη δεύτερη ομάδα από τις επιφάνειες S1 και S4. Για να μπορέσουν να προσδιορισθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες συνέβη η συγκεκριμένη αστοχία έγιναν δύο μοντέλα ανάλυσης ευστάθειας ως προς σφηνοειδή ολίσθηση με τη χρήση του λογισμικού Swedge της Rockscience.

Για τον υπολογισμό των συνθηκών κάτω από τις οποίες συνέβησε η αστοχία χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές του ποσοστού πλήρωσης των ρογμών του πετρώματος με νερό για να προσδιοριστούν οι συνθήκες υδροστατικών πιέσεων κάτω από τις οποίες συνέβη η αστοχία. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές συνοχής c και γωνίας τριβής φ του πετρώματος οι οποίες θεωρήθηκε ότι θα προσσέγγιζαν όσο το δυνατόν καλύτερα τις παραμέτρους αποσαθρωμένης γνευσιακής βραχόμαζας καθώς δεν έχουν υπολογιστεί παράμετροι μέσω εργαστηριακών ή επι τόπου δοκιμών στο συγκεκριμένο όρυγμα. Ως οριακή τιμή του συντελεστή ασφαλείας θεωρείται FS=1.



Εικόνα 7.1 Φωτογραφία της υπο μελέτη σφηνοειδούς ολίσθησης

# 7.1 1º Μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου ως επιφάνειες οι οποίες ορίζουν το βραχώδες τέμαχος θεωρήθηκαν η ασυνέχεια S1 (με στοιχεία κλίσης/διεύθυνση κλίσης: 37°/181°) και η σχιστότητα (με στοιχεία κλίσης/διεύθυνση κλίσης: 32°/227°).



Σχήμα 7.1 Αναπαράσταση της σφήνας που δημιουργείται στο μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας 1

Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ (μοίρες)	Ποσοστό υδάτων (%)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1	25	0	1,42
1	30	0	1,56
1	35	0	1,73
5	35	0	4,93
10	35	0	8,4
50	25	0	40
100	35	0	75,9

Πίνακας 7.1 Αρχικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για χωρίς ποσοστό υδάτων για το Μοντέλο 1

#### Πίνακας 7.2 Τιμές συντελεστή ασφαλείας με ποσοστό υδάτων 43% για το Μοντέλο 1

Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ (μοίρες)	Ποσοστό υδάτων (%)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1	25	43	1,25
1	30	43	1,31
1	35	43	1,43
5	35	43	4,42
10	35	43	8,39
50	25	43	40,15
100	35	43	75,03

Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ (μοίρες)	Ποσοστό υδάτων (%)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1	25	44	0
1	30	44	0
1	35	44	0
5	35	44	0
10	35	44	0
50	25	44	0
100	35	44	0

Πίνακας 7.3 Μηδενικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για ποσοστό υδάτων 44% για το Μοντέλο 1

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ήμα Γεωλογίας

Όπως παρατηρείται στους παραπάνω πίνακες στο μοντέλο 1 παρουσιάζονται από ικανοποιητικές έως πολύ υψηλές τιμές για τον συντελεστή ασφαλείας χωρίς την ύπαρξη υδάτων στις ρωγμές των πετρωμάτων οι οποίες εξαρτώνται από τις τιμές της συνοχής c των ασυνεχειών του πετρώματος (Πίνακας 7.1). Ο συντελεστής ασφαλείας παραμένει σταθερός ή παρουσιάζει ελάχιστη μείωση καθώς αυξάνεται το ποσοστό του νερού μέσα στις ρωγμές μέχρι και το ποσοστό 43% (Πίνακας 7.2). Έπειτα ο συντελεστής ασφαλείας πέφτει ραγδαία στη τιμή μηδέν (0) μόλις το ποσοστό των υδάτων αγγίξει το 44% (Πίνακας 7.3).

Όσον αφορά τις παραμέτρους των ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση ευστάθειας, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η συνοχή c αυξάνεται ραγδαία και ο συντελεστής ασφαλείας. Ωστόσο το ποσοστό των υδάτων που μπορεί να δεχτεί χωρίς να αστοχήσει δεν αυξάνεται παράλληλα με τη συνοχή c στο συγκεκριμένο μοντέλο. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι διακυμάνσεις στη γωνία τριβής φ δε επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στον συντελεστή ευστάθειας ιδιαίτερα για υψηλές τιμές της συνοχής c.

## 7.2 2° Μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας

Για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου ως επιφάνειες οι οποίες ορίζουν το βραχώδες τέμαχος θεωρήθηκαν η ασυνέχεια S1 (με στοιχεία κλίσης/διεύθυνση κλίσης: 37/181) και η ασυνέχεια S4 (με στοιχεία κλίσης/διεύθυνση κλίσης: 32°/227°).



Σχήμα 7.2 Αναπαράσταση της σφήνας που δημιουργείται στο μοντέλο ανάλυσης ευστάθειας 2 σε σχέση με την πραγματική του εικόνα

Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ	Ποσοστό	Συντελεστής
	(μοίρες)	υδάτων (%)	ασφαλείας FS
1	25	0	1,12
1	30	0	1,27
1	35	0	1,43
5	35	0	3,47
10	35	0	6,01
50	25	0	26
100	35	0	51,8

Πίνακας 7.4 Αρχικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για χωρίς ποσοστό υδάτων για το Μοντέλο 2

Πίνακας 7.5 Μεσαίες και οριακές τιμές του συντελεστή ευστάθειας για διάφορα ποσοστά υδάτων στο Μοντέλο 2

Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ (μοίρες)	Ποσοστό υδάτων (%)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1	25	47	1
1	30	50	1
1	35	60	1
5	35	80	2,57
10	35	80	5,11
50	35	81	25,4
100	35	81	50,79

	4		
Συνοχή (kPa)	Γωνία Τριβής φ (μοίρες)	Ποσοστό υδάτων (%)	Συντελεστής ασφαλείας FS
1	25	82	0
1	30	82	0
1	35	82	0
5	35	82	0
10	35	82	0
50	35	82	0
100	35	82	0

Πίνακας 7.6 Μηδενικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για ποσοστό υδάτων 80%-82% για το Μοντέλο 2

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ήμα Γεωλογίας

Στο μοντέλο 2 παρατηρούνται ικανοποιητικές έως πολύ υψηλές τιμές για τον συντελεστή ασφαλείας, χωρίς την ύπαρξη υδάτων στις ρωγμές των πετρωμάτων, οι οποίες εξαρτώνται από τις τιμές της συνοχής c του πετρώματος παρόμοια με το μοντέλο 1 (Πίνακας 7.4). Έπειτα ανάλογα με την συνοχή c του πετρώματος παρατηρείται μία διακύμανση στο ποσοστό των υδάτων που απαιτούνται για να φτάσει η βραχόμαζα την οριακή τιμή ευστάθειας (Πίνακας 7.5) όμως ακόμα και στις περιπτώσεις με υψηλή συνοχή c μόλις το ποσοστό πλήρωσης υδάτων αγγίξει το 82% ο συντελεστής ευστάθειας μηδενίζεται ακαριαία (Πίνακας 7.6).

Σχετικά με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο παρατηρούμε ότι με την αύξηση της συνοχής των ασυνεχειών c παρατηρείται αύξηση και του συντελεστή ασφαλείας αλλά και του ποσοστού υδάτων που μπορεί να περιέχεται στις ρωγμώσεις του πετρώματος. Αναφορικά με τη γωνία τριβής φ όπως και στο Μοντέλο 1 δεν παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στον συντελεστή ευστάθειας και το ποσοστό πλήρωσης των ρωγμών με τις αλλαγές σε αυτή εκτός από τις περιπτώσεις με χαμηλή συνοχή c, εκεί οι διακυμάνσεις στον συντελεστή ευστάθειας είναι πιο έντονες ενώ όσο αυξάνει η συνοχή c οι διακυμάνσεις γίνονται αμελητέες.



Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση ευστάθειας διαμορφωμένων ορυγμάτων οδοποιίας υπό λειτουργία με τη χρήση LiDAR σε πρανή του κύριου οδικού άξονα της Εγνατίας Οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Μελετήθηκαν τρία ορύγματα τα οποία είχαν διαμορφωθεί σε περιβάλλον γνευσίων.

Τα γνευσιακά πετρώματα είναι ισχυρά μεταμορφωμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί χωρίς σταθερή ορυκτολογική σύσταση. Η σύστασή τους εξαρτάται από το αρχικό πέτρωμα το οποίο προέρχονται καθώς και την ύπαρξη ή μη διεισδυτικών σωμάτων στη μάζα τους. Χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές και μεγάλη σκληρότητα αλλά επειδή συνήθως βρίσκονται σε περιβάλλοντα που έχουν υποστεί ισχυρό τεκτονισμό παρουσιάζουν εκτεταμένες ζώνες αποσάθρωσης. Στα γνευσιακά πετρώματα δε παρατηρείται σχηματισμός υδροφόρου ορίζοντα μόνο τοπικά σε σημεία έντονα κερματισμένα και τεκτονισμένα.

Για να μπορέσει να αποδοθεί με τη μεγίστη δυνατή ακρίβεια η τεχνικογεωλογική κατάσταση των ορυγμάτων που μελετήθηκαν χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) γνευσιακής βραχόμαζας. Τα αποτελέσματα της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8.1)

Όρυγμα	Δομή	Βαθμός Αποσάθρωσης	GSI
1	Πολύ τεμαχώδης- διαταραγμένη (τοπικά )	Μέτρια αποσαθρωμένο	30-40
2	Αποδιοργανωμένη	Πλήρως αποσαθρωμένο	10
3	Πολύ τεμαχώδης	Μέτρια αποσαθρωμένο	40-50

Η μελέτη της τεχνικογεωλογικής κατάστασης των ορυγμάτων έγινε με τη χρήση συσκευής LiDAR (Light Detection And Ranging) η οποία μέσω της αποστολής ηλεκτρομαγνητικών παλμών στο χώρο μπορεί να απεικονίσει οποιαδήποτε τρισδιάστατη δομή με εξαιρετική ακρίβεια. Η παρουσίαση της τρισδιάστατης δομής δίνεται με τη μορφή ενός νέφους σημείων (point cloud) πάνω στο οποίο μπορούν να γίνουν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις που αφορούν την τεκτονική των επιφανειών (κλίση και διεύθυνση κλίσης) καθώς και τα γεωμετρικά τους στοιχεία.

Για να επαληθευτεί η ακρίβεια των μετρήσεων της συσκευής LiDAR και να συμπληρωθούν κάποια γεωλογικά στοιχεία έγινε και μελέτη στο πεδίο όπου έγιναν κάποιες τεκτονικές μετρήσεις στα βραχώδη ορύγματα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την επεξεργασία των δεδομένων της συσκευής LiDAR με τη χρήση του λογισμικού cloud compare προέκυψαν τεκτονικά διαγράμματα τα οποία συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο όπου και διορθώθηκαν κάποιες αποκλίσεις που υπήρχαν. Σε μετρήσεις ορισμένων επιφανειών οι αποκλίσεις που προέκυψαν δεν ήταν αμελητέες αλλά με συνδυασμό δύο εφαρμογών του λογισμικού Cloud Compare (Facets και Compass) που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή τεκτονικών στοιχείων και έχοντας ως οδηγό τις τεκτονικές μετρήσεις από το ύπαιθρο μπόρεσαν να εξαχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για να αξιολογηθεί η τεκτονική κατάσταση και ως αποτέλεσμα η ευστάθεια των ορυγμάτων. Συγκεκριμένα στο όρυγμα 1 δε φαίνεται να υπάρχουν επιφάνειες που να σχηματίζουν πιθανές αστοχίες ενώ στο όρυγμα 3 παρατηρήθηκαν κάποιες επιφάνειες οι οποίες δυνητικά θα μπορούσαν να σχηματίσουν αστοχίες τύπου επίπεδης και σφηνοειδούς ολίσθησης. Το όρυγμα 2 είναι μία ξεχωριστή περίπτωση γιατί αποτελείται από μία μεγάλη αστοχία κυκλικού τύπου σε όλο το μήκος του.

Παράλληλα πάνω στα νέφη σημείων (point clouds) έγινε μέτρηση της επιφάνειας και του όγκου ορισμένων βραχωδών τεμαχών πάνω στα ορύγματα τα οποία είτε έχουν ήδη ολισθήσει είτε έχουν τάση προς ολίσθηση τα οποία όμως στο σύνολό τους έχουν ανασχεθεί από τις υπάρχουσες βραχοπαγίδες. Επίσης μετρήθηκε ο όγκος της αστοχίας κυκλικού τύπου του δεύτερου ορύγματος.

Για μία από τις σφηνοειδείς ολισθήσεις που έχει ήδη συμβεί στην επιφάνεια του Ορύγματος 3 πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας με τη χρήση του λογισμικού Swedge της Rockscience για να διαπιστωθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκε. Κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα για την αστοχία βασισμένα στις ασυνέχειες από τις οποίες προέκυψε το βραχώδες τέμαχος που αστόχησε και προσεγγίστηκε για διάφορες τιμές συνοχής c των ασυνεχειών του πετρώματος και γωνίας τριβής φ το ποσοστό των υδάτων που απαιτείται ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να πάρει τιμές μικρότερες της μονάδας (FS>1)και ως αποτέλεσμα να χαθεί η επαφή μεταξύ τεμάχους και βραχόμαζας. Από τα δύο αυτά μοντέλα ανάλυσης ευστάθειας υπολογίστηκε ότι το ποσοστό πλήρωσης των ασυνεχειών αποσαθρωμένων γνευσιακών πετρωμάτων για να πάρει ο συντελεστής ασφαλείας τιμή μικρότερη της μονάδας κυμαίνεται από 33% έως 60% για χαμηλές τιμές συνοχής (c=1kPa), ενώ για υψηλότερες τιμές συνοχής (c=5-100kPa) κυμαίνεται από 44% έως 81%.



GR11, Κοινοπραξία Σχεδιών Διαχειρησης των λεκανών απορροής ποταμών του Υ.Δ Ανατολικής Μακεδονίας. (2013). Σχέδιο Διαχείρησης των Λεκανών Απορροης Ανατολικής Μακεδονίας. Αθήνα: Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Δημητριάδης, Σ. Θ. (1988). Εισαγωγή στη Πετρολογία των Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων. Θεσσαλονίκη: Γιαχούδη.

ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. (n.d.). Γεωλογική Μελέτη Ασπροβάλτα-Στρυμόνας (11.2-11.3)-Σήραγγα C&C2.

Ι.Γ.Μ.Ε. (n.d.). Φύλλο Γεωλογικού Χάρτη Σταυρός (κλίμακα 1:50.000).

Κούκης, Γ., & Σαμπατακάκης, Ν. (2002). Τεχνική Γεωλογία. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μαρίνος, Β. (2016, 12). Παρουσιάσεις μαθήματος Τεχνικής Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Μουντράκης, Δ. Μ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας . Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

## Διεθνής Βιβλιογραφία

Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996) 'Landslides: Investigation and Mitigation -Chapter 3: Landslide Types and Processes', *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, 247(JANUARY 1996), p. 76. Available at: https://www.researchgate.net/publication/269710355\_CrudenDM\_Varnes\_DJ\_1996 \_Landslide\_Types\_and\_Processes\_Special\_Report\_Transportation\_Research\_Board\_ National\_Academy\_of\_Sciences\_24736-75.

Dewez, T. J. B., Girardeau-montaut, D., Allanic, C. and Rohmer, J. (2016) 'FACETS : A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS', XLI(July), pp. 799–804. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016.

Ducan C Wyllie, C. W. M. (2005) *Rock slope engineerig Civil and Mining*. 4th edn. Spoon Press.

Highland, C. by L. (2004) 'Landslide Types and Processes USGS', *http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/*, (July), pp. 1–4.

Hoek, E. (2007) *Practical Rock engineering*. Available at: https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abella, A., Derron, M., Loye, A., Metzger, R. and Pedrazzini, A. (2012) 'Use of LIDAR in landslide investigations: a review', pp. 5–28. doi: 10.1007/s11069-010-9634-2.

Kilias A., Mountrakis D., Falalakis G. (1999) 'Cretaceous – Tertiary structures and kinematics of the Serbomacedonian metamorphic rocks and their relation to the exhumation of the Hellenic hinterland (Macedonia, Greece)', *Journal of earth Sciences*, pp. 513–531.

Marinos, P. (2010) 'New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses', *Proceedings of the 12th Bulletin of the Geological Society of Greece International Congress Patras, May, 2010*, (3), pp. 1248–1258. Available at: https://geolib.geo.auth.gr/digeo/index.php/bgsg/article/viewFile/6841/6599.

Marinos, P. and Hoek, E. (2001) 'Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(2), pp. 85–92. doi: 10.1007/s100640000090.

Mcinerney, D., Kempeneers, P. and Data, E. S. (no date) '3D Point Cloud Data Processing'. doi: 10.1007/978-3-319-01824-9.

Novotný, J. (2013) 'Varnes Landslide Classification (1978)', *Charles University in Prague, Faculty of Science, Czech Republic*, (November), p. 25 URL http://www.geology.cz/projekt681900/vyuk. Available at: http://www.geology.cz/projekt681900/vyukovematerialy/2\_Varnes\_landslide\_classification.pdf.

Thiele, S. T. (2017). Thiele, S. T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwa Rapid, semiautomatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data, Solid Earth Discuss., https://doi.org/10.5194/se-2017-83, in revi.

#### Ιστοσελίδες

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Caribean Handbook on risk information management: <u>http://www.charim.net/datamanagement/32</u> (2017)

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος: <u>http://portal.tee.gr</u>