



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

«ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαντά Σωτηρία

Επιβλέπων: Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής καθηγητής
Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

«ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαντά Σωτηρία

Επιβλέπων: Λουπασάκης Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ___ / ___ / 2021

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθανασάς Κωνσταντίνος, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπενάρδος Ανδρέας, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
2. ΠΡΑΝΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	11
2.1 ΠΡΑΝΗ	11
2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	12
2.2.1.ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	13
2.2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	14
2.2.2.1 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ (FALLS)	14
2.2.2.2 ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ (TOPPLINGS).....	14
2.2.2.3 ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ (SLIDES)	15
2.2.2.4 ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ (ΥΠΟΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ) ΕΞΑΠΛΩΣΕΙΣ (LATERAL SPREADS)	17
2.2.2.5 ΡΟΕΣ (FLOWS).....	17
2.2.2.6 ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ (COMPLEX)	18
2.2.2.7 ΕΡΠΥΣΜΟΙ.....	18
2.3. ΑΙΤΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	20
2.3.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΤΕΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	20
2.3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ.....	20
3. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΕ ΟΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	21
3.1. ΟΡΥΧΕΙΟ PANLUO	21
3.2. ΟΡΥΧΕΙΟ ΦΑΡΑΓΓΙΟΥ BINGHAM.....	21
3.3. ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	22
3.4. ΟΡΥΧΕΙΟ WEST.....	22
3.5. ΟΡΥΧΕΙΟ AIR LAYA.....	23
3.6. ΟΡΥΧΕΙΟ KEF ESSNOUN.....	23
4. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	24
4.1. ΟΡΥΧΕΙΟ PANLUO, ΕΠΑΡΧΕΙΑ FUJIAN ΚΙΝΑ.....	24
4.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
4.1.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	25
4.1.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	28
4.1.4. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	33

4.1.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	40
4.2. ΟΡΥΧΕΙΟ ΧΑΛΚΟΥ ΦΑΡΑΓΓΙ BINGHAM, ΓΙΟΥΤΑ Η.Π.Α.....	41
4.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
4.2.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	42
4.2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	49
4.2.4. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	54
4.2.5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	56
4.2.6. ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ – ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ.....	56
4.3. ΟΡΥΧΕΙΟ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΜΥΝΤΑΙΟ, ΦΛΩΡΙΝΑ ΕΛΛΑΔΑ	58
4.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	58
4.3.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	59
4.3.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	64
4.3.4. ΥΛΙΚΕΣ ΖΗΜΙΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	68
4.3.5. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	69
4.3.6. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	69
4.4. ΟΡΥΧΕΙΟ ΛΙΓΝΙΤΗ WEST, ΔΥΤΙΚΗ FUSHUN, ΕΠΑΡΧΙΑ LIAONING ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΚΙΝΑ.....	71
4.4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
4.4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	71
4.4.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	74
4.4.4. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ - ΠΡΟΛΗΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	76
4.5. ΧΩΡΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΤΕΙΡΩΝ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΙΥΙ, ΕΠΑΡΧΙΑ SICHUAN, ΚΙΝΑ. 81	
4.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
4.5.2. ΚΛΙΜΑ, ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	81
4.5.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	82
4.5.4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	84
4.5.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	84
4.5.4.2 ΒΡΑΧΩΔΗ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	85
4.5.5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΚΙΝΗΣΗΣ – ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	86
4.5.6. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ.....	87
5. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κατάπτωσης (Lynn M. Highland κ.α. 2008) ..	14
Εικόνα 2:Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ανατροπής (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	15
Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου περιστροφικής ολίσθησης (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	16
Εικόνα 4:Σχηματική απεικόνιση φαινομένου στρωματοειδούς ολίσθησης (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	16
Εικόνα 5:Σχηματική απεικόνιση φαινομένου πλευρικής εξαπλώσεως (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	17
Εικόνα 6:Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ροής (Lynn M. Highland κ.α. 2008)	18
Εικόνα 7:Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ερπυσμού (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	18
Εικόνα 8:Κύριοι τύποι κατολισθητικών κινήσεων (Lynn M. Highland κ.α. 2008).....	19
Εικόνα 9:Θέση ορυχείου Panluo (σημειώνεται με το κόκκινο τετράγωνο) (Zuoan Wei κ.α. 2007).....	24
Εικόνα 10:Όψη της κατολίσθησης στο ορυχείο Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007)	25
Εικόνα 11: Μορφολογία στην περιοχή του ορυχείου Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007).....	25
Εικόνα 12: Γεωλογική τομή του ορυχείου (Zuoan Wei κ.α. 2007).....	26
Εικόνα 13: Πυρήνες ιλυόλιθων και ψαμμιτών από γεώτρηση στην περιοχή (Zuoan Wei κ.α. 2007).....	27
Εικόνα 14: Στρώματα τετραδικών αποθέσεων (Zuoan Wei κ.α. 2007)	27
Εικόνα 15: Γεωλογικές δομές στο ορυχείο Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007).....	28
Εικόνα 16:Πολλαπλές επιφάνειες ολίσθησης που προκύπτουν από την ανάλυση οριακής ισορροπίας (Zhang L. κ.α. 2005).....	29
Εικόνα 17:Η σχέση μεταξύ των παραγόντων ευστάθειας του πρανούς και της διατμητικής αντοχής (φ και C) (Zhang L. κ.α. 2005).....	30
Εικόνα 18:Οι κατολισθήσεις στο ορυχείο Panluo (Zhang L. κ.α. 2005).....	31
Εικόνα 19:Η ακολουθία αστοχίας του πρανούς (Zhang L. κ.α. 2005).....	31
Εικόνα 20: Βροχόπτωση και αποτελέσματα από την παρακολούθηση βασικών σημείων της κατολίσθησης από το 1990 έως το 2000 (Zhang L. κ.α. 2005).....	32
Εικόνα 21:Σχέση μεταξύ της μηνιαίας βροχόπτωσης και των μετατοπίσεων στο σημείο παρακολούθησης #2 το 1995 (Zhang L. κ.α. 2005)	32
Εικόνα 22:Απλές κεκλιμένες γεωτρήσεις (Wei Z. κ.α. 2003).....	33
Εικόνα 23: Φυσικές ιδιότητες και παράμετροι αντοχής του πρανούς (Wei Z. κ.α. 2003)	34
Εικόνα 24:Ορισμένα σημεία παρακολούθησης και μέτρα αποκατάστασης (Wei Z. κ.α. 2003)	35
Εικόνα 25:Γεώτρηση για την παρακολούθηση της στάθμης των υπογείων υδάτων στο πρανές (Wei Z. κ.α. 2003)	35
Εικόνα 26:Αυτόματος καταγραφικός σταθμός βροχοπτώσεων (Wei Z. κ.α. 2003).....	36
Εικόνα 27:Προτεινόμενος τοίχος αντιστήριξης (Wei Z. κ.α. 2003).....	36
Εικόνα 28:Μέτρα για τον έλεγχο των κατολισθήσεων (Wei Z. κ.α. 2003).....	37
Εικόνα 29:Εφαρμογή των μέτρων αντιμετώπισης	37
Εικόνα 30:Επιφανειακή αποστράγγιση και ρύθμιση της επιφάνειας της κατολίσθησης (Wei Z. κ.α. 2003).....	38
Εικόνα 31:Αφαίρεση υλικού από την κορυφή του πρανούς (Wei Z. κ.α. 2003).....	39
Εικόνα 32:Παραμένοντες πυλώνες μεταλλεύματος ως τοίχος συγκράτησης (Wei Z. κ.α. 2003)	39
Εικόνα 33:Προσαρμοσμένο ύψος δαπέδου (Wei Z. κ.α. 2003)	40
Εικόνα 34:Το ορυχείο Bingham Canyon σήμερα	41
Εικόνα 35:Η θέση των ρηγμάτων Uinta και Wasatch σε σχέση με το ορυχείο (Babcock κ.α. 1997).....	43

Εικόνα 36: Τεκτονικός χάρτης του ορυχείου (Lanier κ.α. 1978).....	44
Εικόνα 37: Παλαιζωϊκές και Μεσοζωϊκές αλληλουχίες ιζηματογενών πετρωμάτων στο ορυχείο Bingham (Swensen 1975).....	46
Εικόνα 38: Κατανομή των εκρηξιγενών πετρωμάτων στο ορυχείο (Phillips κ.α. 1997).....	47
Εικόνα 39: Λεκάνες τροφοδοσίας στην περιοχή (Wallace και Lowe 2009).....	48
Εικόνα 40: Εθνικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Η.Π.Α (USGS 2014).....	49
Εικόνα 41: Φωτογραφίες από τις κατολισθήσεις στο ορυχείο Bingham Canyon (φωτογραφία ιδιοκτησίας της Rio Tinto Kennecott).....	50
Εικόνα 42: Πανοραμική όψη των κατολισθήσεων (Septian κ.α. 2016).....	53
Εικόνα 43: Ρομποτικός σταθμός παρακολούθησης (RTS) για την μέτρηση παραμορφώσεων στα πρανή (Rio Tinto Kennecott 2013).....	54
Εικόνα 44: Ραντάρ ευστάθειας πρανούς Groundprobe (Rio Tinto Kennecott 2013).....	55
Εικόνα 45: Η λανθασμένη εκτίμηση για το μέγεθος των κατολισθήσεων (Moore κ.α. 2017).	55
Εικόνα 46: Το μεταλλείο μετά τις εργασίες αποκατάστασης (Ward 2015).....	57
Εικόνα 47: Τυπική απλοποιημένη τομή βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής στην Ελλάδα (Zevgolis κ.α. 2021).....	58
Εικόνα 48: Η λιγνιτική λεκάνη Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου.....	59
Εικόνα 49: Στρωματογραφία των ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων (Galetakis κ.α. 2005)	60
Εικόνα 50: Λιθοστρωματογραφική στήλη της λεκάνης Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου (Koukouzas 2007).....	61
Εικόνα 51: Αεροφωτογραφία του 1945, που απεικονίζει την έκταση του έλους πριν την αποξήρανσή του.....	62
Εικόνα 52: Δορυφορική εικόνα στην οποία φαίνεται η θέση του ορυχείου Αμυνταίου (Loupasakis 2020).....	63
Εικόνα 53: Σχηματική αναπαράσταση της γεωλογικής τομής του ορυχείου στην οποία φαίνονται οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί και η θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα (Loupasakis 2020).....	63
Εικόνα 54: Η τεράστια κατολίσθηση στο ορυχείο Αμυνταίου (Loupasakis 2020).....	64
Εικόνα 55: Χαρτογράφηση της κατολίσθησης της 10ης Ιουνίου στο ορυχείο Αμυνταίου (Valkaniotis κ.α. 2017).....	64
Εικόνα 56: Δευτερεύοντα ρήγματα μεταξύ των ρηγμάτων της Βεγορίτιδας και των Αναργύρων. Τα χρωματιστά βέλη δείχνουν τα επίπεδα των ρηγμάτων προβεβλημένα στην κύρια κατακρήμνιση της αστοχίας (Loupasakis 2020).	65
Εικόνα 57: a. Υπόγεια νερά από τους ρηχούς υδροφορείς διασχίζουν την κύρια κατακρήμνιση της κατολίσθησης (κίτρινα βέλη). b. Όψη του νοτιοανατολικού τμήματος της κατακρήμνισης στην οποία φαίνονται μικρές λίμνες που σχηματίστηκαν από το νερό που προήλθε από τους υδροφορείς (κόκκινα βέλη). c. Όψη του βορειοδυτικού τμήματος της κατακρήμνισης, που είναι τελείως ξηρό εξαιτίας της έλλειψης υπόγειου νερού (Loupasakis 2020).....	66
Εικόνα 58: Η κλίση του πρανούς υπολογισμένη έμμεσα με βάση την απόσταση μεταξύ διαδοχικών φορέων. Οι κλίσεις που σημειώνονται αποδεικνύουν πως διαχρονικά, τα ανώτερα τμήματα του πρανούς ήταν πιο ομαλά ενώ τα κατώτερα πιο απότομα (Loupasakis 2020). ...	67
Εικόνα 59: a. Μία πιο κοντινή όψη του δυτικού ορίου της κατολίσθησης. Αρκετά μέτρα μεταφορικής ταινίας που καταστράφηκαν είναι εμφανή. Φαίνεται το όριο της κατολίσθησης το οποίο συμπίπτει με το ρήγμα της Βεγορίτιδας. b. Ένας καδοφόρος εκσκαφέας 1500 τόνων που θάφτηκε από την κατολίσθηση. C. Μία όψη του χωριού των Αναργύρων που επηρεάστηκε από την κατολίσθηση. Φαίνεται και το κατεστραμμένο οδικό δίκτυο. d. Ένα από τα σπίτια στο χωριό Ανάργυροι που καταστράφηκε από την κατολίσθηση. e. Η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του χωριού των Αναργύρων κατέρρευσε. f. Ένας από τους αρχαιολογικούς χώρους περιμετρικά του ορυχείου πριν την κατολίσθηση. g. Μία κοντινότερη	

εικόνα από μία αρχαιολογική ανασκαφή. Φαίνονται τα ίχνη από τους ξύλινους πυλώνες για τη θεμελίωση των σπιτιών (Loupasakis 2020).....	68
Εικόνα 60:Το μέγεθος της κατολίσθησης στο ορυχείο του Αμυνταίου (φωτογραφία ιδιοκτησίας της Eurokinissi).....	69
Εικόνα 61: Εικόνα της κατολίσθησης πριν την αποκατάσταση (Βλάχος και Ρούμπος 2020) .	70
Εικόνα 62:Εικόνα της κατολίσθησης μετά την Α' φάση αποκατάστασης (Βλάχος και Ρούμπος 2020).....	70
Εικόνα 63: Το ορυχείο West στη Fushun (Ιδιοκτησία του ιστότοπου alamy.com)	71
Εικόνα 64: Γεωλογική τομή του νότιου πρανούς (Nie L. κ.α. 2014).....	72
Εικόνα 65: Επιφανειακή εμφάνιση των σχηματισμών (Nie L. κ.α. 2014).....	72
Εικόνα 66: Χάρτης και αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης και των συσκευών παρακολούθησης στον τομέα E1200. Η κίτρινη γραμμή αναπαριστά τα όρια της κατολίσθησης. Οι γραμμές W800 έως E2200 αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς. Η άσπρη γραμμή (11') είναι το ίχνος της γεωλογικής τομής (Nie L. κ.α. 2014)	74
Εικόνα 67: Φωτογραφία της εδαφικής ρωγμής 1 στην κεφαλή της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014).....	75
Εικόνα 68: Θέση της εδαφικής ρωγμής 2 στην κεφαλή της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014)	76
Εικόνα 69: a.Εικόνα του αντλητικού σταθμού 309 στον τομέα E1200 b.Εικόνα της ρωγμής διόγκωσης στη δεξαμενή #2 (Nie L. κ.α. 2014).....	76
Εικόνα 70: Αθροιστικές μετατοπίσεις στο επιμηκνσιόμετρο 1 από την 26η Ιουλίου 2011 μέχρι την 25η Μαρτίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).....	77
Εικόνα 71:Δεδομένα από το αποκλισιόμετρο κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2012 έως Μάρτιο 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).	78
Εικόνα 72: Οι ολικές μετατοπίσεις στα σημεία GPS0-4 έως GPS0-7 από την 25η Φεβρουαρίου 2013 μέχρι την 12η Απριλίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).....	79
Εικόνα 73:Πιθανές επιφάνειες ολίσθησης και τα διανύσματα μετατόπισης της επιφάνειας του πρανούς στον τομέα E1200 από την 25η Φεβρουαρίου 2013 έως και την 12η Απριλίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).	79
Εικόνα 74: Γεωλογικός χάρτης της κατολίσθησης στο χώρο απόθεσης απορριμμάτων (Wang H. κ.α. 2021).....	82
Εικόνα 75: Νερό στη βάση του τέλματος (Eid H. κ.α. 2000)	84
Εικόνα 76: Οι διαστάσεις της κατολίσθησης (Wang H. κ.α. 2021).	85
Εικόνα 77:Διεπαφές και πηγές στην επιφάνεια ολίσθησης (Eid H. κ.α. 2000).....	86
Εικόνα 78: Φωτογραφίες από τα αγροτόσπιτα πριν και μετά την κατολίσθηση (Wang H. κ.α. 2021).....	87

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τη Μαντά Σωτηρία, φοιτήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, στην κατεύθυνση της Γεωτεχνολογίας, στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της σχολής, για την απόκτηση διπλώματος μηχανικού Ε.Μ.Π. και την επιτυχή ολοκλήρωση του κύκλου σπουδών.

Η εργασία αυτή επιχειρεί μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης να παρουσιάσει γεωτεχνικές αστοχίες, μεγάλου μεγέθους, που συνέβησαν σε μεταλλευτικά έργα. Επικεντρώνεται σε αστοχίες που συνέβησαν σε ορυχεία ανοικτής εκσκαφής και αναλύει το μηχανισμό τους.

Με την ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. Λουπασάκη Κωνσταντίνο, που ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να με βοηθήσει σε οποιαδήποτε απορία και αν είχα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τους γονείς μου και τις αδελφές μου για την στήριξη και την αγάπη τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Αντώνιο Καμηλάκη για την υπομονή του και την αγάπη του, όλα αυτά τα χρόνια που έχουμε συνδέσει τις ζωές μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση γεωτεχνικών αστοχιών σε μεταλλευτικά έργα. Εξετάζει παραδείγματα από όλο τον κόσμο και επικεντρώνεται σε κατολισθητικά φαινόμενα σε πρηνή ορυχείων ανοικτής εκσκαφής και σε πρηνή χώρων απόθεσης μεταλλευτικών απορριμμάτων.

Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο, με βάση το οποίο θα γίνει η ανάλυση του μηχανισμού των κατολισθήσεων. Αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρηνών και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους τύπους των κατολισθήσεων και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθενός από αυτούς. Στο τέλος του θεωρητικού κεφαλαίου, αναφέρονται τα πιθανά αίτια που συντελούν στην εκδήλωση ενός κατολισθητικού φαινομένου.

Στη συνέχεια, γίνεται μία περιληπτική αναφορά σε διάφορες γεωτεχνικές αστοχίες σε μεταλλευτικούς χώρους. Στο κύριο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκαν προς ανάλυση πέντε παραδείγματα κατολισθήσεων ανά τον κόσμο. Τα παραδείγματα αυτά επελέγησαν λόγω του μεγάλου μεγέθους της αστοχίας που περιέχουν και λόγω του ότι αποτελούν περιπτώσεις που επιτρέπουν την ενδελεχή διερεύνηση των μηχανισμών της αστοχίας, λόγω της επαρκούς βιβλιογραφίας που υπάρχει για αυτά.

Οι περιπτώσεις μελέτης που παρουσιάζονται είναι η κατολίπηση του Ιουλίου του 1990, στο ορυχείο Panlao, στην Κίνα, η τεράστια κατολίπηση της 10^{ης} Απριλίου 2013 στο ορυχείο Bingham, στις ΗΠΑ, η κατολίπηση της 10^{ης} Ιουνίου 2017 στο ορυχείο Αμυνταίου, στην Ελλάδα, η κατολίπηση που ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2012 στο ορυχείο West στην Κίνα και τέλος η κατολίπηση της 27^{ης} Φεβρουαρίου 2011 στον χώρο απόθεσης μεταλλευτικών απορριμμάτων στην περιοχή Μιγί της Κίνας.

Για κάθε περίπτωση μελέτης, υπάρχει αρχικά μια συνοπτική περιγραφή του μεταλλευτικού χώρου στον οποίο συνέβη. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο μελέτης, η υδρογεωλογία και η τοπογραφία της περιοχής. Έπειτα, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε αστοχίας, αναλύεται ο μηχανισμός ενεργοποίησης, εξέλιξης και απόθεσης υλικού της. Τέλος παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκε κάθε φαινόμενο.

ABSTRACT

The objective of this paper is the literature review of geotechnical failures that have happened in mining sites. The paper examines examples from all over the world and focuses on landslide phenomena that happened on the slopes of open pit mines and on the slopes of mine waste dumps.

Initially, the necessary theoretical context is presented, according to which, the analysis of the mechanism of the landslides will be done. There is an analysis of the factors that affect the slopes' stability and then a reference is made on the types of the landslides and on the specific characteristics of each one of them. In the end of the theoretical chapter, the possible causes of landslide phenomena are presented.

Furthermore, there is a brief review of some geotechnical failures in mining sites. In the main chapter of this paper, five examples of landslides, all over the world, are chosen to be thoroughly presented. These examples were selected because of the failure's size and due to the adequate literature that describes them.

The case studies, that this paper analyses, are the following: the landslide on July 1990 in the Panluo mine, in China, the massive landslide on the 10th of October 2013 in the Bingham canyon mine in the USA, the landslide on the 10th of June 2017 in the Amintaio mine in Greece, the landslide that initiated on August 2012 in the West mine, in China and lastly the landslide that occurred on the 27th of February 2011 in the mine waste dump in Miyi region in China.

For each one of the case studies, there is a brief description of the mining site that hosted it. Then the site's geology, hydrogeology and topography are presented. Afterwards, the characteristics of each failure are examined and the mobilization movement and deposition process are analyzed. Last but not least, there is a presentation of the ways in which the failure was dealt with.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξορυκτική δραστηριότητα από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα αποτέλεσε πυλώνα της ανάπτυξης του πρωτογενούς τομέα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η εκμετάλλευση ακόμα και των πιο δυσπρόσιτων κοιτασμάτων έχει καταστεί δυνατή. Στην αρχαιότητα, η πλειοψηφία των μεταλλευτικών έργων ήταν μικρής κλίμακας εξαιτίας της έλλειψης τεχνικών μέσων και γνώσης για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων. Στη σύγχρονη, όμως, εποχή μεταλλευτικά έργα τεραστίων διαστάσεων πραγματοποιούνται παγκοσμίως.

Ανέκαθεν, η μεταλλευτική δραστηριότητα και η κατασκευή των συνοδών έργων συνδεόταν με μερικά από τα μεγαλύτερα και πιο επιζήμια ατυχήματα. Γεωτεχνικές αστοχίες που έχουν συμβεί σε ορυχεία, έχουν κοστίσει τη ζωή χιλιάδων ανθρώπων και έχουν προκαλέσει τεράστιες υλικές καταστροφές. Οι γεωτεχνικές αυτές αστοχίες είτε οφείλονται σε ανθρωπογενείς παράγοντες, είτε οφείλονται σε φυσικά αίτια είναι απαραίτητο να εξεταστούν προς την αποφυγή επανάληψής τους.

Οι κατολισθήσεις είναι μία από τις πιο συχνές γεωτεχνικές αστοχίες που συμβαίνουν σε μεταλλευτικά έργα και επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία τους και όχι μόνο. Η εκδήλωση των κατολισθήσεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η βροχόπτωση, η σεισμικότητα, οι γεωλογικές συνθήκες, η τεκτονική, η διάβρωση καθώς και οι εργασίες εξόρυξης.

Λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους που συνδέονται με τις γεωτεχνικές αστοχίες, είναι απαραίτητη η προσπάθεια πρόβλεψής τους και η λήψη μέτρων για την αποφυγή τους. Από τη στιγμή όμως που αυτές συμβούν, είναι ζήτημα υψίστης σημασίας να μελετηθεί ο μηχανισμός με τον οποίο εκδηλώνονται και να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης προκειμένου να μετριαστούν οι επιπτώσεις τους.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσπάθεια ανάλυσης κάποιων χαρακτηριστικών αστοχιών, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με σκοπό την αποφυγή μελλοντικής επανάληψής τους. Στα παρακάτω κεφάλαια γίνεται η παρουσίαση του θεωρητικού πλαισίου και αναλύονται οι επιλεγμένες αστοχίες.

2. ΠΡΑΝΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

2.1 ΠΡΑΝΗ

Ως πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν, δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων στο εσωτερικό τους, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα προκειμένου να εξομαλύνουν το ανάγλυφο. Στις διατμητικές αυτές τάσεις αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους και στην περίπτωση που αυτή δεν επαρκεί, τότε προκαλείται θραύση του πρανού και μετακίνηση της εδαφικής μάζας, που ονομάζεται κατολίσθηση. (Turner & Schuster 1996)

Αστοχία πρανού είναι η κατάρρευση μάζας της επιφάνειάς του. Αστοχία μπορεί να επέλθει είτε λόγω της ανθρώπινης επέμβασης στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (εκσκαφές ορυγμάτων, υποσκαφές, επιφορτίσεις, κ.α.), τα οποία διαταράσσουν την υφιστάμενη ισορροπία στο έδαφος είτε υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α. μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία ενός πρανού. (Turner & Schuster 1996)

Τα τεχνητά πρανή κατασκευάζονται σε διάφορα τεχνικά έργα και προκύπτουν από την εκσκαφή του φυσικού εδάφους ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού. Έτσι διακρίνονται δύο κατηγορίες τεχνητών πρανών, τα πρανή ορυγμάτων και τα πρανή επιχωμάτων. Η ευστάθεια ενός τέτοιου τεχνητού πρανού εξασφαλίζεται με τη χρησιμοποίηση έργων αντιστήριξης, όπως τοίχοι αντιστήριξης, διαφράγματα από πασσάλους, αγκυρώσεις καθώς και οπλισμένη γη και γεω - υφάσματα.

Οι παράγοντες που επιδρούν κυρίως σε ένα φυσικό πρανές είναι εκείνοι της γεωλογικής δομής, των υδρογεωλογικών συνθηκών, των τεκτονικών συνθηκών και των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Γενικά, οι κατολισθήσεις αποτελούν από τα πιο σοβαρά και καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα. Τα αποτελέσματά τους έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, που διαδραματίζουν αξιόλογο ρόλο στη βιωσιμότητα πολλών οικισμών, στη διατήρηση επισφαλών συνθηκών θεμελίωσης των τεχνικών έργων, στη σωστή λειτουργία του οδικού δικτύου και στην καταλληλότητα ή μη πολλών περιοχών για διάφορες χρήσεις.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ευστάθειας πρανών, που διαμορφώνονται κατά την κατασκευή τεχνικών έργων, αλλά και φυσικών πρανών που παρουσιάζουν ενδείξεις πιθανής κατολίσθησης.

2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Οι κατολισθήσεις, όπως αναφέρει ο Βραχλιώτης (2011), μαζί με τις πυρκαγιές, τους σεισμούς τις ηφαιστειακές εκρήξεις και τις πλημμύρες, συνιστούν τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές αποτελώντας βασική αιτία απώλειας ανθρωπίνων ζώων αλλά και περιουσιών με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Οι κατολισθήσεις είναι γεωλογικοί κίνδυνοι που επιφέρουν στο διεθνή χώρο αρκετές απώλειες ανθρωπίνων ζώων και καταστροφές σε κατασκευές κατ' έτος. Η πλέον καταστροφική κατολίσθηση που αναφέρεται διεθνώς έλαβε χώρα στην Κίνα το 1920 μετά από σεισμό και προκάλεσε το θάνατο 100.000 ανθρώπων, καθώς τα σπίτια τους σκεπάστηκαν από μετακινημένες μάζες ασβεστούχων πηλών.

Σύμφωνα με το Ρόζο (2007) ο όρος «κατολισθητικά φαινόμενα» είναι ο πλέον αποδεκτός για να περιλάβει όλο το εύρος των αστοχιών πρανών, δηλαδή, ερπυσμούς, ολισθήσεις, ροές, ανατροπές, καταπτώσεις που μπορούν να συμβούν στην ξηρά και υποθαλάσσια.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για το φαινόμενο της κατολίσθησης.

Ακολουθούν ορισμένοι αντιπροσωπευτικοί ορισμοί.

- Οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρανή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα ορίζουν το φαινόμενο της κατολίσθησης. Κατολίσθηση ορίζεται κάθε αλλαγή, μεγάλη ή μικρή, της επιφάνειας μιας κλιτύος, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού, με ρήξη ή όχι της συνέχειάς της, αργή ή ξαφνική, που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας και οφείλεται σε φυσικά ή τεχνητά αίτια. Η κατολίσθηση εκφράζει δηλαδή το αποτέλεσμα της αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους, που εκτός από την περίπτωση τεχνητών αιτιών, αποτελεί μια φυσική γεωμορφολογική εξέλιξη, αλλά με πολύ μεγαλύτερες γενικά ταχύτητες. Συνεπώς, είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου, με τη διαμόρφωση νέων εντατικών καταστάσεων, που δημιουργούν μια επιθυμητή νέα κατάσταση ισορροπίας (Π. Μαρίνος 1984).
- Εναλλακτικά η κατολίσθηση ορίζεται ως την προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου, κορημάτων ή γαιών σε ένα πρανές (Cruden 1991). Από αυτόν τον ορισμό εξαιρούνται οι καθιζήσεις, οι καταπτώσεις, οι θραύσεις εδάφους, καθώς και οι κατολισθήσεις, που έχουν τη μορφή και την ταχύτητα χιονοστιβάδας. Η χιονοστιβάδα χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο μεγάλης κλίμακας. Υλικά μιας τέτοιας αστοχίας μετακινούνται σε μεγάλες αποστάσεις και διαταράσσουν τη μορφολογία του τοπίου, την κατανομή της βλάστησης και το φυσικό δίκτυο στράγγισης της ευρύτερης περιοχής.

2.2.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, οι οποίες στηρίζονται σε ποικίλα κριτήρια, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των συστημάτων ταξινόμησης.

1. Ανάλογα με το στάδιο δράσης, χαρακτηρίζονται σε:

- Ενεργές
- Απενεργοποιημένες
- Αδρανείς
- Ανενεργές
- Αρχαίες ή απολιθωμένες

2. Ανάλογα με το υλικό, η μάζα η οποία κατολισθαίνει μπορεί να είναι βράχος ή έδαφος.

3. Ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης, οι κατολισθήσεις ταξινομούνται κατά Varnes (1978) όπως φαίνεται παρακάτω:

Τάξη	Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/sec)	Ταχύτητα μετακίνησης
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$>5 \cdot 10^2$	>5 m/sec
6	Πολύ γρήγορη	$5 \cdot 10^1$	3 m/min
5	Γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1}$	1.8 m/hr
4	Μέτρια	$5 \cdot 10^{-3}$	1.8 m/hr
3	Αργή	$5 \cdot 10^{-5}$	1.8 m/hr
2	Πολύ αργή	$5 \cdot 10^{-7}$	1.8 m/hr
1	Εξαιρετικά αργή	$<5 \cdot 10^{-7}$	<1.8 m/hr

4. Ανάλογα με το είδος της κίνησης, οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Varnes, 1978) :

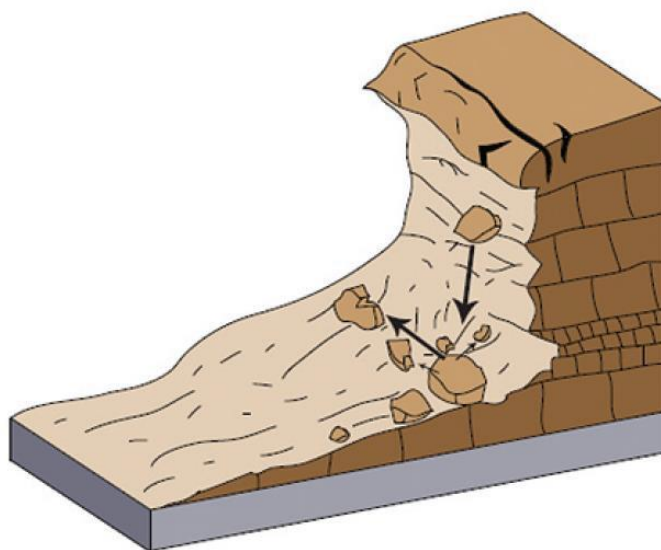
- Καταπτώσεις (falls)
- Ανατροπές (topplings)
- Ολισθήσεις (slides)
- Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- Ροές (flows)
- Σύνθετες κινήσεις (complex)

2.2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι μορφές των κατολισθήσεων όπως αναφέρεται από το Ρόζο (2007) είναι:

2.2.2.1 ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ (FALLS)

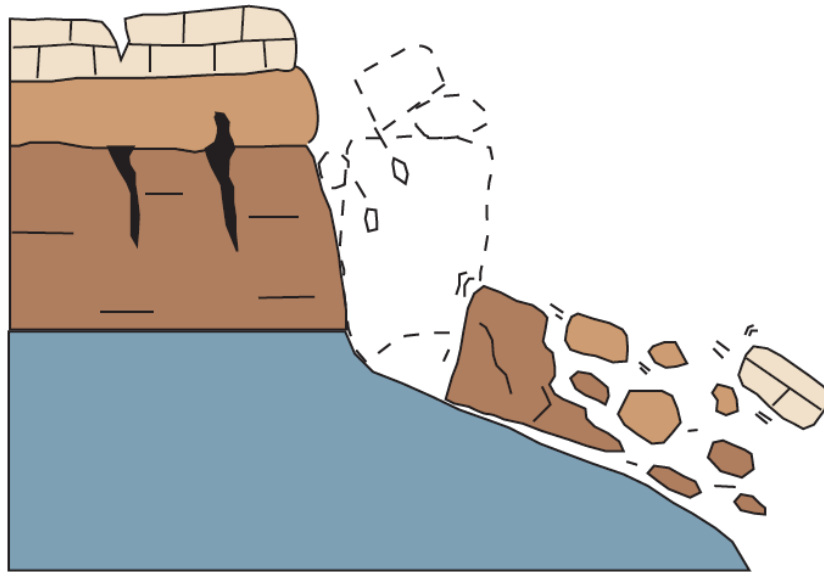
Ο όρος κατάπτωση αφορά βραχώδεις σχηματισμούς και αναφέρεται στην αποκόλληση τμημάτων βραχομάζας ποικίλου μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή, η αποκόλληση γίνεται σε απότομο πρανές και κατά μήκος μίας επιφάνειας όπου δεν εκδηλώνεται διατμητική κίνηση. Ακολουθεί η ελεύθερη πτώση του αποσπασθέντος τμήματος της βραχομάζας με κύλιση ή αναπήδηση, δηλαδή με κατάπτωση. Είναι συνήθη φαινόμενα σε απότομα πρανή από ανθρακικά πετρώματα.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου κατάπτωσης (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.2.2.2 ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ (TOPPLINGS)

Σε ένα βραχώδη επίσης σχηματισμό, κάτω από τη δράση της βαρύτητας καθώς και άλλων παραγόντων, όπως η δράση του νερού που κινείται μέσα στις ασυνέχειες της βραχομάζας, είναι δυνατόν να εκδηλωθεί προς τα έξω ανατροπή και κατάπτωση τεμάχους, εφόσον αυτό οριοθετείται από ασυνέχειες που αποκλίνουν $\pm 10^{\circ}$ από την κλίση του πρανούς (νεότερες απόψεις οριοθετούν την απόκλιση στις $\pm 30^{\circ}$). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει πτώσεις ή ολισθήσεις, ανάλογα με τη γεωμετρία της επιφάνειας αποκόλλησης, τη γεωμετρία της μετακινούμενης μάζας και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Οι ανατροπές μπορεί να είναι εξαιρετικά αργές μέχρι και εξαιρετικά γρήγορες, ενώ πολλές φορές επιταχύνουν κατά την κίνηση.



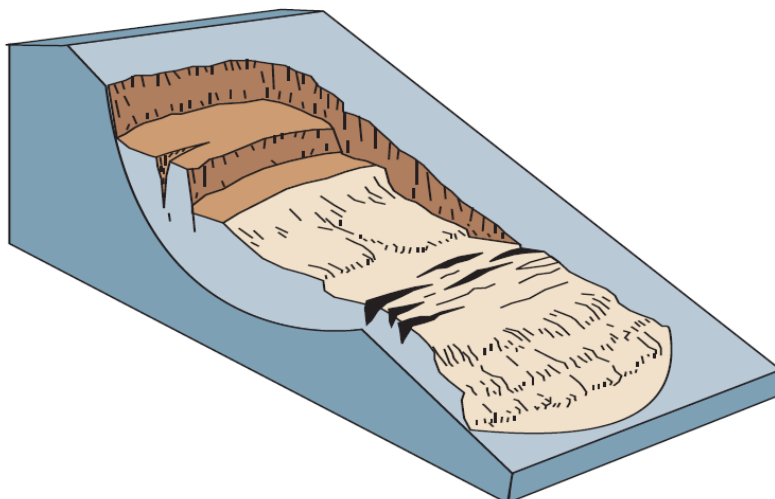
Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ανατροπής (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.2.2.3 ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ (SLIDES)

Στις ολισθήσεις, η ολισθαίνουσα μάζα εδαφικών υλικών οριοθετείται από τους υποκείμενους σταθερούς εδαφικούς ορίζοντες, με μια επιφάνεια μορφής συνήθως κουταλιού. Η επιφάνεια αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών αδυναμίας του υλικού, κάτω από τη δράση διατμητικών δυνάμεων. Η κίνηση μπορεί να συμβεί εφ' άπαξ (και να αναφέρεται σε μια επιφάνεια ολίσθησης) ή να εξελιχθεί προοδευτικά από μια αρχική επιφάνεια προς τα ανάντη, ενσωματώνοντας περισσότερες ζώνες αδυναμίας του εδαφικού υλικού. Οι ολισθήσεις γενικά διακρίνονται στις περιστροφικές ολισθήσεις (rotational) και στις επίπεδες μετακινήσεις (translational).

ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

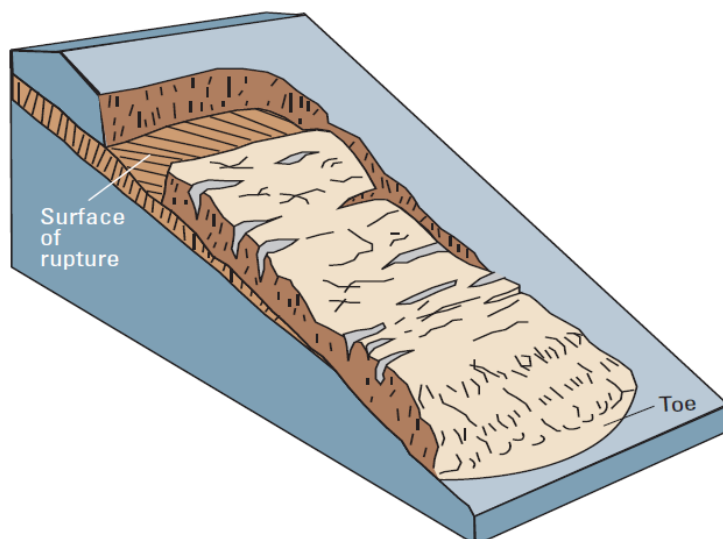
Η επιφάνεια ολίσθησης, στην περίπτωση αυτή, είναι κοίλη ή κυλινδρική, ακολουθώντας πάντως σε γενικές γραμμές προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνέχειας ή αδυναμίας, με μικρή παραμόρφωση του τεμάχους που ολισθαίνει.



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου περιστροφικής ολίσθησης (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΕΣ (ΣΤΡΩΜΑΤΟΕΙΔΕΙΣ) ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

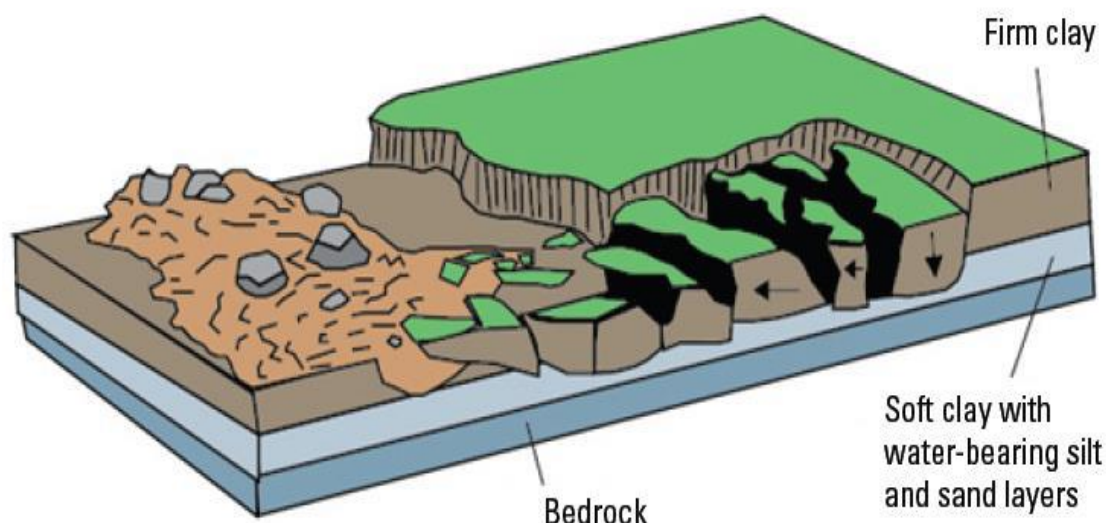
Η επιφάνεια ολίσθησης εδώ, είναι σχεδόν επίπεδη και το εδαφικό ή βραχώδες υλικό (ολίσθηση τεμάχους) κινείται κατά μήκος αυτής προς τα κάτω και προς τα έξω. Η κίνηση δηλαδή δεν περιλαμβάνει σημαντική ολική στροφή ή προς τα πίσω στροφή της κεφαλής και έτσι διακρίνεται εύκολα από την περιστροφική ολίσθηση. Κυρίως ελέγχεται από την ύπαρξη ασυνεχειών όπως στρώσεις, ρήγματα, διαρρήξεις κλπ.



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου στρωματοειδούς ολίσθησης (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.2.2.4 ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ (ΥΠΟΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ) ΕΞΑΠΛΩΣΕΙΣ (LATERAL SPREADS)

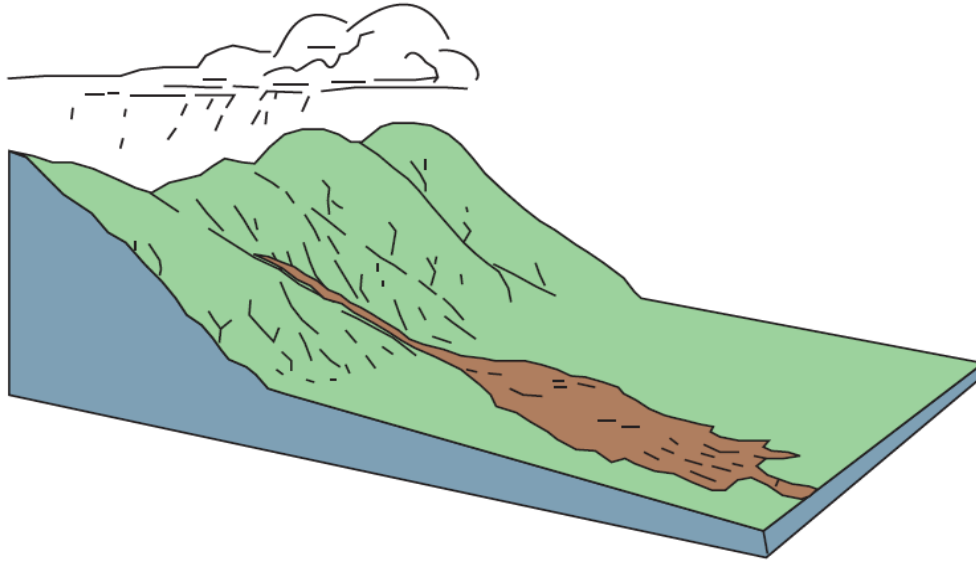
Στις πλευρικές (υποοριζόντιες) εξαπλώσεις η κίνηση συνοδεύεται από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές. Γενικά, η κίνηση μπορεί να είναι επέκταση μάζας που ολισθαίνει, χωρίς να μπορεί να καθορισθεί με ακρίβεια το επίπεδο ολίσθησης ή η ζώνη πλαστικής ροής. Επίσης, πλευρικές εξαπλώσεις μπορεί να παρατηρηθούν με την ολίσθηση βραχωδών σχηματισμών ή συνεκτικών εδαφών πάνω σε μαλακά εδαφικά υλικά, όπως ρέουσες πλαστικές αργίλους ή λεπτόκοκκες άμμους και ιλύες που ρευστοποιούνται.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου πλευρικής εξαπλώσεως (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.2.2.5 ΡΟΕΣ (FLOWS)

Με τον όρο αυτό αναφέρεται η σχετική κίνηση ρευστοποιημένων εδαφικών υλικών, που αποτελούν την κινούμενη μάζα, πάνω σε μία άλλη σταθερή. Δηλαδή, το εδαφικό υλικό που μετακινείται προσομοιάζει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, με ιξώδες ρευστό που ρέει (ροές εδαφών, ρεύματα γαιών, ρεύματα κορημάτων). Η κίνηση αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με ερπυσμό καθώς ο τελευταίος είναι πολύ αργή κίνηση. Η ροή στους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως η ροή γαιών (άμμου, ιλύος ή αργίλου) ή και στα πλευρικά κορήματα των ορεινών περιοχών, μπορεί να γίνει κάτω από διάφορες συνθήκες περιεχόμενης υγρασίας και με ταχύτητα από μικρή μέχρι εξαιρετικά μεγάλη.



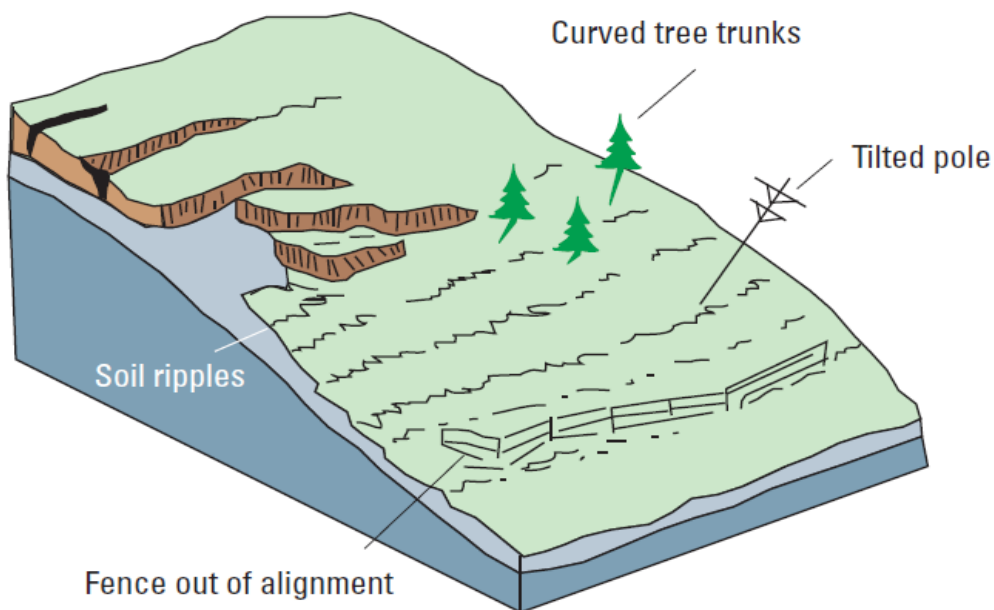
Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ροής (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.2.2.6 ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ (COMPLEX)

Περιλαμβάνουν περισσότερους, του ενός, τύπους κίνησης. Δηλαδή, ένας τύπος κίνησης μετατρέπεται τυπικά σε κάποιον άλλο τύπο, ή συμβάλλει στη δημιουργία κίνησης διαφορετικού τύπου.

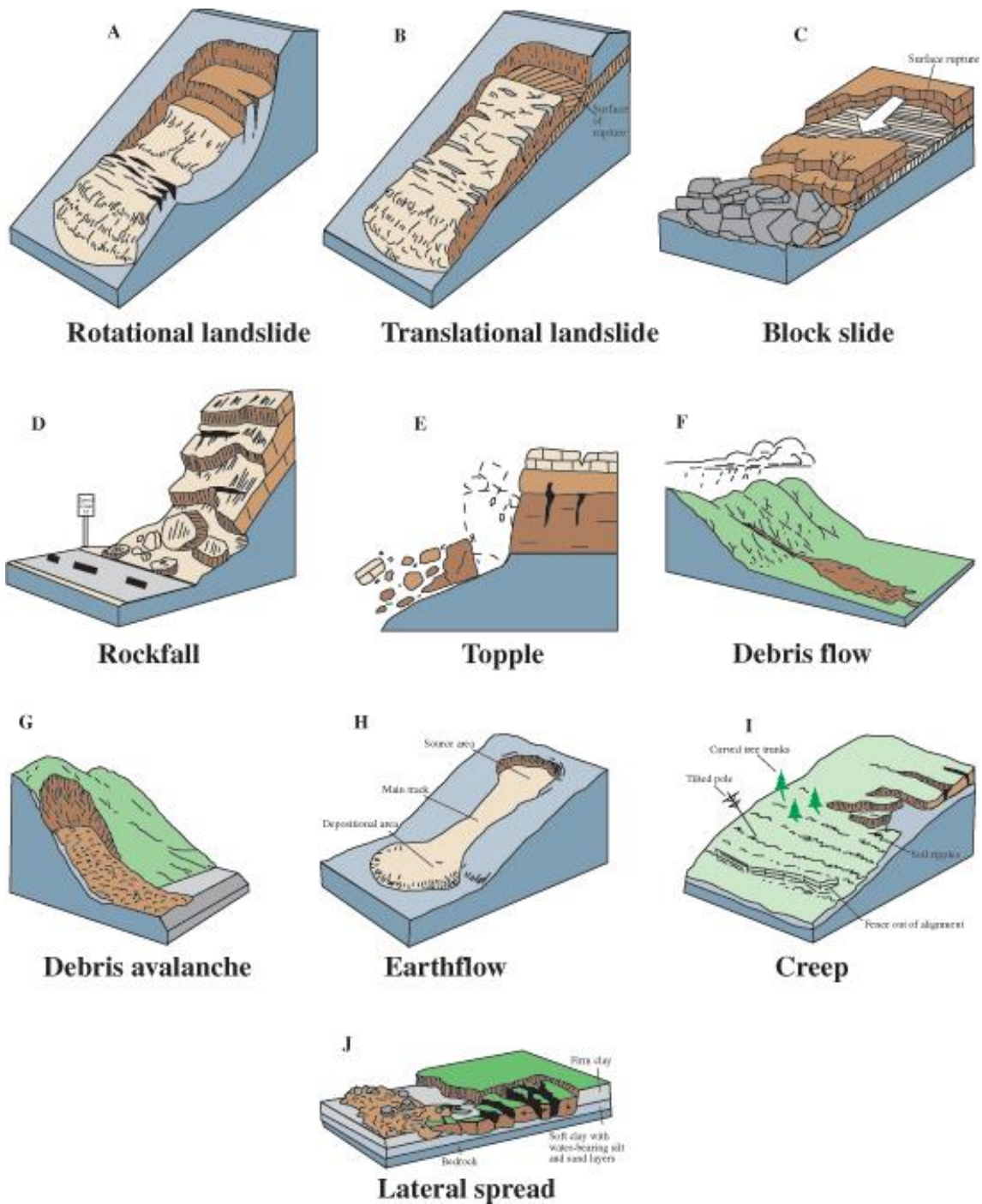
2.2.2.7 ΕΡΠΥΣΜΟΙ

Πρόκειται για αργές έως πολύ αργές παραμορφώσεις στο χώρο (δηλαδή πολύ αργές ολισθήσεις εδαφικών μαζών), που δεν αναπτύσσουν εφελκυστικές ρωγμές και έτσι δεν είναι εύκολο να εντοπιστεί η ζώνη δράσης τους, ενώ αν δεν αντιμετωπισθούν έγκαιρα, εξελίσσονται συνήθως σε περιστροφικές ολισθήσεις.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ερπυσμού (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

Στην εικόνα 8 παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι κατολισθήσεων:



Εικόνα 8:Κύριοι τύποι κατολισθητικών κινήσεων (Lynn M. Highland κ.α. 2008)

2.3. ΑΙΤΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

2.3.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΤΕΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΙΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

- i. Καθαρά γεωλογικοί (φύση εδάφους ή πετρώματος, δομή, εσωτερική γεωμετρία και σχέση με το σταθερό περιβάλλον)
- ii. Γεωμορφολογικοί (στατική - δυναμική) και τοπογραφικοί (εξωτερική γεωμετρία και σχέση με σταθερό περιβάλλον)
- iii. Υδρολογικοί, κλιματολογικοί, υδρογεωλογικοί (επιφανειακά και υπόγεια νερά, υγρασία εδάφους κλπ.)
- iv. Μηχανικοί (εντατικές καταστάσεις, μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους κλπ.)

2.3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Μερικοί από τους παράγοντες επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι επιδρούν περιοδικά και αποτελούν το έναυσμα για την εκδήλωση του φαινομένου. Οι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις, διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς είναι εκείνοι οι παράγοντες που δημιουργούν την προδιάθεση ολίσθησης, ενώ οι δευτερογενείς προκαλούν άμεσα την κατολίσθηση.

Ειδικότερα, οι βασικότεροι πρωτογενείς παράγοντες είναι:

- Η δομή του γεωλογικού υποβάθρου και η τεκτονική της περιοχής. Ένα έδαφος που αποτελείται από εναλλαγές πολλών ετερογενών στρωμάτων, είναι πιθανότερο να παρουσιάσει κατολισθητικά φαινόμενα, λόγω των πολλών πιθανών επιφανειών ολίσθησης, από ένα άλλο έδαφος το οποίο αποτελείται από ένα ενιαίο στρώμα.
- Το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της περιοχής. Υπάρχουν πετρώματα τα οποία είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθήσεις, όπως ο φλύσχης και τα αργιλικά εδάφη.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το ύψος του νερού με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης που πέφτει στην περιοχή, μπορεί να οδηγήσει σε κατολίσθηση.
- Η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς και η κινητικότητα του υποβάθρου. Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν πολλές φορές να αποτελέσουν την αφορμή για την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, προσθέτοντας στις ήδη ασταθείς μάζες την επιπλέον δυναμική φόρτιση, που τις ωθεί στην ολίσθηση. Ιδιαίτερα επικίνδυνες χαρακτηρίζονται οι περιοχές που επιδεικνύουν νεοτεκτονική δραστηριότητα.

3. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΕ ΟΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

3.1. ΟΡΥΧΕΙΟ PANLUO

Το ορυχείο ανοικτής εκσκαφής Panluo βρίσκεται στην νοτιοδυτική επαρχία Fujian στην Κίνα. Είναι το μεγαλύτερο ορυχείο επιφανειακής εκμετάλλευσης σιδήρου, σχεδιάστηκε το 1965 και βρισκόταν σε λειτουργία από το 1978. Τον Ιούλιο του 1990, ένας σεισμός 5,3 βαθμών της κλίμακας Richter, με επίκεντρο την Ταϊβάν, και οι εκτεταμένες βροχοπτώσεις επηρέασαν το πρηνές του ορυχείου, προκαλώντας ρωγματώσεις και μεγάλου μεγέθους αστοχίες, σχηματίζοντας μία κατολίσθηση σχήματος U. Ο συνολικός, εν δυνάμει, όγκος της κατολίσθησης υπολογίστηκε πως ήταν $10^6 m^3$ (Zuoan Wei κ.α. 2007). Η εκδήλωση αυτού του φαινομένου απείλησε ευθέως την παραγωγική διαδικασία του ορυχείου.

Προκειμένου να προστατευτεί η παραγωγή του ορυχείου και η ασφάλεια των κατοίκων των γύρω περιοχών, εφαρμόστηκε μια συνολική δυναμική μέθοδος, η οποία περιλάμβανε γεωτεχνικές έρευνες, επί τόπου δοκιμές και παρακολούθηση, ανάλυση ευστάθειας καθώς και πολλά μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης του φαινομένου. Αυτά τα μέτρα καθυστέρησαν την εξέλιξη της κατολίσθησης. Παρόλα τα μέτρα που λήφθηκαν η κατολίσθηση παρέμεινε ενεργή και επιταχύνθηκε εξαιτίας των βροχοπτώσεων και της συνέχισης των εργασιών εξόρυξης. Ωστόσο, δεν προέκυψαν καταστροφικά ατυχήματα και η εξόρυξη συνεχίστηκε, μέχρι που ολοκληρώθηκε στο βάθος των 887 μέτρων το 2000.

3.2. ΟΡΥΧΕΙΟ ΦΑΡΑΓΓΙΟΥ BINGHAM

Το ορυχείο χαλκού στο φαράγγι Bingham βρίσκεται 30 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης Salt Lake στη Γιούτα και είναι ένα από τα μεγαλύτερα ορυχεία ανοικτής εκσκαφής παγκοσμίως. Το ορυχείο έχει περίπου 1170 μέτρα βάθος και περίπου 4.5 χιλιόμετρα πλάτος. Έχει παράξει περισσότερο χαλκό (πάνω από 20 εκατομμύρια τόνους) από κάθε άλλο ορυχείο στον κόσμο και παράγει επίσης χρυσό, άργυρο και μολυβδένιο. Στις 10 Απριλίου του 2013, προέκυψε μια τεράστια κατολίσθηση στον βορειοανατολικό τοίχο του μεταλλείου, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την μετακίνηση υλικού με μέση ταχύτητα 112 km/h και η οποία έθαψε το δάπεδο του ορυχείου 100 μέτρα κάτω από συντρίμια (Septian A. κ.α. 2017). Χαρακτηρίστηκε ως η πιο εκτεταμένη, μη ηφαιστειακή κατολίσθηση στη σύγχρονη Βόρειο – Αμερικανική ιστορία. Εξαιτίας της κατολίσθησης συνέβησαν δύο κύρια σεισμικά γεγονότα 5.1 και 4.9 βαθμών στην κλίμακα Richter, καθώς και 14 μικρότεροι σεισμοί (Moore κ.α. 2017). Η κατολίσθηση δεν είχε κάποιο εμφανές αίτιο.

Η γεωτεχνική ομάδα χρησιμοποίησε τα δεδομένα που συλλέγονταν από τα συστήματα παρακολούθησης, τα οποία ήταν τοποθετημένα σε πολλά σημεία του μεταλλείου, προκειμένου να δράσει προληπτικά, αναστέλλοντας τη μεταλλευτική δραστηριότητα και απομακρύνοντας το σύνολο του προσωπικού από το χώρο. Έτσι δεν υπήρξε κανένας τραυματισμός και καμία ανθρώπινη απώλεια. Ωστόσο, η κατολίσθηση έθαψε περισσότερο από το 95% του δαπέδου του ορυχείου κάτω από εκατομμύρια τόνους υλικού και άλλαξε δραστικά το μέγεθος και το σχήμα του. Το ορυχείο επανήλθε στους κανονικούς του ρυθμούς εργασίας τον Δεκέμβριο του 2013, όποτε και η εταιρεία που το διαχειρίζεται ανακοίνωσε την επίτευξη της επιθυμητής ετήσιας παραγωγής.

3.3. ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Το ορυχείο Αμύνταιο, βρίσκεται στην λιγνιτική λεκάνη Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου στο νομό Φλώρινας, στην Ελλάδα. Το ορυχείο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία από τα μέσα του 1980, αναμένεται να λειτουργεί για τα επόμενα 10 χρόνια και η εκμετάλλευσή του γίνεται από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού της Ελλάδας (Δ.Ε.Η.). Στις 10 Ιουνίου του 2017, συνέβη μία κατολίσθηση τεραστίων διαστάσεων, η οποία δεν είχε προηγούμενο στον Ελληνικό χώρο και η οποία αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις σε λιγνιτωρυχεία παγκοσμίως. Το μήκος της κατολισθαίνουσας μάζας ήταν 2,2 χιλιόμετρα και το πλάτος 2 χιλιόμετρα (Zevgolis κ.α. 2019). Ο πόδας της κατολίσθησης εντοπίστηκε στη βάση του 210 μέτρων ύψους πρανούς, ο όγκος της κατολισθαίνουσας μάζας ήταν περίπου 80 εκατομμύρια m^3 και κάτω από αυτήν θάφτηκαν 25 εκατομμύρια τόνοι λιγνίτη. Τα στοιχεία δείχνουν πως επρόκειτο για μία μεταθετική ολίσθηση (Loupasakis C. 2014).

Το εγκατεστημένο δίκτυο παρακολούθησης, κατέγραψε σταδιακή αύξηση στον ρυθμό των παραμορφώσεων, η οποία οδήγησε τις αρχές του ορυχείου να διατάξουν την εκκένωση του ορυχείου και την άμεση απομάκρυνση του φορητού εξοπλισμού την 2^η Ιουνίου του 2017, οκτώ μέρες πριν την αστοχία. Ωστόσο, η εν λόγω αστοχία προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε φορητές καθώς και μόνιμες υποδομές του ορυχείου, όπως επίσης και στο κοντινό χωριό των Αναργύρων. Υπέστησαν σοβαρές υλικές ζημιές ή καταστράφηκαν ολοσχερώς, τέσσερις καδοφόροι εκσκαφείς στο ορυχείο (5000 έως 1500 τόνοι ο καθένας), επίσης καταστράφηκαν αρκετές εκατοντάδες μέτρα μεταφορικής ταινίας και θάφτηκαν αρκετά μικρότερα φορητά και εκσκαφείς.

3.4. ΟΡΥΧΕΙΟ WEST

Το ορυχείο West στη βορειοανατολική Κίνα είναι από τα μεγαλύτερα ορυχεία ανοικτής εκσκαφής άνθρακα στην Ασία. Η εξόρυξη λιγνίτη από αυτό ξεκίνησε το 1901 και συνεχίζεται για περίπου 100 χρόνια. Το ορυχείο έχει μήκος 6,6 χιλιόμετρα από τα ανατολικά προς τα δυτικά, 2,2 χιλιόμετρα πλάτος από το βορά προς το νότο και το βάθος του είναι περίπου 420 μέτρα. Τελευταία, το νότιο πρανές του ορυχείου ταλανίζεται από προβλήματα ευστάθειας καθώς από τον Αύγουστο του 2010 έχουν εμφανιστεί πολλαπλές επιφανειακές ρωγμές σε αυτό, οι οποίες από σημειακές διευρύνθηκαν και εξελίχθηκαν σε γραμμικές (Wang κ.α. 2021). Η παρακολούθηση των δεδομένων έχει δείξει ότι η οριζόντια και η κατακόρυφη μετατόπιση έχουν αυξηθεί από τον Αύγουστο του 2012 και συνεχίζουν με αυξητικούς ρυθμούς. Η ανάλυση της επιτόπου έρευνας και τα δεδομένα παραμόρφωσης (Wang κ.α. 2021) έδειξαν ότι στο νότιο πρανές του ορυχείου West συμβαίνει μία κατολίσθηση, με μήκος 1.200 έως 1.500 μέτρα στην διεύθυνση βορά- νότου, πλάτος 3.100 μέτρα στη διεύθυνση ανατολής - δύσης και όγκο περίπου 0,1 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα.

Το γεγονός ότι η εν λόγω κατολίσθηση διασχίζει κατοικημένες περιοχές, επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία εξόρυξης και την ομαλή λειτουργία του ορυχείου και θα μπορούσε να θέσει σε σοβαρό κίνδυνο τους εργαζομένους και τις εγκαταστάσεις του ορυχείου επέβαλε τη δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 20 δέκτες GPS, ένα επιμηκυσιόμετρο για την μέτρηση των επιφανειακών μετατοπίσεων και ένα αποκλισιόμετρο χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των εσωτερικών μετατοπίσεων.

3.5. ΟΡΥΧΕΙΟ AIR LAYA

Το ορυχείο λιγνίτη Air Laya καλύπτει μια περιοχή 76 km^2 και βρίσκεται στην περιοχή Bukit Asam, στη νότια Σουμάτρα, στην Ινδονησία. Στις 27 Νοεμβρίου 2002, προέκυψε μία κατολίσθηση στο πρανές του εξωτερικού τέλματος του ορυχείου. Η περιοχή, στην οποία σημειώθηκε η κατολίσθηση, ήταν ένα τέλμα, το οποίο καλύπτει μία έκταση $6,5 \text{ km}^2$ και βρίσκεται βόρεια του ορυχείου. Το φαινόμενο συμπεριελάμβανε αρκετές περιστροφικές ολισθήσεις (Asof κ.α. 2005). Το τμήμα που αστόχησε ήταν περίπου $0,72 \text{ km}^2$ ή το 11% της συνολικής επιφάνειας του τέλματος. Η ταχεία κίνηση του υλικού διήρκεσε τέσσερις μέρες. Η μεγαλύτερη ταχύτητα που σημειώθηκε ήταν 724 mm / ώρα , τη δεύτερη μέρα της κατολίσθησης (Asof κ.α. 2005).

Από τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται πως η κατολίσθηση ξεκίνησε από την ανάπτυξη επιφανειακών ρωγματώσεων στο πρανές του τέλματος, που προκάλεσαν μείωση της διατμητικής αντοχής των υλικών από τα οποία αυτό αποτελούταν. Επίσης οι παρατεταμένες και βαριές βροχοπτώσεις στην περιοχή, διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση του φαινομένου (Asof κ.α. 2005). Η εν λόγω κατολίσθηση προκάλεσε την κατάρρευση ενός ηλεκτροδοτικού πύργου, κατέστρεψε επίσης μέρος του φορητού εξοπλισμού του ορυχείου και προκάλεσε ζημιές στην αγροτική περιοχή που βρισκόταν στο πόδι της κατολίσθησης. Δεν υπήρχαν, ωστόσο, απώλειες ανθρώπινων ζωών ή βαριοί τραυματισμοί.

3.6. ΟΡΥΧΕΙΟ KEF ESSNOUN

Το ορυχείο Kef Essnoun βρίσκεται στη νότια πλευρά του Jebel El-Onk (βορειοανατολικά της Αλγερίας), περίπου 10 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης Bir El-Ater. Αυτό το ορυχείο το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 2001 παρήγαγε 3,5 εκατομμύρια τόνους φωσφορικών αλάτων ετησίως και έκανε εξαγωγές παγκοσμίως. Στις 8 Σεπτεμβρίου του 2007 στις 5 π.μ., προέκυψε μια τεράστια κατολίσθηση στο παραπάνω ορυχείο, τα υλικά της οποίας γέμισαν όλο το χώρο του ορυχείου. Η κατολισθαίνουσα μάζα κάλυψε μια περιοχή περίπου $0,11 \text{ km}^2$, με μέσο πάχος 75 μέτρα (Riheb Hadji κ.α. 2020). Ο όγκος της κατολισθαίνουσας μάζας υπολογίζεται στα $7,7$ εκατομμύρια m^3 . Η κατολίσθηση συνέβη σε μια περιοχή που αποτελούταν κυρίως από ένα στρώμα φωσφόρου, υπερκαλυμμένο από στρώματα ασβεστολίθου (Riheb Hadji κ.α. 2020).

Από την ανάλυση που διενεργήθηκε, έγινε κατανοητό πως η μη συμμόρφωση του προσωπικού του ορυχείου με τους κανονισμούς και η λανθασμένη, ετεροχρονισμένη επιλογή μεθόδου εξόρυξης ήταν τα κύρια αίτια της κατολίσθησης που προκλήθηκε. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση αυτού του φαινομένου έπαιξαν και οι προερχόμενες από τις ανατινάξεις δονήσεις. Καθώς, αφενός, επηρέασαν τη συνοχή των πετρωμάτων και αφετέρου συνέβαλαν στην δημιουργία μιας επιφάνειας ολίσθησης, στο στρώμα των φωσφορικών αλάτων.

4. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. ΟΡΥΧΕΙΟ PANLUO, ΕΠΑΡΧΕΙΑ FUJIAN ΚΙΝΑ

4.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ορυχείο ανοικτής εκσκαφής Panluo είναι ένα ορυχείο στο οποίο γίνεται εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος και βρίσκεται στο νοτιοδυτικό μέρος της επαρχίας Fujian στην Κίνα.



Εικόνα 9:Θέση ορυχείου Panluo (σημειώνεται με το κόκκινο τετράγωνο) (Zuoan Wei κ.α. 2007)

Το εν λόγω ορυχείο σχεδιάστηκε το 1965 και βρισκόταν σε πλήρη λειτουργία από το 1978. Η ετήσια εξορυκτική ικανότητα του είναι 3×10^5 τόνοι μεταλλεύματος. Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό του έργου, κάτω από τα 920 μέτρα η εξόρυξη θα προχωρούσε υπόγεια, ενώ πάνω από το συγκεκριμένο υψόμετρο θα γινόταν επιφανειακά. Το δάπεδο του ορυχείου βρίσκεται στο υψόμετρο των 880 μέτρων. Τον Ιούλιο του 1990, οπότε και συνέβη η κατολίσθηση που θα εξεταστεί παρακάτω, το πρηνές του ορυχείου εκτεινόταν ήδη πάνω από 100 μέτρα σε ύψος και πάνω από 300 μέτρα σε πλάτος. Η κλίση του πρηνούς ποίκιλλε από 28° έως 35° . Ένας σεισμός 5.3 βαθμών, με επίκεντρο τον πορθμό της Ταϊβάν και εκτεταμένες καταγίδες, είχαν ως αποτέλεσμα μια ευρεία αστοχία, η οποία εκδηλώθηκε με τη μορφή κατολίσθησης σχήματος U (όπως φαίνεται στην Εικόνα 10). Ο εκτιμώμενος συνολικός όγκος υλικού που μετακινήθηκε εξαιτίας αυτού του συμβάντος είναι $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Zuoan Wei κ.α. 2007).



Εικόνα 10: Όψη της κατολίσθησης στο ορυχείο Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007)

4.1.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η Εικόνα 11 δείχνει μια γενική όψη του ορυχείου Panluo και της κατολίσθησης που προέκυψε στην ανατολική πλευρά του βουνού Zhetou. Το ορυχείο βρισκόταν στον πόδα της κατολίσθησης. Η κεφαλή του κυρίου σώματος της κατολίσθησης εντοπιζόταν ψηλότερα στην πλαγιά του βουνού Zhetou, του οποίου το υψόμετρο είναι περίπου 1677 μέτρα. Η μέση κλίση του πρανούς είναι περίπου 36° στο ανώτερο τμήμα και μεταξύ 25° - 28° στο κατώτερο. Ενώ υπάρχουν αρκετές χαράδρες στην επιφάνεια του εδάφους.

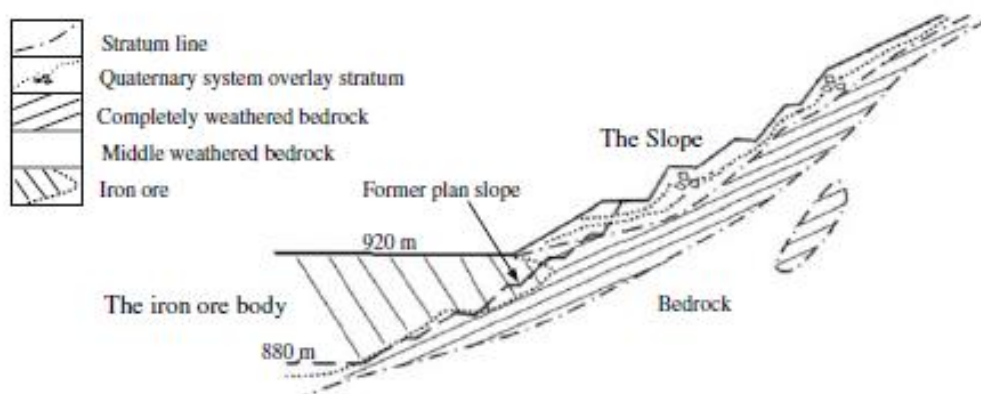


Εικόνα 11: Μορφολογία στην περιοχή του ορυχείου Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007)

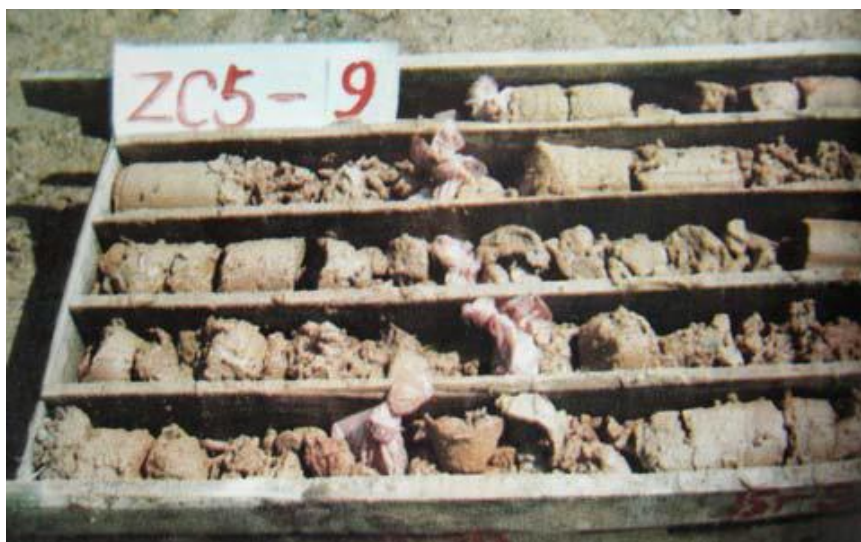
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Τα διαθέσιμα γεωλογικά δεδομένα (Zuoan Wei κ.α. 2007) υποδεικνύουν ότι η περιοχή ανήκει στη ζώνη Daiyunshan, που σχηματίστηκε κατά το Πέρμιο και το Λιθανθρακοφόρο του Παλαιοζωϊκού. Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι κυρίως ιλύολιθοι και ψαμμίτες. Πάνω από τα ιζηματογενή πετρώματα υπάρχουν τριαδικές αποθέσεις και εδαφικά υλικά τα οποία περιέχουν κατολισθαίνοντα υλικά, καθώς και κολουβιακές και αλλουβιακές αποθέσεις ποικίλου πάχους. Η εικόνα 12 απεικονίζει μία τυπική στρωματογραφική στήλη (από πάνω προς τα κάτω) για την περιοχή. Περιέχει:

- ❖ Τετραδικές αποθέσεις και εδαφικά υλικά τα οποία κατά κύριο λόγο περιέχουν ελουβιακά, κολουβιακά και διλουβιακά πετρώματα. Πρόκειται κυρίως για ιλύωδη άργιλο και κατακερματισμένους ψαμμίτες. (Εικόνα 13)
- ❖ Βραχώδες υπόβαθρο κάτω από τις τριαδικές αποθέσεις: κυρίως ιλύολιθοι και ψαμμίτες. Οι ιλύολιθοι είναι κατακερματισμένοι, ενώ οι ψαμμίτες μέτρια κερματισμένοι. (Εικόνα 14)



Εικόνα 12: Γεωλογική τομή του ορυχείου (Zuoan Wei κ.α. 2007)



Εικόνα 13: Πυρήνες ιλυόλιθων και ψαμμιτών από γεώτρηση στην περιοχή (Zuoan Wei κ.α. 2007)

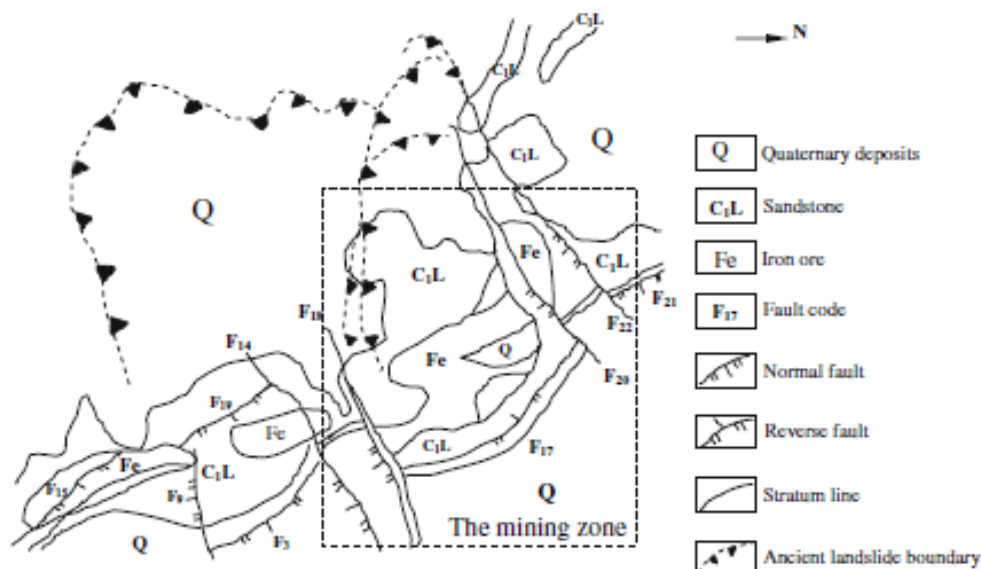


Εικόνα 14: Στρώματα τετραδικών αποθέσεων (Zuoan Wei κ.α. 2007)

ΡΗΓΜΑΤΑ

Στην περιοχή εντοπίζονται έντεκα κύρια ρήγματα (Zuoan Wei κ.α. 2007) . Όπως φαίνεται στην εικόνα 15, αυτά τα έντεκα ρήγματα μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από κανονικά ρήγματα, όπως τα ρήγματα F9, F14, F16, F18, F20, F22. Οι παρατάξεις τους είναι αυτές των 46° και των 82° με κατεύθυνση προς τα ανατολικά και κλίση προς τα νότια - νοτιοανατολικά, με γωνίες κλίσης 45° και 85° . Η δυτική πλευρά του κυρίου σώματος της κατολίσθησης οριοθετείται από τα ρήγματα F20 και F22. Στην δεύτερη ομάδα εντάσσονται τα επωθητικά ρήγματα του ρήματος F17, των οποίων οι παρατάξεις είναι αυτές των 310° και των 345° , και τα οποία κλίνουν προς τα νοτιοδυτικά με γωνίες κλίσης 10° και

45°. Η τρίτη ομάδα απαρτίζεται από τα υπόλοιπα κανονικά ρήγματα F3, F11, F15, F19, F21. Η διεύθυνση της παράταξής τους είναι προς τα βορειοδυτικά και η φορά, προς τα νοτιοανατολικά με γωνίες κλίσης 20° και 85°. Το ίδιο το ορυχείο επηρεάζεται και αυτό από αρκετά ρήγματα.



Εικόνα 15: Γεωλογικές δομές στο ορυχείο Panluo (Zuoan Wei κ.α. 2007)

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Το καταγεγραμμένο μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή είναι περίπου 1868 mm και το καταγεγραμμένο μέγιστο ετήσιο ύψος βροχής ήταν 2750,7 mm το 1990. Το μεγαλύτερο μέρος των κατακρημνίσεων προκύπτει από τις καταιγίδες κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο. Κανένας ποταμός δεν διέρχεται από την περιοχή εξόρυξης. Από μεταγενέστερη εκτενή γεωτρητική διερεύνηση, προκύπτει πως ο κύριος υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στη βάση των Τριαδικών αποθέσεων σε βάθος μεταξύ των 6 και των 35 μέτρων. Η βροχόπτωση αποτελεί την μόνη πηγή προέλευσης των υπογείων υδάτων. Η στάθμη των υπογείων υδάτων μεταβάλλεται εποχικά, όντας υψηλότερη την εποχή των βροχών και χαμηλότερη κατά την περίοδο ξηρασίας.

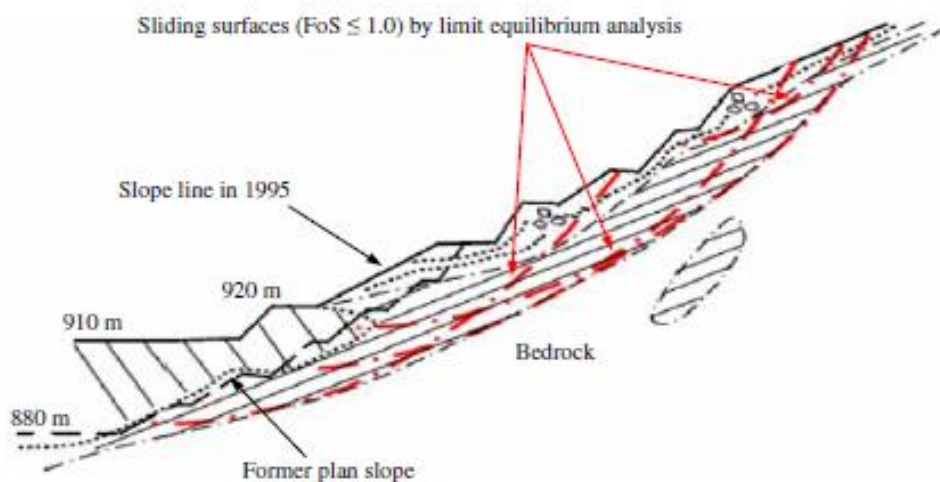
4.1.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Γεωλογική έρευνα που έλαβε χώρα στην περιοχή από τους Zhang L. κ.α. (2005) στην οποία έγινε διερεύνηση της περιοχής, της γεωμορφολογίας, και της σύνθεσης των πετρωμάτων και των εδαφικών υλικών, αποκάλυψε πως επρόκειτο για μία προ υπάρχουσα αρχαία κατολίσθηση. Η ενεργοποίησή της προήλθε από το συνδυασμό διαφόρων παραγόντων. Τα φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά του πρηνούς ήταν ο κύριος ενδογενής παράγοντας που προκάλεσε την αστάθεια στο πρηνές. Ακόμα, σημαντικό ρόλο διατέλεσαν εξωτερικοί παράγοντες όπως ο σεισμός, η βροχόπτωση και η εξόρυξη.

Οι κάτοικοι της περιοχής, ανέφεραν πως αρχικά δημιουργήθηκαν ρωγματώσεις εξαιτίας της κατολίσθησης στο πάνω μέρος του πρανούς, περίπου μία εβδομάδα αφότου συνέβη ο σεισμός και η εκτεταμένη βροχοπτώση. Τα αρχεία του καιρού υποδεικνύουν ότι υπήρξαν βροχοπτώσεις για επτά αλληπάλληλες μέρες, από τις 14 έως τις 20 Ιουνίου, με ένα ρυθμό κατακρημνίσεων των 132 mm ημερησίως. Πρόκειται για το μεγαλύτερο καταγεγραμμένο ύψος βροχής στην περιοχή.

Στην εικόνα 16, παρουσιάζεται η ανάλυση ευστάθειας του πρανού. Η συγκεκριμένη κατολίσθηση εντάσσεται στις περιστροφικές ολισθήσεις. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανάλυσης της οριακής ισορροπίας, της απλοποιημένης μεθόδου Bishop, προκειμένου να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας (FoS) του πρανού. Από τα αποτελέσματα προέκυψε πως το πρανές βρισκόταν ήδη σε οριακή κατάσταση ισορροπίας πριν από το σεισμό και τις βροχοπτώσεις. Τα εδαφικά υλικά του πρανού ήταν κορεσμένα σε νερό και είχαν χάσει μέρος της διατμητικής τους αντοχής, αυξάνοντας έτσι την αστάθεια του. Η περαιτέρω ανάλυση αποκάλυψε πως αν η εξόρυξη συνεχιζόταν έως το σχεδιασμένο δάπεδο στα 880 μέτρα, το νέο πρανές θα ήταν ασταθές, αφού ο συντελεστής ασφαλείας θα ήταν μικρότερος του 1.0.



Εικόνα 16: Πολλαπλές επιφάνειες ολίσθησης που προκύπτουν από την ανάλυση οριακής ισορροπίας (Zhang L. κ.α. 2005)

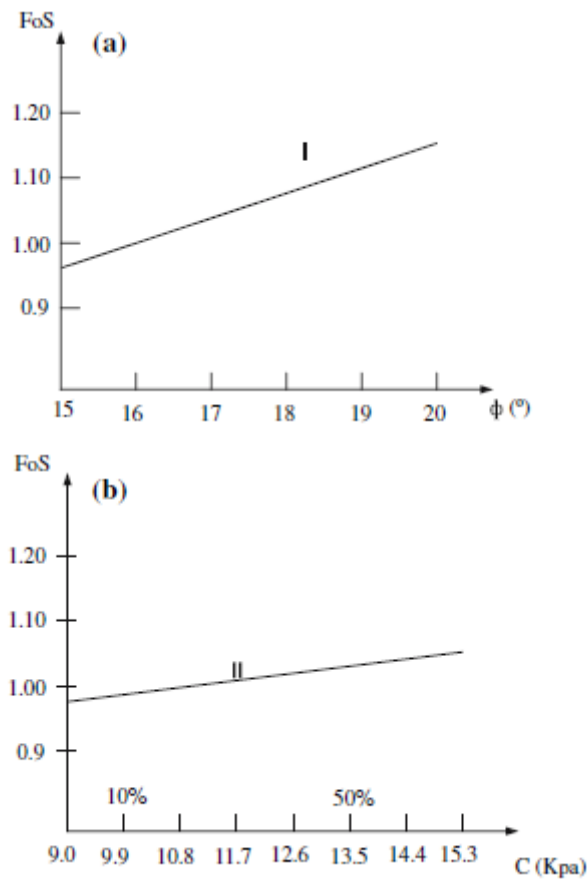
Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή ασφαλείας FoS. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παραμένουσας ώσης του Κινεζικού Κώδικα Προδιαγραφών. Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FoS = \frac{(E_i - \psi_i \times E_{i-1} + C_i \times L_i + W_i) \times \cos \alpha_i}{W_i \times \sin \alpha_i} \times \tan \phi_i$$

Όπου για κάθε i το στοιχειώδες εμβαδό E_i είναι η παραμένουσα ώση, το W_i είναι το βάρος, το α_i είναι η γωνία της βάσης και το L_i είναι το μήκος της βάσης. Το ψ_i είναι συντελεστής μετατροπής που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \times \tan \phi_i$$

Τα αποτελέσματα, επίσης, δείχνουν πως αν η γωνία τριβής αυξηθεί κατά 1° (6.51%), ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς θα αυξανόταν κατά 7.1% (Εικόνα 17a). Ωστόσο, αν η συνοχή C αυξηθεί κατά 10%, ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς θα αυξανόταν μόνο κατά 0.55%. Συμπερασματικά, είναι φανερό πως η γωνία τριβής επηρεάζει άμεσα την ευστάθεια του πρανούς.



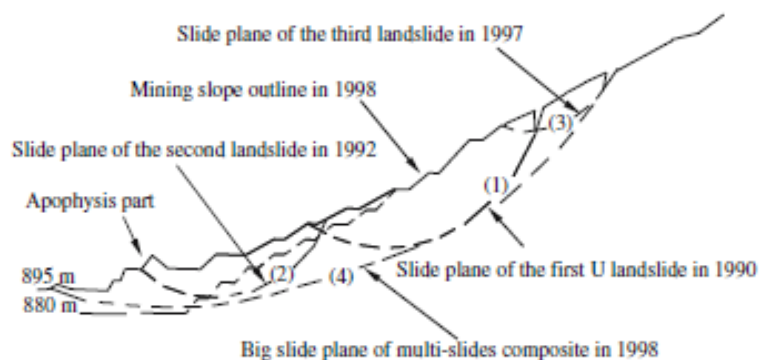
Εικόνα 17: Η σχέση μεταξύ των παραγόντων ευστάθειας του πρανούς και της διατμητικής αντοχής (ϕ και C) (Zhang L. κ.α. 2005)

Από εργαστηριακές δοκιμές και υπολογισμούς προκύπτει πως, στην φυσική του κατάσταση, ο βαθμός κορεσμού του εδάφους είναι 85.7% και η γωνία διατμητικής του αντοχής είναι 22° . Με τη βροχόπτωση, που θα μπορούσε να προκαλέσει κορεσμό του εδάφους σε νερό, η γωνία διατμητικής αντοχής ήταν μόλις 18° . Το κατακερματισμένο βραχώδες υπόβαθρο έχει τα ίδια χαρακτηριστικά.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

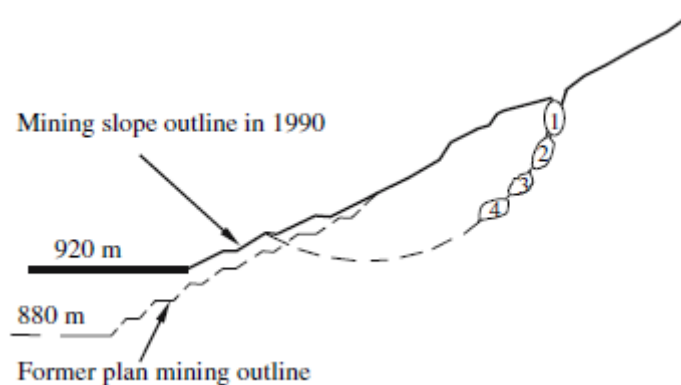
Οι γεωτεχνικές έρευνες και η παρακολούθηση του πεδίου αποκάλυψαν τα χαρακτηριστικά της εξέλιξης της κατολίσθησης, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

1. Συνέβησαν τρεις κατολισθήσεις (No 1, No 2, και No 3). Προέκυψαν και αναπτύχθηκαν κάτω από διαφορετικές περιστάσεις και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 18, η ακολουθία αυτών ήταν No 1 το 1990, No 2 το 1992 και No 3 το 1997.



Εικόνα 18:Οι κατολισθήσεις στο ορυχείο Panluo (Zhang L. κ.α. 2005)

2. Κάτω από συνδυαστικές ενδογενείς και εξωγενείς διεργασίες, η εμφάνιση και η εξέλιξη των κατολισθήσεων ήταν δυναμική. Αρχικά, προέκυψαν αρκετές ρωγματώσεις στο ανώτερο μέρος του πρανούς και ο πόδας της κατολίσθησης δεν παρουσίαζε εμφανή αλλαγή (Εικόνα 19). Η γεωλογική ανάλυση υποδεικνύει ότι η μάζα σιδηρομεταλλεύματος στο κατώτερο τμήμα υποστήριζε το πρανές. Αυτό συν υποδηλώνει, πως σε αυτήν την περίπτωση η επιφάνεια ολίσθησης δεν σχηματίστηκε από πάνω προς τα κάτω.

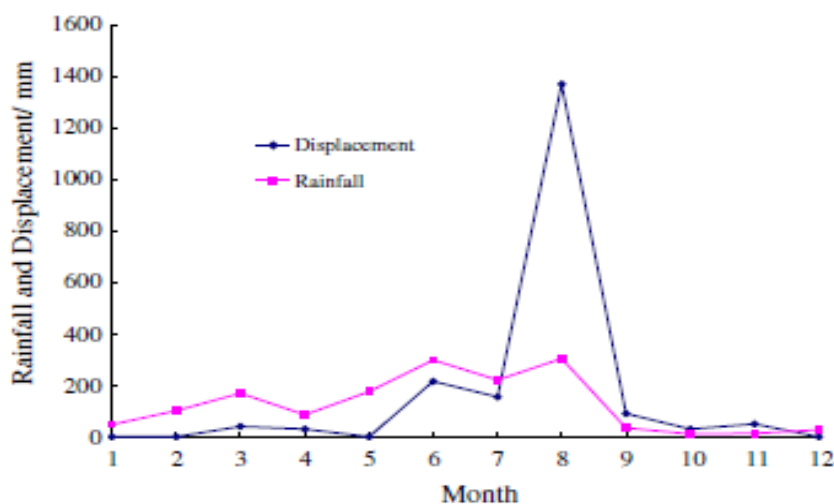


Εικόνα 19:Η ακολουθία αστοχίας του πρανούς (Zhang L. κ.α. 2005)

3. Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία προκύπτει πως η εκδήλωση και η ανάπτυξη των κατολισθήσεων, συνδέεται στενά με τις βροχοπτώσεις (Chen και Lee, 2003). Η συγκεκριμένη κατολίσθηση δεν αποτελεί εξαίρεση στον παραπάνω κανόνα. Από τη στιγμή που συνέβη η κατολίσθηση, οι ρωγματώσεις που προέκυψαν λόγω της φόρτισης στο πάνω μέρος του πρανούς προκάλεσαν πολυάριθμες ανεπιθύμητες συνέπειες στην ευστάθεια του. Τα επιφανειακά ύδατα (ειδικά από την εκτεταμένη βροχόπτωση) διείσδυσαν στο πρανές μέσω των ρωγματώσεων, επιδεινώνοντας τις κατολισθήσεις. Όπως φαίνεται στις εικόνες 20 και 21, η κίνηση της κατολίσθησης συνδέεται στενά με τις βροχοπτώσεις. Όσο πιο εκτεταμένη η βροχόπτωση, τόσο μεγαλύτερο το εκτόπισμα της κατολίσθησης.

Annual	1990	1992	1994	1996	1998	1999	2000
Rainfall (mm)	2,750.7	2,221.9	1,937.8	1,804.0	1,908.8	1,789.5	2,247.0
Key point displacement (cm)							
#1	5.0	0.0	12.0	13.4	18.0	15.0	0.7
#2	50.0	243.0	31.0	73.0	107.7	87.0	1.4
#12	5.0	0.0	15.0	13.4	Broken		

Εικόνα 20: Βροχόπτωση και αποτελέσματα από την παρακολούθηση βασικών σημείων της κατολίσθησης από το 1990 έως το 2000 (Zhang L. κ.α. 2005)



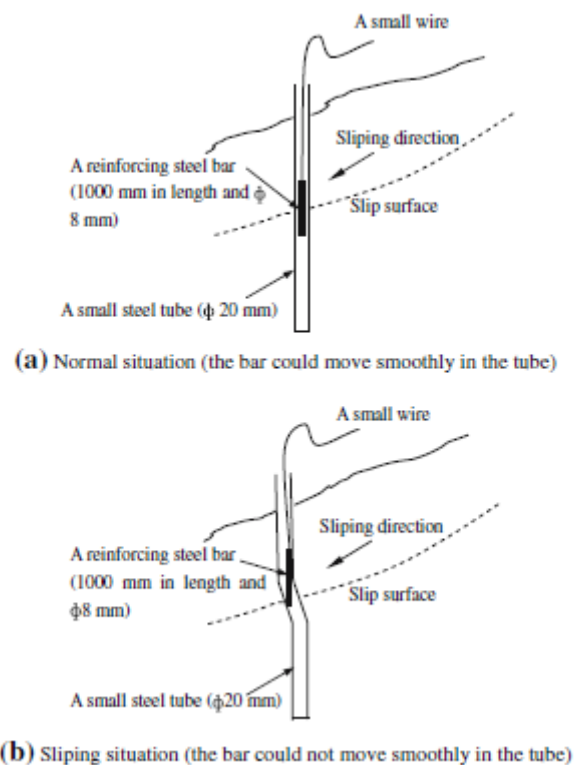
Εικόνα 21: Σχέση μεταξύ της μηνιαίας βροχόπτωσης και των μετατοπίσεων στο σημείο παρακολούθησης #2 το 1995 (Zhang L. κ.α. 2005)

4.1.4. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στο παρελθόν, είχαν διενεργηθεί ελάχιστες γεωτεχνικές εργασίες στην ανοικτή αυτή εκσκαφή και καμία εξ αυτών δεν επικεντρωνόταν στα πρανή. Στις εξορύξεις, οι οποίες βασίζονται μόνο στην ταξινόμηση των πετρωμάτων (κάτι το οποίο συνέβη και στην παρούσα), η εκσκαφή συνήθως διαιρείται σε αρκετές παρόμοιες, ως προς τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τους, ζώνες και προτείνεται ένας εμπειρικός σχεδιασμός για τα πρανή. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του ορυχείου δεν βασίστηκε ειδικά στα γεωτεχνικά δεδομένα της περιοχής, κάτι το οποίο εγκυμονεί σοβαρούς ενδεχόμενους κινδύνους σε οποιοδήποτε εξορυκτικό εγχείρημα.

Εκ των υστέρων, προκειμένου να αποκτηθούν γεωτεχνικά δεδομένα για τα πρανή και να τεθεί υπό έλεγχο η κατολίσθηση, διενεργήθηκε ένα λεπτομερές διερευνητικό γεωτεχνικό πρόγραμμα (Wei Z. κ.α. 2003). Αυτό το πρόγραμμα περιείχε εκτεταμένες γεωλογικές έρευνες, 183 διερευνητικές γεωτρήσεις (συμπεριλαμβανομένων 22 γεωτρήσεων για να καθοριστεί η επιφάνεια ολίσθησης και 15 απλών κεκλιμένων γεωτρήσεων για να καθοριστεί η εις βάθος μετατόπιση, όπως φαίνεται στην εικόνα 22), επί τόπου δοκιμές (δοκιμές πρότυπης διείδυσης SPT, δοκιμές διατμητικής αντοχής, δοκιμές διείδυσης) και εργαστηριακές δοκιμές για την αντοχή της βραχώμαζας και των εδαφικών υλικών, την ανίχνευση επιφανειών ολίσθησης, τον καθορισμό της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κ.τ.λ.



Εικόνα 22: Απλές κεκλιμένες γεωτρήσεις (Wei Z. κ.α. 2003)

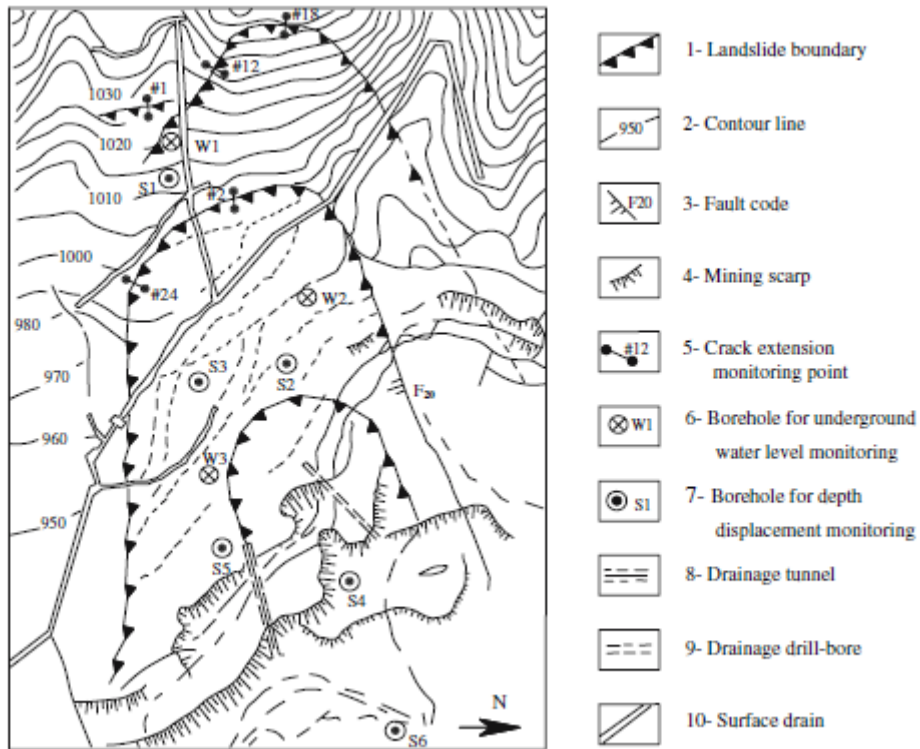
Για τον έλεγχο της κατολίσθησης πραγματοποιήθηκαν συνολικά τρεις γεωτεχνικές έρευνες το 1990, το 1992 και το 1998. Διά μέσου της επί τόπου δειγματοληψίας, που βασίστηκε στις Κινεζικές προδιαγραφές για μεθόδους ελέγχου σε μηχανικά υλικά, οι φυσικές ιδιότητες του πρανούς καθορίστηκαν και καταγράφηκαν στον πίνακα της Εικόνας 23. Υπάρχουν πολλά λεπτά στρώματα καολινίτη στον ψαμμίτη. Γρήγορα διαλύθηκαν καθώς ήρθαν σε επαφή με νερό. Το κατακερματισμένο ψαμμιτικό υπόβαθρο έγινε σχετικά υδατοστεγές. Επιπρόσθετα, η έρευνα στην περιοχή εξόρυξης φανέρωσε την ύπαρξη ενός φακοειδούς στρώματος, το οποίο έφερε νερό, και βρισκόταν στην επιφάνεια ολίσθησης του πρανούς, δρώντας ενάντια στην ευστάθεια του.

Εικόνα 23: Φυσικές ιδιότητες και παράμετροι αντοχής του πρανούς (Wei Z. κ.α. 2003)

Parameters	Unit weight γ (kN/m ³)	Water content (%)	Cohesion, <i>C</i> (kPa)		Friction angle, ϕ (°)	
			Peak	Residual	Peak	Residual
Quaternary						
Natural	18.5	30.0	39.0	16.0	22.0	16.5
Saturation	19.2	35.0	27.0		18.0	
Completely weathered bedrock						
Natural	19.0	30.0	17.0		27.0	
Saturation	20.0	32.0	15.0		21.0	
Middle weathered bedrock						
Saturation	25.2	13.0	176.0		23.0	
Iron ore						
Natural	45		190.0		32.5	
Failure surface soil						
Saturation	19.1	44.0	17.9	11.3	18.5	14.8

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ

Ως κομμάτι του λεπτομερούς γεωτεχνικού προγράμματος εγκαταστάθηκαν δίκτυα παρακολούθησης στο ορυχείο, προκειμένου να καταγραφεί η εξέλιξη της κατολίσθησης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 24, το δίκτυο αποτελούταν από 32 επιφανειακά σημεία παρακολούθησης μετατοπίσεων, 16 σημεία παρακολούθησης της διεύρυνσης των ρωγματώσεων, 6 γεωτρήσεις παρακολούθησης μετατοπίσεων πολλαπλών σημείων για την εποπτεία των εις βάθος μετατοπίσεων, 6 υπόγειες γεωτρήσεις για τη μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (εικόνα 25) και 1 καταγραφικό σταθμό για τις βροχοπτώσεις (εικόνα 26). Δεδομένα συλλέγονταν μία φορά καθημερινά κατά τη διάρκεια της εποχής των βροχοπτώσεων και μία φορά ανά τρεις μέρες κατά την ξηρή περίοδο, από μέλη της ομάδας.



Εικόνα 24: Ορισμένα σημεία παρακολούθησης και μέτρα αποκατάστασης (Wei Z. κ.α. 2003)



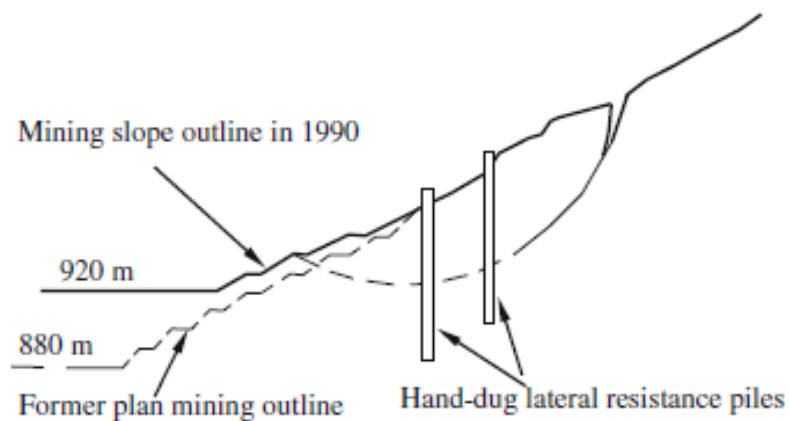
Εικόνα 25: Γεώτρηση για την παρακολούθηση της στάθμης των υπογείων υδάτων στο πρανές (Wei Z. κ.α. 2003)



Εικόνα 26:Αυτόματος καταγραφικός σταθμός βροχοπτώσεων (Wei Z. κ.α. 2003)

ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ

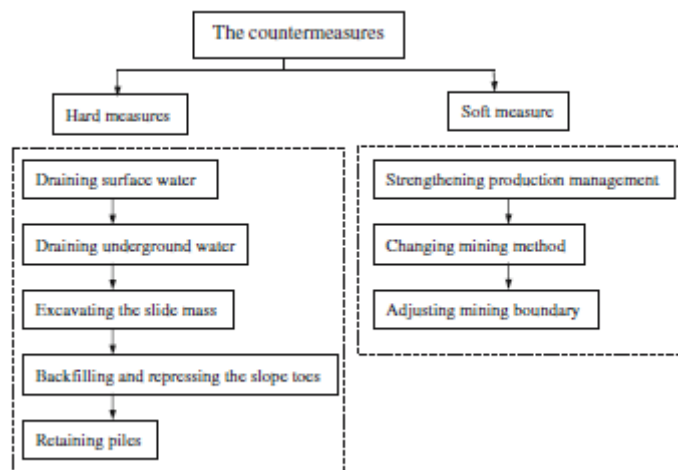
Λόγω της πολυπλοκότητας της κατάστασης, προτάθηκαν δύο σχέδια αντιμετώπισης. Το ένα εξ αυτών ήταν η κατασκευή ενός πασσαλότοιχου πλευρικής υποστήριξης από σκυρόδεμα. Κάθε κολώνα θα είχε μέσο μήκος 24 μέτρα και το σχήμα του τοίχου θα ήταν τετράγωνο, με διαστάσεις 3.5 μέτρα σε πλάτος και 4.5 μέτρα ύψος (όπως φαίνεται στην εικόνα 27). Το κόστος του συγκεκριμένου έργου θα ανερχόταν στα 24 εκατομμύρια RMB.



Εικόνα 27:Προτεινόμενος τοίχος αντιστήριξης (Wei Z. κ.α. 2003)

Το δεύτερο σχέδιο προέβλεπε μία γενικευμένη δυναμική μέθοδο ελέγχου και λόγω της μεγαλύτερης αξιοπιστίας και του χαμηλότερου κόστους ήταν αυτό που τελικά επιλέχθηκε. Σε αυτή τη μέθοδο που στηρίζεται στη μελέτη πεδίου, στην επί τόπου συλλογή δεδομένων και στην ανάλυση ευστάθειας, ένα ή περισσότερα μέτρα πρόληψης τίθενται σε εφαρμογή προκειμένου να ελεγχθεί η περαιτέρω εξέλιξη της κατολίσθησης χρονικά. Σε αυτά τα μέτρα

συμπεριλαμβάνονταν «σκληρά» μέτρα όπως επιφανειακή και υπόγεια αποστράγγιση, υποσκαφή εδαφικού υλικού σε σημεία κλειδιά, έτσι ώστε να μειωθεί το φορτίο, πυλώνες αντιστήριξης και επιχωμάτωση του πόδα της κατολίσθησης, αλλά και κάποια άλλα μέτρα όπως ο περιορισμός των ορίων της εξόρυξης. Η εικόνα 28 δείχνει σχηματικά τα μέτρα και τις διαδικασίες για τον έλεγχο των κατολισθήσεων.



Εικόνα 28: Μέτρα για τον έλεγχο των κατολισθήσεων (Wei Z. κ.α. 2003)

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

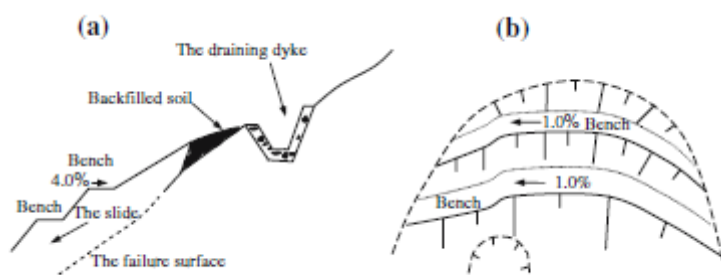
Η γενικευμένη δυναμική μέθοδος ελέγχου περιλάμβανε δραστικά και λιγότερο δραστικά μέτρα αντιμετώπισης. Η εικόνα 29 παρουσιάζει το χρονικό πλαίσιο στο οποίο αυτά εφαρμόστηκαν.

Εικόνα 29: Εφαρμογή των μέτρων αντιμετώπισης

1991	1992	1993	1994-1995	1998	1999
Surface drainage dyles: 800 m	Level drainage tunnel: 40 m	Cutting soil and reducing download: $9.0 \times 10^4 \text{ m}^3$	Cutting soil and reducing download: $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3$	Cutting soil and reducing download: $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3$	Stabilizing piles: 16
Remained jamb: 20 m (width), 70 m (length)	Level drainage drill: 70 m				Backfill and repress: $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3$

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Στις αρχές του 1991, όταν η εξέλιξη της κατολίσθησης βρισκόταν σε πρώιμο στάδιο, κατασκευάστηκαν το επιφανειακό και το υπόγειο δίκτυο αποστράγγισης. Ως πρώτο βήμα, κατασκευάστηκαν κανάλια αποστράγγισης στα όρια της επιφάνειας ολίσθησης και στο εσωτερικό της (όπως φαίνεται στην εικόνα 30a). Οι ρωγματώσεις του πρανούς επιχωματώθηκαν και συμπιέστηκαν, και η επιφάνεια του πρανούς αναδιαμορφώθηκε για να μειωθεί η επίδραση των βροχοπτώσεων (όπως φαίνεται στην εικόνα 30b). Αυτά τα μέτρα είχαν άμεση επίδραση, καθώς η κατολίσθηση επιβραδύνθηκε ουσιαστικά. Η μετατόπιση που μετρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, στο σημείο μέτρησης 2, ήταν μόλις 19 εκατοστά με μία ετήσια βροχόπτωση ύψους 1341 mm.

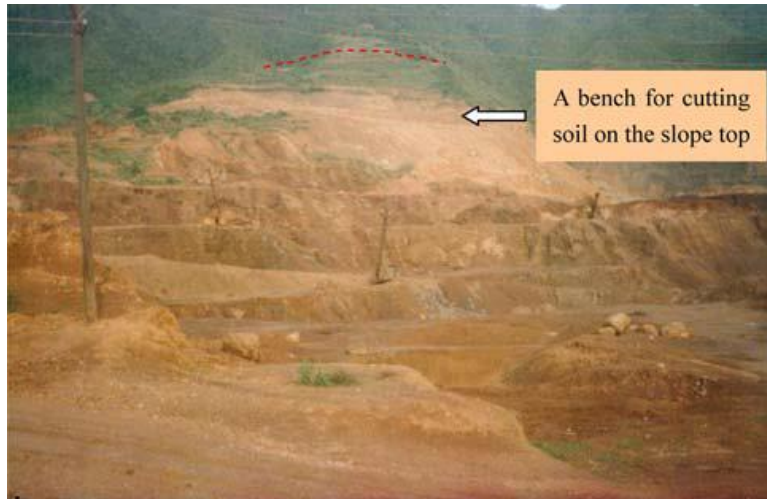


Εικόνα 30:Επιφανειακή αποστράγγιση και ρύθμιση της επιφάνειας της κατολίσθησης (Wei Z. κ.α. 2003)

Στις αρχές του 1992, κατασκευάστηκε το δίκτυο αποστράγγισης των υπογείων υδάτων. Κατασκευάστηκε μία σήραγγα αποστράγγισης στο εσωτερικό του πρανούς, σε υψόμετρο 910 μέτρων και ανοίχθηκε ένα οριζόντιο κανάλι αποστράγγισης μήκους 70 μέτρων κατά την περίοδο ξηρασίας, τον Σεπτέμβρη του 1992. Στην αρχή, η ημερήσια απορροή από το κανάλι αποστράγγισης ήταν 5 τόνοι νερού. Τα δεδομένα που συλλέγονταν έδειξαν πως ο ρυθμός με τον οποίο αναπτυσσόταν η κατολίσθηση μειώθηκε κατά το 1993, κάτι το οποίο φανερώνει πως τα μέτρα αυτά ήταν επιτυχημένα.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΓΙΑ ΝΑ ΜΕΙΩΘΕΙ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

Σε κάθε περίοδο ξηρασίας από το 1993 έως το 1998, τα εδαφικά υλικά στην κορυφή του πρανούς εκσκάπτονταν σταδιακά, προκειμένου να μειωθεί το φορτίο. Παρ' ότι η εφαρμογή των προαναφερθέντων μέτρων έφερε κάποια αποτελέσματα στη σταθεροποίηση του πρανούς, αυτό ήταν ακόμα ακατάλληλο για τη συνέχιση των εξορυκτικών εργασιών. Με σκοπό τη μείωση του κατακόρυφου φορτίου, εδαφικά υλικά σε σημεία κλειδιά του πρανούς αφαιρέθηκαν σε τρία στάδια. Η απαιτούμενη μείωση του όγκου των εδαφικών υλικών προσδιορίστηκε διά μέσου ανάλυσης με την μέθοδο οριακής ισορροπίας. Συνολικά αφαιρέθηκαν 0.6 εκατομμύρια τόνοι γεω - υλικού από το πρανός. Η αφαίρεσή του ήταν εμφανής στο πρανός όπως φαίνεται στην εικόνα 31.



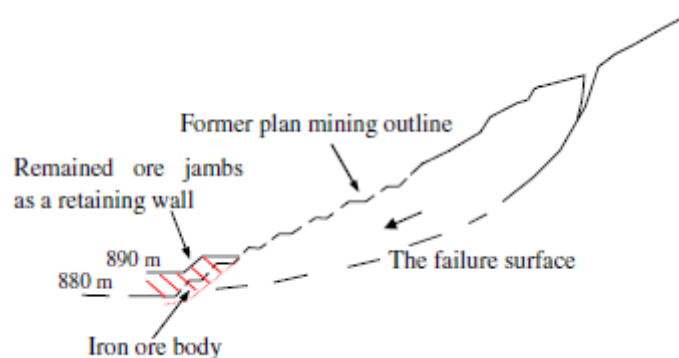
Εικόνα 31: Αφαίρεση υλικού από την κορυφή του πρανούς (Wei Z. κ.α. 2003)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Στα τέλη του 1999, εφαρμόστηκε η μέθοδος των πυλώνων αντιστήριξης. Ένας τοίχος αντιστήριξης, που αποτελούταν από 16 πυλώνες εγκαταστάθηκε στη βάση του πρανούς. Ο μακρύτερος πυλώνας ήταν 18 μέτρα. Μετά την ολοκλήρωση αυτού του έργου σημεία κλειδιά του ορυχείου (στην κύρια κατεύθυνση ολίσθησης) επιχωματώθηκαν με στείρα υλικά. Με αυτά τα μέτρα, ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς αυξήθηκε στο 1.27 (που είναι μεγαλύτερος από το 1.25 που απαιτείται από τον Κινεζικό κώδικα προτύπων για ανοικτές εκσκαφές).

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΚΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

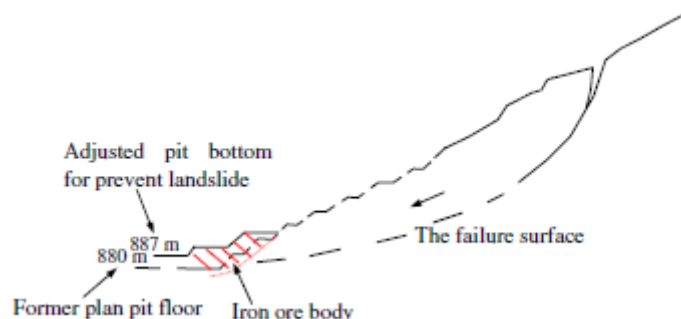
Η ζώνη εξόρυξης προσαρμόστηκε και διατηρήθηκαν δοκοί μεταλλεύματος για τη συγκράτηση του πρανούς. Δοκοί πλάτους 10-20 μέτρων διατηρήθηκαν στον πόδα της κατολίσθησης για να σταθεροποιηθεί το πρανές (Εικόνα 32). Σύμφωνα με την αντίστροφη ανάλυση με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, ο συντελεστής ασφαλείας μπορούσε να αυξηθεί στο 1.03 και το πρανές ήταν σχετικά ευσταθές. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν έδειξαν ότι η μετατόπιση στο σημείο 2 ήταν μικρότερη από ότι πριν.



Εικόνα 32: Παραμένοντες πυλώνες μεταλλεύματος ως τοίχος συγκράτησης (Wei Z. κ.α. 2003)

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΔΑΠΕΔΟΥ ΤΟΥ ΟΡΥΧΕΙΟΥ

Το ύψος του δαπέδου του ορυχείου προσαρμόστηκε από τα 880 μέτρα, που ήταν αρχικά, στα 887 μέτρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 33. Από αυτό το μέτρο ενισχύθηκε σημαντικά η ευστάθεια του πρανούς και αποφεύχθηκε περαιτέρω επένδυση.



Εικόνα 33: Προσαρμοσμένο ύψος δαπέδου (Wei Z. κ.α. 2003)

4.1.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Έπειτα από την κατασκευή των πασσαλότοιχων και την αφαίρεση εδαφικού υλικού το 1999, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των δύο επόμενων χρόνων κατέδειξαν πως παρόλο που το ετήσιο ύψος βροχής ήταν μεγάλο η μετατόπιση στο σημείο μέτρησης 2 ήταν μόλις 1.4 εκατοστά το 2000, κάτι το οποίο σημαίνει πως η κατολίσθηση είχε σχεδόν τερματιστεί.
- ❖ Από το 1991 έως το 2000, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των μέτρων αντιμετώπισης, η κατολίσθηση προχωρούσε εποχικά, χωρίς όμως να προκύψει κανένα ατύχημα. Το ορυχείο παρήγαγε 1.0×10^9 κιλά μεταλλεύματος υψηλής περιεκτικότητας σε διάρκεια 10 χρόνων, παραγωγή που απέφερε έσοδα 100 εκατομμύρια RMB.

4.2. ΟΡΥΧΕΙΟ ΧΑΛΚΟΥ ΦΑΡΑΓΓΙ BINGHAM, ΓΙΟΥΤΑ Η.Π.Α.

4.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ορυχείο χαλκού στο φαράγγι Bingham βρίσκεται 30 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης Salt Lake στη Γιούτα και είναι ένα από τα μεγαλύτερα ορυχεία ανοικτής εκσκαφής παγκοσμίως. Το ορυχείο έχει περίπου 1170 μέτρα βάθος και περίπου 4.5 χιλιόμετρα πλάτος. Έχει παράξει περισσότερο χαλκό (πάνω από 20 εκατομμύρια τόνους) από κάθε άλλο ορυχείο στον κόσμο και παράγει επίσης χρυσό, άργυρο και μολυβδένιο. Το ορυχείο απασχολεί 2171 υπαλλήλους και ξεκίνησε να λειτουργεί το 1903. Το μεταλλουργικό εργοστάσιο και το διυλιστήριο του ορυχείου εκσυγχρονίστηκαν το 1993 έναντι 880 εκατομμυρίων δολαρίων, η οποία είναι η ακριβότερη επένδυση στην ιστορία της Γιούτα. Το ορυχείο αναγνωρίστηκε ως Εθνικό Ιστορικό Μνημείο το 1972 (Goin κ.α. 2004). Βρίσκεται ακόμη εν λειτουργία και εκτιμάται ότι θα συνεχίσει να εξορύσσει χαλκό επικερδώς έως το 2028 (Whitehead κ.α. 2006). Στις 10 Απριλίου του 2013, προέκυψε μια τεράστια κατολίσθηση στον βορειοανατολικό τοίχο του μεταλλείου, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την μετακίνηση υλικού με μέση ταχύτητα 112 km/h και η οποία έθαψε το δάπεδο του ορυχείου 100 μέτρα κάτω από συντρίμια.



Εικόνα 34: Το ορυχείο Bingham Canyon σήμερα

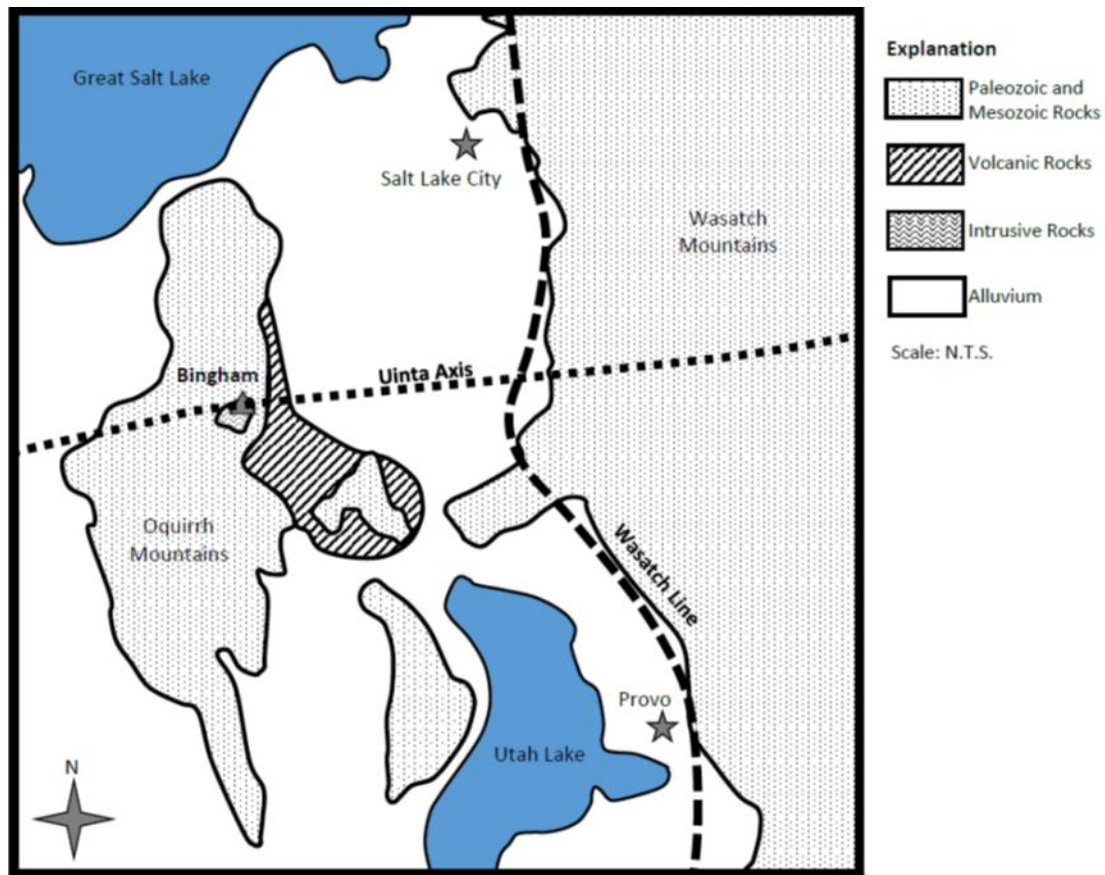
4.2.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Το ορυχείο βρίσκεται στο κέντρο ενός πολυμεταλλικού τριτογενούς πορφυριτικού κοιτάσματος 30 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης Salt Lake και στο βόρειο κομμάτι της οροσειράς Oquirrh (Babcock κ.α. 1997). Η οροσειρά Oquirrh είναι κομμάτι τριών ξεχωριστών μαζών προσχωσιγενών πετρωμάτων, παρόμοιας ηλικίας, που υπέρκειται του Προκάμβριου. Τα επωθητικά τεκτονικά καλύμματα που συνθέτουν την οροσειρά Oquirrh είναι τα φαράγγια Pass, Bingham και Rogers. Οι Tooker και Roberts (1988) υποθέτουν πως τα τρία επωθητικά συστήματα δημιουργήθηκαν κατά τη Μεσοζωική ορογένεση και μετακινήθηκαν στην περιοχή σχηματίζοντας ένα φολιδωτό επωθητικό σύμπλεγμα.

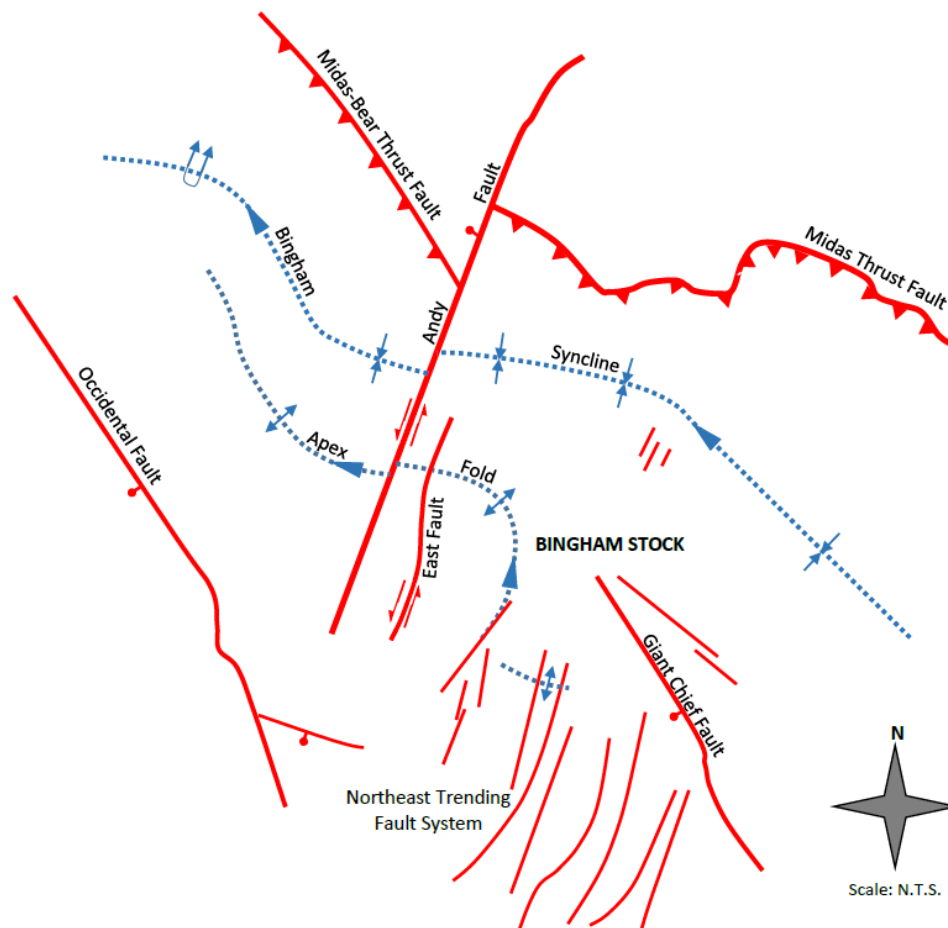
Το τεκτονικό κάλυμμα Bingham ταξίδεψε αρκετά χιλιόμετρα από τα δυτικά – νοτιοδυτικά κατά μήκος ενός υποκειμένου βασικού τεκτονικού καλύμματος (του συστήματος Midas) πριν να υπερπηδήσει το τεκτονικό κάλυμμα Pass. Το τεκτονικό κάλυμμα Bingham τερματίζεται βορειοανατολικά του ορυχείου στο φαράγγι Bingham καθώς κόβεται από το μεγάλης κλίσης ρήγμα AJ (Tooker και Roberts, 1988). Το τεκτονικό κάλυμμα Bingham έχει πάχος 7989 μέτρα.

Το σκηνικό της περιοχής που συντίθεται από την οροσειρά Oquirrh, συνέβαλε σημαντικά στο σχηματισμό του πορφυριτικού κοιτάσματος Bingham. Η εναπόθεση ανθρακούχων πλακωδών ιζημάτων, που απαρτίζουν το τεκτονικό κάλυμμα Bingham, προέκυψε πριν το σύστημα Midas μετακινήσει την πλάκα. Αυτά τα ανθρακούχα ιζήματα επέτρεψαν τη δημιουργία ζωνών ορυκτογένεσης, κοντά στο πορφυριτικό κοιτάσμα του φαραγγιού Bingham (Babcock κ.α. 1997). Δύο ρήγματα, ένα με διεύθυνση από την ανατολή προς τη δύση, το οποίο ονομάζεται Uinta και ένα με διεύθυνση από το βορά προς το νότο, που ονομάζεται Wasatch, είναι ενεργά από τον Αρχαιοζωικό μεγα - αιώνα και έχουν προκαλέσει περαιτέρω παραμόρφωση της οροσειράς Oquirrh διά μέσου της περιοδικής ανύψωσης και αποσάθρωσης, εκθέτοντας έτσι τα πλουτώνια πετρώματα που φιλοξενούν το πορφυριτικό κοιτάσμα (Babcock κ.α. 1997).



Εικόνα 35: Η θέση των ρηγμάτων Uinta και Wasatch σε σχέση με το ορυχείο (Babcock κ.α. 1997)

Η οροσειρά Οquirrh είναι η ανατολικότερη στη λεκάνη και υπόκειται σε τρισδιάστατα καθεστώτα πίεσης τα οποία οδηγούν σε ευθυγράμμιση των ρηγμάτων Horst και Graben στη λεκάνη Salt Lake. Επιπρόσθετα, η οροσειρά αυτή βρίσκεται ανάμεσα στην πτυχή Cordilleran και στη ζώνη επώθησης και επηρεάζεται από δυνάμεις συμπίεσης (Babcock κ.α. 1997). Αυτές οι δυνάμεις δημιούργησαν μεγάλης κλίμακας δομικά χαρακτηριστικά στην περιοχή, τα οποία πυροδότησαν το σχηματισμό τοπικών πτυχών, ρηγμάτων και ρωγματώσεων. Τα τελευταία με τη σειρά τους επέτρεψαν την εισχώρηση υδροθερμικών διαλυμάτων στα πετρώματα.



Εικόνα 36: Τεκτονικός χάρτης του ορυχείου (Lanier κ.α. 1978)

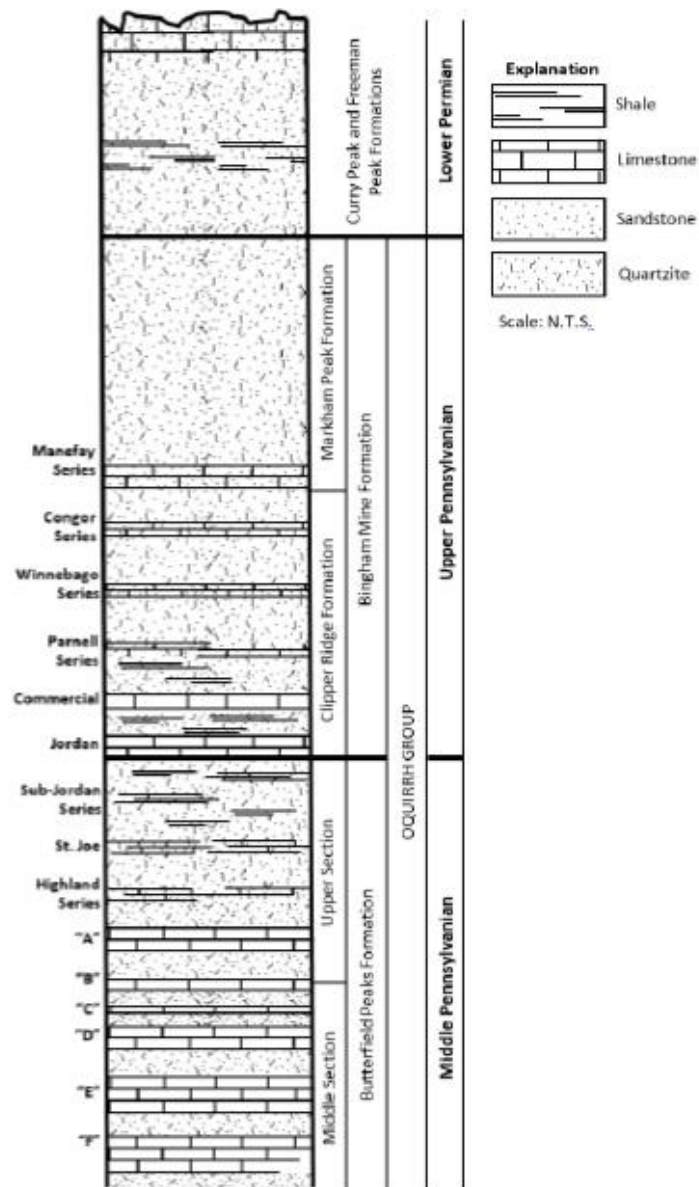
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η περιοχή αποτελείται από εναλλαγή πυκνών στρωμάτων Παλαιozoϊκού χαλαζίτη, σχιστόλιθου, ασβεστόλιθου και πυριτικών κλαστικών πετρωμάτων. Το πορφυριτικό κοίτασμα Bingham εντοπίζεται εντός ενός συμπλέγματος Τριτογενών παρεισφρήσεων ισόκοκκων, πορφυριτικών αποθεμάτων (Tooker, 1999).

Ο σχηματισμός Butterfield Peaks και ο σχηματισμός του ορυχείου Bingham είναι μέρη της οροσειράς Oquirrh και είναι οι κύριες μονάδες ιζηματογενών πετρωμάτων που απαντώνται στο ορυχείο Bingham. Το κύριο ιζηματογενές πέτρωμα σε αυτές τις μονάδες είναι ο χαλαζίτης και είναι το πέτρωμα που συναντάται περισσότερο από κάθε άλλο στην ανοικτή εκσκαφή. Τα ιζηματογενή πετρώματα κλίνουν ελαφρώς προς τα βόρεια – βορειοδυτικά (Bray κ.α. 1975).

ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

- Σχηματισμός Butterfield Peaks (παλαιότερος προς νεότερο)
Τα μεσαία και ανώτερα τμήματα αυτού του σχηματισμού είναι εκτεθειμένα στη νότια πλευρά του ορυχείου και αποτελούν την παλαιότερη γεωλογική μονάδα στην περιοχή εξόρυξης (Lanier κ.α. 1978). Το κατώτερο τμήμα αυτού του σχηματισμού (που εμφανίζεται λίγο νοτιότερα του ορυχείου) αποτελείται από μια αλληλουχία λεπτοστρωματώδους ασβεστόλιθου, χαλαζίτη, ψαμμίτη, ιλυόλιθου και σχιστόλιθου. Το μεσαίο τμήμα είναι μια αλληλουχία από εναλλασσόμενα στρώματα γαλαζωπού-γκρι πυριτόλιθου, αργιλωδών, απολιθοματοφόρων ή αρενιτούχων ασβεστολίθων και ανοιχτού γκρι, ασβεστολιθικού χαλαζίτη ή αστριούχου ορθοχαλαζίτη (Swensen 1975). Το ανώτερο τμήμα του σχηματισμού είναι κυρίως ορθοχαλαζίτης χρώματος ανοιχτού γκρι – ανοιχτού καφέ, ασβεστολιθικός χαλαζίτης με διαστρώσεις αρενιτούχου ή πυριτιούχου ασβεστόλιθου και ασβεστολιθικός ψαμμίτης.
- Σχηματισμός ορυχείου Bingham
Αυτός ο σχηματισμός αποτελεί την κύρια στρωματογραφική μονάδα που διασχίζει το ορυχείο. Αυτός ο σχηματισμός υποδιαιρείται στον κατώτερο σχηματισμό Clipper Ridge και τον ανώτερο σχηματισμό Markham Peak (Tooker και Roberts 1988). Στη βάση του σχηματισμού Clipper Ridge απαντάται σκούρος γκρι αργιλώδης, πυριτιούχος και αρενιτούχος ασβεστόλιθος (Swensen 1975). Πάνω από αυτό, υπάρχει ένα στρώμα ανοιχτού γκρι ασβεστολιθικού χαλαζίτη, ορθοχαλαζίτη και ασβεστολιθικού ψαμμίτη. Το ανώτερο στρώμα συντίθεται από λεπτοστρωματώδη σκούρο γκρι, αργιλώδη και πυριτιούχο ασβεστόλιθο (Swensen 1975). Τέλος, εμφανίζεται ένα τμήμα 720 μέτρων ανοιχτού γκρι ορθοχαλαζίτη και ασβεστολιθικού χαλαζίτη, με διαστρώσεις λεπτοκοκκώδους ασβεστόλιθου, ψαμμίτη, ιλυόλιθου και σχιστόλιθου. Η εξόρυξη του χαλκού γίνεται από αυτό το στρώμα. Ο σχηματισμός Markham Peak αποτελείται από λεπτά στρώματα ανοιχτών γκρι ορθοχαλαζιτών και ασβεστολιθικών χαλαζιτών. Στους χαλαζίτες παρεμβάλλονται γκρι ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι και ιλυόλιθοι (Swensen 1975).



Εικόνα 37: Παλαιζωϊκές και Μεσοζωϊκές αλληλουχίες ιζηματογενών πετρωμάτων στο ορυχείο Bingham (Swensen 1975)

ΕΚΡΗΞΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Αρκετά επεισόδια εισβολής εκρηξιγενών πετρωμάτων συνέβησαν κατά το τέλος του Ηώκαινου και την αρχή του Ολιγοκαινού (Lanier κ.α. 1978). Οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών στην περιοχή επέτρεψαν την εισαγωγή μαγματικών σωμάτων και υδροθερμικών διαλυμάτων (Bray κ.α. 1975).

- Ισοκοκκώδης μονζονίτης (Ηώκαινο)

Ο μονζονίτης εμφανίζεται στο ένα τρίτο της επιφάνειας του ορυχείου και αποτελεί το πιο σύνηθες εκρηξιγενές πέτρωμα σε αυτό.

- Πορφυριτικός – ισοκοκκώδης χαλαζιακός Μονζονίτης

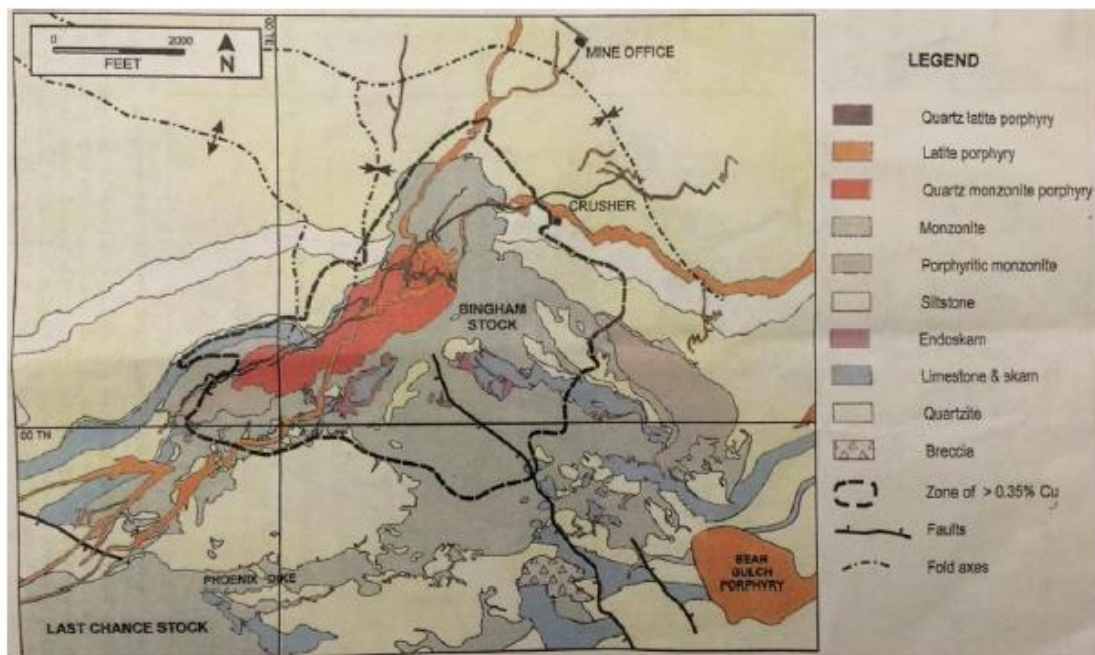
Εμφανίζεται σε μία έκταση περίπου 2-5% του ορυχείου.

- Λατίτης (Ολιγόκαινο)

Αποτελεί μία μικρή εμφάνιση στο νοτιοανατολικό άκρο του ορυχείου.

- Χαλαζιακός Πορφυρίτης (Ολιγόκαινο)

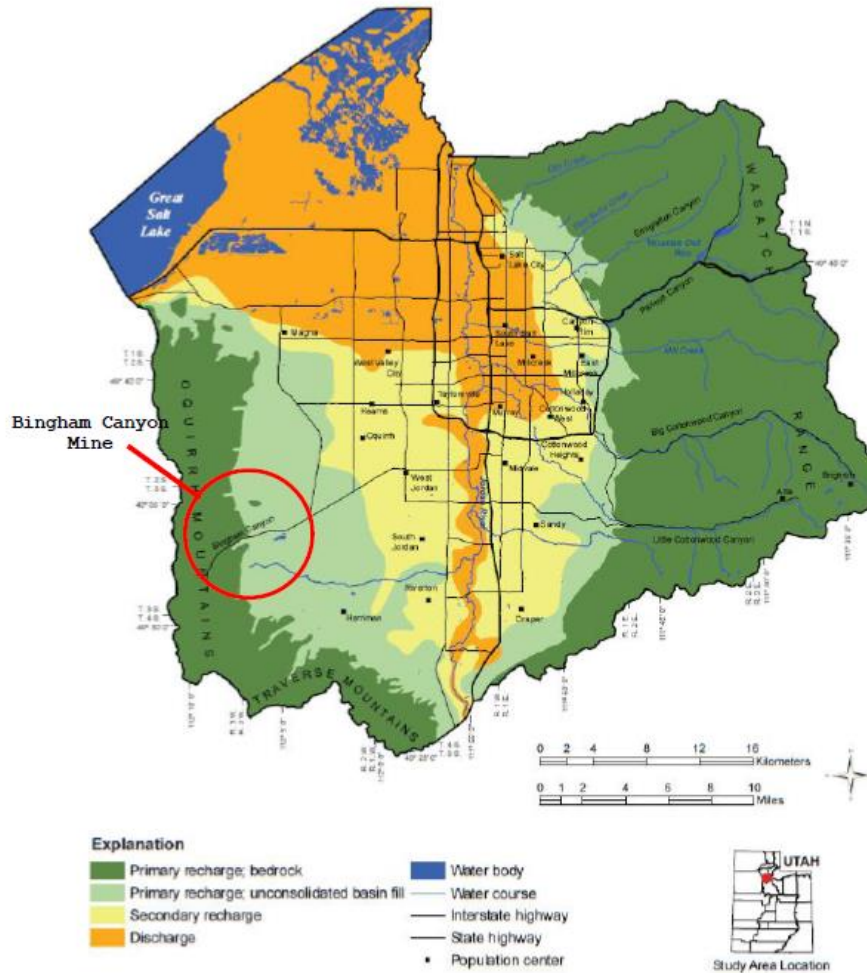
Αποτελεί την πιο άφθονη πορφυριτική εμφάνιση και καλύπτει 5% της επιφάνειας του ορυχείου.



Εικόνα 38: Κατανομή των εκρηξιγενών πετρωμάτων στο ορυχείο (Phillips κ.α. 1997)

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

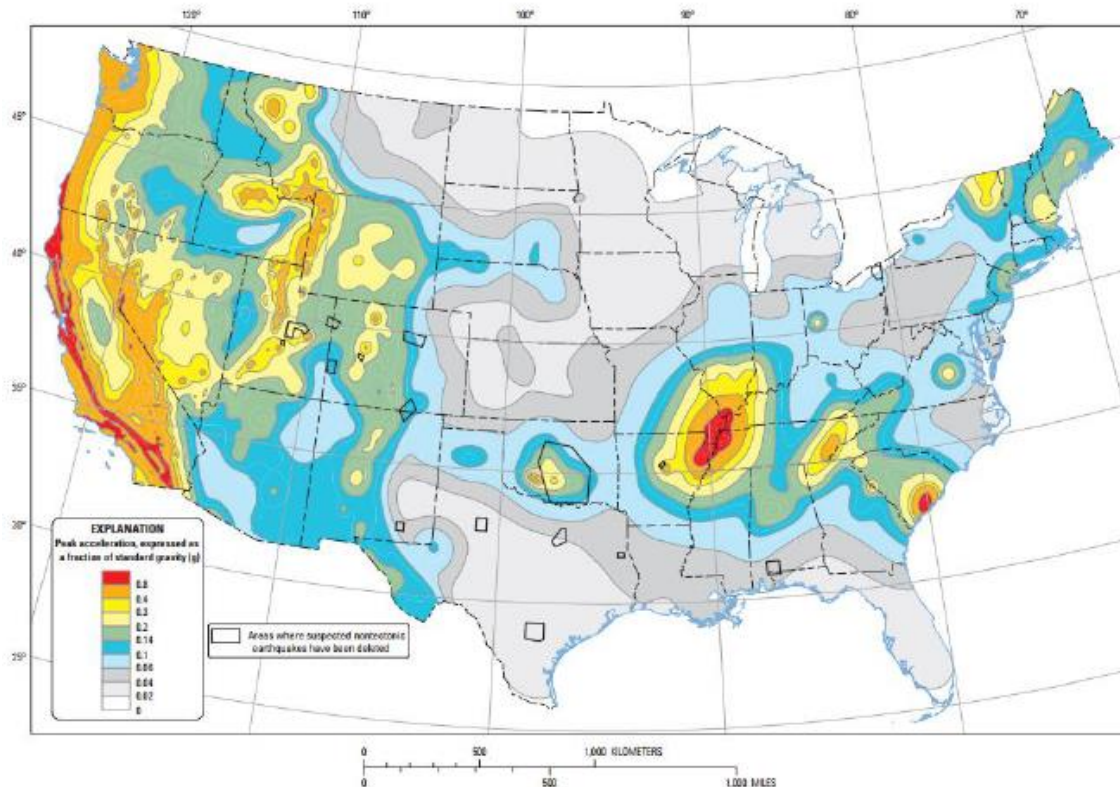
Το ορυχείο Bingham βρίσκεται στη λεκάνη τροφοδοσίας της κοιλάδας Salt Lake που απορρέει στον κύριο υπόγειο υδροφορέα της περιοχής (Wallace και Lowe 2009). Ο υδροφορέας αυτός με τη σειρά του τροφοδοτεί την πόλη Salt Lake, τον ποταμό Jordan και τη λίμνη Great Salt.



Εικόνα 39: Λεκάνες τροφοδοσίας στην περιοχή (Wallace και Lowe 2009)

ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

Ο εθνικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του έτους 2014, του Αμερικανικού Ινστιτούτου Γεωλογικών Ερευνών (USGS) υποδεικνύει ότι υπάρχει 2% πιθανότητα, σε περίοδο 50 χρόνων, η μέγιστη επιτάχυνση στο έδαφος εξαιτίας σεισμικού γεγονότος να είναι ίση με το 40% της επιτάχυνσης της βαρύτητας στο ορυχείο Bingham. Η ύπαρξη αρκετών ρηγμάτων στην περιοχή είναι μία πιθανή πηγή σεισμικής δραστηριότητας.



Εικόνα 40:Εθνικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Η.Π.Α (USGS 2014)

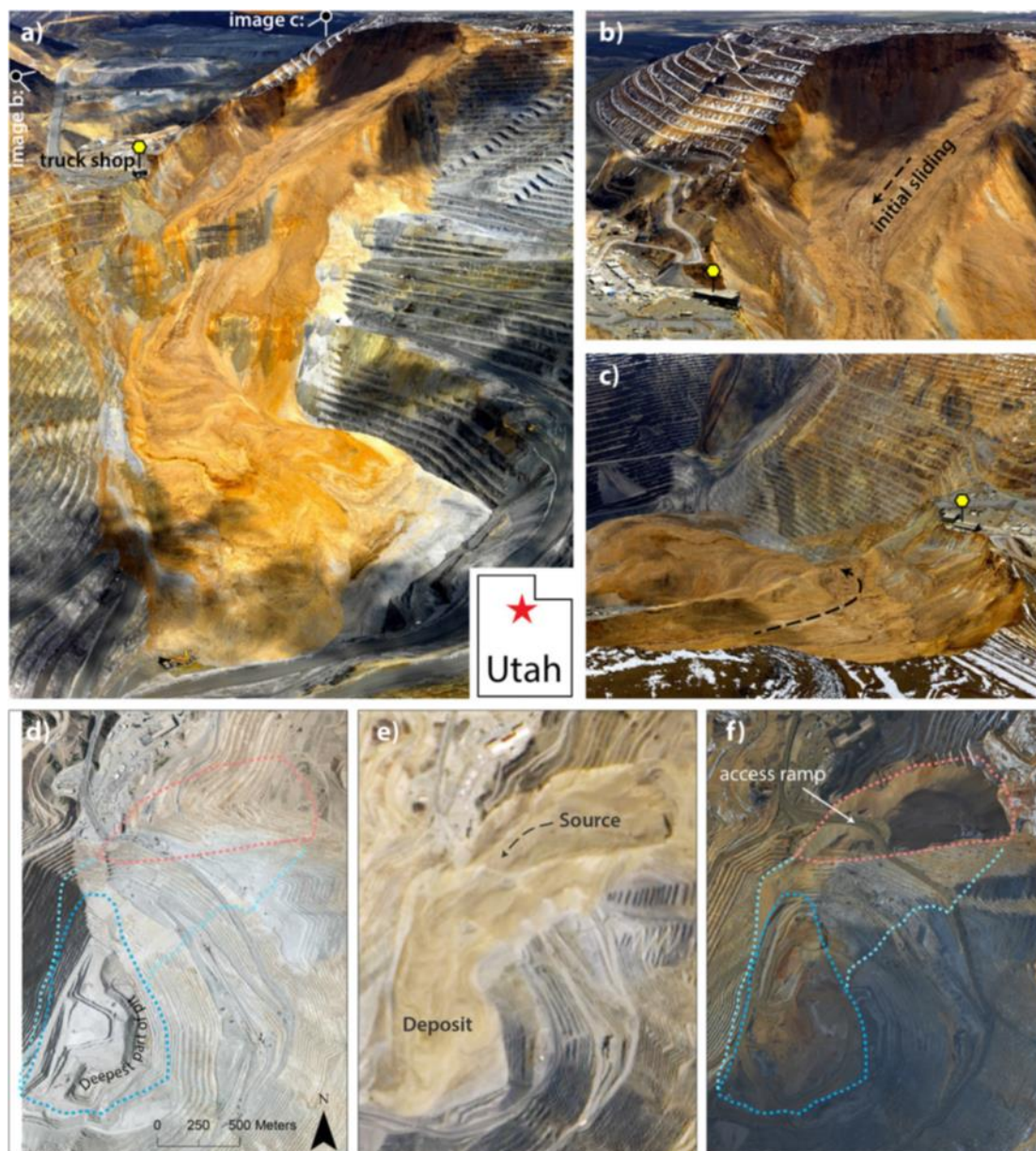
4.2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

ΓΕΝΙΚΑ

Επρόκειτο για δύο γιγαντιαίες ολισθαίνουσες μάζες οι οποίες προήλθαν από το ανώτερο τμήμα του βορειοανατολικού τοίχου του ορυχείου και συνέβησαν με διαφορά 1.5 ώρας στις 10 Απριλίου του 2013. Χαρακτηρίστηκαν ως οι πιο εκτεταμένες, μη ηφαιστειακές κατολισθήσεις στη σύγχρονη Βόρειο – Αμερικανική ιστορία. Η πρώτη συνέβη στις 9:30 μ.μ. MDT (3:30 π.μ. UTC, 11 Απριλίου 2013) και η δεύτερη στις 11:05 μ.μ. MDT (5:05 π.μ. UTC, 11 Απριλίου 2013). Η ακριβής χρονική στιγμή που συνέβη κάθε μία από τις κατολισθήσεις προέκυψε από την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων. Ο συνολικός όγκος των κατολισθαίνοντων υλικών ήταν 144 εκατομμύρια m^3 . Εξαιτίας των δύο κατολισθήσεων συνέβησαν δύο κύρια σεισμικά γεγονότα 5.1 και 4.9 βαθμών στην κλίμακα Richter, καθώς και 14 μικρότεροι σεισμοί. Οι κινήσεις είχαν ξεκινήσει μήνες νωρίτερα και οι κατολισθήσεις δεν είχαν κάποιο εμφανές αίτιο. Η ύπαρξη ενός εκτεταμένου συστήματος γεωτεχνικής παρακολούθησης στο ορυχείο, επέτρεψε τον χρονικό προσδιορισμό της κατολίσθησης, όμως δεν κατέστη ικανή να προβλέψει την έκταση του φαινομένου.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Η εγγύτητα των κατολισθήσεων σε ένα πυκνό σεισμικό δίκτυο, καθώς και βασικά στοιχεία και φωτογραφίες που δημοσιεύτηκαν από το ορυχείο συντελούν στη σύνθεση ενός πλούσιου όγκου δεδομένων, παρότι τα επί τόπου δεδομένα παραμένουν αδημοσίετα και συνεπώς μη διαθέσιμα.



Εικόνα 41: Φωτογραφίες από τις κατολισθήσεις στο ορυχείο Bingham Canyon (φωτογραφία ιδιοκτησίας της Rio Tinto Kennecott)

Σύμφωνα με τους Moore κ.α. (2017), η Εικόνα 41α παρουσιάζει μία γενική εικόνα του ορυχείου, της περιοχής από όπου ξεκίνησαν οι κατολισθήσεις και των κατολισθαίνοντων υλικών, κοιτώντας προς το βορά. Κατολισθαίνοντα υλικά γκρι χρώματος, από την πρώτη κατολίσθηση, είναι εμφανή στην περίμετρο, με τα υλικά πορτοκαλί χρώματος, από τη δεύτερη κατολίσθηση, να τα έχουν καλύψει. Η εικόνα 41b υποδεικνύει την πηγή της κατολίσθησης : η

βασική επιφάνεια αστοχίας κλίνει προς τα δυτικά, με το σταθμό των οχημάτων να φαίνεται σε πρώτο πλάνο. Η εικόνα 41c παρουσιάζει μία οπτική γωνία από το σημείο που ξεκίνησαν οι κατολισθήσεις, επισημαίνοντας την προς το νότο στροφή και τα υπερ-ανυψωμένα κατολισθαίνοντα υλικά τα οποία υποδεικνύουν ταχύ ρυθμό προχώρησης των κατολισθήσεων. Οι εικόνες 41d-f είναι φωτογραφίες βαθμιαίας παρέλευσης του χρόνου από το ορυχείο. Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα 41d, είναι από τον Ιούλιο του 2012, 9 μήνες πριν τις κατολισθήσεις, η εικόνα 41e, από τον Μάιο του 2013, ακριβώς μετά από τις κατολισθήσεις και τέλος η εικόνα 41f από τον Φεβρουάριο του 2014, μετά από την απομάκρυνση των κατολισθαίνοντων υλικών και τη συνέχιση της εξόρυξης. Το μέρος από το οποίο ξεκίνησαν οι κατολισθήσεις σημειώνεται με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, το κύριο σώμα της κατολίστεσης σημειώνεται με σκούρο μπλε και με γαλάζιο επισημαίνεται το σύνολο της κατολισθαίνουσας μάζας.

Από την σύγκριση των παραπάνω εικόνων προκύπτουν κάποια σημαντικά στοιχεία:

- Το σημείο από το οποίο ξεκίνησαν οι κατολισθήσεις ήταν μία απότομη βραχώδης ράχη στο βόρειο τοίχο.
- Βραχώδη υλικά είχαν στοιβαχθεί στην κορυφή και τη βόρεια πλευρά αυτής της ράχης.
- Μία συνεχής επιφάνεια αστοχίας είναι εμφανής να κλίνει ελαφρώς προς τα δυτικά.
- Το βαθύτερο κομμάτι του ορυχείου ήταν ένα αμυδωτό κομμάτι στη νοτιοανατολική πλευρά του δαπέδου.
- Η ροή των κατολισθαίνοντων υλικών πήρε μία τροπή προς τα δυτικά, καθώς αυτά αποκολλήθηκαν από την περιοχή όπου ξεκίνησε η κατολίστεση και εισήλθαν στο εσωτερικό του ορυχείου.
- Η υπερχείλιση των υλικών προς τα νότια κάλυψε τις απότομες βαθμίδες του ορυχείου, ενώ το κύριο σώμα των υλικών πλήρωσε το δάπεδο του ορυχείου.
- Δραστική τροποποίηση του χώρου του ορυχείου, μετά τις κατολισθήσεις είχε ήδη συμβεί έως τον Φεβρουάριο του 2014.

Οι κατολισθήσεις στο φαράγγι Bingham ξεκίνησαν ως ολισθήσεις σε ένα βασικό ρήγμα (γνωστό στην περιοχή ως ρήγμα Manefay) (Moore κ.α. 2017). Το ίχνος αυτού του ρήγματος ήταν ορατό πριν τις κατολισθήσεις στο βόρειο τοίχο του μεταλλείου. Στην εικόνα 41 φαίνεται πως το κύριο επίπεδο διάρρηξης εκτείνεται από το κατώτερο σημείο της περιοχής που ξεκίνησε η κατολίστεση έως και το ανώτερο σημείο, όπου υλικά υποχώρησαν δημιουργώντας ένα γκρεμό ύψους 120 μέτρων. Συνολικά αστόχησε ένα κομμάτι μήκους 1350 μέτρων και πλάτους 500 μέτρων, με εκτιμώμενο εμβαδόν 542.000 τ.μ. Το βασικό επίπεδο αστοχίας κλίνει ελαφρώς κατά 21° προς τα δυτικά.

Αθροιστικά, τα κατολισθαίνοντα υλικά κάλυψαν μια περιοχή εμβαδού 1.336.000 τ.μ., ενώ το κύριο σώμα του κοιτάσματος έχει επιφανειακή εμφάνιση μόλις 75.000 τ.μ. Η μέγιστη απόσταση από τη στέψη μέχρι τον πόδα της κατολίστεσης είναι 2950 μέτρα (Moore κ.α. 2017). Τα κατολισθαίνοντα υλικά από την πρώτη κατολίστεση έχουν κυρίως γκρι χρώμα αφού προέρχονται από το βραχώδες υπόβαθρο της εξωτερικής επιφάνειας των τοίχων του μεταλλείου, ενώ τα υπέρθετα υλικά από τη δεύτερη κατολίστεση έχουν κυρίως πορτοκαλί χρώμα κάτι το οποίο αντανακλά μια μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε απορρίμματα (που εκτιμάται στο 25%).

Η εικόνα 41 αποκαλύπτει επίσης πως τα κατολισθαίνοντα υλικά από την πρώτη κατολίστεση είναι ελαφρώς υπερυψωμένα στο ανώτερο σημείο τους (κάτι το οποίο γίνεται εμφανές από την ευθυγράμμιση με τις βαθμίδες του ορυχείου στην εικόνα 41α), γεγονός το οποίο οδηγεί στο

συμπέρασμα πως υπήρξε μια ελαφριά πρόσκρουση σε αυτόν τον τοίχο. Τα κατολισθαίνοντα υλικά της δεύτερης κατολίσθησης δεν φαίνεται να έχουν επηρεάσει τον εν λόγω τοίχο και έχουν ένα λοβώδες σχήμα. Και οι δύο κατολισθήσεις υπερυψώθηκαν προχωρώντας προς τα δυτικά και έκαναν μια στροφή 90⁰ προς το νότο. Κατολισθαίνοντα υλικά και από τις δύο κατολισθήσεις είναι εμφανή στο δυτικό τοίχο του μεταλλείου (τα οποία όπως ειπώθηκε διαχωρίζονται από το χρώμα), καθώς συγκρατήθηκαν από τις βαθμίδες του ορυχείου. Τα υλικά από τη δεύτερη κατολίσθηση διακρίνονται ψηλότερα στον τοίχο από αυτά της πρώτης.

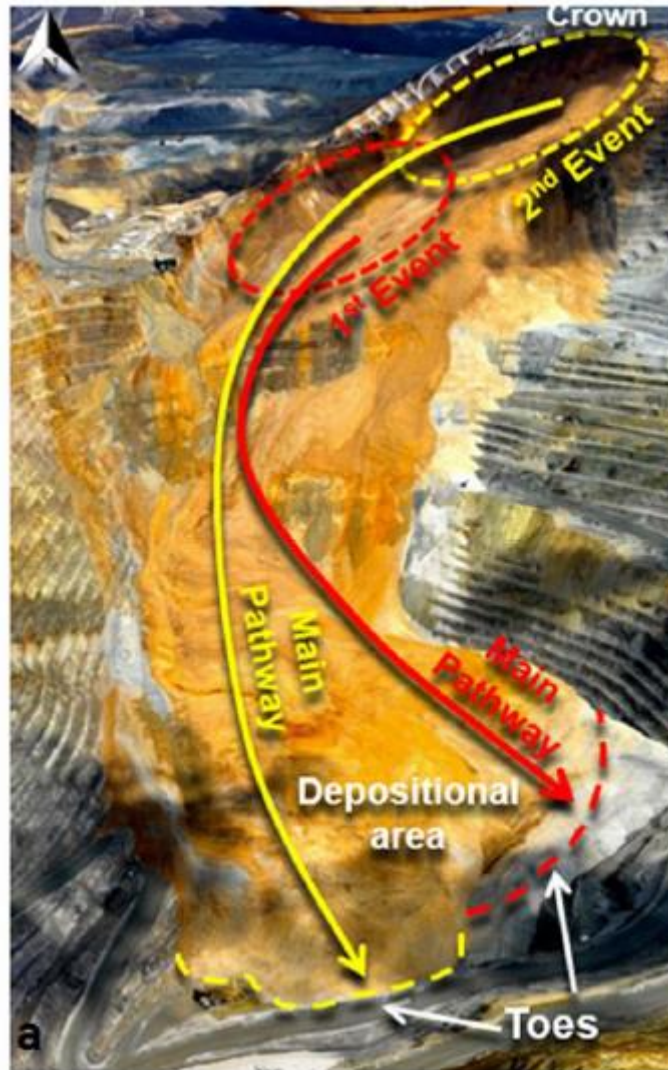
Η εταιρεία Rio Tinto Kennecott, η οποία διαχειρίζεται το ορυχείο, προσδιόρισε πως η συνολική μάζα των κατολισθήσεων ήταν 144.000.000 τόνοι, κάτι το οποίο υποθέτοντας μία πυκνότητα 2600 kg/m³ (τιμή η οποία αντιστοιχεί στα απορρίμματα του ορυχείου) ισοδυναμεί σε όγκο 55 Mm³. Οι επί μέρους όγκοι των δύο κατολισθήσεων είναι άγνωστοι. Τα στοιχεία δείχνουν ότι η πρώτη κατολίσθηση ήταν μεγαλύτερη από τη δεύτερη, καθώς τα υλικά της πρώτης γέμισαν το δάπεδο του ορυχείου, ενώ της δεύτερης όχι. Εκτιμάται πως η μάζα της πρώτης κατολίσθησης ήταν 1.5 φορά μεγαλύτερη από τη μάζα της δεύτερης.

ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ (Moore κ.α. 2017)

Η πρώτη κατολίσθηση απομακρυνόμενη από το σημείο εκκίνησης επιτάχυνε με γρήγορο ρυθμό κινούμενη προς τα νότια, καθώς κάποια υλικά σκορπίστηκαν στις απότομες βαθμίδες στα νοτιοανατολικά. Με την πάροδο 30 δευτερολέπτων, το κύριο σώμα της κατολίσθησης έχει φτάσει στην προαναφερθείσα στροφή προς τα δυτικά καθώς και στη μέγιστη ταχύτητα περίπου 75 m/s. Τα κατολισθαίνοντα υλικά υπερυψώνονται καθώς στρέφονται προς τα δυτικά και προσκρούουν στον απόκρημνο τοίχο του μεταλλείου. Υπερπηδώντας τον τοίχο αυτό, ο οποίος είχε ύψος 45 μέτρα, και κινούμενα με ταχύτητες περίπου 55 m/s τα κατολισθαίνοντα υλικά ρέουν προς τα νότια κατακλύζοντας μέχρι και τα πιο απομακρυσμένα σημεία του μεταλλείου.

Με την πάροδο 55 δευτερολέπτων, τα κατολισθαίνοντα υλικά έχουν μετακινηθεί σε απόσταση 2 χιλιομέτρων με μέση ταχύτητα 36 m/s. Αφού τα υλικά της κατολίσθησης έφτασαν στο νοτιότερο τμήμα του μεταλλείου, άρχισαν να πληρώνουν σταδιακά τις βόρειες και ανατολικές περιοχές δημιουργώντας ένα σωρό υλικών αρκετά κοντά στον βόρειο τοίχο. Μετά από 70 δευτερόλεπτα η κατολίσθηση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και τα εναπομείναντα υλικά ολισθαίνουν από την πηγαία περιοχή με πολύ χαμηλό ρυθμό. Η επιφάνεια αστοχίας έχει εκκενωθεί πλήρως μετά από 140 δευτερόλεπτα.

Η δεύτερη κατολίσθηση προήλθε από ψηλότερα στην πηγαία περιοχή και ξεκινά με τα κατολισθαίνοντα υλικά να επιταχύνουν καθώς ολισθαίνουν πάνω στην χαμηλής τριβής επιφάνεια αστοχίας στα δυτικά. Με την πάροδο 40 δευτερολέπτων τα υλικά φτάνουν στην προς το νότο στροφή, ταξιδεύοντας με μέγιστη ταχύτητα 85 m/s. Μεταξύ των 40 και των 50 δευτερολέπτων, τα κατολισθαίνοντα υλικά ταξιδεύουν νότια και ανατολικά έως τα βαθύτερα σημεία του μεταλλείου. Οι ταχύτητες σταδιακά βαίνουν μειούμενες. Μετά από 60 δευτερόλεπτα τα υλικά της κατολίσθησης έχουν διανύσει απόσταση 2.5 χιλιομέτρων. Μετά τα 80 δευτερόλεπτα η δεύτερη κατολίσθηση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί, ενώ τα υλικά παύουν πλήρως να ολισθαίνουν μετά από 160 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 42: Πανοραμική όψη των κατολισθήσεων (Septian κ.α. 2016)

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Η επιθεώρηση των ηχητικών δεδομένων από μία διάταξη WMUT (που είναι τοποθετημένη 57 χιλιόμετρα μακριά από το μεταλλείο), φανέρωσε την ύπαρξη και μίας τρίτης κατολίσθησης, η οποία συνέβη μισή ώρα μετά από την πρώτη κατολίσθηση και μία ώρα πριν από τη δεύτερη (Moore κ.α. 2017). Η εν λόγω κατολίσθηση καταγράφηκε επίσης και από σταθμούς εντοπισμού σεισμικής δραστηριότητας που βρίσκονται έως και 100 χιλιόμετρα μακριά από το μεταλλείο. Η τρίτη κατολίσθηση παρουσιάζει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με τις δύο προαναφερθείσες.

Έπειτα από την περαιτέρω ανάλυση των ηχητικών δεδομένων, προσδιορίστηκε η ύπαρξη συνολικά 11 επιπρόσθετων, μικρότερων κατολισθήσεων (Moore κ.α. 2017). . Οι 8 προέκυψαν στο χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κατολίσθησης, ενώ οι υπόλοιπες 4 μετά από τη δεύτερη κατολίσθηση. Συνολικά, οι 11 αυτές κατολισθήσεις είχαν εκτιμώμενο όγκο περίπου $104 \text{ με } 105 \text{ m}^3$ (όγκο αμελητέο συγκριτικά με τις δύο πρώτες).

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΚΥΡΙΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Η πρώτη κατολίσθηση εξελίχθηκε σε στενότερα χρονικά όρια σε σχέση με τη δεύτερη και παρουσίασε μία σημαντική παύση πριν ολοκληρωθεί, κάτι το οποίο δεν συνέβη με τη δεύτερη. Οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύχθηκαν στην πρώτη και τη δεύτερη κατολίσθηση είναι 120 και 90 GN αντίστοιχα και η ακριβής διάρκεια των κατολισθήσεων ήταν 71 και 84 δευτερόλεπτα (Moore κ.α. 2017). Η πορεία της πρώτης κατολίσθησης προφανώς συνεχίστηκε μακρύτερα κατά μήκος του δαπέδου του ορυχείου, ενώ της δεύτερης παρόλο που ακολούθησε παρόμοια τροχιά σταμάτησε αρκετά νωρίτερα.

4.2.4. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Η γεωτεχνική ομάδα χρησιμοποίησε τα δεδομένα που συλλέγονταν από τα συστήματα παρακολούθησης, τα οποία ήταν τοποθετημένα σε πολλά σημεία του μεταλλείου, προκειμένου να δράσει προληπτικά, αναστέλλοντας τη μεταλλευτική δραστηριότητα και απομακρύνοντας το σύνολο του προσωπικού από το χώρο. Έτσι δεν υπήρξε κανένας τραυματισμός και καμία ανθρώπινη απώλεια. Οι αυστηροί κανονισμοί του μεταλλείου στο φαράγγι Bingham, που ονομάζονται «Εννέα Στρώσεις Προστασίας», συμπεριλαμβάνουν εξειδικευμένη εκπαίδευση των εργαζομένων, αυστηρή προσκόλληση στα πρότυπα του M.S.H.A. (Mining Safety and Health Administration), που είναι ο μεταλλευτικός κανονισμός των Η.Π.Α., και την ύπαρξη ενός εκτεταμένου δικτύου παρακολούθησης, τα οποία συντέλεσαν στην πρόβλεψη των κατολισθήσεων.

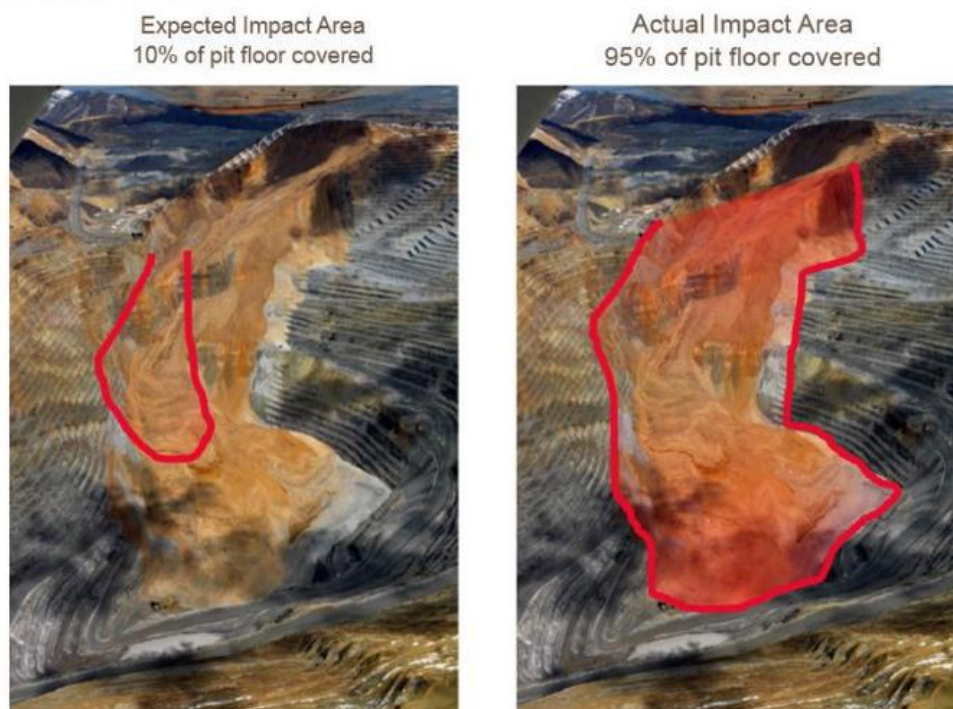


Εικόνα 43:Ρομποτικός σταθμός παρακολούθησης (RTS) για την μέτρηση παραμορφώσεων στα πρανή (Rio Tinto Kennecott 2013)



Εικόνα 44:Ραντάρ ευστάθειας πρανούς Groundprobe (Rio Tinto Kennecott 2013)

Ενώ η χρονική περίοδος κατά την οποία συνέβησαν οι κατολισθήσεις προβλέφθηκε με ακρίβεια, δεν κατέστη δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του μεγέθους τους κάτι το οποίο έγινε εμφανές εκ των υστέρων (Moore κ.α. 2017).



Εικόνα 45:Η λανθασμένη εκτίμηση για το μέγεθος των κατολισθήσεων (Moore κ.α. 2017).

4.2.5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Εκτιμάται πως εξαιτίας των κατολισθήσεων η εταιρεία Rio Tinto έχασε 780 εκατομμύρια δολάρια καθώς το μεταλλείο δεν λειτούργησε για τον υπόλοιπο χρόνο. Επίσης, το κόστος για την αποκατάσταση του μεταλλευτικού χώρου μετά τις τεράστιες κατολισθήσεις ανήλθε στο ποσό του 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων (Petley 2013). Επιπρόσθετα, το 35 % του συνόλου των εργαζομένων έχασαν τη δουλειά τους, εξαιτίας της αδυναμίας της εταιρείας να πληρώσει τους μισθούς τους.

Οι κατολισθήσεις είχαν αρνητικό αντίκτυπο και συνολικά στην οικονομία της πολιτείας της Γιούτα, καθώς το μεταλλείο συνεισέφερε κατά μέσο όρο 1.2 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως, ποσό το οποίο μειώθηκε στο 50% τη χρονιά που συνέβησαν οι κατολισθήσεις.

ΥΛΙΚΕΣ ΖΗΜΙΕΣ

Οι κατολισθήσεις έθιψαν περισσότερο από το 95% του δαπέδου του ορυχείου κάτω από εκατομμύρια τόνους υλικού και άλλαξαν δραστικά το μέγεθος και το σχήμα του, καλύπτοντας το μεγαλύτερο τμήμα των εκτεθειμένων ζωνών εξόρυξης και καταστρώνοντας τα σχέδια και τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής σχεδόν άχρηστα. Καταστράφηκε επίσης ένα μεγάλο τμήμα, μήκους 500 μέτρων, του κύριου δρόμου που επέτρεπε την κίνηση των φορτηγών από και προς το μεταλλείο. Ακόμη θάφτηκαν κάτω από τα κατολισθαίνοντα υλικά 13 φορτηγά, 3 ερπυστριοφόροι εκσκαφείς και περίπου 30 τόνοι καυσίμων, τα οποία ήταν αποθηκευμένα στο δάπεδο του μεταλλείου.

4.2.6. ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ – ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα μεγαλύτερα προβλήματα που προέκυψαν μετά την εκδήλωση των κατολισθήσεων, τα οποία ήταν το πως θα ξαναγινόταν ο χώρος του μεταλλείου και πάλι ασφαλής για τους εργαζομένους και για τα μηχανήματα και πως θα ξανάρχιζε η παραγωγική διαδικασία, αγοράστηκαν από την εταιρεία συνολικά 90 μηχανήματα βαρέως τύπου. Ανάμεσα σε αυτά αποκτήθηκαν 2 ερπυστριοφόροι εκσκαφείς, 30 μπουλντόζες, 9 υδραυλικοί εκσκαφείς, 20 φορτηγά και 3 τρυπάνια για τη διάνοιξη ορυγμάτων για εκρηκτικά. Αρκετά από αυτά τα μηχανήματα διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατός ο τηλεχειρισμός τους ή η αυτόνομη λειτουργία τους, με σκοπό να μην απαιτείται η πρόσβαση προσωπικού σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας.

Οι αρχικές ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις παραπάνω δυνατότητες των μηχανημάτων ήταν :

- Ο καθαρισμός της κεφαλής των κατολισθήσεων και άλλων επικίνδυνων περιοχών κατά μήκος του άνω μέρους του σώματος τους.
- Η επισκευή του τμήματος του κύριου δρόμου του μεταλλείου που καταστράφηκε.
- Ο καθαρισμός των βαθμίδων που καλύφθηκαν από τα κατολισθαίνοντα υλικά, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η συνέχιση της παραγωγής.

Τον Αύγουστο του 2013 επιτράπηκε από την Μ.Σ.Η.Α. η επανδρωμένη εργασία στην περιοχή όπου εκτυλίχθηκαν οι κατολισθήσεις, στο τέλος του Οκτώβρη ολοκληρώθηκε η επισκευή του κύριου δρόμου και μέχρι τον Νοέμβρη είχε ήδη καθαριστεί το δάπεδο του μεταλλείου από τα κατολισθαίνοντα υλικά. Τέλος, το Δεκέμβριο το μεταλλείο ανακοίνωσε πως είχε φτάσει την επιθυμητή συγκέντρωση των 165.000 tn ετησίως.

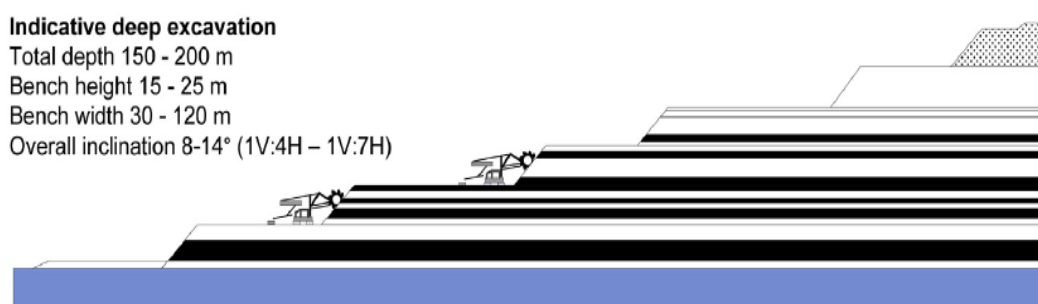


Εικόνα 46: Το μεταλλείο μετά τις εργασίες αποκατάστασης (Ward 2015)

4.3. ΟΡΥΧΕΙΟ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ, ΦΛΩΡΙΝΑ ΕΛΛΑΔΑ

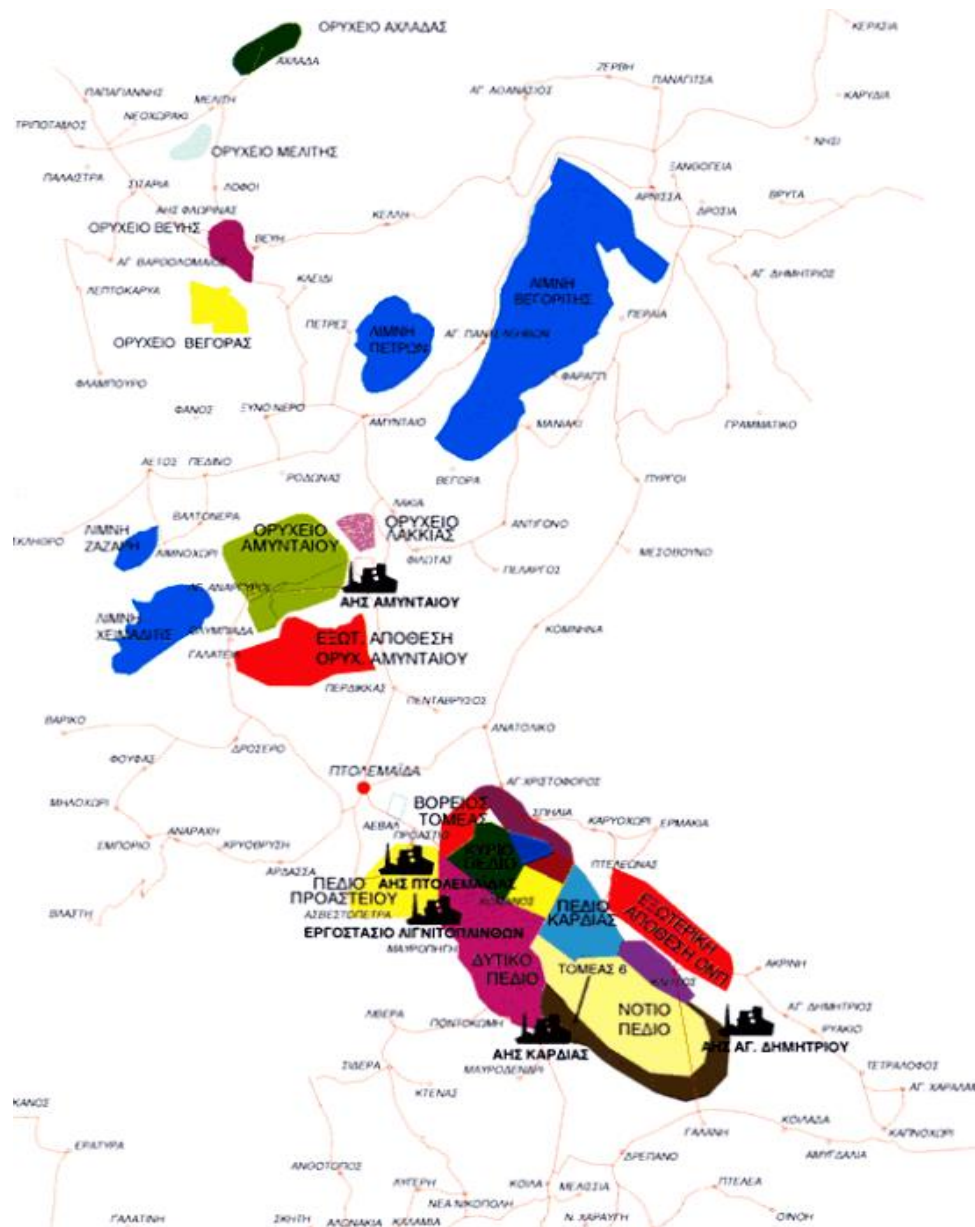
4.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ορυχείο Αμύνταιο, βρίσκεται στην λιγνιτική λεκάνη Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου στο νομό Φλώρινας στην Ελλάδα. Το λιγνιτικό κέντρο που υπάρχει στην παραπάνω περιοχή αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα στον κόσμο. Η λιγνιτική λεκάνη στην οποία ανήκει το ορυχείο έχει υπολογισμένο απόθεμα 1,8 δισεκατομμύρια τόνους λιγνίτη και η θερμογόνο δύναμη του λιγνίτη που εξορύσσεται κυμαίνεται από 975 έως 1380 kcal/kg. Η λιγνιτική παραγωγή ανέρχεται σε περίπου 40 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Το ορυχείο Αμυνταίου βρίσκεται σε λειτουργία από τα μέσα του 1980, αναμένεται να λειτουργεί για τα επόμενα 10 χρόνια και η εκμετάλλευση του γίνεται από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού της Ελλάδας (Δ.Ε.Η.) (Κανουριδής 2008). Πρόκειται για ένα τυπικό παράδειγμα βαθιάς εκσκαφής με βάθη μέχρι και 180 μέτρα.



Εικόνα 47: Τυπική απλοποιημένη τομή βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής στην Ελλάδα (Zevgolis κ.α. 2021)

Στις 10 Ιουνίου του 2017, στο ορυχείο Αμυνταίου, συνέβη μία κατολίσθηση τεραστίων διαστάσεων, η οποία δεν είχε προηγούμενο στον Ελληνικό χώρο και η οποία αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις σε λιγνιτορυχεία παγκοσμίως (Loupasakis 2020). Στο παρελθόν, λόγω των δυσμενών γεωλογικών, γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, είχαν συμβεί πολλές ακόμα κατολισθήσεις, πολύ μικρότερων όμως διαστάσεων.



Εικόνα 48: Η λιγνιτική λεκάνη Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου

4.3.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η ευρύτερη λεκάνη της Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου είναι μέρος της Πελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης της Ελλάδας, που αποτελείται από κρυσταλλικό – σχιστολιθικό βραχώδες υπόστρωμα που αλληλεπικαλύπτεται από Νεογενή και Τεταρτοταγή ιζήματα. Οι σχηματισμοί του βραχώδους υποβάθρου κατατάσσονται είτε στο Τριαδικό – Ιουρασικό ανθρακικό κάλυμμα είτε στα ανώτερα κρητιδικά, πελάγια ιζήματα, της λιθοστρωματογραφικής αλληλουχίας της Πελαγονικής ζώνης. Τα Νεογενή αποθέματα διακρίνονται σε τρία τμήματα (κατώτερα, λιγνιτικά και ανώτερα) (Κουκουζας κ.α. 1979). Τα κατώτερα και ανώτερα τμήματα (τα οποία περιβάλλουν τα λιγνιτικά αποθέματα) αποτελούνται από λεπτόκοκκα αποθέματα, αμμώδη άργιλο έως και μάργα, ποτάμιας ή λιμναίας προέλευσης, με φακοειδείς παρεμβολές από

μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, στα ανώτερα σημεία των κατωτέρων τμημάτων. Τα λιγνιτικά τμήματα διαχωρίζονται στις ανώτερες και κατώτερες λιγνιτικές στρώσεις, καθώς και στην ενδιάμεση άγωνα στρώση, η οποία αποτελείται από μάργες ανοιχτού γκριζού χρώματος, πάχους έως και 15 μέτρων. Το συνολικό πάχος των λιγνιτικών τμημάτων είναι παραπάνω από 150 μέτρα. Το μέγιστο ολικό πάχος των Νεογενών αποθέσεων υπερβαίνει τα 450 μέτρα (Κουκουζας κ.α. 1979).

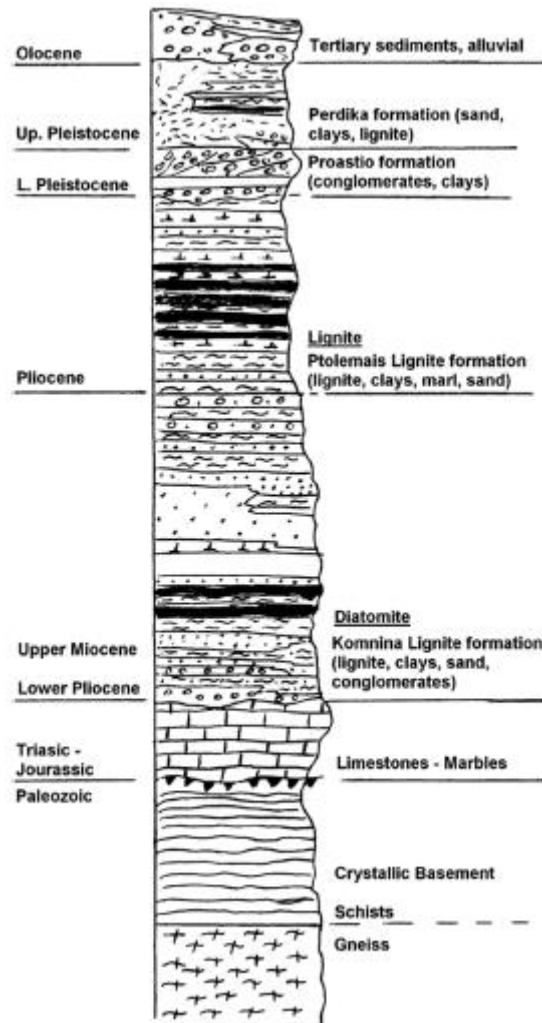


Εικόνα 49: Στρωματογραφία των ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων (Galetakis κ.α. 2005)

Μετά την απόθεση των Νεογενών ιζημάτων, στις αρχές του Πλειοκαίνου, η τεκτονική δραστηριότητα διαίρεσε την αρχική λεκάνη σε νέες υπο-λεκάνες. Οι διαδικασίες αποσάθρωσης προμήθευσαν τις υπο-λεκάνες με Τεταρτοταγή ποτάμια αποθέματα και αλλουβιακά υλικά. Οι Τεταρτοταγής αποθέσεις διαχωρίζονται (Κουκουζας κ.α.1979) από πάνω προς τα κάτω στο:

- Σχηματισμό του Προαστίου, ο οποίος αποτελείται από ποτάμια αποθέματα του κατώτερου και του μεσαίου Πλειστοκαίνου, τα οποία υπέρκεινται των Νεογενών αποθέσεων. Γενικά, αυτός ο σχηματισμός αποτελείται από εναλλασσόμενες χαλαρές έως και αργιλώδεις άμμους και συσσωματώματα με κόκκινη άργιλο, σε όλη τη λεκάνη.
- Σχηματισμό του Πέρδικα, ο οποίος περιλαμβάνει ποτάμια και λιμναία ιζήματα του κατώτερου και μεσαίου Πλειστοκαίνου. Από τη μία πλευρά της λεκάνης στην άλλη, αυτός ο σχηματισμός συνίσταται από λεπτόκοκκη άμμο με εναλλασσόμενες στρώσεις αμμώδους αργίλου, αργίλου και μάργας, όπως και από φακοειδείς παρεμβολές συσσωματωμάτων που δημιουργούνται από βότσαλα μικρού μεγέθους. Μεταξύ των χωριών Ανάργυροι και Βαλτόνερα, ο σχηματισμός του Πέρδικα αποτελείται από εναλλασσόμενες αμμώδεις αργίλους και αργιλώδεις άμμους, με ένα συνολικό πάχος το οποίο ποικίλλει από 20 έως και 70 μέτρα. Αυτός ο σχετικά χαλαρός και συμπίεσιμος σχηματισμός είναι υπεύθυνος για την εκδήλωση φαινομένων εδαφικών υποχωρήσεων.
- Σχηματισμό των Αναργύρων, ο οποίος αποτελείται από ποτάμια και λιμναία αποθέσεις του Μεσαίου Πλειστοκαίνου, που συντίθενται από αργιλώδεις άμμους ή

λεπτές άμμους οι οποίες σε κάποια σημεία εμφανίζουν αργιλώδεις στρώσεις ή φακούς με γωνιώδη τεμάχια.



Εικόνα 50: Λιθοστρωματογραφική στήλη της λεκάνης Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου (Koukouzas 2007)

ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

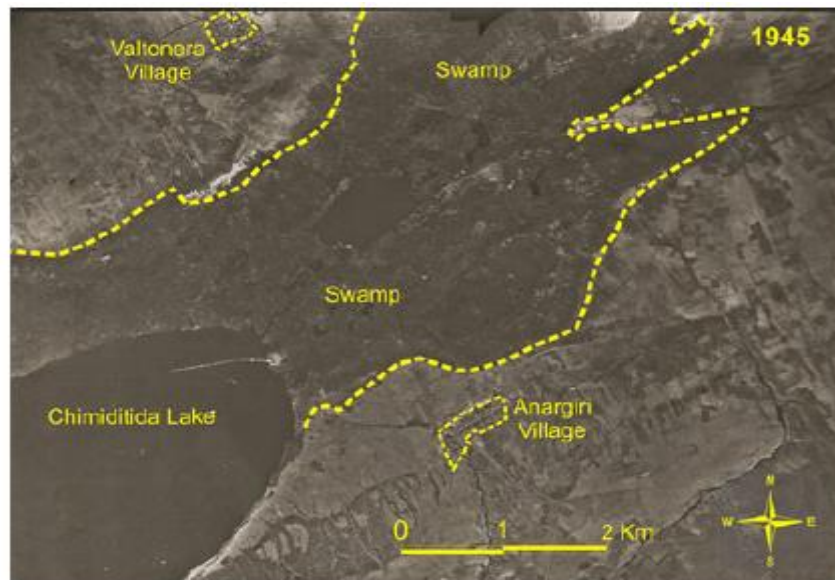
Η νεοτεκτονική δραστηριότητα στην περιοχή ελέγχεται από ένα εφελκυστικό τασικό πεδίο, ενεργό από το μεσαίο – ανώτερο Μειόκαινο έως και τώρα, το οποίο επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Ελλάδας. Η αρχική μεγάλη λεκάνη της Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου σχηματίστηκε από κανονικά ρήγματα τα οποία εκτείνονται από ΒΔ - ΝΑ σε ΒΒΔ – ΝΝΑ κατευθύνσεις, ενώ μία δεύτερη ομάδα ρηγμάτων από ρήγματα κατευθύνσεων από τα ΒΑ – ΝΔ προς τα ΑΒΑ – ΔΝΔ σχηματίστηκε συγχρόνως (Pavlides 1985). Τα ρήγματα της δεύτερης ομάδας σε συνδυασμό με τα αντιθετικά τους ρήγματα σχηματίζουν διαδοχικές λεκάνες κατά μήκος ενός άξονα με διεύθυνση από το Βορρά προς το Νότο.

Η κύρια τεκτονική γραμμή που κυριαρχεί στην περιοχή μελέτης είναι το ρήγμα των Αναργύρων. Πρόκειται για ένα τυπικό κανονικό ρήγμα το οποίο παρουσιάζει μία παράταξη ΒΒΑ – ΝΝΔ κατεύθυνσης και γωνία κλίσης 60° προς το Βορρά (Pavlides 1985). Αυτό το

ρήγμα περνά μέσα από το χωριό Ανάργυροι και επεκτείνεται προς τα ΝΔ συνορεύοντας με τη λίμνη Χειμαδίτιδα. Εντός των πρανών του ορυχείου, εντοπίζονται αρκετά παράλληλα ρήγματα. Οι επιφανειακές ρωγμές που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης ακολουθούν τις κύριες τεκτονικές δομές που παρουσιάζουν ΒΑ – ΝΔ και δευτερευόντως ΒΔ – ΝΑ προς ΒΒΔ – ΝΝΑ κατευθύνσεις (Pavlidis 1985).

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Το υδρογεωλογικό ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις Τεταρτοταγείς αποθέσεις που φιλοξενούν ημιπεριορισμένους υδροφόρους, στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται δύο συστήματα υδροφορέων: ένα ρηχό ημιπεριορισμένο σύστημα υδροφορέων στις Τεταρτοταγείς αποθέσεις και ένα καρστικό σύστημα υδροφορέων στο κρυσταλλικό βραχώδες υπόβαθρο. Η συστηματική εκμετάλλευσή τους ξεκίνησε μετά την αποξήρανση του έλους, το οποίο εκτεινόταν στα βορειοανατολικά της λίμνης Χειμαδίτιδα, και την ανακατανομή της γης το 1974.

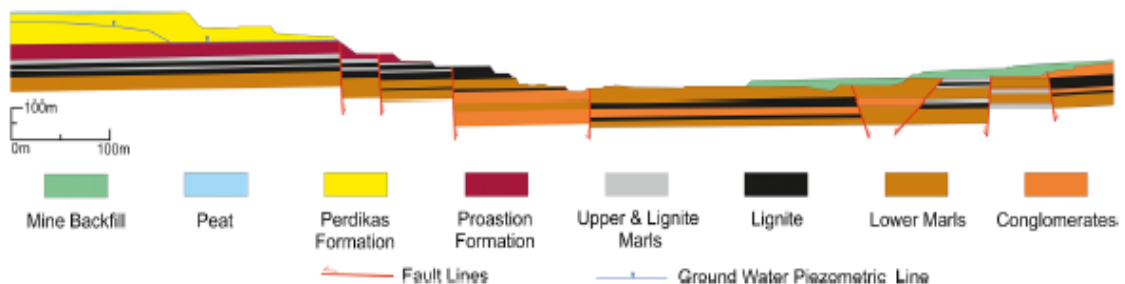


Εικόνα 51: Αεροφωτογραφία του 1945, που απεικονίζει την έκταση του έλους πριν την αποξήρασή του



Εικόνα 52: Δορυφορική εικόνα στην οποία φαίνεται η θέση του ορυχείου Αμυνταίου (Loupasakis 2020)

Από τότε, ανοίχτηκαν αρκετά πηγάδια ως εναλλακτικές πηγές για την άρδευση. Η έναρξη της μεταλλευτικής δραστηριότητας το 1989, άλλαξε δραστικά τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, καθώς συνδυάστηκε με την κατασκευή πολυάριθμων πηγαδιών για την προστασία των επιφανειακών πρανών. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που αντλήθηκαν από τα προαναφερθέντα πηγάδια, σε συνδυασμό με τις εισροές νερού στο επιφανειακό ορυχείο, το μετέτρεψαν σε ένα μεγάλης διαμέτρου πηγάδι το οποίο επηρεάζει ολόκληρη τη λεκάνη (Dimitrakopoulos, 2001). Παρότι το περισσότερο νερό που αντλείται από το ορυχείο οδηγείται στα αρδευτικά κανάλια που το περικλείουν, οι υδροφόροι δεν ξαναγεμίζουν με αποτέλεσμα η στάθμη τους να πέφτει.



Εικόνα 53: Σχηματική αναπαράσταση της γεωλογικής τομής του ορυχείου στην οποία φαίνονται οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί και η θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα (Loupasakis 2020)

Από την αξιολόγηση των δεδομένων που αποκτούνται από βαθιές γεωτρήσεις, φαίνεται πως το πιεζομετρικό επίπεδο του καρστικού συστήματος υδροφορέων είναι περισσότερο από 100 μέτρα πάνω από τον πυθμένα του ορυχείου (Dimitrakopoulos 2001). Λαμβάνοντας υπόψη τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, είναι εμφανές πως τα πιεζομετρικά φορτία των καρστικών υδροφορέων μεταφέρθηκαν διά μέσου των χοντρόκοκκων στρώσεων του κατώτερου Νεογενούς πολύ κοντά στον πυθμένα της εκσκαφής (Εικόνα 53).

4.3.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

ΓΕΝΙΚΑ

Η τεραστίων διαστάσεων κατολίσθηση της 10^{ης} Ιουνίου 2017, επηρέασε τα πρανή τα οποία βρίσκονταν εν λειτουργία σε όλο τους το μήκος. Το μήκος της κατολισθαίνουσας μάζας ήταν 2,2 χιλιόμετρα και το πλάτος 2 χιλιόμετρα (Εικόνα 54). Ο πόδας της κατολίσθησης εντοπίστηκε στη βάση του 210 μέτρων ύψους πρανούς, ο όγκος της κατολισθαίνουσας μάζας ήταν περίπου 80 εκατομμύρια m^3 και κάτω από αυτήν θάφτηκαν 25 εκατομμύρια τόνοι λιγνίτη (Loupasakis 2020). Η κατολισθαίνουσα μάζα κινήθηκε από τα νότια (πολύ κοντά στο χωριό των Αναργύρων) προς τα βόρεια και κάλυψε μία τεράστια περιοχή, η οποία εκτιμάται μέσω δορυφορικών εικόνων πως ήταν μεταξύ 2,98 και 3,56 km^2 (Εικόνα 55) (Valkaniotis κ.α. 2017). Τα στοιχεία δείχνουν πως επρόκειτο για μία μεταθετική ολίσθηση.



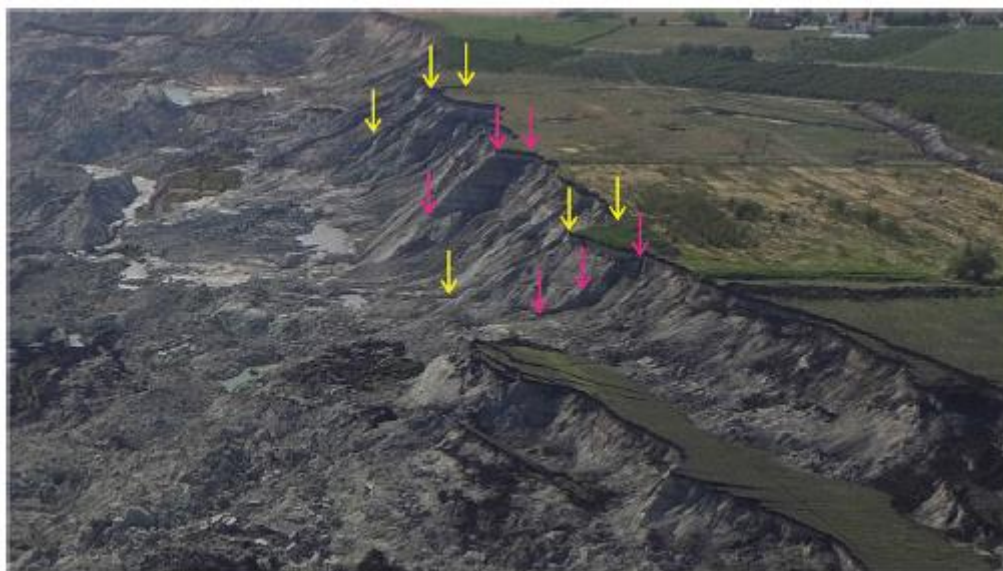
Εικόνα 54: Η τεράστια κατολίσθηση στο ορυχείο Αμυνταίου (Loupasakis 2020)



Εικόνα 55: Χαρτογράφηση της κατολίσθησης της 10ης Ιουνίου στο ορυχείο Αμυνταίου (Valkaniotis κ.α. 2017)

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ - ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

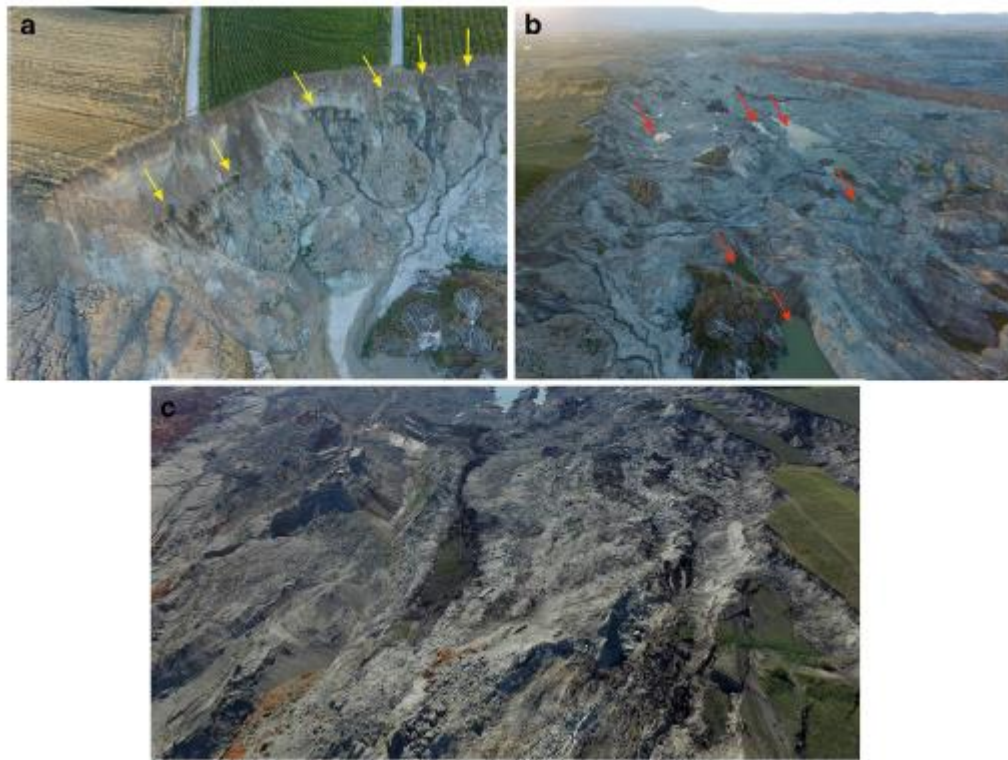
- ❖ Με σκοπό την αξιολόγηση της συνεισφοράς της τεκτονικής της λεκάνης στην εκδήλωση της κατολίσθησης, χρησιμοποιήθηκε η εθνική βάση σεισμικών δεδομένων. Σύμφωνα με αυτήν, ο τελευταίος σεισμός με μέγεθος μεγαλύτερο των 2,5 βαθμών στην κλίμακα Richter, καταγράφηκε 18 μήνες πριν την κατολίσθηση. Κανένας σεισμός μεγαλύτερος των 2,5 Richter δεν σημειώθηκε σε διάστημα πέντε μηνών πριν την κατολίσθηση. Συνεπώς, ούτε η εκδήλωση της κατολίσθησης, ούτε η εμφάνιση παραμορφώσεων πριν από αυτήν μπορούν να καταλογιστούν στην τεκτονική της περιοχής (Loupasakis 2020). Ωστόσο, η ύπαρξη ρηγμάτων είναι βέβαιο πως επηρέασε τη γεωμετρία της κατολισθαίνουσας μάζας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 54, ένα τμήμα του ρήγματος της Βεγορίτιδας αποτελεί ένα μικρό μέρος του δυτικού ορίου της μάζας της κατολίσθησης και το ρήγμα των Αναργύρων διασταυρώνεται με την κεφαλή και το ανατολικό όριο της κατολίσθησης. Επιπρόσθετα, αρκετά από τα άλλα δευτερεύοντα ρήγματα, στην ίδια κατεύθυνση, διασταυρώνονται με την κατολισθαίνουσα μάζα επηρεάζοντας της μορφολογία της (Εικόνα 56). Συμπερασματικά, τα ρήγματα, ενεργά ή όχι, ήταν παρόντα στην περιοχή, όμως δεν συνέβαλαν στην εκδήλωση της συγκεκριμένης αστοχίας (Loupasakis 2020).



Εικόνα 56: Δευτερεύοντα ρήγματα μεταξύ των ρηγμάτων της Βεγορίτιδας και των Αναργύρων. Τα χρωματιστά βέλη δείχνουν τα επίπεδα των ρηγμάτων προβεβλημένα στην κύρια κατακρήμνιση της αστοχίας (Loupasakis 2020).

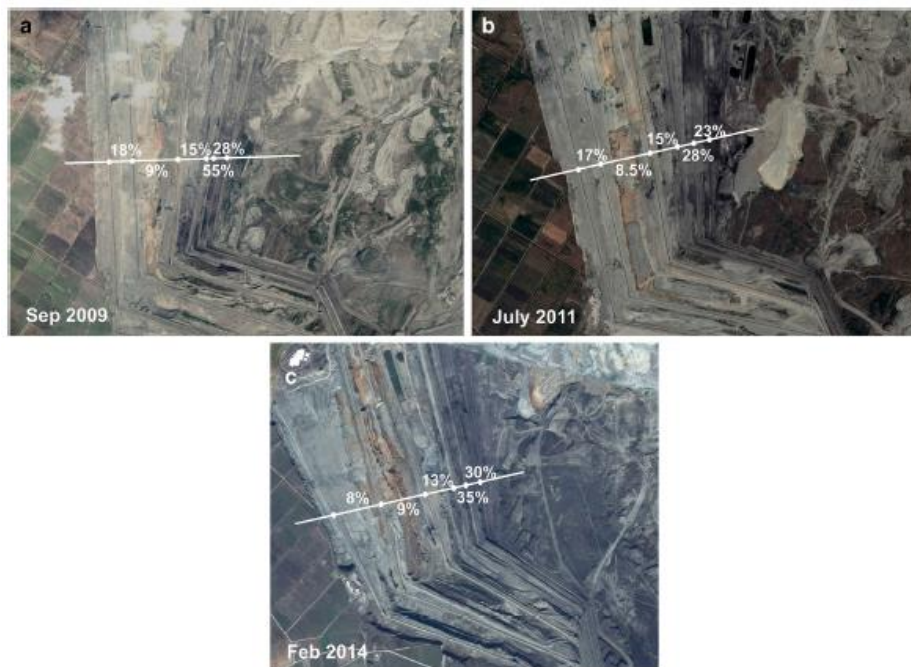
- ❖ Επίσης, πρέπει να αξιολογηθεί η συνεισφορά της πίεσης των πόρων του υπογείου νερού στην εκδήλωση της αστοχίας. Όπως προαναφέρθηκε, τα δύο συστήματα υδροφορέων που εντοπίζονται στην περιοχή είναι ένα ημιπεριορισμένο σύστημα υδροφορέων που φιλοξενείται από τα Τεταρτοταγή αποθέματα και ένα καρστικό σύστημα υδροφορέων, στο κρυσταλλικό βραχώδες υπόβαθρο (Zevgolis κ.α. 2019). Το ρηχό σύστημα υδροφορέων υπόκειται σε υπερεκμετάλλευση για την προστασία των πρανών. Ωστόσο, η ένταση της άντλησης δεν ήταν πάντα η ίδια. Πριν το 2002, από τις βαθιές γεωτρήσεις αντλούνταν $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Από τότε, η εκμετάλλευση των υπογείων νερών έχει σταδιακά μειωθεί, φτάνοντας τα $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως το 2009, και τα $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως το 2016 (Zevgolis κ.α. 2019).

Είναι εμφανές πως η συμπύκνωση των υδροφορέων σταδιακά μείωσε την υδραυλική τους αγωγιμότητα, μειώνοντας έτσι αναλογικά την ανάγκη για εργασίες αποστράγγισης στον υφιστάμενο κώνο κατάπτωσης. Το αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής έγινε εμφανές μετά την αστοχία καθώς υπόγειο νερό αποστραγγιζόταν στην κύρια κατακρήμιση της κατολίσθησης (Εικόνα 57a). Σύμφωνα με αυτήν την παρατήρηση, είναι σαφές ότι πριν την αστοχία, το επίπεδο των υδροφορέων στα νοτιοανατολικά ήταν αρκετά υψηλό έτσι ώστε να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες των Τεταρτοταγών αποθέσεων που καταλάμβαναν τα εν λειτουργία πρανή (Loupasakis 2020). Εν αντιθέσει, δεν συνέβαινε το ίδιο στα βορειοδυτικά αφού τα εν λειτουργία πηγάδια αποστράγγισης κρατούσαν το υπόγειο νερό μακριά από τα εν λειτουργία πρανή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως η κατολίσθηση της 10ης Ιουνίου άρχισε από το νοτιοανατολικό τμήμα των πρανών του ορυχείου. Τέλος, οι συνθήκες που επικρατούσαν λόγω των πιεζομετρικών φορτίων των καρστικών υδροφορέων, τα οποία μεταφέρονταν μέσω των χονδρόκοκκων στρώσεων του κατώτερου Νεογενούς προς τον πυθμένα της εκσκαφής, απέφεραν και αυτές αρνητικές επιπτώσεις στην ευστάθεια των πρανών (Loupasakis 2020).



Εικόνα 57: a. Υπόγεια νερά από τους ρηχούς υδροφορείς διασχίζουν την κύρια κατακρήμιση της κατολίσθησης (κίτρινα βέλη). b. Όψη του νοτιοανατολικού τμήματος της κατακρήμισης στην οποία φαίνονται μικρές λίμνες που σχηματίστηκαν από το νερό που προήλθε από τους υδροφορείς (κόκκινα βέλη). c. Όψη του βορειοδυτικού τμήματος της κατακρήμισης, που είναι τελείως ξηρό εξαιτίας της έλλειψης υπόγειου νερού (Loupasakis 2020).

- ❖ Η γεωμετρία των πρανών είναι μία άλλη κρίσιμη παράμετρος που είναι ικανή να πυροδοτήσει μία αστοχία πρανούς. Ελέγχοντας όλες τις δορυφορικές εικόνες του ορυχείου που είναι διαθέσιμες από το Google Earth (Εικόνα 58), είναι εμφανές πως διαχρονικά οι δύο ανώτερες βαθμίδες σκάφτηκαν πρώτες σκοπεύοντας στην αποφόρτιση του πρανούς. Έπειτα, προτεραιότητα δόθηκε στην εκσκαφή των κατώτερων βαθμίδων προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της παραγωγής. Σαν αποτέλεσμα, οι μεσαίες βαθμίδες, οι οποίες αποτελούνται από το ανώτερο Νεογενές και το κατώτερο Τεταρτοταγές, συστηματικά αφέθηκαν πίσω. Έτσι η γεωμετρία των πρανών δεν ήταν ομοιόμορφη καθώς τα ανώτερα τμήματα είχαν πάντα πιο μικρή κλίση, ενώ τα κατώτερα ήταν πιο απότομα (Loupasakis 2020). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ύψος των βαθμίδων ήταν περίπου 30 μέτρα, η οριζόντια απόσταση μεταξύ των φορέων στις δορυφορικές εικόνες επισημαίνει την κλίση των πρανών, καθώς όσο μικρότερη η απόσταση μεταξύ των φορέων τόσο μεγαλύτερη η κλίση (Εικόνα 58). Το γεγονός πως η βάση των πρανών είναι πιο απότομη, σίγουρα ενέχει κινδύνους για την ευστάθειά τους (Loupasakis 2020).



Εικόνα 58: Η κλίση του πρανούς υπολογισμένη έμμεσα με βάση την απόσταση μεταξύ διαδοχικών φορέων. Οι κλίσεις που σημειώνονται αποδεικνύουν πως διαχρονικά, τα ανώτερα τμήματα του πρανούς ήταν πιο ομαλά ενώ τα κατώτερα πιο απότομα (Loupasakis 2020).

- ❖ Συμπερασματικά, αξιολογώντας τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούσαν στα πρανή, είναι σίγουρο πως η εμφάνιση ζωνών διάτμησης μέσα στις αποθέσεις του Νεογενούς, τα πολλαπλά ρήγματα που διασχίζουν την περιοχή, τα υψηλά πιεζομετρικά φορτία των καρστικών υδροφορέων κάτω από τον πυθμένα του ορυχείου και η πίεση των πόρων από το ρηχό ημιπεριορισμένο υδροφορέα ήταν τα κύρια φυσικά αίτια της κατολίσθησης (Loupasakis 2020). Πέρα από αυτά, η εν μέρει αστοχία των γεωτρήσεων αποστράγγισης, η οποία οδήγησε στην αυξημένη πίεση πόρων των ρηχών υδροφορέων, μπορεί να συγκαταλεγεί ανάμεσα στους παράγοντες που πυροδότησαν την αστοχία.

4.3.4. ΥΛΙΚΕΣ ΖΗΜΙΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ

Η εν λόγω αστοχία προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε φορητές καθώς και μόνιμες υποδομές του ορυχείου, όπως επίσης και στο κοντινό χωριό των Αναργύρων. Συγκεκριμένα, έπαθαν σοβαρές υλικές ζημιές ή καταστράφηκαν ολοσχερώς, τέσσερις καδοφόροι εκσκαφείς στο ορυχείο (5000 έως 1500 τόνοι ο καθένας), επίσης καταστράφηκαν αρκετές εκατοντάδες μέτρα μεταφορικής ταινίας και θάφτηκαν αρκετά μικρότερα φορητά και εκσκαφείς (Loupasakis 2020). Στο χωριό των Αναργύρων, η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων κατέρρευσε, καταστράφηκε μια γειτονιά με κατοικίες μέχρι και δύο ορόφων, καταστράφηκε η παροχή νερού και οι ηλεκτροδοτικές υποδομές και υπέστη σοβαρές ζημιές το οδικό δίκτυο που ένωνε το χωριό με την υπόλοιπη περιοχή. Τέλος, καταστράφηκαν αρκετοί αρχαιολογικοί χώροι οι οποίοι βρίσκονταν περιμετρικά του ορυχείου.



Εικόνα 59: a. Μία πιο κοντινή όψη του δυτικού ορίου της κατολίσθησης. Αρκετά μέτρα μεταφορικής ταινίας που καταστράφηκαν είναι εμφανή. Φαίνεται το όριο της κατολίσθησης το οποίο συμπίπτει με το ρήγμα της Βεγορίτιδας. b. Ένας καδοφόρος εκσκαφέας 1500 τόνων που θάφτηκε από την κατολίσθηση. c. Μία όψη του χωριού των Αναργύρων που επηρεάστηκε από την κατολίσθηση. Φαίνεται και το κατεστραμμένο οδικό δίκτυο. d. Ένα από τα σπίτια στο χωριό Ανάργυροι που καταστράφηκε από την κατολίσθηση. e. Η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του χωριού των Αναργύρων κατέρρευσε. f. Ένας από τους αρχαιολογικούς χώρους περιμετρικά του ορυχείου πριν την κατολίσθηση. g. Μία κοντινότερη εικόνα από μία αρχαιολογική ανασκαφή. Φαίνονται τα ίχνη από τους ξύλινους πυλώνες για τη θεμελίωση των σπιτιών (Loupasakis 2020).

4.3.5. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Παρόλο που η αστοχία κράτησε 20 λεπτά, παραμορφώσεις στην περίμετρο του ορυχείου καταγράφονταν για αρκετούς μήνες πριν την κατολίσθηση. Σύμφωνα με την αρχαιολογική υπηρεσία, ο αρχαιολογικός χώρος που βρισκόταν πάνω από το βορειοδυτικό άκρο των εν λειτουργία πρανών, υπόκειτο σε παραμορφώσεις ήδη από το 2014 (Loupasakis 2020). Σε αυτόν το χώρο, οι αρχαιολογικές ανασκαφές σταμάτησαν από τον Νοέμβριο του 2016, οκτώ μήνες πριν την αστοχία, εξαιτίας της εντατικοποίησης των παραμορφώσεων. Περιμετρικά του χωριού των Αναργύρων, παραμορφώσεις με τη μορφή εκτεταμένων επιφανειακών ρωγμών, οι οποίες επηρέαζαν τους δρόμους και τα αγροκτήματα αναφέρονταν από τις τοπικές αρχές από τον Φεβρουάριο του 2017, πέντε μήνες πριν την αστοχία. Τέλος, η σταδιακή αύξηση στον ρυθμό των παραμορφώσεων οδήγησε τις αρχές του ορυχείου να διατάξουν την εκκένωση του και την άμεση απομάκρυνση του φορητού εξοπλισμού την 2^η Ιουνίου του 2017, οκτώ μέρες πριν την αστοχία (Loupasakis 2020).

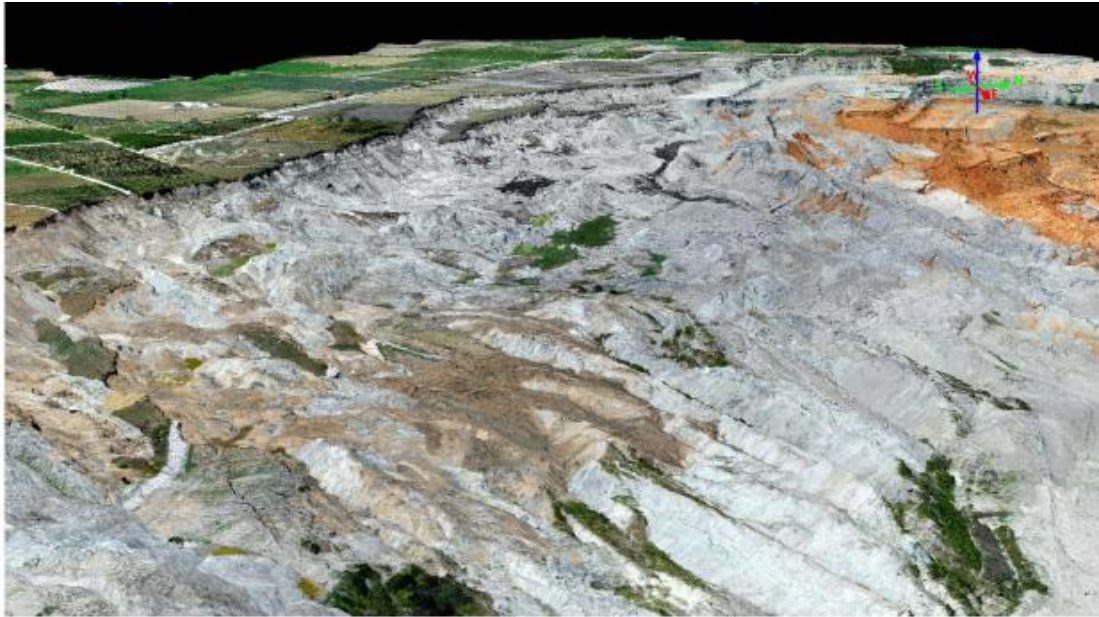


Εικόνα 60: Το μέγεθος της κατολίσθησης στο ορυχείο του Αμυνταίου (φωτογραφία ιδιοκτησίας της Eurokinissi)

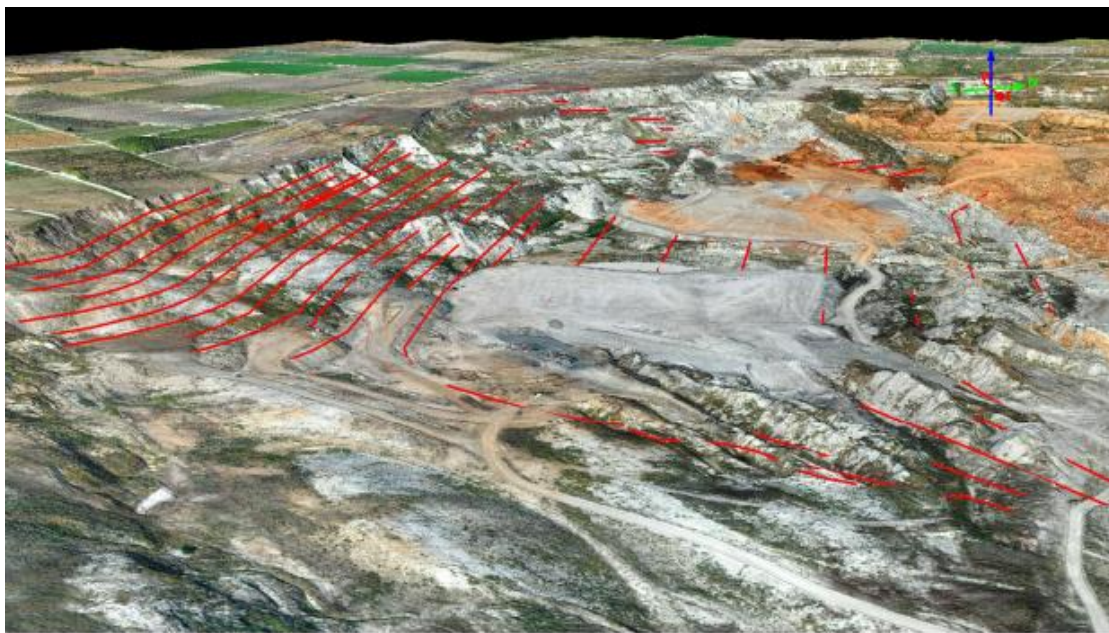
4.3.6. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της κατολίσθησης και να ανακάμψει το ορυχείο όσο ταχύτερα γινόταν, έγιναν οι παρακάτω εργασίες (Βλάχος και Ρούμπος 2020) :

- Απεγκλωβισμός εξοπλισμού.
- Χωματοργικές εργασίες διαμόρφωσης δαπέδων.
- Αποκατάσταση ηλεκτροδότησης πάγιου εξοπλισμού.
- Επανατοποθέτηση & ευθυγράμμιση πλαισίων ταινιοδρόμων.
- Διευθέτηση βαθμίδων εξόρυξης και μόνιμων πρανών.



Εικόνα 61: Εικόνα της κατολίσθησης πριν την αποκατάσταση (Βλάχος και Ρούμπος 2020) .



Εικόνα 62: Εικόνα της κατολίσθησης μετά την Α' φάση αποκατάστασης (Βλάχος και Ρούμπος 2020).

4.4. ΟΡΥΧΕΙΟ ΛΙΓΝΙΤΗ WEST, ΔΥΤΙΚΗ FUSHUN, ΕΠΙΡΧΙΑ LIAONING ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΚΙΝΑ

4.4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ορυχείο West στη βορειοανατολική Κίνα είναι από τα μεγαλύτερα ορυχεία ανοικτής εκσκαφής άνθρακα στην Ασία. Η εξόρυξη λιγνίτη από αυτό ξεκίνησε το 1901 και συνεχίζεται για περίπου 100 χρόνια. Το ορυχείο έχει μήκος 6,6 χιλιόμετρα από τα ανατολικά προς τα δυτικά, 2,2 χιλιόμετρα πλάτος από το βορά προς το νότο και το βάθος του είναι περίπου 420 μέτρα. Το νότιο πρηνές του ορυχείου ταλανίζεται από προβλήματα ευστάθειας καθώς από τον Αύγουστο του 2010 έχουν εμφανιστεί πολλαπλές επιφανειακές ρωγμές σε αυτό, οι οποίες από σημειακές διευρύνθηκαν και εξελίχθηκαν σε γραμμικές. Η παρακολούθηση των δεδομένων έχει δείξει ότι η οριζόντια και η κατακόρυφη μετατόπιση έχουν αυξηθεί από τον Αύγουστο του 2012 και συνεχίζουν με αυξητικούς ρυθμούς (Nie L. κ.α. 2014). Συνεπώς, παρακάτω η ανάλυση επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης αυτής της κατολίσθησης στο νότιο πρηνές.



Εικόνα 63: Το ορυχείο West στη Fushun (Ιδιοκτησία του ιστότοπου alamy.com)

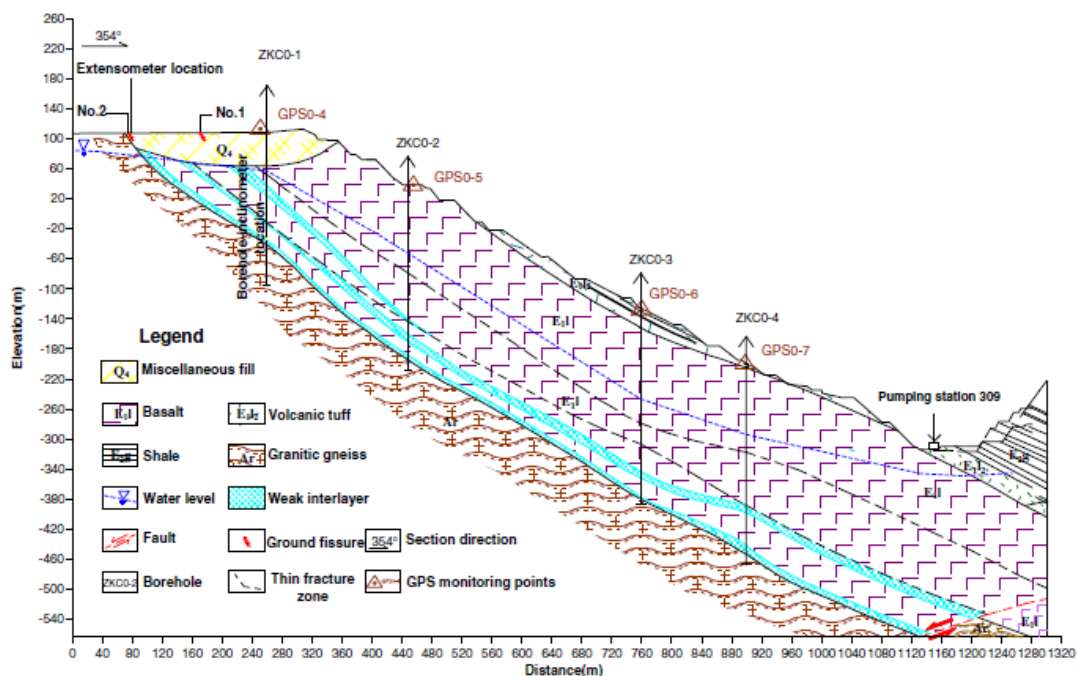
4.4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΚΛΙΜΑ

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται σε μία εύκρατη κλιματική ζώνη η οποία επηρεάζεται από τους μουσώνες της Ανατολικής Ασίας, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ζεστών και βροχερών καλοκαιριών, με μεγάλους σε διάρκεια, ψυχρούς χειμώνες και μέση ετήσια θερμοκρασία 5 με 7⁰C. Ο μέσος όρος κατακρημνίσεων στην περιοχή έρευνας είναι 740 με 790 χιλιοστά, με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να πέφτουν την περίοδο των βροχών (από Ιούλη μέχρι Σεπτέμβρη) (Nie L. κ.α. 2014). Κατά την περίοδο των βροχών πέφτει το 75% των συνολικών ετήσιων κατακρημνίσεων.

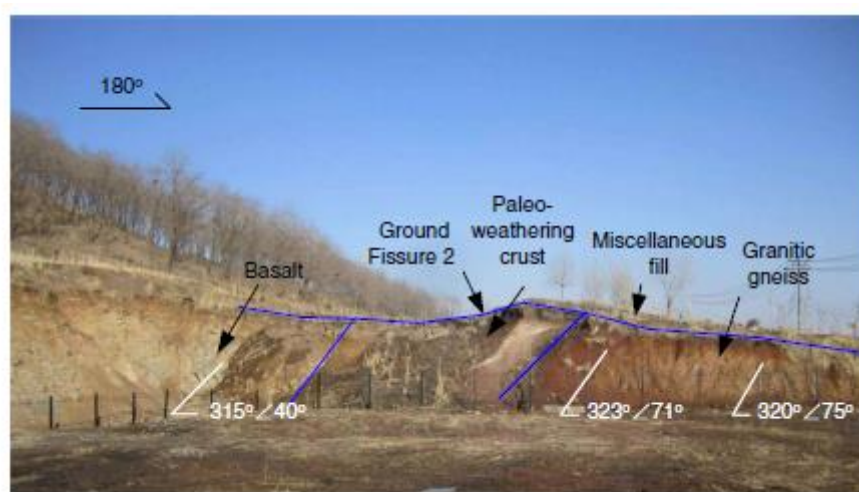
ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ

Επιφανειακά η περιοχή έρευνας αποτελείται κυρίως από μεσοζωική ηφαιστειακή τύρφη, βασάλτες και ένα μη συνεκτικό ενδιάμεσο στρώμα (ζώνη κατακερματισμού). Το υποκείμενο βραχώδες υπόβαθρο συνίσταται από αρχαίο γρανιτικό γνεύσιο (Wu κ.α. 2000). Στο μέτωπο του πρανούς υπάρχουν κατά τόπους εμφανίσεις από άλλα, ποικίλα, πετρώματα. Η στρωματογραφία του νότιου πρανούς παρουσιάζεται στην τομή E1200 (Εικόνα 64).



Εικόνα 64: Γεωλογική τομή του νότιου πρανούς (Nie L. κ.α. 2014)

Το νότιο πρανές του ορυχείου West βυθίζεται προς τον βορρά με μία συνολική κλίση 19° με 27° (Zhang 2009). Η κλίση των στρωμάτων και του πρανούς ακολουθούν σχεδόν την ίδια κατεύθυνση. Το στρώμα του βασάλτη βυθίζεται ΒΒΔ από 315° έως 356° με γωνία από 23° - 48° , ενώ η κλίση του ενδιάμεσου μη συνεκτικού στρώματος είναι περίπου 29° και ο γρανιτικός γνεύσιος βυθίζεται από 320° έως 323° με μία γωνία από 71° έως 75° (Zhang 2009). Οι επιφανειακές εμφανίσεις φαίνονται από τον περιβάλλοντα χώρο του λεβητοστασίου στο βουνό Qiantai (Εικόνα 65).



Εικόνα 65: Επιφανειακή εμφάνιση των σχηματισμών (Nie L. κ.α. 2014)

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

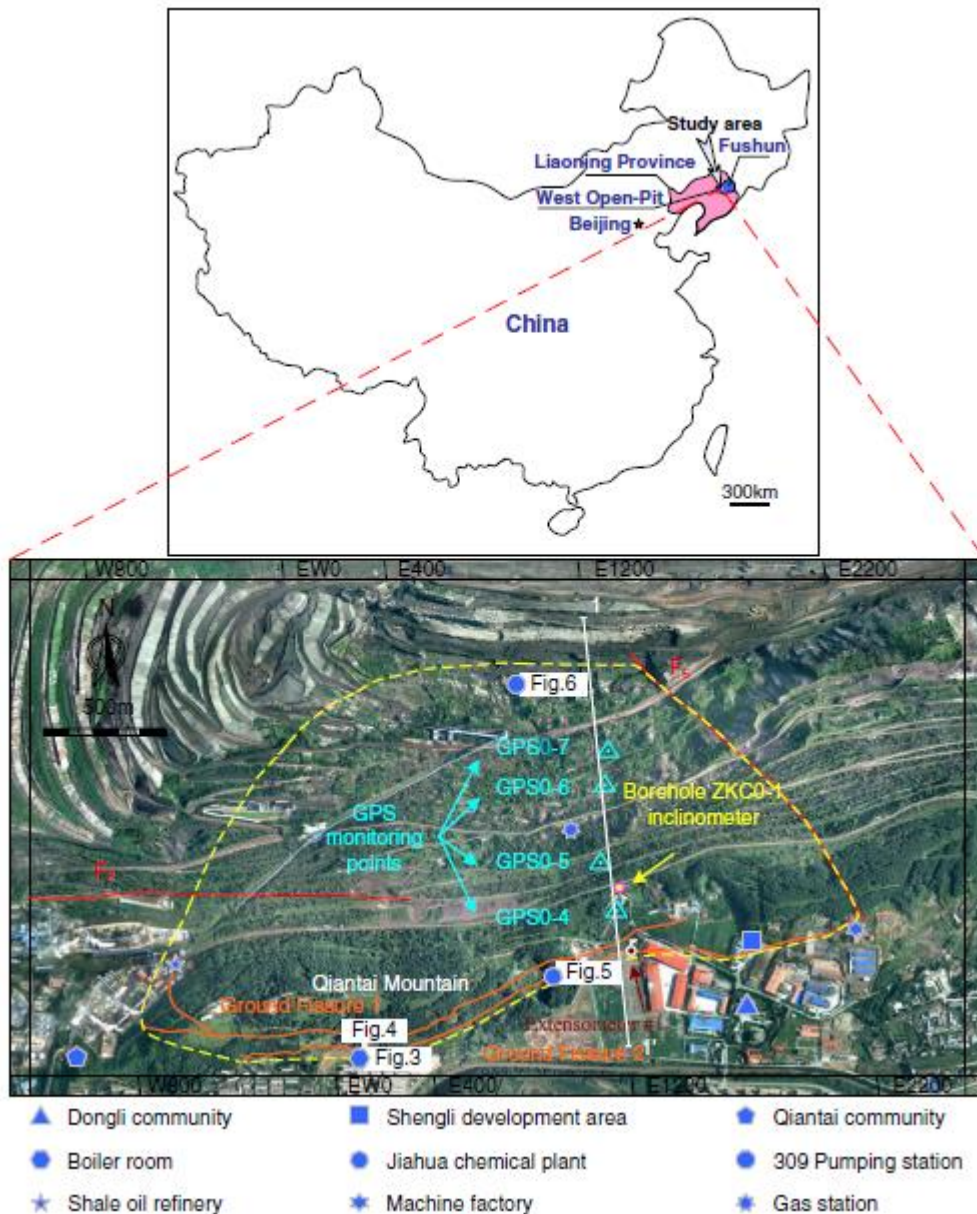
Στην περιοχή έρευνας υπάρχει ένα κυματοειδές ανάγλυφο και κάποια σημεία της περιοχής έχουν εξορυχθεί με τη μέθοδο των βαθμίδων. Η συνολική κλίση του πρανούς στο παραμορφωμένο τμήμα του βουνού Qiantai, που βρίσκεται στο νότιο πρανές του ορυχείου West είναι 25° με 30° (Johnson 1990). Η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σταθμού άντλησης 309, στην ανοιχτή εκσκαφή, και της κορυφής του βουνού είναι περίπου 410 μέτρα, ενώ το χαμηλότερο σημείο στην περιοχή έρευνας βρίσκεται στα - 309 μέτρα (Nie L. κ.α. 2014).

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΙ

Το ρήγμα F2 διασχίζει την περιοχή έρευνας από την ανατολή προς τη δύση και το ρήγμα F5 διαπερνά την περιοχή με κατεύθυνση από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά (Εικόνα 66) (Nie L. κ.α. 2014). Το ρήγμα F2 βρίσκεται στο νότιο πρανές του ορυχείου West μεταξύ των γραμμών W1500 και EW0 στην δυτική πλευρά της περιοχής έρευνας (Nie L. κ.α. 2014). Είναι ένα κανονικό ρήγμα με περίπου 1.600 μέτρα μήκος, με διεύθυνση από την ανατολή προς τη δύση και βυθίζεται προς τα βόρεια με γωνία κλίσης 80° (Johnson 1990). Έχει κατακόρυφη μετατόπιση 15 με 38 μέτρα και οριζόντια μετατόπιση 2 με 9 μέτρα (Johnson 1990).

Το ρήγμα F5 βρίσκεται στο νότιο πρανές μεταξύ E1605 και E2000, στην ανατολική πλευρά της περιοχής έρευνας. Έχει μήκος περίπου 1.700 μέτρα, διεύθυνση $N55^\circ\Delta$ και γωνία κλίσης 36° . Είναι ένα εφελκυστικό στροφικό κανονικό ρήγμα με κατακόρυφη μετατόπιση 15 με 20 μέτρα και οριζόντια μετατόπιση 42 με 59 μέτρα (Johnson 1990).

Παρόλο που υπάρχει συχνή, χαμηλής έντασης, σεισμική δραστηριότητα, δεν έχει συμβεί κάποιος καταστροφικός σεισμός στη Fushun. Από όταν εγκαταστάθηκε το δίκτυο παρακολούθησης σεισμικής δραστηριότητας, το 1965, έχουν καταγραφεί 17 σεισμοί στην περιοχή με μέγεθος χαμηλότερο των 2,2 βαθμών στην κλίμακα Richter (Nie L. κ.α. 2014).



Εικόνα 66: Χάρτης και αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης και των συσκευών παρακολούθησης στον τομέα E1200. Η κίτρινη γραμμή αναπαριστά τα όρια της κατολίσθησης. Οι γραμμές W800 έως E2200 αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς. Η άσπρη γραμμή (11') είναι το ίχνος της γεωλογικής τομής (Nie L. κ.α. 2014)

4.4.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η ανάλυση της επιτόπου έρευνας και τα δεδομένα παραμόρφωσης έδειξαν ότι στο νότιο πρηνές του ορυχείου West βρίσκεται σε εξέλιξη ένα κατολισθητικό φαινόμενο, με μήκος 1.200 έως 1.500 μέτρα στην διεύθυνση βορά- νότου, πλάτος 3.100 μέτρα στη διεύθυνση ανατολής - δύσης και όγκο περίπου 0,1 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (Nie L. κ.α. 2014). Το σώμα της κατολίσθησης εντοπίζεται σε μία περιοχή μεταξύ W800 και E2200 στο νότιο πρηνές του ορυχείου West (Εικόνα 66). Η γραμμή EW0 διαχωρίζει την περιοχή της κατολίσθησης σε ανατολική και δυτική. Στην δυτική πλευρά του πρηνούς η βραχώδης μάζα είναι μαλακή τύρφη. Η γραμμή W800 αντιπροσωπεύει το δυτικό όριο της κατολίσθησης. Η βραχώδης μάζα του

ανατολικού πρानού αποτελείται κυρίως από βασάλτη (Wu κ.α. 2000). Ένας μεγάλος όγκος περίπου 1,31 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων έχει εξορυχθεί στην περιοχή που βρίσκεται ο αντλητικός σταθμός 309 από τον Απρίλη του 2011 έως τον Ιούλιο του 2012. Αυτό οδήγησε σε μεγάλες μετατοπίσεις και δημιούργησε την κύρια περιοχή παραμόρφωσης με το ρήγμα F5 σαν σύνορο στην ανατολική πλευρά της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014). Το πόδι της κατολίσθησης βρίσκεται στον πυθμένα του ορυχείου σε υψόμετρο περίπου - 270 έως - 310 μέτρα, ενώ η κεφαλή βρίσκεται σε υψόμετρο 100 έως 205 μέτρα. Το ύψος του πρानού είναι 400 - 500 μέτρα (Nie L. κ.α. 2014).

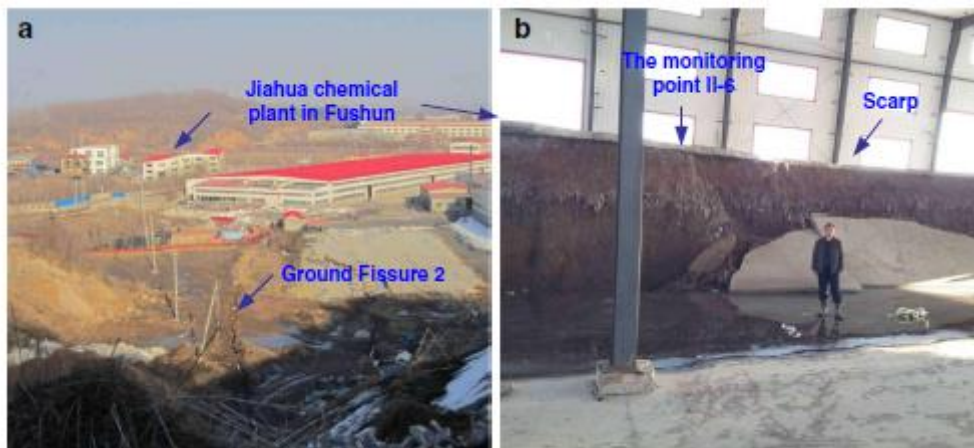
Από τον Αύγουστο του 2010 οι ρωγμές στην κεφαλή της κατολίσθησης μεγαλώνουν κάθε χρόνο. Οι ρωγμές σταδιακά αναπτύχθηκαν σε βάθος και έτσι η αθροιστική παραμόρφωση των ρωγμών διευρύνθηκε. Ένα κατακόρυφο άνοιγμα μεγαλύτερο στα νότια και μικρότερο στα βόρεια δημιουργήθηκε στην επιφάνεια του πρानού. Μέχρι τον Απρίλιο του 2013 είχαν δημιουργηθεί δύο σχεδόν παράλληλες εδαφικές ρωγμές, στη διεύθυνση ανατολής - δύσης που προκλήθηκαν από τον εφελκυσμό στην κεφαλή της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014). Η απόσταση μεταξύ των εδαφικών ρωγμών ήταν 100 με 150 μέτρα. Το συνολικό μήκος των εδαφικών ρωγμών ήταν 5,2 χιλιόμετρα.

Η εδαφική ρωγμή 1 έχει μήκος περίπου 2446 μέτρα και εκτείνεται δυτικά του διυλιστηρίου, ανατολικά του δρόμου και ανατολικά του οικισμού Dongli. Το μέγιστο πλάτος της ρωγματομένης ζώνης ήταν περίπου 10 με 40 μέτρα και η κατακόρυφη μετατόπιση μεγαλύτερη από 1,5 μέτρο (Εικόνα 67) (Nie L. κ.α. 2014).



Εικόνα 67: Φωτογραφία της εδαφικής ρωγμής 1 στην κεφαλή της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014)

Η εδαφική ρωγμή 2 είχε μήκος περίπου 2744 μέτρα, εκτείνεται δυτικά από το νότιο πρανές του βουνού Qiantai, απέναντι από το λεβητοστάσιο και το χημικό εργοστάσιο στη Fushun. Το μέγιστο πλάτος της ρωγματομένης ζώνης ήταν 10 με 40 m και η μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση ήταν 4,05 μέτρα (Εικόνα 68) (Nie L. κ.α. 2014). Σοβαρές παραμορφώσεις σε κτίρια έλαβαν χώρα στην κεφαλή της κατολίσθησης βάση των αποτελεσμάτων από το σημείο παρακολούθησης Π-6 (Εικόνα 68), κοντά στην εδαφική ρωγμή 2, στο τμήμα E1200.



Εικόνα 68: Θέση της εδαφικής ρωγμής 2 στην κεφαλή της κατολίσθησης (Nie L. κ.α. 2014)

Το σώμα της κατολίσθησης επωθείται έντονα προς τον πόδα της. Υπήρχε ξεκάθαρη διόγκωση 1-2 μέτρων στον πόδα της κατολίσθησης και αναπτύχθηκαν, επίσης, ρωγμές διαστολής (Nie L. κ.α. 2014). Οι βραχώδεις και οι εδαφικοί σχηματισμοί ήταν χαλαροί και συνέβησαν καταρρεύσεις στον πόδα της κατολίσθησης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 69, η δεξαμενή #2 και ο αντλητικός σταθμός 309 στον τομέα E1200 έγειραν και η διαφορά ύψους μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου ήταν περίπου 2 μέτρα.



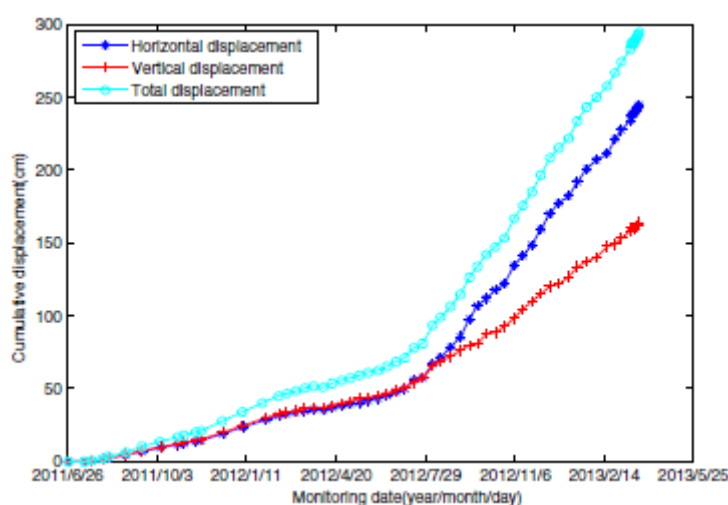
Εικόνα 69: α.Εικόνα του αντλητικού σταθμού 309 στον τομέα E1200 β.Εικόνα της ρωγμής διόγκωσης στη δεξαμενή #2 (Nie L. κ.α. 2014)

4.4.4. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ - ΠΡΟΛΗΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Το γεγονός ότι η εν λόγω κατολίσθηση διασχίζει κατοικημένες περιοχές, επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία εξόρυξης και την ομαλή λειτουργία του ορυχείου και θα μπορούσε να θέσει σε σοβαρό κίνδυνο τους εργαζομένους και τις εγκαταστάσεις του ορυχείου επέβαλε τη δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 20 δέκτες GPS, ένα επιμηκυστόμετρο για την μέτρηση των επιφανειακών μετατοπίσεων και ένα αποκλισιόμετρο για την μέτρηση των εσωτερικών μετατοπίσεων (Zhou J. κ.α. 2011).

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ

Το επιμηκυνσιόμετρο παρακολουθούσε τις παραμορφώσεις στο πρανές σε διάφορα μεσοδιαστήματα από τις 26 Ιουνίου 2011. Μεταξύ της 15^{ης} Φεβρουαρίου 2012 και της 15^{ης} Μαρτίου 2013, δεδομένα συλλέγονταν κάθε 10 μέρες. Καθώς η παραμόρφωση αυξανόταν, αυξανόταν και η συχνότητα συλλογής δεδομένων, η οποία γινόταν καθημερινά από τις 15 Μαρτίου του 2013 και μετά. Τα δεδομένα παρακολούθησης από το επιμηκυνσιόμετρο #1 στον τομέα E1200 παρουσιάζονται στην Εικόνα 70. Κατά την περίοδο παρακολούθησης από την 26^η Ιουνίου 2011 μέχρι την 25^η Μαρτίου 2013 η οριζόντια μετατόπιση του επιμηκυνσιόμετρου 1 ήταν 244.6 cm, με μία μέση ταχύτητα οριζόντιας μετατόπισης 3.83 mm ημερησίως (Zhou J. κ.α. 2011). Η κατακόρυφη μετατόπιση ήταν 164 cm και η μέση ταχύτητα κατακόρυφης μετατόπισης ήταν 2.57 mm ημερησίως (Zhou J. κ.α. 2011). Η ημερήσια ταχύτητα παραμόρφωσης μεταβλήθηκε από 1 mm/μέρα τον Ιούνιο του 2011, έως και 10 mm/μέρα τον Μάρτιο του 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).



Εικόνα 70: Αθροιστικές μετατοπίσεις στο επιμηκυνσιόμετρο 1 από την 26η Ιουλίου 2011 μέχρι την 25η Μαρτίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).

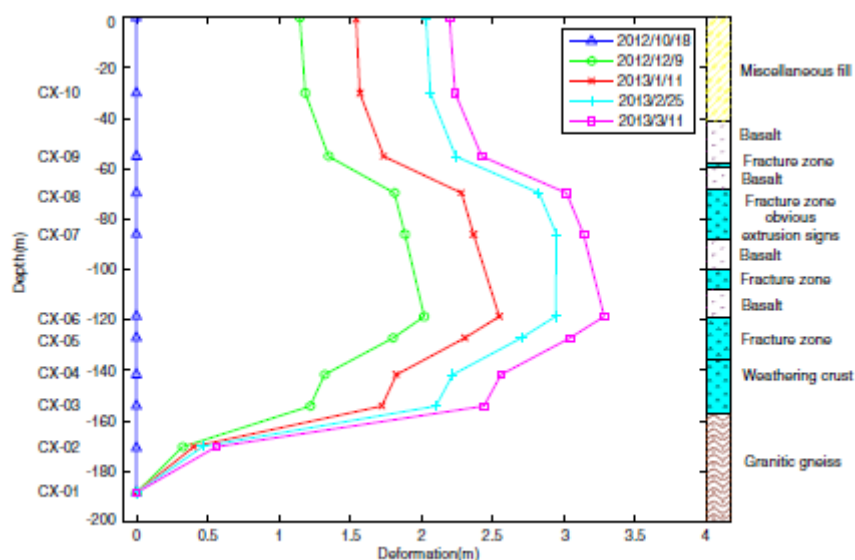
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Ένα αποκλισιόμετρο γεώτρησης τοποθετήθηκε στην κορυφή της κατολίσθησης, στη γεώτρηση ZKC0-1 στον τομέα E1200, για να καθοριστεί το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης και η κατεύθυνση της κατολίσθησης. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις σε διαφορετικές στιγμές, θα μπορούσε να αξιολογηθεί η ταχύτητα παραμόρφωσης σε διαφορετικά βάθη. Η παρακολούθηση μέσω του αποκλισιόμετρου ξεκίνησε την 18^η Οκτωβρίου 2012. Η γεώτρηση ZKC0-1 βρισκόταν 146 μέτρα από την εδαφική ρωγμή 1. Η κορυφή της γεώτρησης βρισκόταν σε ύψος 110.6 μέτρων. Η εικόνα 71 δείχνει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το αποκλισιόμετρο, από τον Δεκέμβριο του 2012 μέχρι τον Μάρτιο του 2013.

Η ανάλυση του αποκλισιόμετρου στην καμπύλη ολικών μετατοπίσεων παρουσιάζει μια καμπύλη σχήματος D με μία μόνο εμφανή επιφάνεια ολίσθησης (Zhou J. κ.α. 2011). Η θέση της επιφάνειας ολίσθησης ήταν αρκετά βαθιά, το σώμα της κατολίσθησης πάνω από αυτήν την επιφάνεια ολίσθησης ήταν σε κίνηση και βαθιά η βραχώδης μάζα είχε την πιθανότητα να ολισθήσει προς τα βόρεια. Σε βάθος 118.5 m στη γεώτρηση ZKC0-1, τα δεδομένα CX-06 του αποκλισιόμετρου δείχνουν μια μετατόπιση 3,287 m την 11^η Μαρτίου 2013, με κατεύθυνση

BBA (355⁰) (Zhou J. κ.α. 2011). . Η ολική μετατόπιση στην κορυφή της γεώτρησης ήταν 2.199 m, με μία ταχύτητα μετατόπισης 15,2 mm/μέρα.

Η πιο σημαντική μετατόπιση συνέβη σε βάθος 68-118 μέτρων (Zhou J. κ.α. 2011). Η κύρια επιφάνεια ολίσθησης βρισκόταν πάνω από το γρανιτικό γενύσιο της ευσταθούς βραχώδους μάζας στην περιοχή. Η επιφάνεια ολίσθησης αυτού του τμήματος ήταν μια ρωγματομένη ζώνη μέσα στο βασάλτη.

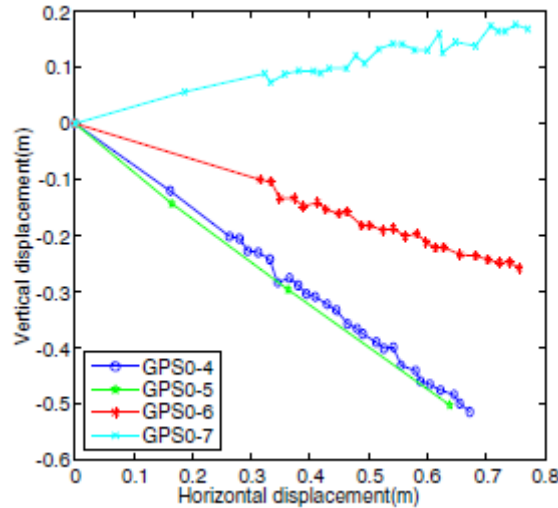


Εικόνα 71: Δεδομένα από το αποκλισίμετρο κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2012 έως Μάρτιο 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).

ΔΕΚΤΕΣ GPS

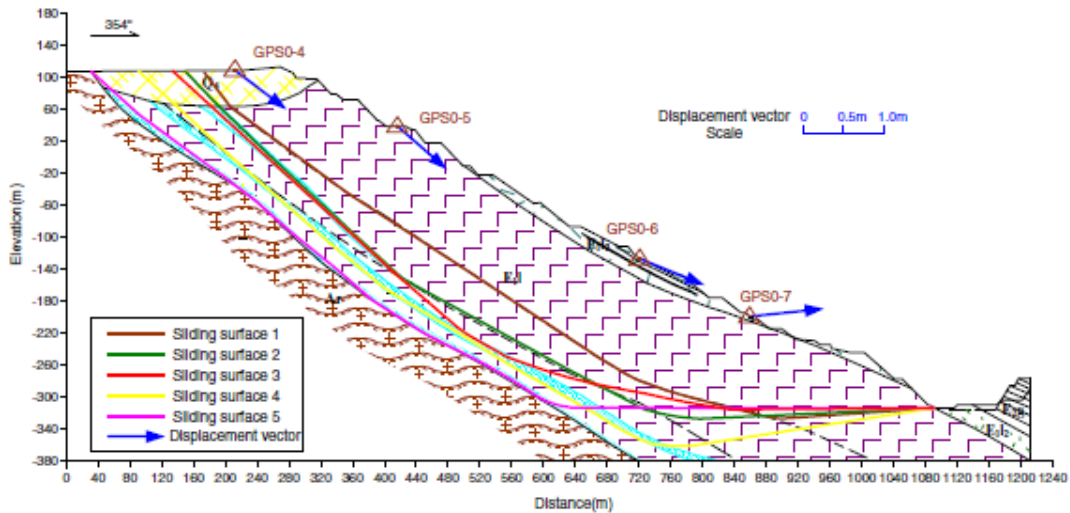
Το στατικό σύστημα παρακολούθησης (GPS) απαρτιζόταν από 20 δέκτες (κοντά στους τομείς E400 και E1200) και είχε διανεμηθεί σε διαφορετικά σημεία του σώματος της κατολισθαίνουσας μάζας προκειμένου να μετρήσει τη συμπεριφορά της κατολίσθησης και την ταχύτητα παραμόρφωσης (Zhou J. κ.α. 2011). Στον τομέα E1200 υπήρχαν 4 σημεία παρακολούθησης (GPS0-4 έως GPS0-7) και η εικόνα 72 δείχνει τις συνολικές μετατοπίσεις με την πάροδο του χρόνου για αυτά τα τέσσερα σημεία.

Κατά την περίοδο 47 ημερών από την 25^η Φεβρουαρίου 2013 μέχρι και την 12^η Απριλίου του 2013, η μεγαλύτερη ολική μετατόπιση παρουσιάστηκε στο GPS0-4. Το GPS0-4 κατέγραψε και τις μεγαλύτερες ταχύτητες (18mm/μέρα) με διεύθυνση προς τον πυθμένα του ορυχείου. Στα GPS0-5 και GPS0-6 η ταχύτητα παραμόρφωσης ήταν 17,3 και 17 mm/μέρα (Zhou J. κ.α. 2011). Η ταχύτητα παραμόρφωσης στο GPS0-7 ήταν 16,8 mm/μέρα. Η ταχύτητα παραμόρφωσης στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης ήταν μεγαλύτερη από αυτή του κατώτερου τμήματος. Το ανώτερο τμήμα παρουσίασε μια μετατόπιση προς τα κάτω, ενώ το κατώτερο παρουσίασε μετατόπιση προς τα πάνω. Η μετατόπιση συνέχισε να αυξάνεται προοδευτικά και η διεύθυνση της μετατόπισης στα σημεία παρακολούθησης, στο μεσαίο τμήμα, συνάδει με αυτή του ανώτερου τμήματος (και οι δύο προς τον πυθμένα του ορυχείου).



Εικόνα 72: Οι ολικές μετατοπίσεις στα σημεία GPS0-4 έως GPS0-7 από την 25η Φεβρουαρίου 2013 μέχρι την 12η Απριλίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).

Εάν προβληθούν τα διανύσματα οριζόντιας μετατόπισης στο τμήμα E1200, χρησιμοποιώντας τις οριζόντιες και τις κατακόρυφες μετατοπίσεις, μπορούν να υπολογιστούν τα διανύσματα των συνολικών μετατοπίσεων για αυτό το τμήμα. Αυτά μπορούν να καθορίσουν το μοτίβο παραμόρφωσης ολόκληρης της κατολίθησης (Εικόνα 73).



Εικόνα 73: Πιθανές επιφάνειες ολίσθησης και τα διανύσματα μετατόπισης της επιφάνειας του πρανούς στον τομέα E1200 από την 25η Φεβρουαρίου 2013 έως και την 12η Απριλίου 2013 (Zhou J. κ.α. 2011).

Προκειμένου να αποφευχθεί το παραπάνω κατολισθητικό φαινόμενο οι αρχές του ορυχείου αποφάνθηκαν πως θα έπρεπε να κατασκευαστεί ένα αντλητικό δίκτυο περιμετρικά της κατολίθησης.

ΑΝΤΛΗΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Λαμβάνοντας υπόψη τα μηχανικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών, το βάθος στο οποίο συνέβαινε η κατολίσθηση καθώς και τις διαστάσεις αυτής αποφασίστηκε η κατασκευή ενός δικτύου σημείων άντλησης ισχυρής αναρρόφησης (Zhou J. κ.α. 2011). Αυτό το δίκτυο αποτελούταν από πολυάριθμα σωληνωτά φρέατα κατασκευασμένα, με μικρή απόσταση μεταξύ τους, περιμετρικά της κατολισθαίνουσας μάζας. Τα φρέατα ήταν συνδεδεμένα σε ένα ενιαίο δίκτυο το οποίο αντλούταν από ένα κεντρικό αντλητικό συγκρότημα. Τα φρέατα εγκαταστάθηκαν με μεταξύ τους απόσταση 2 μέτρων. Έτσι, αποφεύχθηκαν οι εισροές νερού στην κατολίσθηση και μειώθηκαν οι πιθανότητες εκδήλωσης ενός πιο επικίνδυνου φαινομένου (Zhou J. κ.α. 2011).

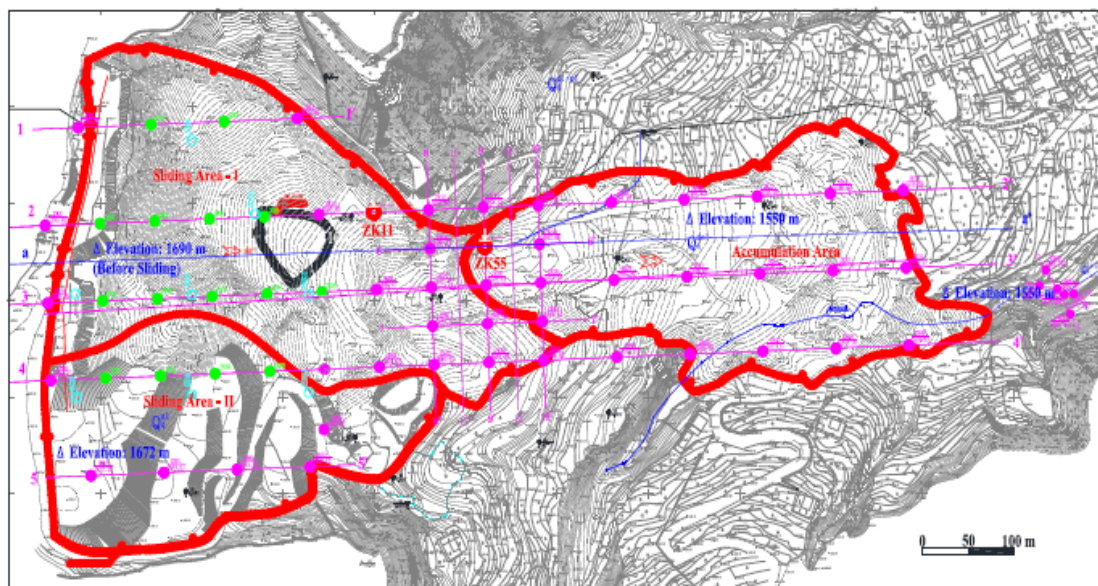
4.5. ΧΩΡΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΤΕΙΡΩΝ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΙΥΙ, ΕΠΑΡΧΙΑ SICHUAN, ΚΙΝΑ

4.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Κίνα, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ορυχείων που έχει, είναι η χώρα με τους περισσότερους χώρους απόθεσης στερεών μεταλλευτικών απορριμμάτων στον κόσμο. Ένας τυπικός χώρος απόθεσης στείρων καταλαμβάνει περίπου το 50% της περιοχής εξόρυξης και τα κόστη που σχετίζονται με την κατασκευή του, φτάνουν στο 40-60% των συνολικών εξόδων του ορυχείου. Παρακάτω θα εξεταστεί η κατολίσθηση που συνέβη στο χώρο απόθεσης στείρων στην περιοχή Μιγι, στην επαρχία Sichuan, στην Κίνα. Αυτός ο χώρος λειτουργούσε από τον Οκτώβριο του 2008 και η ποσότητα των στείρων σε αυτόν, μέχρι το 2009, ανερχόταν σε 200.000 m³. Η αστοχία σε αυτό το τέλμα συνέβη περίπου στις 6:40 π.μ., την 27^η Φεβρουαρίου 2011 (Wang Η. κ.α. 2021).

4.5.2. ΚΛΙΜΑ, ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο εν λόγω χώρος απόθεσης απορριμμάτων, έχει υποτροπικό κλίμα με άφθονες βροχοπτώσεις. Η μέση ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 1.118,8 mm. Η διαμόρφωση του εδάφους στο σημείο της κατολίσθησης αποτελείται από διαβρωμένα πρηνή χαμηλών έως και μεσαίων σε ύψος λόφων, όπως φαίνεται στην εικόνα 74. Οι βραχώδεις σχηματισμοί διαβρώθηκαν λόγω των καιρικών συνθηκών. Το υψόμετρο του χώρου απόθεσης ήταν μεταξύ 1600 - 1690 m και χωριζόταν σε τρεις βαθμίδες με υψόμετρο 1690 m, 1650m και 1630m (Wang Η. κ.α. 2021). Πριν την εκδήλωση της αστοχίας, ο χώρος απόθεσης στην ανατολική πλευρά βρισκόταν σε χαμηλότερο επίπεδο συγκριτικά με τη νότια, δυτική και βόρεια πλευρά. Η πίσω πλευρά του χώρου απόθεσης είχε περίπου 500 μέτρα πλάτος και είχε κλίση μεταξύ 20°- 25° (Wang Η. κ.α. 2021). Η μπροστινή πλευρά του τέλματος ήταν στενή με πλάτος 250 μέτρα. Στην περιοχή του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων είχαν σχηματιστεί δύο μικρές χαράδρες από νότια προς βόρεια με μία μικρής κλίσης κορυφή μεταξύ τους. Το υψόμετρο της περιοχής κυμαινόταν μεταξύ 1563-1698 m. Το υψόμετρο στο κέντρο του υψηλότερου σημείου του τέλματος ήταν λιγότερο από 1.625 μέτρα και το πρηνές είχε κλίση περί τις 15°. Η πίσω πλευρά του τέλματος βρισκόταν υψηλότερα από τα 1.625 μέτρα με μία γωνία κλίσης 20°- 40°. Επίσης βόρεια του χώρου απόθεσης απορριμμάτων βρίσκεται μία ιχθυοκαλλιέργεια, που εκτείνεται σε μία επιφάνεια 4.400 τετραγωνικών μέτρων.



Εικόνα 74: Γεωλογικός χάρτης της κατολίσθησης στο χώρο απόθεσης απορριμμάτων (Wang H. κ.α. 2021).

4.5.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η στρωματογραφική στήλη της περιοχής της κατολίσθησης (από τα νεότερα προς τα παλαιότερα στρώματα) έχει ως εξής (Eid H. κ.α. 2000) :

Στρώμα αποθέσεων κατολίσθησης Ολοκαίνου : αυτό το στρώμα βρίσκεται στα μεσαία και ανώτερα τμήματα του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων. Δημιουργήθηκε από την απόθεση εδαφικού υλικού και ιλυώδους αργίλου από την κατολίσθηση. Τα κύρια συστατικά αυτού του στρώματος είναι ιλυώδης άργιλος και χάλικες. Συναντάται σε βάθος 3 -12 m.

Στρώμα υλικών πλήρωσης Ολοκαίνου : αυτό το στρώμα βρίσκεται στην πίσω και δεξιά πλευρά του χώρου απόθεσης απορριμμάτων και συνιστά το αποτιθέμενο υλικό πλήρωσης. Τα κύρια συστατικά του στρώματος αυτού είναι άργιλος και χάλικες. Συναντάται σε βάθος από 3 έως 16 m. Η συνοχή αυτού του στρώματος είναι μικρή έως μέτρια.

Αλλουβιακές αποθέσεις Ολοκαίνου: οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε δύο υπό-στρώματα: (1) ένα υπο-στρώμα ιλυώδους αργίλου, που εκτείνεται σε όλη την περιοχή σε βάθη που κυμαίνονται από 2 έως 8 μέτρα και περιέχει μικρές ποσότητες χαλικιών (10-20%). Τμήματα του υποστρώματος αυτού βρίσκονταν σε πλαστική ή τελείως πλαστική κατάσταση, ενώ τα επίπεδα κορεσμού ήταν από ελαφρώς υγρά έως υγρά. (2) το δεύτερο υπο-στρώμα ήταν ένα γκριζωπό χαλικώδες έδαφος. Τα βραχοτεμάχια και οι χάλικες σε αυτό το υπο-στρώμα αποτελούνταν κυρίως από υπογωνιώδη συηνίτη και γρανίτη με μέση διάμετρο 9-30 cm και μέγιστη διάμετρο 60 cm. Οι αποθέσεις αυτές περιείχαν 40-50% άργιλο και χαλικώδη άμμο ενώ ήταν σχετικά συμπαγείς και υγρές.

Αποθέσεις Πλειστοκαίνου με δύο υποκατηγορίες : (1) ένα λασπώδες αργιλικό υπο-στρώμα, αποτελούμενο κυρίως από περλιτικές αποθέσεις, το οποίο βρίσκεται στη μεριά του ποταμού Weilong, όπου υπάρχουν κι οι δύο προαναφερθείσες χαράδρες. Το υπο-στρώμα αυτό συναντάται σε βάθος 3 - 6 μέτρων και είναι υγρό, σε ελαφρώς πλαστική ή πλαστική κατάσταση. (2) ένα υπο-στρώμα κροκαλλοπαγούς σύνθεσης, το οποίο βρίσκεται στην ίδια περιοχή και συναντάται σε βάθος 3 με 10 m. Το υπο-στρώμα αυτό είναι υγρό και ελαφρώς έως μέτρια συμπαγές.

Τεταρτοταγείς αποθέσεις πρηνούς: αυτές βρίσκονται σε ολόκληρη την περιοχή της κατολίσθησης και συναντώνται σε βάθος 3-8 m. Το στρώμα αυτό ήταν υγρό και βρισκόταν σε πλαστική κατάσταση.

Τεταρτοταγές βραχώδες υπόβαθρο συνηίτη: το οποίο αποτελείται από τρία διαφορετικά υπο-στρώματα: (1) ένα στρώμα καφέ-κίτρινου συνηίτη, σε αποσύνθεση, με βραχώδεις πυρήνες, που αποτελούνται από χαλικώδη άμμο γάββρου, χονδρόκοκκη άμμο και αμμόδες έδαφος. Αυτό το υπόστρωμα συναντάται σε βάθη 0,8 - 29,8 m. (2) ένα αρκετά διαβρωμένο στρώμα συνηίτη (καφέ-κίτρινο, γκρι ή καφέ - γκρι), που αποτελείται από μεσαίους έως χοντρούς κόκκους με συμπαγή δομή. Επειδή αυτό το στρώμα έχει υποστεί μεγάλη διάβρωση υπάρχουν καλά ανεπτυγμένες ρωγμές και ασυνέχειες στο σώμα του πετρώματος, το οποίο είναι αρκετά κερματισμένο. Και έτσι ο δείκτης (RQD) ποιότητας της βραχώμαζας είναι μηδέν. Το βάθος στο οποίο συναντάται το στρώμα αυτό ήταν 1,6-22,1 m. (3) Ένα μέτρια διαβρωμένο στρώμα (σκούρου ή ανοιχτού γκρι) συνηίτη, που αποτελείται από άστριο, πλαγιόκλαστο, βιοτίτη, πυρόξενο κ.α. Οι κόκκοι του σχηματισμού αυτού είχαν μεσαίο ή μεγάλο μέγεθος. Λόγω της μέτριας διάβρωσης που είχε υποστεί το πέτρωμα ήταν εμφανείς οι ασυνέχειες και οι ρωγμές, οι οποίες είχαν πληρωθεί με οξειδία του σιδήρου και του μαγγανίου, καφέ χρώματος. Η δομή του πετρώματος ήταν συνεχής και αδιατάρακτη. Οι βραχώδεις πυρήνες ήταν στήλες μικρού ύψους 5 - 35 cm ή χάλικες. Ο δείκτης RQD ήταν 30-58%. Το υπο-στρώμα αυτό βρίσκεται σε βάθος 1,6-22,1 m.

Η μεγαλύτερη επιφανειακή εμφάνιση νερού, κοντά στην περιοχή της κατολίσθησης, είναι ο ποταμός Weilong. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις για τα επίπεδα του νερού, το ύψος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται μεταξύ 0 και 14 m, με μεταβαλλόμενη στάθμη (Eid H. κ.α. 2000). Το εδαφικό νερό αποτελείται από το νερό των πόρων, που υπάρχει κυρίως στο Τεταρτοταγές στρώμα χαλίκων και κροκάλων και το νερό των ρωγμών, που βρίσκεται στο Τεταρτοταγές βραχώδες υπόβαθρο. Τα δεδομένα από τους δειγματοληπτικούς πυρήνες δείχνουν ότι οι ρωγμές στο σχηματισμό του συνηίτη έχουν μεγάλη εξάπλωση και υπάρχει ένας αρκετά ικανός χώρος για την αποθήκευση και μεταφορά του υπογείου νερού (Eid H. κ.α. 2000). Η διείσδυση του βρόχινου νερού στο έδαφος έχει σημαντική επίδραση στην αύξηση του νερού των πόρων. Ο σχηματισμός του συνηίτη μπορεί να αποθηκεύσει μια συγκεκριμένη ποσότητα από το νερό που περιέχεται στις ρωγμές του υποβάθρου. Το νερό του υδροφόρου στην περιοχή απόθεσης των απορριμμάτων αναπληρώνεται κυρίως από τις βροχοπτώσεις και εν μέρει από τον ποταμό Weilong στα βορειοανατολικά. Το νερό που υπάρχει προσωρινά αποθηκευμένο στις Τεταρτοταγείς αποθέσεις στο υψηλότερο μέρος του πρηνούς, στην περιοχή αποθέσεων των απορριμμάτων, διεισδύει στο σχηματισμό του βραχώδους υποβάθρου αυξάνοντας έτσι το περιεχόμενο στις ρωγμές του νερό (Eid H. κ.α. 2000). Με την πάροδο του χρόνου το, περιεχόμενο στις ρωγμές του βραχώδους υποβάθρου, νερό διαρρέει στα ανώτερα στρώματα, με αποτέλεσμα την αύξηση του νερού των πόρων στις Τεταρτοταγείς αποθέσεις προκαλώντας διαρροή του νερού στις βαθμίδες όπου υπάρχουν ασυνέχειες. Επιπροσθέτως, κατά τη διαδικασία των γεωτρήσεων υπήρξε εισροή νερού από τα τοιχώματα των γεωτρήσεων σε διαφορετικά βάθη.



Εικόνα 75: Νερό στη βάση του τέλματος (Eid H. κ.α. 2000)

4.5.4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

4.5.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η αστοχία στο συγκεκριμένο τέλμα συνέβη περίπου στις 6:40 στις 27 Φεβρουαρίου 2011. Η μάζα της κατολίσθησης, που απαρτιζόταν από μεταλλευτικά απορρίμματα, προήλθε από την πίσω πλευρά του τέλματος. Η επιτόπου μελέτη και η επιφανειακή έρευνα διεξάχθηκε για μία επιφάνεια 93941 m^2 (Huang Y. κ.α. 2016). Η γεωτρητική έρευνα έδειξε ότι το πάχος των αποθέσεων της κατολίσθησης ήταν μεταξύ 3,5-19 m, με ένα μέσο όρο περίπου 6 m. Δεδομένης της επιφάνειας και του βάθους των αποθέσεων, ο συνολικός όγκος της κατολίσθησης υπολογίζεται στα $5,64 \times 10^5 \text{ m}^3$ (Huang Y. κ.α. 2016). Ο συνολικός όγκος περιλαμβάνει τα μεταλλευτικά απορρίμματα και τα διαβρωμένα εδάφη της κατολίσθησης.

Η κάτοψη της μάζας της κατολίσθησης παρουσίαζε ένα ακανόνιστο σχήμα, δηλαδή μικρό μέγεθος στη μέση και μεγάλο στην μπροστά και πίσω πλευρά. Το πλάτος της κατολίσθησης ήταν 522 m στην πίσω πλευρά, 150 m στη μέση και 260 m στην μπροστινή πλευρά (Huang Y. κ.α. 2016). Η κύρια διεύθυνση ολίσθησης ήταν 88° . Η απόσταση του πόδα από την κεφαλή της κατολίσθησης ήταν περίπου 1.000 m. Η κατολισθαίνουσα μάζα διένυσε μια απόσταση περίπου 770 m. Η υψομετρική διαφορά του πόδα και της κεφαλής της κατολίσθησης ήταν περίπου 210 m (Wang H. κ.α. 2021).

Τα μεταλλευτικά απορρίμματα οδηγούνταν σε ολίσθηση πάνω στη διεπιφάνεια τους με τον τοπικό εδαφικό σχηματισμό. Επίσης, με την βοήθεια της βαρύτητας, κινήθηκαν κατηφορικά ξεπερνώντας το τέλμα και συνεχίζοντας για 600 m ακόμα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 76, εντοπίζονται δύο ζώνες της κατολισθαίνουσας μάζας, η ζώνη της απόθεσης και η ζώνη της ολίσθησης. Σύμφωνα με την εικόνα 76a, η ζώνη ολίσθησης διαχωρίζεται σε δύο υπό ζώνες ολίσθησης την I και την II. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις δύο υπο-ζώνες παρουσιάζονται στην εικόνα 76 b, c. Το συνολικό μέγεθος της κατολίσθησης καταλαμβάνει μια έκταση 273.993 m^2 , από τα οποία 93.941 m^2 καλύπτει η ζώνη απόθεσης, 114.708 m^2 η ζώνη ολίσθησης I (εικόνα 76b) και 65.344 m^2 η ζώνη ολίσθησης II (εικόνα 76c) (Wang H. κ.α. 2021).



Εικόνα 76: Οι διαστάσεις της κατολίσθησης (Wang H. κ.α. 2021).

4.5.4.2 ΒΡΑΧΩΔΗ ΚΑΙ ΕΛΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών ιδιοτήτων κάθε γεωλογικού στρώματος διενεργήθηκαν δοκιμές πρότυπης διείδυσης, δοκιμές δυναμικής διείδυσης και δειγματοληψίες, με τα παρακάτω αποτελέσματα (Eid H. κ.α. 2000).

- Η μάζα της κατολίσθησης: αποτελούταν κυρίως από άργιλο, αρκετά έως μέτρια αποσαθρωμένο συνηίτη και χάλικες γάββρου. Οι χάλικες ήταν αδιατάρακτοι και αποτελούσαν το 30% της συνολικής μάζας.
- Ζώνη ολίσθησης: τα δεδομένα από τις γεωτρητικές και τις επιφανειακές έρευνες έδειξαν ότι μία ζώνη ολίσθησης δημιουργήθηκε όταν με το πέρασμά της η κατολίσθηση παγίδεψε τεμάχια ιλυώδους αργίλου στο μέσο της κατολισθαίνουσας μάζας (Εικόνα 77). Αυτό το στρώμα εμφάνιζε εξαιρετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες στη φυσική του κατάσταση, οι οποίες, όμως, έφθιναν λόγω της μακροχρόνιας επαφής του σχηματισμού με το υπόγειο νερό.
- Υπόστρωμα της ολίσθησης: και αυτός ο σχηματισμός αποτελείται από ιλυώδη άργιλο, καθώς συνίσταται από υλικά πλήρωσης από τον χώρο απόθεσης.



Εικόνα 77: Διεπαφές και πηγές στην επιφάνεια ολίσθησης (Eid H. κ.α. 2000)

4.5.5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΚΙΝΗΣΗΣ – ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τους κατοίκους, στην περιοχή που επηρεάστηκε από την κατολίσθηση, στις 6:40 π.μ. της 27^{ης} Φεβρουαρίου 2011, ακούστηκε ένας εκκωφαντικός ήχος, σαν να συνέβη κάποιος σεισμός. Μέχρι να ξυπνήσουν τις οικογένειες τους και να εκκενώσουν τα σπίτια τους, η κατολίσθηση από τον χώρο απόθεσης απορριμμάτων είχε φτάσει στις αυλές τους (Εικόνα 78).

Μετά την καταστροφή, ξεκίνησαν έρευνες στην περιοχή από όπου ξεκίνησε η κατολίσθηση, στην περιοχή με την υψηλής ταχύτητας ροή συντριμμιών και στο χώρο απόθεσης. Τα μεταλλευτικά απορρίμματα τοποθετούνταν ακριβώς επάνω στο ιλύωδες αργιλικό έδαφος της λίμνης Shanping. Το μη συνεκτικό έδαφος δεν μπορούσε να αντέξει το βάρος του 90 m ύψους τέλματος, καταλήγοντας στην κατάρρευση του τέλματος και την επακόλουθη ροή προς τα κάτω των υλικών (Wang H. κ.α. 2021). Η ξαφνική αστοχία του τέλματος συνοδευόταν από υψηλή ενέργεια και για αυτό δεν μπορούσε να περιοριστεί αφότου ξεκίνησε. Εντός σύντομου χρονικού διαστήματος, η κατολίσθηση διάβρωσε σχεδόν το 1/5 του λόφου, ο οποίος βρισκόταν στο αριστερό τμήμα του χώρου απόθεσης απορριμμάτων και κατέστρεψε τους οπωρώνες και τα χωράφια κατά μήκος του πρानού (Wang H. κ.α. 2021). Η κατολίσθηση ήταν σαν γιγαντιαίο άροτρο, το οποίο παρέσυρε τα δέντρα, τους βράχους και ό,τι άλλο βρέθηκε στο πέρασμά της.

Έξι άνθρωποι σκοτώθηκαν στο καταστροφικό γεγονός. Τη στιγμή της αστοχίας, η κατολισθαίνουσα μάζα έφτασε στην κοίτη του ποταμού Weilong, συνέχισε να ρέει και κατέστρεψε τη γέφυρα Desheng και τους συνδεδεμένους με αυτήν μεταλλευτικούς δρόμους. Η συνολική απόσταση που διένυσε η κατολισθαίνουσα μάζα ήταν περίπου 770 m, και η κατολίσθηση διήρκεσε περίπου 200 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 78: Φωτογραφίες από τα αγροτόσπιτα πριν και μετά την κατολίσθηση (Wang H. κ.α. 2021).

Η έρευνα για την κατολίσθηση έδειξε πως η κατολισθαίνουσα μάζα έφτασε στη χαράδρα βόρεια του χώρου απόθεσης απορριμμάτων. Η συνολική έκταση της κατολίσθησης ήταν $210.000 m^2$ και ο συνολικός όγκος της ήταν $560.000 m^3$, εκ των οποίων $390.000 m^3$ ήταν μη συνεκτικά στείρα και τα $170.000 m^3$ ήταν μη συνεκτικά εδαφικά υλικά, που παρασύρθηκαν από την κατολίσθηση (Wang H. κ.α. 2021). Η απόσταση από το πόδι μέχρι την κεφαλή της κατολίσθησης ήταν 1060 m. Η κατολισθαίνουσα μάζα κινήθηκε για 770 m. Σύμφωνα με τις «Προδιαγραφές Γεωλογικών Ερευνών για τη σταθεροποίηση Κατολισθήσεων», που δημοσιεύθηκαν από το Υπουργείο πόρων και Γης της Κίνας, αυτός ο τύπος κατολίσθησης ταξινομείται στις κατολισθήσεις μεσαίου μεγέθους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για αυτόν τον τύπο κατολισθήσεων, η συνολική διαδρομή της κατολισθαίνουσας μάζας δεν είναι περισσότερη από 2,8 φορές το ύψος του τέλματος. Ωστόσο, η διαδρομή που διανύθηκε σε αυτήν την περίπτωση, είναι 7 φορές το ύψος του τέλματος, κάτι το οποίο δεν έχει προηγούμενο ούτε στην Κίνα, ούτε παγκοσμίως (Wang H. κ.α. 2021).

4.5.6. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Μετά το πέρας του φαινομένου, ο συγκεκριμένος χώρος απόθεσης μεταλλευτικών απορριμμάτων έκλεισε και δεν ξαναχρησιμοποιήθηκε. Οι μόνες εργασίες που διενεργήθηκαν ήταν χωματοργικές εργασίες για την απομάκρυνση των κατολισθαίνοντων υλικών από τους παραπλήσιους οικισμούς. Τέλος, δόθηκαν αποζημιώσεις για την αποκατάσταση των υλικών ζημιών που προκλήθηκαν σε σπίτια.

5. ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων, σε μεταλλευτικούς χώρους ανοικτής εκσκαφής, που διερευνώνται στην παρούσα εργασία, αποδίδεται σε διάφορα αίτια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- ✚ Στην περίπτωση της κατολίσθησης στο ορυχείο Panliao, ο κύριος ενδογενής παράγοντας που προκάλεσε την αστάθεια στο πρανές ήταν τα φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά του. Ακόμα, σημαντικό ρόλο διατέλεσαν εξωτερικοί παράγοντες, όπως ο σεισμός που συνέβη πριν την κατολίσθηση, η εκτεταμένη βροχόπτωση και η εξορυκτική δραστηριότητα.
- ✚ Στο ορυχείο του φαράγγιού Bingham, παρά το τεράστιο, χωρίς προηγούμενο, μέγεθος της κατολίσθησης δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός κάποιου εμφανούς φυσικού αιτίου, που οδήγησε στην ενεργοποίησή της. Συνεπώς, το φαινόμενο αποδίδεται στην διατάραξη των σχηματισμών από την εξορυκτική δραστηριότητα.
- ✚ Όσο αφορά, το κατολισθητικό φαινόμενο στο ορυχείο Αμυνταίου, τα κύρια αίτια του ήταν η εμφάνιση ζωνών διάτμησης εντός των αποθέσεων και τα υψηλά πιεζομετρικά φορτία των υδροφορέων κάτω από το ορυχείο. Πέρα από αυτά, η εν μέρει αστοχία των γεωτρήσεων αποστράγγισης, η οποία οδήγησε στην αυξημένη πίεση πόρων των ρηχών υδροφορέων, μπορεί να συγκαταλεγεί ανάμεσα στους παράγοντες που πυροδότησαν την αστοχία (Loupasakis 2020).
- ✚ Στο ορυχείο West στη Fushun, η κατολίσθηση αποδίδεται στην εξορυκτική δραστηριότητα, καθώς με την προχώρηση του πρανούς το βραχώδες υπόβαθρο έχασε την ευστάθειά του και δημιουργήθηκαν επιφάνειες ολίσθησης.
- ✚ Τέλος, στο χώρο απόθεσης μεταλλευτικών απορριμμάτων στην περιοχή Miyi, το υπόβαθρο στο οποίο τοποθετούνταν τα στείρα υλικά είχε φτωχές ιδιότητες με αποτέλεσμα να μην αντέξει το βάρος του τέλματος και να καταρρεύσει. Επίσης, σημαντικό ρόλο έπαιξε η απουσία αποστράγγισης του πρανούς και η βαριά βροχόπτωση πριν την κατολίσθηση.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία είναι εμφανές πως ο ανθρωπογενής παράγοντας διατελεί βασικό ρόλο στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων σε μεταλλευτικούς χώρους. Είτε δεν υπάρχει σωστός σχεδιασμός και διαστασιολόγηση των πρανών του ορυχείου, είτε υπάρχει αστοχία σε ληφθέντα μέτρα προστασίας των πρανών (αστοχία στα στραγγιστήρια ή και απουσία αποστράγγισης), είτε απλά η παρέμβαση μέσω της εξόρυξης, συντελούν στην ενεργοποίηση αστοχιών με καταστροφικές συνέπειες.

Συμπερασματικά, κρίνεται απαραίτητη η ενδεδειγμένη διερεύνηση με επιτόπιες έρευνες, γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες των συνθηκών που επικρατούν σε υποψήφιους χώρους εκμετάλλευσης, πριν την έναρξη των εξορυκτικών δραστηριοτήτων σε αυτούς. Επιπρόσθετα, επιτακτική είναι η ανάγκη εγκατάστασης ενός επαρκούς δικτύου παρακολούθησης, στους εν ενεργεία μεταλλευτικούς χώρους, με σκοπό την έγκαιρη και έγκυρη ανίχνευση φαινομένων όπως είναι οι κατολισθήσεις, με σκοπό την αποφυγή καταστροφικών συνεπειών.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βλάχος Θ., Ρούμπος Χ.** (2020) Διαχείριση κατολισθήσεων σε μεγάλα υπαίθρια ορυχεία.
- Λουπασάκης Κ.**, (2016) Σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος «Βελτιώσεις γεωτεχνικής συμπεριφοράς γεωλογικών σχηματισμών»
- Ρόζος Δ.**, (2007), *ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ*. Αθήνα
- Ρόζος Δ.**, (2013) Παρουσιάσεις Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας II, ΕΜΠ.
- Alfred Septiana, Marcelo A. Llano-Sernaa, Marc R. Ruesta, David J. Williams** (2017), Three-dimensional kinematic analysis of Bingham Canyon mine pit wall slides
- Asof M., Gofar N., Rivai A.** (2005) Analysis of landslide at outside dumping area, Air Laya coal mining site, Indonesia.
- Atzemoglou A, Tsourlos P, Pavlides S** (2003) Investigation of the tectonic structure of the NW part of the amynteon basin (NW Greece) by means of a vertical electrical sounding (VES) survey.
- Babcock, R.C., Ballantyne, G.H., and Phillips, C.H.** (1997) Summary of the Geology of the Bingham District, Utah, in, John, D.A. and Ballantyne, G.H., eds., *Geology and Ore Deposits of the Oquirrh and Wasatch Mountains*
- Behera P, Sarkar K, Singh A, Verma A, Singh T** (2016) Dump slope stability analysis—a case study.
- Blight G** (2008) Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review.
- Blight G, Fourie A** (2005) Catastrophe revisited-disastrous flow failures of mine and municipal solid waste.
- Bray, R.E., Lanier, G., John, E.C.** (1975), General Geology of the Open-Pit Mine, in *Guidebook to the Bingham Mining District*
- Chen H, Lee CF** (2003) A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes.
- Chen M, Lu W, Xin X, Zhao H, Bao X, Jiang X** (2016) Critical geometric parameters of slope and their sensitivity analysis: a case study in Jilin, Northeast China.
- Dimitrakopoulos D** (2001), Hydrogeological conditioning of Amyndeon mine. Problems during exploitation and overcoming them, PhD Thesis. NTUA—School of Mining and Metallurgical Engineering, NTUA, Athens.

- Dimitrakopoulos D, Koumantakis I** (2017) Hydrodynamic regime of Amynteon basin. Influence of open lignite mines. In: proceedings of the 11th international hydrogeological congress of Greece, Athens.
- Eid H, Stark T, Evans W** (2000) Municipal solid waste slope failure I: waste and underlying ground soil properties.
- Galetakis, M., Vasiliou, A., Roumpos, C., & Pavloudakis, F.** (2005). Developing Fuzzy Inference Systems (FIS) for the evaluation of multiplelayer lignite deposits.
- Goin, P. and C.E. Raymond** (2004), World's Biggest Hole: Creating and Re-creating Bingham Canyon, Utah, in Changing Mines in America
- Hadji R., Abderrazak S., Riadh B.** (2020) Back-Analysis Study on Slope Instability in an Open Pit Mine (Algeria).
- Haibin Wang, Guanhua Sun, Tan Sui** (2021) Landslide mechanism of waste rock dump on a soft gently dipping foundation: a case study in China.
- He MC, Feng JL, Sun XM** (2008) Stability evaluation and optimal excavated design of rock slope at Antaibao open pit coal mine, China.
- Huang Y, Fan G** (2016) Engineering geological analysis of municipal solid waste landfill stability.
- Jeffrey R. Moore, Kristine L. Pankow, Sean R. Ford, Keith D. Koper, J. Mark Hale, Jordan Aaron, and Chris F. Larsen,** (2017), Dynamics of the Bingham Canyon rock avalanches (Utah, USA) resolved from topographic, seismic, and infrasound data
- Johnson EA** (1990) Geology of the Fushun coalfield, Liaoning province, People's Republic of China.
- Kavouridis K** (2008) Lignite industry in Greece within a world context: mining, energy supply and environment.
- Kosich, D.,** (2013), Inside Bingham Canyon – N. American Mining's Largest, Most Successful Landslide
- Koukouzas, N.** (2007). Mineralogy and geochemistry of diatomite associated with lignite seams in the komnina lignite basin, Ptolemais, northern Greece.
- Koukouzas C, Kotis T, Ploumidis M, Metaxas A** (1979) Coal exploration

of Anargiri - Amynteon area, mineral deposit research.

Koukouzas C, Kotis T, Ploumidis M, Metaxas A (1981) Coal exploration of “Apophisis” field of Anargiri - Amynteon area, research for energy resources.

Lanier, G. (1975) Geologic Map of the Bingham Mine, Guidebook to the Bingham Mining District

Lanier, G., John, E.C., Swensen, A.J., Reid, J., Bard, C.E., Caddey, S.W., Wilson, J.C. (1978) General Geology of the Bingham Mine, Bingham Canyon, Utah

Lei Nie, Zechuang Li, Min Zhang, Lina Xu (2014) Deformation characteristics and mechanism of the landslide in West Open-Pit Mine, Fushun, China.

Lin C-W, Liu S-H, Lee S-Y, Liu C-C (2006) Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan.

Loupasakis C (2006) Study of the geotechnical conditions of the Amintaio coalmine slopes close to the Anargiri village, Aetos Municipality, Florina Prefecture, Greece, technical report. I.G.M.E, Athens

Loupasakis C (2010) Geotechnical study in the Anargiroi village, Aetos Municipality, Florina prefecture, Greece.

Loupasakis C, Angelitsa V, Rozos D, Spanou N (2014) Mining geohazards - land subsidence caused by the dewatering of opencast coal mines: the case study of the Amyntaio coal mine, Florina, Greece.

Lynn M. Highland & Peter Bobrowsky, (2008). The Landslide Handbook – A guide to understanding landslides.

Matsushi Y, Hattanji T, Matsukura Y (2006) Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan.

Mountrakis D, Tranos M, Papazachos C, Thomaidou E, Karagianni E, Vamvakaris D (2006) Neotectonic and seismological data concerning major active faults, and the stress regimes of Northern Greece.

Pavrides S (1985) Neotectonic evolution of the Florina—Vegoritida—Ptolemaida basin (W. Macedonia)

Petley, D. (2013) The Bingham Canyon Copper Mine Landslide, the Most Expensive Single Mass Movement in History.

- Phillips, C.H., Smith, T.W., and Harrison, E.D.** (1997), Alteration, Metal Zoning, and Ore Controls in the Bingham Canyon Porphyry Deposits, Utah
- Swensen, A.J.** (1975) Geologic Map of the Bingham District, Guidebook to the Bingham Mining District
- Swensen, A.J.** (1975), Sedimentary and Igneous Rocks of the Bingham District, in Guidebook to the Bingham Mining District
- Turner K., Schuster R.,** (1996) Landslides : investigation and mitigation
- Tooker, E.W.** (1999) Geology of the Oquirrh Mountains, Utah: U.S. Geological Survey Open-File Report
- Tooker, E.W. and Roberts, R.J.** (1988), Preliminary Geologic Map, Cross-Sections, and Explanation Pamphlet for the Bingham Canyon 7 ½-Minute Quadrangle, Salt Lake and Tooele Counties
- Valkaniotis, S., Ganas, A., & Papathanassiou, G.** (2017). Rapid Mapping of the Amyntaio-Anargyroi landslide (Western Macedonia, Greece) using combined remote sensing techniques.
- Vaziri A, Moore L, Ali H** (2010) Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines.
- Wallace, J. and Lowe, M.,** (2009) Ground-Water Quality Classification for the Principal Basin-Fill Aquifer, Salt Lake Valley, Salt Lake County, Utah
- Wang RX, Nie L** (2010) Landslide prediction in Fushun West Open Pit mine area with quadratic curve exponential smoothing method. In: 18th International Conference, Beijing, China.
- Wang ZG, Tian XB** (1999) Analysis on Mechanism and controlling measures of the landslide in limestone open-pit mine in Panzhihua.
- Ward J.** (2015) Bingham canyon landslide: analysis and mitigation.
- Wei Z, Yin G, Zhang D, Li D** (2003) Comprehensive dynamical control of the landslide disaster at the northern Zhetou Mountain.
- Whitehead, B.D. and Rampton R.E.** (2006), Bingham Canyon, in Whitley, From the Ground Up: The History of Mining in Utah
- Wu C, Yang Q, Zhu Z, Liu G, Li X** (2000) Thermodynamic analysis and simulation of coal metamorphism in the Fushun Basin, China.
- Xu C, Xu X, Pourghasemi HR, Pradhan B, Iqbal J** (2014) Volume, gravitational potential energy reduction, and regional centroid position

change in the wake of landslides triggered by the 14 April 2010 Yushu earthquake of China.

Zhang Lei, Wei Zuoran, Liu Xiaoyu & Li Shihai (2005) Application of three-dimensional discrete element face-to-face contact model with fissure water pressure to stability analysis of landslide in Panluo iron mine

Zhang SX (2009) Fushun Formation. In: Geological Formation Names of China (1866–2000), Beijing

Zhou JJ, Chen L, Fu ZL, Xie KK (2011) Study on geological hazards and countermeasures in Fushun mining area.

Zuoran Wei, Guangzhi Yin, Ling Wan, Louyan Shen (2007) Case history of controlling a landslide at Panluo open-pit mine in China