



«Διερεύνηση αστοχίας σε αποθέσεις στείρων υλικών λιγνιτωρυχείου του ΛΚΔΜ»

> Διπλωματική εργασία Θαλασσινάκης Γιάννης

Εξεταστική επιτροπή:

Στειακάκης Εμμανουήλ: Λέκτορας (επιβλέπων) Αγιουτάντης Ζαχαρίας: Καθηγητής Εξαδάκτυλος Γεώργιος: Καθηγητής

> Χανιά Οκτώβριος 2010

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο Διπλωματικής Εργασίας στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και έχει σαν θέμα την διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας που εκδηλώθηκε σε αποθέσεις στείρων υλικών λιγνιτωρυχείου του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας.

Στις 30 Απριλίου του 2004 εκδηλώθηκε ευρείας έκτασης κατολίσθηση στην εξωτερική απόθεση υπερκειμένων του ορυχείου Νοτίου Πεδίου (Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας) όπου το συνολικό ύψος της απόθεσης ήταν 110m. Η αστοχία συνοδεύτηκε από διαρροή υλικών προς τα κατάντη του χώρου απόθεσης και η διαταραχθείσα μάζα, είχε πλάτος στον πόδα της κατολίσθησης 600m, μήκος περίπου 1500m, πάχος μετακινούμενων υλικών 30-90m.

Σκοπός της εργασίας είναι η γεωτεχνική προσομοίωση της απόθεσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η διερεύνηση του μηχανισμού της κινητικής συμπεριφοράς.

Το πρόβλημα διερευνήθηκε με το λογισμικό πακέτο Plaxis 2D V.8, σε αντιπροσωπευτική τομή εγκάρσια στο πρανές. Χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb και πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις ευστάθειας σε κάθε στάδιο απόθεσης.

Η παραμετρική ανάλυση της ευστάθειας με βάση τη διαφοροποίηση της πιεζομετρίας που αναπτύσσονταν υπέδειξε τον πλέον πιθανό μηχανισμό που οδήγησε στην αστοχία.

i

Πρόλογος

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν και ιδιαίτερα:

• Τον επιβλέποντα κ. Στειακάκη Εμμανουήλ για την πολύτιμη βοήθεια και την άριστη συνεργασία που είχαμε σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

- Τον καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία μέλος της εξεταστικής επιτροπής,
- Τον καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

• Τον κ. **Βαβαδάκη Διονύση** για την βοήθεια του, και την εξυπηρέτηση του για θέματα του εργαστηρίου.

Θαλασσινάκης Γιάννης

Xavía 2010

Αφιερώνεται

Στην οικογένεια μου και τους φίλους μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή 1 -
Κεφάλαιο 2 Κατολισθήσεις – Κατακρημνίσεις 3 -
2.1 Κατηγορίες Κατολισθήσεων 5 -
2.2 Αιτίες των κατολισθήσεων 14 -
2.2.1 Μείωση των μηχανικών παραμέτρων14 -
2.2.2 Αύζηση του βάρους της επισφαλούς μάζας
2.2.3. Διαφοροποίηση της γεωμετρίας 16 -
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία των πρανών σε λιγνιτωρυχεία- 16
-
2.3.1 Γεωλογική δομή και ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών σε
λιγνιτωρυχεία 16 -
2.3.2 Υπεδαφικό νερό και διαφοροποίηση της πίεσης του νερού των πόρων 20 -
2.4 Εκτίμηση ευστάθειας 21 -
2.4.1 Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού πρανούς με μηδενική γωνία εσωτερικής
τριβής του γεωυλικού ($\varphi_u=0$) 22 -
2.4.2 Εκτίμηση της ευστάθειας μη ομογενών πρανών (Μέθοδος των Λωρίδων)- 24
-
2.5 Αντιμετώπιση των κατολισθήσεων 26 -
Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία 30 -
3.1. Γενικά 30 -
3.2 Φιλοσοφία επίλυσης των γεωμηχανικών προβλημάτων με τη ΜΠΣ 32 -
3.3. Διαίρεση του πεδίου 33 -
3.3.1. Είδη στοιχείων 33 -
3.3.2 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου 34 -
3.4. Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες
3.5. Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών 37 -

3.6 Κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών 38 -
3.6.1 Κριτήριο Mohr-Coulomb 39 -
3.6.2. Κριτήριο Tresca 40 -
3.6.3. Κριτήριο von Mises 40 -
3.6.4. Κριτήριο Drucker-Prager 41 -
Κεφάλαιο 4 Λογισμικό Plaxis 42 -
4.1 Εισαγωγή δεδομένων (Input) 42 -
4.1.1 Γενικές Ρυθμίσεις 43 -
4.1.2 Γεωμετρία προσομοιώματος 43 -
4.1.3 Φορτία και συνοριακές συνθήκες 44 -
4.1.4 Ιδιότητες υλικών 45 -
4.1.5 Δημιουργία δικτυώματος στοιχείων 51 -
4.1.6. Αρχικές συνθήκες (Initial Conditions) 52 -
4.1.7. Δημιουργία υδατικών Συνθηκών 52 -
4.1.8. Προσδιορισμός αρχικών συνθηκών γεωμετρίας
4.2 Υπολογισμοί (Calculations) 56 -
4.2.1 Γενικά υπολογιστικά στοιχεία 57 -
4.2.2. Παράμετροι υπολογιστικού ελέγχου (Parameters) 58 -
4.2.3. Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων
4.3. Αποτελέσματα (Output) 63 -
4.3.1 Παραμορφώσεις 63 -
4.3.2. Τάσεις 63 -
4.3.3 Διαγράμματα και τομές του προτύπου 64 -
4.4. Καμπύλες φορτίων – μετατοπίσεων και κατανομή φορτίων (Curves) 64 -
4.4.1 Δημιουργία καμπύλης 65 -
Κεφάλαιο 5 Κατολίσθηση εξωτερικής απόθεσης Νοτίου Πεδίου 67 -
5.1. Εισαγωγή 67 -
5.2 Γεωλογία – Υδρογεωλογία 71 -
5.3. Περιγραφή της κατολίσθησης 72 -
5.3.1 Γενική περιγραφή της διαταραχθείσας εζωτερικής απόθεσης 72 -

περασμένων στοιχείων	78
6.1 Εισαγωγή δεδομένων	78
6.1.1. Γενικές ρυθμίσεις (General settings)	78
6.1.2. Γεωμετρία	78
6.1.3. Γεωτεχνικές παράμετροι	79
6.1.4. Μέθοδος Αριθμητικής Ανάλυσης	- 82
6.1.5. Δημιουργία δυκτυώματος	- 82
6.1.6. Ορισμός πίεσης πόρων	82
6.2 Υπολογιστική Φάση	86
6.2.1. Ανάλυση του προβλήματος με ανύψωση υδροφόρου σ	ορίζοντα και συνθήκες
στράγγισης	- 88
6.2.2. Ανάλυση προβλήματος με ανύψωση υδροφόρου ορίζα	οντα και αστράγγιστες
συνθήκες	93
6.2.3. Ανάλυση προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργ	είται από το οριζόμενο
υδραυλικό φορτίο	94
6.3 Αποτελέσματα	98
6.3.1 Αποτελέσματα ανάλυσης με ορισμό υδροφόρου ορίζον	ντα και συνθήκες
στράγγισης	99
6.3.2 Ανάλυση με ορισμό υδροφόρου ορίζοντα και αστράγγι	ιστες συνθήκες 104
6.3.3 Ανάλυση προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργ	είται από υπόγεια ροή
και αστράγγιστες συνθήκες απόθεσης	109

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Προτάσεις	115	5	-
-------------------------------------	-----	---	---

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Την 30.04.2004 εκδηλώθηκε ευρείας έκτασης κατολίσθηση στην εξωτερική απόθεση του ορυχείου Νοτίου Πεδίου, η οποία συνοδεύτηκε από διαρροή των υλικών της διαταραχθείσας περιοχής προς τα κατάντι του χώρου απόθεσης. Λόγω της κατολίσθησης διακόπηκε η λειτουργία των αποθετών και των καδοφόρων εκσκαφέων των τομών υπερκειμένων και επί πλέον επηρεάσθηκε για βραχύ χρονικό διάστημα η διακίνηση λιγνίτη με ταινιόδρομους προς τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου (Steiakakis et al., 2008).

Το ορυχείο Νοτίου Πεδίου αποτελεί το μεγαλύτερο λιγνιτωρυχείο της ΔΕΗ και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης, με ετήσια παραγωγή λιγνίτη 18-22 Μτον. και ετήσιο ρυθμό συνολικών εκσκαφών περίπου 100 Mm³. Η διαταραχθείσα περιοχή, που περιέλαβε την κεντρική περιοχή της εξωτερικής απόθεσης, είχε πλάτος στον πόδα της κατολίσθησης 600m., μήκος περίπου 1500m, πάχος μετακινούμενων υλικών 30-90m. και συνολικό ύψος απόθεσης 110m. Η μάζα που διέρρευσε πέραν του ορίου της απόθεσης, ανήλθε σε περίπου 2,5 Mm³, ενώ ο συνολικός όγκος της απόθεσης, που επηρεάστηκε από το κατολισθητικό φαινόμενο εκτιμάται σε 40 Mm³. Οι μάζες, που μετακινήθηκαν καθώς και εκείνες που διέρρευσαν, είχαν αποτεθεί στην περιοχή αυτή σε διάφορες φάσεις, που ξεκίνησαν πριν από 25 χρόνια περίπου. Λίγο πριν την αστοχία είχαν αποτεθεί μόνο τα υλικά της τρίτης φάσης απόθεσης.

Η βάση (πόδι) της διαταραχθείσας απόθεσης ξεκίνησε να μετακινείται με ρυθμό 1-2 m/ώρα, μειώθηκε δραστικά μετά την παρέλευση 15 ημερών και αποσβέσθηκε πλήρως με την κατασκευή των ανασχετικών φραγμάτων μετά την παρέλευση δύο μηνών περίπου (Καβουρίδης 2008)

Για την σταθεροποίηση της κατολίσθησης απαιτήθηκε η κατασκευή ανασχετικού φράγματος (αναχώματος) μεταβαλλόμενης τραπεζοειδούς διατομής μήκους 1.500m μέγιστου ύψους 46m, πλάτους στη βάση 200m. και στη στέψη 40m και συνολικού όγκου 2.7 Mm³. Η δαπάνη που απαιτήθηκε για την κατασκευή των ανασχετικών φραγμάτων ανήλθε σε 3.2 Μ€, από την οποία 2.3 Μ€ αφορούν παραγωγική διακίνηση από τις τομές του ορυχείου. Οι ταχύτατες και αποτελεσματικές παρεμβάσεις περιόρισαν τις συνέπειες στη λειτουργία του ορυχείου σε απώλεια εκσκαφών 2,1 Mm³ (Καβουρίδης 2008).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση της απόθεσης και η διερεύνηση του μηχανισμού της κατολίσθησης με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο Plaxis 2D V8 σε δύο διαστάσεις.

Η εργασία αναπτύσσεται ως εξής:

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι μορφές κατολισθήσεων, οι αιτίες δημιουργίας τους, οι τρόποι αντιμετώπισης τους στα εδαφικά πρανή καθώς επίσης και οι μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας.

Η θεωρία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και μερικά από τα σημαντικότερα κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι δυνατότητες του λογισμικού Plaxis V8, που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της απόθεσης και την ανάλυση της κινητικής της συμπεριφοράς

Στο 5 κεφάλαιο αναφέρεται αναλυτικά το ιστορικό της κατολίσθησης στην περιοχή του Νοτίου Πεδίου στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας. Αναφέρονται τα στάδια δημιουργίας της απόθεσης το χρονικό της κατολίσθησης καθώς και τα μέτρα που εφαρμόστηκαν για τον περιορισμό και τον έλεγχό της.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία προσομοίωσης του προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Περιγράφεται το μοντέλο, αναφέρονται τα βήματα επίλυσης, οι γεωτεχνικές παράμετροι εδαφικών υλικών, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση καθώς και προτάσεις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την διερεύνηση του θέματος.

Κεφάλαιο 2 Κατολισθήσεις – Κατακρημνίσεις

Οι κατολισθήσεις είναι μετακινήσεις βράχων ή εδαφών που λαμβάνουν χώρα σε κεκλιμένες μορφολογικά επιφάνειες, με την επίδραση της βαρύτητας. Οι πιο κοινοί τύποι κατολισθήσεων είναι η : πτώση, η ολίσθηση και η ροή (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 . Κατολισθήσεις : (α) πτώση, (b) ολίσθηση, (c) ροή (Στειακάκης, 2008 με πηγή Johnson and DeGraff, 1988).

Η επικινδυνότητα μιας κατολίσθησης, εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται. Ο Varnes (1978) διακρίνει τις κατολισθήσεις, με βάση την ταχύτητα εξέλιξή τους, σε αργές μέτριες και γρήγορες (πίνακας 2.1).



Πίνακας 2.1 . Κλίμακα ρυθμού μετακίνησης των πρανών (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καλλέργης και Κούκης, 1985)

Είναι γεγονός ότι πολλές κατολισθήσεις, ανεξάρτητα του μεγέθους τους παρουσιάζουν κατά την διάρκεια της εξέλιξης τους μικτούς χαρακτήρες, δηλαδή τμήματα (ή και το σύνολο) της κατολισθαίνουσας μάζας παρουσιάζουν διαφορετικά στάδια ταχύτητας.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων αφορά το μέγεθος μετακίνησης της κατολισθαίνουσας μάζας, το οποίο επηρεάζει αποφασιστικά της κατασκευές και τα τεχνικά έργα που γίνονται για την προστασία των πρανών. Η μετακίνηση μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά χιλιόμετρα και θα πρέπει πάντα να εξετάζεται με συνδυασμό με την ταχύτητα εξέλιξης και τις διαστάσεις (σε όγκο) της κατολίσθησης. Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι οι κατολισθήσεις μεγάλης έκτασης, δεν αφορούν συνήθως μια κατολίσθηση, αλλά σμήνος μικρών και μεγάλων ομοειδών κατολισθήσεων, οι οποίες επειδή βρίσκονται κάτω από τους ίδιους ή παρεμφερείς μηχανισμούς γένεσης, εξελίσσονται ομαδικά ή αλυσιδωτά (Στειακάκης 2008).

2.1 Κατηγορίες Κατολισθήσεων

Από πολλούς ερευνητές έχει επιχειρηθεί η ταξινόμηση των κατολισθήσεων είτε με βάση παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση του φαινομένου, είτε με βάση διάφορες παραμέτρους της κατολίσθησης που μπορούν να μετρηθούν.

Ο Varnes (1978) έδωσε μια ταξινόμηση των κατολισθήσεων (σχήμα 2.2) με βάση τη γεωλογική σύσταση των σχηματισμών που κατολισθαίνουν, το είδος της κίνησης και τις συνθήκες εκδήλωσης τους (υγρασία γεωυλικών, μορφολογία πρανούς κ.ά.).

Γενικά στους βασικούς τύπους κατολισθήσεων περιλαμβάνονται: α) <u>οι</u> <u>πτώσεις</u>, β) <u>οι ανατροπές</u>, γ) <u>οι ολισθήσεις</u> (περιστροφικές και επίπεδες – μεταθετικές), δ) <u>οι πλευρικές διαστάσεις</u>, ε) <u>οι ροές</u>, στ) <u>ο ερπυσμός</u> και ζ) <u>οι</u> <u>σύνθετες μετακινήσεις</u>.

<u>Α) Πτώσεις.</u> Θεωρούνται οι ελεύθερες πτώσεις τμημάτων πετρώματος, ή πολύ σκληρού εδάφους (σχήμα 2.2 και σχήμα 2.5 –Falls), τα οποία αποσπώνται απότομα από κλιτείς με μεγάλη κλίση. Πολλές φορές εκδηλώνεται αρχικά μια ολίσθηση της εδαφικής μάζας ή του βραχώδους τεμάχους και στη συνέχεια ακολουθεί η πτώση (σχήμα 2.2).

Εκτός από τη μεγάλη κλίση του πρανούς, στην εκδήλωση των πτώσεων συντελούν:

- Η ευνοϊκή διάταξη των ασυνεχειών (επίπεδα στρώσης, διακλάσεις, ρήγματα)
 σε σχέση με τη μορφολογία
- Η πυκνότητα των ασυνεχειών,
- Η υποσκαφή και
- Η δράση του νερού (σε υγρή ή στερεή φάση).

Μια πολύ συνηθισμένη περίπτωση πτώσεων προκύπτει από την υποσκαφή της βάσης ενός πετρώματος, το οποίο βρίσκεται πάνω από ένα άλλο πιο ευαποσάθρωτο (σχήμα 2.3). Όταν η υποσκαφή προχωρήσει αρκετά, τότε το τμήμα του υπερκειμένου

πετρώματος που προεξέχει, αποκόπτεται και πέφτει λόγω του βάρους του, ή και με την επίδραση του νερού.

B) Ανατροπές. Η ανατροπή (σχήμα 2.4) προκύπτει από περιστροφική κίνηση ενός ή περισσοτέρων τεμαχίων, γύρω από ένα άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από τα κέντρα βάρους τους. Προκαλείται με τη βαρύτητα και της δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχη ή από το νερό το οποίο βρίσκεται μέσα στις ρωγμές του πετρώματος.

<u>Γ</u>) Ολισθήσεις.</u> Στις ολισθήσεις (σχήμα 2.5 – Slides) περιλαμβάνονται οι περιστροφικές και οι επίπεδες (ολίσθηση τεμάχους, ή ολίσθηση με πλευρική εξάπλωση). Η μετακίνηση προκύπτει από διατμητική παραμόρφωση των σχηματισμών και μετατόπιση κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, που μπορεί να είναι ορατές ή να τεκμαίρονται. Η κίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, η διατμητική θραύση μπορεί να μην αναπτύσσεται ταυτόχρονα σ' όλη την επιφάνεια αστοχίας, αλλά να επεκτείνεται σταδιακά αρχίζοντας από μια περιοχή τοπικής θραύσης.

- <u>Περιστροφικές ολισθήσεις (Rotational slides)</u>

Η πιο συνηθισμένη μορφή περιστροφικής ολίσθησης είναι η κάθηση (slump) (σχήμα 2.6, 2.7). Πρόκειται για ολίσθηση ως προς μια κοίλη επιφάνεια θραύσης. Οι καθήσεις, απλές ή σε συνδυασμό με άλλους τύπους κίνησης, αφορούν ίσως το μεγαλύτερο ποσοστό μετακινήσεων των πρανών.



Σχήμα 2.2. Πτώση βράχου που έπεται ολίσθηση (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καροτσιέρης, 1993)



Σχήμα 2.3. Πτώση βράχου λόγω υποσκαφής (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καροτσιέρης, 1993).



Σχήμα 2.4. Κατολίσθηση βράχου με ανατροπή (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καροτσιέρης, 1993).



Σχήμα 2.5. Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes (Στειακάκης, 2008 με πηγή Bell, 1992).







Σχήμα 2.7. Τυπική κατολίσθηση τύπου κάθησης στην οποία διακρίνονται τα επιμέρους τμήματα και χαρακτηριστικά στοιχεία (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καροτσιέρης, 1993)

- Επίπεδες ή μεταθετικές ολισθήσεις (Translational slides)

Στις επίπεδες η μεταθετικές ολισθήσεις η μαζα μετακινείται ως προς μια κατά προσέγγιση επίπεδη ή ομαλά κυματοειδή επιφάνεια, με πολύ μικρή περιστροφική κίνηση ή κάμψη (σχήμα 2.8), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καλλέργης, Κούκης, 1985). Μια μεταθετική ολίσθηση χαρακτηρίζεται σαν: α) ολίσθηση τεμάχους (block slide), όταν η κινούμενη μάζα αποτελείται από μια μόνο μονάδα που δεν είναι έντονα παραμορφωμένη ή από λίγες στενά συνδεδεμένες ομάδες και β) κερματισμένη ολίσθηση όταν η μετακινούμενη μάζα αποτελείται αποτελείται από τολλές ημιανεξάρτητες μονάδες. Η κίνηση στις μεταθετικές ολισθήσεις ελέγχεται συνήθως από επιφάνειες ασυνεχειών (όπως τα επίπεδα στρώσης, τα ρήγματα, τις ρωγμές) και τη διαφοροποίηση της διατμητικής αντοχής μεταξύ των επιφανειών αυτών. (Στειακάκης, 2008).



Σχήμα 2.8. Μεταθετκές ολισθήσεις (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καλλέργης, Κούκης, 1985).

Δ) Πλευρικές διατάσεις (Lateral spreads). Η κίνηση που επικρατεί στις κατολισθήσεις του τύπου αυτού είναι η πλευρική διάταση (έκταση) του γεωυλικού που διευκολύνεται από τις διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές (σχήμα 2.9). Διακρίνονται δύο τύποι πλευρικών διατάσεων:

Αυτές στις οποίες δεν υπάρχει μια σαφώς καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης
 ή ζώνη πλαστικής ροής που να ελέγχει τη κίνηση και

- Εκείνες στις οποίες προκαλείται κατακερματισμός και διάταση του συνεκτικού γεωυλικού.

Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου είναι πιθανόν να περιλαμβάνουν ενδείξεις περιστροφής, μετάθεσης αλλά και ροής και ως εκ τούτου οι πλευρικές διατάσεις μπορεί να θεωρηθούν και σαν σύνθετες μετακινήσεις.



Σχήμα 2.9. Πλευρικές εκτάσεις (Στειακάκης, 2008 με πηγή Varnes, 1978)

E) Poές (Flows). Πρόκειται για κατολισθήσεις στις οποίες παρατηρείται σχετική μετακίνηση των επιμέρους συστατικών της κινούμενης μάζας, η οποία μοιάζει με ένα παχύρευστο υγρό μεγάλου ιξώδους. Εκδηλώνεται μεγάλη παραμόρφωση του γωυλικού και έντονη διαφοροποίηση της εσωτερικής του δομής. Οι επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μάζα δεν είναι συνήθως ορατές, ενώ η ταχύτητα μετακίνησης είναι τις περισσότερες φορές γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη. Ροές εκδηλώνονται τόσο σε συνεκτικά (αργιλικά), όσο και σε ψαθυρά (αμμώδη) εδάφη. Επίσης, ροές εμφανίζονται και στα πλευρικά κορήματα που βρίσκονται σε απότομες πλαγιές.

Παράδειγμα εκδήλωσης ροής αποτελεί η κατολίσθηση που λαμβάνει χώρα όταν σημαντικές ποσότητες νερού εισχωρήσουν σε αργιλομιγή εδάφη, στα οποία διαμορφώνεται μια κατάσταση λίγο έως πολύ κοντά στο όριο υδαρότητας τους. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού και στην περίπτωση που η κλίση του πρανούς είναι ευνοϊκή, το γεωυλικό αρχίζει να ρέει. Μια χαρακτηριστική περίπτωση απορροής εμφανίζεται στις ευαίσθητες αργίλους, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί από πτώση βράχων.

<u>ΣΤ) Ερπυσμός.</u> Μερικές από τις μετακινήσεις που χαρακτηρίζονται σαν ροές, αναφέρονται από πολλούς συγγραφείς σαν ερπυσμός (creep). Ο Varnes (1978), πιστεύει ότι ο όρος «ερπυσμός» πρέπει να περιοριστεί στις αργές και συνεχείς παραμορφώσεις των γεωυλικών.

Όμως υπάρχουν διαφορετικές απόψεις σχετικά με τη φύση του ερπυσμού και οι απόψεις αυτές έχουν οδηγήσει συ σύγχυση. Η κατάσταση περιπλέκεται και από το γεγονός ότι ερπυσμός μπορεί να εκδηλωθεί σε διάφορους τύπους κατολισθήσεων (ανατροπές, ολισθήσεις, εκτάσεις και ροές). Ο Ter Stepanian (1980), μελετώντας το φαινόμενο, αναφέρει ότι ο ερπυσμός των πρανών αφορά μια αργή (μακράς διάρκειας) παραμόρφωση, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις προηγείται της κατολίσθησης. Ορίζει σαν ερπυσμό την παραμόρφωση που υφίσταται μια εδαφική μάζα σαν ενιαίο (συνεχές) σώμα. Εμφανίζεται σε εδάφη με μεγάλες δυνάμεις επαφής μεταξύ των κόκκων, σε αντίθεση με τα μη συνεκτικά (επιφανειακά) στρώματα, στα οποία η παραμόρφωση οφείλεται στη σχετική μετακίνηση των μεμονωμένων κόκκων που προκαλείται με τη βαρύτητα.

Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται ένα πρανές από την περιοχή της Κεντρικής Σλοβακίας με τυπική κίνηση ερπυσμού (Στειακάκης, 2008 με πηγή Zaruba and Mencl,1982). Το πρανές διαμορφώνεται σε ηφαιστειακούς σχηματισμούς που καλύπτονται από τεταρτογενείς αποθέσεις. Ο ερπυσμός που προκλήθηκε λόγω της έντονης μορφολογίας, έχει προκαλέσει αστοχίες, η εξέλιξη των οποίων είναι αρκετά γνωστή από το παρελθόν. Όσον αφορά την ανάλυση του φαινομένου, ο ερπυσμός στη ρεολογία των ιξωδοπλαστικών υλικών υποδηλώνει την αργή αύξηση της παραμόρφωσης τους με το χρόνο (κάτω από τη δράση σταθερών τάσεων που υπερέχουν συγκεκριμένου μεγέθους-ορίου), χωρίς η παραμόρφωση αυτή να φτάνει την τιμή που αντιστοιχεί στην αντοχή. Ο ερπυσμός εκδηλώνεται είτε στην περίπτωση που το όριο ερπυσμού είναι μικρό, είτε στην περίπτωση που ο βαθμός ενεργοποίησης (ο λόγος της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης προς την διατμητική αντοχή) της διαμτητικής αντοχής του γεωυλικού είναι υψηλός. Και οι δύο συνθήκες είναι δυνατόν να εμφανιστούν στα πρανή.



Σχήμα 2.10. Σχηματική τομή σε θέση που εκδηλώνεται ερπυσμός, στην λιγντοφόρα λεκάνη Handlova, Σλοβακία (Στειακάκης, 2008 με πηγή Zaruba and Mencl, 1982) (1-αργιλόλιθος, 2-γαιάνθρακας, 3-ανδεσίτης, 4-θεωρούμενη ζώνη διάτμησης, 5-πλευρικά κορήμματα, 6-ρήγμα, 7-πηγή)

Η πρώτη περίπτωση (υπο-επιφανειακός ερπυσμός) παρουσιάζεται σε επιφανειακά στρώματα. Όπου εξαιτίας της αποσάθρωσης και της εποχικής μεταβολής υγρασίας και θερμοκρασίας, η διατμητική αντοχή του εδάφους δεν είναι αρκετά υψηλή και ένα φαινόμενο ερπυσμού μπορεί να λάβει χώρα. Η δεύτερη περίπτωση (ερπυσμός βάθους) εμφανίζεται σε βάθος, όπου εξαιτίας της βαρύτητας και της αυξημένης συγκέντρωσης διατμητικών τάσεων, ο βαθμός ενεργοποίησης της διατμητικής αντοχής είναι μεγάλος. Κάτω από χαμηλά και μεσαία μεγέθη διατμητικών τάσεων, ο ρυθμός του ερπυσμού μειώνεται βαθμιαία, το φαινόμενο εξελίσσεται με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό και μπορεί να διαρκέσει δεκαετίες και εκατονταετίες. Όμως, κάτω από υψηλές διατμητικές τάσεις που προσεγγίζουν τη θραύση, ο ρυθμός του ερπυσμού αυξάνει με το χρόνο και το φαινόμενο ολοκληρώνεται με την αστοχία του πρανούς (Στειακάκης, 2008 με πηγή Ter Stephanian, 1980).

Ζ) Σύνθετες μετακινήσεις πρανών. Κατά κανόνα, οι μετακινήσεις των πρανών είναι συνδυασμός, περισσότερων του ενός τύπου μετακίνησης οι οποίοι περιγράφηκαν παραπάνω, (Στειακάκης, 2008 με πηγή Καλλέργης και Κούκης,1985) και χαρακτηρίζονται σαν σύνθετες μετακινήσεις. Ιδιαίτερα επικίνδυνες, σύνθετες μετακινήσεις, αποτελούν οι εξαιρετικά γρήγορες πτώσεις βράχων – ροές κορημάτων, που συχνά αναφέρονται και σαν «χιονοστιβάδες» πτώσεις βράχων (rock-fall avalanche). Οι μετακινήσεις του τύπου αυτού είναι πολύ συνηθισμένες στις ορεινές

περιοχές. Αναφέρεται ότι ένας τέτοιος τύπος μετακίνησης στο Eln της Ελβετίας στοίχισε 115 ζωές. (Στειακάκης 2008).

2.2 Αιτίες των κατολισθήσεων

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης εξαρτάται από τη γεωλογική σύσταση και δομή των σχηματισμών, την κλίση – μορφολογία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής, τασική κατάσταση) των γεωυλικών που δομούν το πρανές. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζουν το νερό (υγρασία, κατείσδυση, επιφανειακή και υπόγεια ροή) και τυχόν σεισμική δράση. Τα αίτια εκδήλωσης των κατολισθήσεων ομαδοποιούνται σε τρείς βασικές κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω:

2.2.1 Μείωση των μηχανικών παραμέτρων

α) Μείωση της συνοχής. Προκύπτει συνήθως από το υπόγειο νερό το οποίο προκαλεί απόπλυση διαλυτών ορυκτολογικών στοιχείων με συνέπεια τη μείωση της συνοχής του εδάφους. Σε περιπτώσεις υπερβολικά ευαίσθητων αργίλων, το νερό της κατείσδυσης είναι δυνατόν να μειώσει το ποσοστό των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων και να ελαττώσει τη συνοχή των εδαφών αυτών. Μείωση στη συνοχή επέρχεται και με την ανάπτυξη παγετού, ενώ οι μεταβολές στην εδαφική υγρασία και τον υδροφόρο ορίζοντα προκαλούν μεταβολές στον όγκο του γεωυλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της συνοχής λόγω των ρωγματώσεων που αναπτύσσονται από την εναλλαγή ξήρανσης – διαβροχής (συρρίκνωσης-διόγκωσης) του. Επίσης, ελλάτωση της συνοχής και ρευστοποίηση μπορεί να προκληθεί και από κραδασμούς υψηλής συχνότητας, οι οποίοι προέρχονται από σεισμούς ή εκρήξεις.

<u>β) Μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής.</u> Η απομάκρυνση των λεπτών κόκκων ενός εδάφους από το νερό (μέσω της εσωτερικής διάβρωσης), έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής του. Το νερό, επίσης, παίζει και το ρόλο λιπαντικού, κυρίως όταν διαποτίζει αργιλικά συστατικά τα οποία αποκτούν πλαστική ή και υδαρή συμπεριφορά.

<u>γ) Μείωση της ενεργής τάσης.</u> Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αυτό μπορεί να προκληθεί σε μια εδαφική μάζα με την άνοδο της πιεζομετρικής στάθμης, ή όταν το έδαφος καλυφθεί από νερά π.χ. στη λεκάνη κατάκλισης ενός φράγματος. Ιδιαίτερα στην περίπτωση βαχωδών πρανών, το νερό που πληροί τις ασυνέχειες, ωθεί μέσω της υδροστατικής πίεσης τα τεμάχη του πετρώματος προς το πρανές, ενώ το νερό στην επιφάνεια ολίσθησης προκαλεί μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια μείωση της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας (σχήμα 2.11)



Σχήμα 2.11. Επίδραση του νερού στην ευστάθεια του πρανούς (Στειακάκης, 2008 με πηγή Hencher, 1989)

2.2.2 Αύξηση του βάρους της επισφαλούς μάζας

Αυτή προκαλείται με:

α) Αύξηση του μοναδιαίου βάρους. Μπορεί να προκύψει με την προσθήκη νερού στον εδαφικό σχηματισμό από την επιφάνεια, ή με τριχοειδή ανύψωση από ένα χαμηλότερο επίπεδο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση του βάρους λόγω κορεσμού, αφορά την περίπτωση γεωυλικού που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το γεωυλικό βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, υφίσταται άνωση και το βάρος του μειώνεται.

<u>β) Φόρτιση με πρόσθετο βάρος.</u> Μπορεί να συμβεί ή με φυσική διεργασία ή με την παρέμβαση του ανθρώπου. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη συσσώρευση φερτών υλικών από προσχώσεις (κορήματα, πτώσεις βράχων), ενώ η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται στην φόρτιση με τις κατασκευές επιχωμάτων ή άλλων έργων στα πρανή.

2.2.3. Διαφοροποίηση της γεωμετρίας

Προκύπτει με αλλαγή της κλίσης του πρανούς ή και διαφοροποίηση του ύψους του. Ο κυριότερος φυσικός παράγοντας που προκαλεί αύξηση της κλίσης των πρανών είναι η διάβρωση τους από το νερό. Επίσης η δράση των κυμάτων της θάλασσας (ή μιας λίμνης) μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές στο ίδιο αποτέλεσμα. Η ανθρώπινη παρέμβαση αφορά τις εκχωματώσεις που γίνονται στις κάθε είδους ανοικτές εκσκαφές (για μεταλλευτικούς σκοπούς, συγκοινωνιακά έργα, την κατασκευή καναλιών, διωρύγων κλπ.). Ακόμη στην κατηγορία αυτή θα μπορούσαν να ενταχθούν και οι κάθε είδους επιχωματώσεις που δημιουργούνται νέα πρανή. (Στειακάκης 2008).

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία των πρανών σε λιγνιτωρυχεία

2.3.1 Γεωλογική δομή και ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών σε λιγνιτωρυχεία

Η διερεύνηση της κινητικότητας των πρανών, γίνεται πιο δύσκολη κάτω από σύνθετες γεωλογικέ και μορφολογικές συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν και τον τύπο της πιθανής αστοχίας (ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, σφήνα, ανατροπή). Δεδομένου ότι η πολυπλοκότητα των συνθηκών αυτών είναι θέμα τοπικού χαρακτήρα, η επίδραση της στρωματογραφίας και της τεκτονικής τεκμηριώνεται παρακάτω με αναφορά σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις (Στειακάκης 2008). Στρωματογραφία.

Οι ζώνες μετάβασης μεταξύ διαφορετικών πετρογραφικών οριζόντων έχουν πολλές φορές μειωμένη διατμητική αντοχή και συμβάλουν στην κινητικότητα των

- 16 -

πρανών. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα κατολισθήσεων στο λιγνιτωρυχείο του Newcastle (Αυστραλία), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Fell et al., 1988). Μειωμένη διατμητική αντοχή και διατμήσεις ως προς τις επιφάνειες στρώσης, προήλθαν από τη διαφορετική φόρτιση και συμπύκνωση των γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης, από διαφορικές κινήσεις κατά τη διάρκεια των πτυχώσεων και από την εκτόνωση των τάσεων κατά τη διαμόρφωση της σύγχρονης μορφολογίας.

Επίσης στο λιγνιτωρυχείο Himmetoglu (Τουρκία) τα επίπεδα στρώσης των υπερκείμενων του κοιτάσματος στρωμάτων, καλύπτονται από λεπτομερές υλικό που τα καθιστά ασταθή με αποτέλεσμα την αστοχία των πρανών (Στειακάκης, 2008 με πηγή Ulusay et al., 2001).

Μια από τις πιο σοβαρές καταστάσεις διαμορφώνεται όταν ψαθυρά στρώματα (όπως χαλίκια) υπέρκεινται πλαστικών στρωμάτων (αργίλων), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Zaruba and Mencl, 1982). Εξαιτίας της διαρροής των αργιλικών στρωμάτων, οι οριζόντιες (θλιπτικές) τάσεις στα χαλίκια μειώνονται. Η μείωση αυτή επηρεάζει αρνητικά τη διατμητική τους αντοχή (γωνία τριβής) και κατά συνέπεια τους συντελεστές ευστάθειας στο εσωτερικό του πρανούς.

Μια άλλη επισφαλής κατάσταση διαμορφώνεται όταν υπάρχουν διαπερατές (αμμώδεις) ενστρώσεις στη μάζα αργιλικών πρανών. Η διήθηση του νερού μέσω των διαπερατών στρώσεων εξασθενεί την υποκείμενη αργιλική μάζα και σε συνδυασμό με τεκτονικές ασυνέχειες μπορεί να προκαλέσει αστοχίες. Το φαινόμενο είναι συχνό στα πρανή των λιγνιτωρυχείων της Πτολεμαΐδος (Στειακάκης, 2008 με πηγή Kavvadas et al., 1992) και προκαλεί την προς τα κατάντη ολίσθηση τεμαχών.

Στην περίπτωση πολυστρωματικού σχηματισμού, η επιφάνεια αστοχίας διέρχεται όπως είναι φυσικό από το στρώμα με τη μικρότερη αντοχή. Στο ορυχείο Goonyella (Αυστραλία), η στρώση μιας υπο-οριζόντιας αργίλου μικρής διατμητικής αντοχής, αμέσως πάνω από τον γαιάνθρακα, απετέλεσε το επίπεδο διάτμησης του πρανούς, (Στειακάκης, 2008 με πηγή Mallett and Wooltorton, 1981).

Επίσης στο ορυχείο ανοικτής εκσκαφής Kislakoy (Τουρκία) αναπτύχθηκε μια σύνθετη αστοχία και το επίπεδο τμήμα της διέρχεται από τα στρώματα σαπροπηλού που υπέρκεινται του λιγνιτικού κοιτάσματος. Η ζώνη αυτή είναι ιδιαίτερα ανομοιογενής και περιέχει το πλέον αδύνατο γεωϋλικό της στρωματογραφικής ακολουθίας (Στειακάκης, 2008 με πηγή Ural kai Yuksel, 2004).

Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί ότι στον σύνθετο τύπο αστοχίας που συνήθως αναπτύσσεται σ' ένα πολυστρωματικό σχηματισμό, ο συντελεστής ευστάθειας δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από την κλίση του πρανούς. Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια, είναι η διατμητική αντοχή στο επίπεδο / υπο-οριζόντιο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας. Μικρό μέγεθος της αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε τμήμα της επιφάνειας αστοχίας. Μικρό μέγεθος της αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε κατολίσθηση και πρανή με ήπιες κλίσεις (σχήμα 2.12). Τέλος, η έρευνα αστοχιών σύνθετου τύπου σε Ελληνικά λιγνιτωρυχεία, έδειξε ότι η επιφάνεια αστοχίας αναπτύσσεται από τον πόδα προς τη στέψη του πρανούς (Leonardos, 2004).





<u>Τεκτονική</u>

Όσον αφορά τη συμβολή της τεκτονικής στην κινητικότητα των πρανών, τα ρήγματα από μόνα τους ή και σε συνδυασμό με τις επιφάνειες στρώσης είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην κινητικότητα μιας εδαφικής μάζας προς το εσωτερικό της εκσκαφής (σχήμα 2.13, A, B).

Ποιο συγκεκριμένα, ρήγματα κοντά στα πρανή με προσανατολισμό παράλληλα προς αυτά, μειώνουν την αντοχή σε διάταση της εδαφικής μάζας και επιτρέπουν τη διήθηση του νερού σε υποκείμενα, μικρότερης αντοχής, στρώματα. Επιπλέον, είναι δυνατόν να εμφανισθούν κινήσεις προς την εκσκαφή οι οποίες λαμβάνουν χώρα είτε ως προς τις επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής (σχήμα 2.13 B). Οι μονοκλινικές κάμψεις με κλίση προς την εκσκαφή (σχήμα 2.13 C) συμβάλλουν στη διαμόρφωση τέτοιων καταστάσεων (Στειακάκης, 2008 με πηγή Mallett and Wooltorton, 1981).



Σχήμα 2.13. Επίδραση των ρηγμάτων και των πτυχών στην ευστάθεια πρανών των λιγνιτωρυχείων - περιοχή Marica - Iztok, (Στειακάκης, 2008 με πηγή Mallett and Wooltorton , 1981) (Α - Κανονικό ρήγμα σε βαθμίδες εξόρυξης, Β - Ανάστροφο ρήγμα μικρής κλίσης, C - Αντικλινική κάμψη).

Ανάστροφες αναλύσεις μετρήσεις προέκυψαν και που από την παρακολούθηση των πρανών στο λιγνιτωρυχείο Himmetoglu (Τουρκία), υπέδειξαν ότι αστοχίες πρανών αναπτύχθηκαν με βάση το επίπεδο των επιφανειών στρώσης και τα ρήγματα. Οι αρμοί στρώσης συνέβαλαν στην ολίσθηση ως κεντρικές και βασικές επιφάνειες ολίσθησης, ενώ τα ρήγματα λειτούργησαν ως οι πίσω επιφάνειες αποχωρισμού της εδαφικής μάζας. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η ευστάθεια των πρανών του ορυχείου επηρεάζεται από το μέγεθος (έκταση) του κατώτερου τμήματος της βασικής επιφάνειας ολίσθησης, την κλίση της και την διατμητική της αντοχή (Στειακάκης, 2008 με πηγή Ulusay et al., 2001).

Σε τάσεις τεκτονικής προέλευσης αποδόθηκαν και οι μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στην εκμετάλλευση του Ορυχείου Braunkohlenbecken στο βορειοδυτικό Bohmen (Τσεχία), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Rybar, 1971). Το στρώμα γαιανθράκων που βρίσκεται ανάμεσα σε λιγότερο δύσκαμπτα αργιλικά στρώματα, συγκεντρώνει και αποθηκεύει τις τάσεις που προκύπτουν από την οριζόντια συνιστώσα του εντατικού πεδίου. Η συσσωρευμένη τάση μέσα στου γαιάνθρακες απελευθερώθηκε με την εκσκαφή, ο γαιάνθρακας στον πόδα του πρανούς παραμορφώθηκε έντονα με αποτέλεσμα τη θραύση.

<u>Ανισοτροπία</u>

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κινητικότητα των πρανών είναι η ανισοτροπία όσον αφορά την αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών και η οποία δρα αποτρεπτικά στην εκδήλωση προοδευτικής θραύσης. Όπως αναφέρουν οι Zaruba and Mencl (1982), η διατμητική αντοχή των περισσοτέρων αργίλων είναι μικρότερη κατά τη διεύθυνση της στρώσης σε σχέση με την αντοχή που επιδεικνύουν εγκάρσια σ' αυτή. Η διαφορά αυτή είναι συχνά της τάξεως του 15%. Επίσης η εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας υποδεικνύει διαφορές της τιμής του από θέση σε θέση σε μια θεωρούμενη επιφάνεια ολίσθησης. Οι διαφορές αυτές είναι μικρότερες συγκριτικά με την περίπτωση διαμόρφωσης του ίδιου πρανούς σε ισότροπο γεωλογικό σχηματισμό, και το γεγονός αυτό υποδηλώνει μικρότερη πιθανότητα εκδήλωσης προοδευτικής θραύσης (Στειακάκης, 2008 με πηγή Zaruba and Mencl, 1982).

2.3.2 Υπεδαφικό νερό και διαφοροποίηση της πίεσης του νερού των πόρων

Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων σ' ένα εδαφικό σχηματισμό, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια τη μείωση της διατμητικής του αντοχής. Ο μηχανισμός αυτός ήταν η κύρια αιτία αστάθειας των βορειοδυτικών πρανών στο λιγνιτωρυχείο Kislakov (Τουρκία), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Ural and Yuksel, 2004).

Η κατάσταση βέβαια μπορεί να βελτιωθεί με την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Εντούτοις, στην περίπτωση πολυστρωματικού σχηματισμού με αργίλους, λιγνιτικούς ορίζοντες και αμμώδεις ενστρώσεις, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχει περίπτωση το αντλούμενο νερό να προέρχεται από αμμώδεις ενστρώσεις των υπερκείμενων του λιγνίτη στρωμάτων και η υπό – οριζόντια επιφάνεια ολίσθησης να αναπτύσσεται στο στεγανό λιγνίτη ή τις αργιλώδεις – μαργαϊκές παρεμβολές (σχήμα 2.14). Στην περίπτωση αυτή, η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα δεν έχει σημαντική επίδραση στη ευστάθεια του πρανούς. Απεναντίας, στην περίπτωση που η υπό – οριζόντια επιφάνεια ολίσθησης αναπτύσσεται σ' ένα αργιλικό στρώμα το οποίο είναι σε επαφή με υδροφόρο στρώμα άμμου (εικόνα 2.13), η μείωση της πίεσης του νερού στο στρώμα της άμμου έχει μια άμεση και έντονα θετική επίδραση στη ευστάθεια των πρανών (Στειακάκης, 2008 με πηγή Leonardos, 2004).



Σχήμα 2.14 Μικρής κλίμακας αστοχία λόγω της υπερπίεσης του νερού (Στειακάκης, 2008 με πηγή Leonardos, 2004).

Μελετώντας τη διασταλτικότητα που επιδεικνύουν ορισμένα εδάφη, προκύπτει το συμπέρασμα ότι και το φαινόμενο αυτό επηρεάζει σημαντικά στη διαμόρφωση του μεγέθους της πίεσης των πόρων. Στην περίπτωση που εκδηλώνεται διασταλτικότητα, η αστοχία αναβάλλεται χρονικά, επειδή προκαλείται τοπική μείωση της πίεσης του νερού των πόρων (Στειακάκης, 2008 με πηγή Kirkebo et al., 1996). Γι' αυτό το λόγο, τα εδάφη που επιδεικνύουν διασταλτικότητα εμφανίζουν μια διατμητική αντίσταση στην επιφάνεια της αναπτυσσόμενης αστοχίας, ακόμα και μετά την πλήρη ενεργοποίηση της γωνίας τριβής. Αντίθετα, σε εδάφη που εμφανίζουν μείωση του όγκου κατά τη διάτμηση, προκαλείται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και η αστοχία επιταχύνεται.

2.4 Εκτίμηση ευστάθειας

Σε μια αστοχία τύπου ολίσθησης, θεωρείται ότι εκδηλώνεται θραύση ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία μιας (ή περισσοτέρων επιφανειών) και η μάζα κινείται ταυτόχρονα σαν ένα σώμα (ή και επί μέρους τμήματα). Η αστοχία του πρανούς προκύπτει από το γεγονός ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ολίσθησης υπερβαίνουν την διατμητική αντοχή των γεωυλικών. Οι περισσότερες μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας βασίζονται στη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Συνήθως θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr – Coulomb ($τ = c+\sigma_n tanφ$) ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό (α) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα και (β) της αντίστασης σε διάτμηση που αυτή επιδεικνύει. Στο σχήμα 2.15α παρουσιάζεται μια κυκλική αστοχία ενός ομογενούς πρανούς. Στην κατολισθαίνουσα μάζα ενεργεί το βάρος (W) που προκαλεί μια ροπή κίνησης (W*E). Σ' αυτή τη ροπή αντιστέκεται η διατμητική τάση (τ) που ενεργοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης (L) και αναπτύσσει μια ροπή αντίστασης (τ*L*R).

Στην περίπτωση επίπεδης ολίσθησης (σχήμα 2.15β), η διατμητική αντίσταση στο επίπεδο ολίσθησης (τ*λ), αντιστέκεται στην κινητήρια δύναμη που προκύπτει από την βαρύτητα (Wsinθ). Οι δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις, αφορούν απλές προσεγγίσεις του προβλήματος της ευστάθειας. Γενικά, σε όλες τις περιπτώσεις

υπολογίζεται ο συντελεστής ευστάθειας ΣΑ (factor of Safety, FS) ο οποίος ορίζεται σαν:

- ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς τις δυνάμεις που προκαλούν τη μετακίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας θραύσης, ή διαφορετικά σαν
- ο λόγος των ροπών αντίστασης προς τις ροπές που προκαλούν τη μετακίνηση γύρω από ένα σημείο.



Σχήμα 2.15. Δυνάμεις που ενεργούν σε κυλινδρικές και επίπεδες επιφάνειες αστοχίες. α) Περιστροφική κυλινδρική αστοχία, b) Ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια (Hunt, 1986).

2.4.1 Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού πρανούς με μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής του γεωυλικού (φ_u=0)

Η ανάλυση της ευστάθειας θεωρώντας ολικές τάσεις σε γεωυλικό με $\varphi_u=0$, αφορά την περίπτωση πλήρως κορεσμένων αργίλων κάτω από αστράγγιστες συνθήκες (δηλ. την κατάσταση αμέσως μετά την διαμόρφωση κορεσμένου αργιλικού πρανούς). Για την ανάλυση αυτή θεωρείται η ισορροπία των ροπών. Σε μια τομή του εδάφους (σχήμα 2.16), η πιθανή επιφάνεια ολίσθησης θεωρείται ότι έχει τη μορφή κυκλικού τόξου (με κέντρο Ο, ακτίνα r και μήκους τόξου La).



Εικόνα 2.16. Η ανάλυση της ευστάθειας με φ_u=0 (Στειακάκης, 2008 με πηγή Craig, 1983).

Η πιθανή αστοχία θα προκληθεί από το βάρος της εδαφικής μάζας που ορίζεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας (βάρος W με μοναδιαίο πάχος της τομής). Σε κατάσταση ισορρροπίας, εξισώνοντας τις ροπές γύρω από το σημείο O, ισχύει:

$$W \cdot d = \frac{c_u}{F} \cdot L_a \cdot r \Longrightarrow F = \frac{L_a \cdot c_u \cdot r}{W \cdot d}$$
(2.1)

Όπου : F= ο συντελεστής ασφάλειας,

 c_u = η συνοχή σε αστράγγιστες συνθήκες,

W= το βάρος της κατολισθαίνουσας μάζας,

L_a, r, d= τα γεωμετρικά στοιχεία που δίνονται στο σχήμα 2.16.

Οι ροπές οποιονδήποτε επιπλέον δυνάμεων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στην περίπτωση ύπαρξης ρωγμής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16, το μήκος του τόξου L_a μειώνεται ανάλογα. Επιπλέον όταν η ρωγμή είναι γεμάτη με νερό, η εφαρμογή μιας υδροστατικής πίεσης (P_w) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (Στειακάκης, 2008 με πηγή Craig, 1983). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να προσδιοριστεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας, είναι απαραίτητο να γίνουν αναλύσεις για ένα αριθμό θεωρούμενων επισφαλών επιφανειών ολίσθησης προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο επικίνδυνη κατάσταση. Σε πολλές περιπτώσεις, η απλή γεωμετρία και η θεώρηση ότι το πρανές είναι ομογενές, δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης της ευστάθειας με νομοδιαγράμματα Taylor (θεωρώντας ολικές τάσεις). Ο συντελεστής ασφάλειας της πλέον επισφαλούς μάζας προσδιορίζεται με βάση το ύψος του πρανούς και της γωνίας εσωτερικής τριβής φ_u του γεωυλικού σε αστράγγιστες συνθήκες. Εντούτοις στη πιο συνηθισμένη περίπτωση (ανομοιογενούς πρανούς, στο οποίο πιθανόν να αναπτύσσεται και υδροφόρος ορίζοντας), η διερεύνηση της ευστάθειας γίνεται με τη μέθοδο των λωρίδων.

2.4.2 Εκτίμηση της ευστάθειας μη ομογενών πρανών (Μέθοδος των Λωρίδων)

Για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών σε ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, θεωρείται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας η οποία οριοθετεί τη μάζα του εδάφους που μπορεί να ολισθήσει. Η μάζα αυτή χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες και η ισορροπία κάθε μιας εξετάζεται χωριστά. (σχήμα 2.17). Η ανάλυση των δυνάμεων για κάθε λωρίδα δίνει δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και μια εξίσωση ροπών.



Σχήμα 2.17. Η μέθοδος των λωρίδων. Ορισμός των λωρίδων και ανάλυση των δυνάμεων που επενεργούν σε κάθε λωρίδα (Στειακάκης, 2008 με πηγή Craig, 1983).

Δυστυχώς, ο προσδιορισμός της ορθής τάσης (N) στην επιφάνεια διάτμησης (σχήμα 2.17), είναι πρόβλημα αόριστο, επειδή ο αριθμός των εξισώσεων ισορροπίας είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγνώστων. Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται βάσει παραδοχών (για μείωση των αγνώστων) που αφορούν κυρίως τη διεύθυνση ή/και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων. Έτσι έχουν προκύψει διάφορες μέθοδοι επίλυσης, ανάλογα με τις θεωρούμενες παραδοχές.

Η μέθοδος Fellenius (ή Σουηδική μέθοδος), η οποία είναι και η παλαιότερη, δεν λαμβάνει υπόψη της όλες τις δυνάμεις που επενεργούν στην κάθε λωρίδα. Παραλείπει τις διατμητικές, τις ορθές τάσεις και τις πιέσεις πόρων που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας- θεωρεί δηλαδή ότι η συνιστάμενη των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων είναι μηδενική. Η παραδοχή αυτή οδηγεί συνήθως σε υπο-εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας κατά 10-15%, ενώ στην περίπτωση απότομων πρανών σε σχηματισμούς με μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής, η υπο-εκτίμηση αυτή μπορεί να πλησιάσει και το 60%, (Στειακάκης, 2008 με πηγή Hunt, 1986).

Για την εκτίμηση της ευστάθειας, το πρανές σχεδιάζεται υπό κλίμακα και η θεωρούμενη μάζα αστοχίας χωρίζεται σε λωρίδες. Θεωρούνται οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα λόγω του βάρους της, ενώ με βάση την πιεζομετρική επιφάνεια εκτιμάται και η πίεση των πόρων (u) στη βάση της λωρίδας (σχήμα 2.17). Κάθε μία από τις δυνάμεις αυτές αναλύονται σε μια κάθετη και μία παράλληλη στην επιφάνεια διάτμησης συνιστώσα και θεωρώντας ισορροπία δυνάμεων σε κάθε λωρίδα (σχήμα 2.17) προκύπτει ότι:

$$N' = W \cdot \cos a - u \cdot l \tag{2.2}$$

Ο συντελεστής ασφάλειας (FS) προσδιορίζεται από τις ροπές ως προς το κέντρο του υπό εξέταση κυκλικού τομέα και δίδεται από τη σχέση (θεωρώντας ενεργές τάσεις):

$$FS = \frac{c' \cdot \sum l + \tan \phi' \cdot \sum (W \cos a - u \cdot l)}{\sum W \sin a}$$
(2.3)

Θεωρώντας διάφορες επιφάνειες ολίσθησης, πραγματοποιούνται επιλύσεις για κύκλους με διαφορετικές ακτίνες και κέντρα, οπότε εντοπίζεται η κρίσιμη επιφάνεια, ο κύκλος δηλαδή με τον μικρότερο συντελεστή ασφάλειας που προσδιορίζει και την ευστάθεια του πρανούς.

Η τροποποιημένη (Modified) μέθοδος Bishop αφορά μια απλούστευση της αρχικής πρότασης του Bishop (complete Bishop method). Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος και θεωρεί ότι οι εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων (σχήμα 2.17) είναι αρκετά μικρές και μπορούν να παραληφθούν. Οι ορθές τάσεις στην επιφάνεια διάτμησης, προσδιορίζονται θεωρώντας ισορροπία δυνάμεων κατά την κατακόρυφο διεύθυνση. Σε κατάσταση ισορροπίας, η διατμητική τάση στη βάση κάθε λωρίδας προσδιορίζεται από τη σχέση

$$T = \frac{1}{FS_1} \left(c' \cdot l + N' \cdot \tan \phi' \right)$$
(2.4)

Αναλύοντας τις δυνάμεις ως προς την κατακόρυφο διεύθυνση, προκύπτει ότι σε κατάσταση ισορροπίας ισχύει:

$$W = N' \cdot \cos a + u \cdot l \cdot \cos a + \frac{c' \cdot l}{FS_1} \cdot \sin a + \frac{N'}{FS_1} \tan \phi' \cdot \sin a \Longrightarrow$$

$$N' = \left(W - \frac{c' \cdot l}{FS_1} \sin a - u \cdot l \cdot \cos a\right) / \left(\cos a + \frac{\tan \phi' \cdot \sin a}{FS_1}\right)$$
(2.5)

Επίσης ένας συντελεστής ασφάλειας (θεωρώντας τις ροπές ως προς το κέντρο του κυκλικού τομέα), υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$FS_2 = \frac{\sum (c' + N' \cdot \tan \phi') \cdot l}{\sum W \cdot \sin a}$$
(2.6)

Αντικαθιστώντας τη σχέση 2.5 στην 2.6 προκύπτει ότι:

$$FS_2 = \frac{\sum (c + (W - u \cdot l) \tan \phi')}{\sum W \cdot \sin a} \cdot 1/m_a$$
(2.7)

Όπου
$$m_a = \cos a \cdot \left(1 + \tan a \frac{\tan \phi'}{FS_1}\right)$$
 (2.8)

Συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται και στις δύο πλευρές της εξίσωσης. Υποθέτοντας την τιμή του FS₁, υπολογίζεται ο FS₂ στο άλλο σκέλος της εξίσωσης και η διαδικασία συνεχίζεται με τη μέθοδο προσέγγισης μέχρις ότου FS₁ = FS₂. Οι λύσεις συγκλίνουν ταχύτατα και δίνουν αποτελέσματα ελάχιστα μικρότερα από αυτά της αρχικά προτεινόμενης μεθόδου Bishop (complete method), (Στειακάκης, 2008 με πηγή Hunt,1986). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά οι μέθοδοι Bishop δίδουν υψηλές τιμές συντελεστών ασφάλειας (FS), όταν η γωνία της επιφάνειας αστοχίας στο κατώτερο τμήμα του πρανούς προσεγγίζει τις 30°. Η γωνία αυτή διαμορφώνεται όταν οι κύκλοι αστοχίας είναι βαθείς ή το κέντρο του βρίσκεται ακριβώς πάνω από την κορυφή του πρανούς (Στειακάκης, 2008 με πηγή Craig,1983).

Τέλος, με αναλύσεις όπως των Jambu και Sarma, είναι δυνατόν να θεωρηθούν επιφάνειες αστοχίας διάφορες της κυκλικής. (Στειακάκης, 2008).

2.5 Αντιμετώπιση των κατολισθήσεων

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, η εκδήλωση μιας κατολίσθησης εξαρτάται από:

- α) τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων και εδαφών που συμμετέχουν στην κατολίσθηση.
- β) το βάρος τους

γ) τη γεωμετρία του πρανούς

Συνεπώς, εάν θέλουμε να αντιμετωπίσουμε μια κατολίσθηση θα πρέπει να επέμβουμε μεμονωμένα ή συνδυασμένα για τη βελτίωση των παραγόντων που υπεισέρχονται στις παραπάνω κατηγορίες. Συνήθως παρεμβαίνουμε με:

- α) αποστράγγιση,
- β) μείωση του βάρους (διαφοροποίηση κλίσης ή και ύψους των πρανών)
- γ) αντιστηρίξεις και
- δ) βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών.

Στις ενότητες που ακολουθούν, αναλύονται τα πιο συνήθη μέτρα αντιμετώπισης που λαμβάνονται για την ανατροπή – έλεγχο του φαινομένου.

Τα κυριότερα μέτρα που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση των κατολισθήσεων όπως αναφέρει ο Καροτσιέρης (1993), είναι:

 Η διευκόλυνση της επιφανειακής απορροής του νερού και η παρεμπόδιση της κατείσδυσης του. Επιτυγχάνεται α) με την εξομάλυνση της επιφανείας του εδάφους (απομάκρυνση κάθε εμποδίου στην κίνηση του νερού, κλείσιμο κοιλοτήτων ή οπών),
 β) με το κλείσιμο των ανοικτών εφελκυστικών ρωγμών και γ) με τη δημιουργία δικτύου αποχέτευσης.

2) Η Υπόγεια αποστράγγιση

Επιτυγχάνεται με διάφορα μέσα, όπως ανοικτά στραγγιστήρια (κανάλια που κατασκευάζονται με κλίση και φθάνουν μέχρι το σταθερό υπόβαθρο μιας κατολίσθησης), σήραγγες αποστράγγισης (όταν δεν μπορούν να γίνουν στραγγιστήρια λόγω μεγάλου πάχους της ασταθούς μάζας) και φρέατα. Κατά το σχεδιασμό της αποστράγγισης, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίδεται στους γεωλογικούς παράγοντες όπως η στρωματογραφία και η τεκτονική (σχήμα 2.18).

3) Η ελάττωση τις κλίσης του πρανούς

Εφαρμόζεται συνήθως σε τεχνητά αλλά και σε φυσικά πρανή. Πολλές φορές για να επιτευχθεί η ελάττωση της κλίσης, τα πρανή διαμορφώνονται σε βαθμίδες.

4) Η φόρτιση στον πόδα του πρανούς

Πρόκειται για απλή επιφανειακή φόρτιση στο κάτω μέρος του πρανούς που σκοπό έχει να αυξήσει το βάρος του τμήματος εκείνου που δρα ανασταλτικά στην κατολίσθηση.

5) Η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης

Πρόκειται για κατασκευές που γίνονται στη βάση επισφαλών πρανών. Η θεμελίωση των τοίχων γίνεται σε βάθος που καθορίζεται από τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης. Όταν η επιφάνεια αυτή βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, οι τοίχοι αντιστήριξης θεμελιώνονται πάνω σε οπλισμένους πασσάλους που φθάνουν βαθύτερα της επιφάνεια ολίσθησης.

Επειδή η υλοποίηση των προαναφερόμενων μέτρων δεν είναι πάντα εφικτή και η κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων οδηγεί πολλές φορές σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα (π.χ. επιφορτίσεις-εκσκαφές πρανούς), προκύπτει συχνά η ανάγκη να υιοθετηθούν και μέτρα βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων και εδαφών και πετρωμάτων ή και συνδυασμένα μέτρα.



Σχήμα 2.18. Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποστράγγιση (Στειακάκης, 2008 με πηγή Hencher, 1987).

Στα μέτρα βελτίωσης περιλαμβάνονται:

6) Η ηλεκτρόσμωση

Πρόκειται για έναν τρόπο υπόγειας στράγγισης που έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των κορεσμένων αργιλομιγών εδαφών. Η απομάκρυνση του νερού επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, το
οποίο αναπτύσσεται από δύο ηλεκτρόδια που βυθίζονται στο έδαφος. Το νερό οδεύει προς την άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο), όπου συγκεντρώνεται και απομακρύνεται.

7) Ενέματα με τσιμέντο ή άλλα χημικά υλικά

Εφαρμόζεται σε μη συνεκτικά εδάφη και έχει σκοπό τη σταθεροποίηση τους. Το ένεμα μπορεί να είναι είτε από τσιμέντο, είτε από άλλα χημικά ρευστά υλικά που πολυμεριζόμενα στερεοποιούνται. Η μέθοδος ενέσεως μίγματος ασβέστου χρησιμοποιείται επίσης για την αύξηση της συνοχής, αλλά έχει περιορισμένη επιτυχία (Καλλέργης και Κούκης, 1985).

8) Η μέθοδος ιοντο-ανταλλαγής

Αφορά μέθοδο που εφαρμόζεται με σκοπό την αύξηση της συνοχής του εδάφους. Συνίσταται στην «αντίδρασης» των αργιλικών ορυκτών με κατάλληλο διάλυμα, που επιλέγεται ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση του εδάφους και τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Ορισμένα κατιόντα των αργιλικών ορυκτών αντικαθίστανται από κατιόντα που εισάγονται με το χημικό διάλυμα. Η αντικατάσταση αυτή προκαλεί την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους έως και 200-300% (Καλλέργης και Κούκης, 1985). Πολλές φορές η αύξηση αυτή είναι αρκετή για την σταθεροποίηση της κατολισθαίνουσας μάζας.

9) Αγκυρώσεις

Εφαρμόζονται κατά κανόνα σε βραχώδη πρανή και έχουν σαν σκοπό να συγκρατήσουν στη θέση τους ασταθή τμήματα βράχου. Πρόκειται για μεταλλικές βέργες διαφόρων μεγεθών, οι οποίες διατρυπώντας την ασταθή μάζα, εισέρχονται σε σταθερό τμήμα του πετρώματος και σταθεροποιούνται μέσα σ' αυτό. Οι αγκυρώσεις μπορεί να είναι απλές ή και προ-εντετεταμένες. Όταν η επισφαλής μάζα που πρόκειται να αγκυρωθεί δεν είναι συμπαγής και συνεχής (ημίβραχος), τότε κατασκευάζονται δοκοί διανομής των τάσεων και πάνω σ' αυτό στερεώνονται τα αγκύρια.

10) Φυτοκάλυψη

Εφαρμόζεται για προστασία από τη διάβρωση και καθήλωση των κινητών γαιών στο υγιές υπόβαθρο. Το μέτρο αυτό έχει και δυσμενείς επιπτώσεις, όπως την αύξηση της κατείσδυσης του νερού (Στειακάκης, 2008).

Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία

3.1. Γενικά

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στη συνέχεια, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου με τους κόμβους του στοιχείου αυτού.

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης των υλικών) σε δύο ή τρείς διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Αγιουτάντης 2002):

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα (σχήμα 3.1)
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain-displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress-strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equations)
- Υπέρθεση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσανατολισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών

- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου
- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κλπ)
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Οι πρώτες εφαρμογές της ΜΠΣ σε θέματα εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής ή γενικότερα γεωμηχανικής, εμφανίστηκαν αμέσως μετά την ανάπτυξη της μεθόδου σε θέματα αεροναυπηγικής και αντοχής υλικών. Για την εφαρμογή, όμως, της μεθόδου σε γεωτεχνικά προβλήματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι δεν υφίστανται στα άλλα πεδία εφαρμογής. Ο σημαντικότερος ίσως παράγοντας είναι ότι τα γεωυλικά δεν ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο καταστατικής συμπεριφοράς (π.χ. ελαστικό, ελαστοπλαστικό, πλαστικό, βισκοελαστικό, κλπ.), καθόσον από τη φύση του είναι ανομοιογενή. Πρόσθετα προβλήματα εμφανίζονται από την ύπαρξη διακλάσεων, επιπέδων διαστρώσεων, κλπ.

Εξαιτίας των ανωτέρω δυσκολιών, στις περισσότερες εφαρμογές λαμβάνονται απλοποιημένα πρότυπα υλικών και συμπεριφοράς, γεγονός που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή της μεθόδου. Παρ' όλα αυτά, η ΜΠΣ είναι πολύ χρήσιμη στην εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός σχηματισμού, καθώς προσφέρει δυνατότητες λεπτομερούς περιγραφής ενός σχηματισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό δεν επιλύει το χρόνιο πρόβλημα που εμφανίζεται στα γεωτεχνικά προβλήματα ή έργα και το οποίο είναι η έλλειψη επαρκών και επακριβών στοιχείων όσον αφορά στην κατανομή των ιδιοτήτων των διαφόρων φυσικών υλικών.

3.2 Φιλοσοφία επίλυσης των γεωμηχανικών προβλημάτων με τη ΜΠΣ

Η επίλυση γεωμηχανικών προβλημάτων με τη ΜΠΣ παρουσιάζεται στη συνέχεια με γνώμονα τα ακόλουθα (Αγιουτάντης, 2002):



Σχήμα 3.1. Διαίρεση πεδίου

- Η ΜΠΣ αποτελεί βασικά μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς.
- Το πεδίο ορισμού (domain) των εξισώσεων αυτών απαιτεί κυρίως συνεχή μέσα. Όταν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν ασυνέχειες στην περιγραφή του μέσου, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ασυνεχειών, τα οποία εξασφαλίζουν μεν μια μαθηματική συνέχεια με το υπόλοιπο μέσο, αλλά χαρακτηρίζονται από μια χαλαρότητα σε σχέση με τα συνήθη στοιχεία.
- Στην περίπτωση επίλυσης προβλημάτων μηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, κίνησης ρευστών σε πορώδη μέσα, κλπ, είναι δυνατόν να δοθεί μια γεωμετρική περιγραφή της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα και επομένως είναι εύκολη η κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου. Η επίλυση γενικευμένων διαφορικών εξισώσεων ξεφεύγει από το αντικείμενο αυτής της ενότητας.
- Η καταστατική εξίσωση συμπεριφοράς του υλικού, η οποία επιλύεται στο συγκεκριμένο μέσο, συνδέει ουσιαστικά το αίτιο (π.χ. δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (π.χ. μετατόπιση, παραμόρφωση) που αποτελεί το άγνωστο μέγεθος.



Σχήμα 3.2. Είδη στοιχείων.

3.3. Διαίρεση του πεδίου

3.3.1. Είδη στοιχείων

Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της ΜΠΣ είναι η διακριτοποίηση (διακεκριμενοποίηση – descretization) ή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα (elements) με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμα ή καμπύλα τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν του κόμβους (nodes) του πλέγματος ή καννάβου διακριτοποίησης του προβλήματος (grid or mesh).

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών, όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και περιπτώσεις, όπου υπάρχουν παραπάνω κόμβοι που περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκταμβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ (σχήμα 3.2).

Ουσιαστικά σε κάθε κόμβο αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο και το αποτέλεσμα με την έννοια που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου (degrees of freedom) αναφέρεται στο σύνολο των αγνώστων μεταβλητών που αντιστοιχούνται σε κάθε στοιχείο.

Επίσης τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πώς συνδέεται η συμπεριφορά και κατ' επέκταση οι ιδιότητες τους με τα μεγέθη που αντιστοιχούνται στους κόμβους τους. Έτσι ένα γραμμικό στοιχείο το οποίο ουσιαστικά παριστάνει μία ράβδο με τις κατάλληλες ιδιότητες (με η χωρίς μάζα) ανάλογα με το εξεταζόμενο πρόβλημα, μπορεί να έχει δύο ή περισσότερους κόμβους και 1,2,3, ή και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο ανάλογα με τη διάσταση του προβλήματος.

Τα επίπεδα στοιχεία μπορεί να παριστάνουν επιφάνειες σε δισ- ή τρισδιάστατα προβλήματα. Στις συνήθεις περιπτώσεις των προβλημάτων μηχανικής κάθε κόμβος έχει δύο ή τρείς βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης του κόμβου. Εάν οι κόμβοι μεταφέρουν ροπές, τότε οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο μπορεί να αυξηθούν κατά έναν στις δύο διαστάσεις και κατά τρεις στις τρεις διαστάσεις. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές, είναι συνήθης η χρήση τριγωνικών ή τετραπλευρικών (επίπεδων) στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν τμήματα υλικού, των οποίων η τρίτη διάσταση είναι μοναδιαία (στις περιπτώσεις όπου είναι δυνατή μία τέτοια απλοποιητική παραδοχή).

3.3.2 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου

Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη ΜΠΣ είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας κάθε στοιχείου
- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου
- Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών.

Για παράδειγμα στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας ενός στοιχείου με την προσθήκη περισσότερων κόμβων όπως για παράδειγμα η χρήση τετραπλευρικού στοιχείου με οκτώ κόμβους.

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η μεταβαλλόμενη διακριτοποίηση του μέσου, στην περίπτωση προσομοίωσης κυκλικού ανοίγματος.



Σχήμα 3.3. Μεταβαλλόμενη γεωμετρία στοιχείων.

Η επιλογή των συναρτήσεων που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους, συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και με τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται συναρτήσεις μορφής (Αγιουτάντης, 2002).

3.4. Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες

Μετά τη δημιουργία των καταστατικών εξισώσεων για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να ενσωματωθούν και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Πρέπει δηλαδή να εφαρμοστούν περιοριστικές δυνάμεις ώστε να κρατούν το μοντέλο σε ισορροπία. Η φόρτιση των υλικών ή αντίστοιχα η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί με ένα ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους

- Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου(π.χ. βαρυτικές)
- Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις)
- Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις)
- Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

Όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν κατάλληλα σε κομβικές, οι οποίες συμμετέχουν στην επίλυση κάθε προβλήματος. Στο σχήμα 3.4 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται κατά την προσομοίωση φόρτισης κυλινδρικού δοκιμίου σε δύο διαστάσεις, όπου με την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, μπορεί να αξιοποιηθεί η συμμετρία του ορθογωνικού μοντέλου.



Σχήμα 3.4. Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου.

Υπάρχουν τρείς τύποι συνοριακών συνθηκών:

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες
 αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές και ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.
 Στη περίπτωση προβλημάτων ελαστικότητας, οι γεωμετρικές συνθήκες

δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$u_x = u_0 \tag{3.1}$$
$$u_y = v_0$$

Όπου u_x και u_y οι μετατοπίσεις στους κόμβους και u₀, υ₀ οι αντίστοιχες συνιστώσες μετατοπίσεων που επιβάλλονται στον κόμβο. Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$f_x = f_0$$

$$f_y = w_0$$
(3.2)

Όπου f_x και f_y οι κομβικές δυνάμεις και f_0 , w_0 οι αντίστοιχες συνιστώσες δυνάμεων που επιβάλλονται στον κόμβο.

Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται ο τυπικός συμβολισμός των συνοριακών συνθηκών στις περιπτώσεις προβλημάτων φορτίσεων – παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης (Αγιουτάντης 2002).



Σχήμα 3.5, Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών.

3.5. Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών.

Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο (παρόλο που το μοντέλο αυτό δε θεωρείται το πλέον κατάλληλο

για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών) σε μια ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} [\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{\kappa\kappa} \delta_{ij}]$$
(3.3)

Όπου σ_{ij} = ο τανυστής των τάσεων που υποδεικνύει την εντατική κατάσταση στο σώμα,

Ε = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού,

 $v = o \lambda όγος Poisson του υλικού,$

 $ε_{ij} = 0$ τανυστής των παραμορφώσεων,

εκκ = το άθροισμα των κυρίων παραμορφώσεων,

 δ_{ij} = ο μοναδιαίος τανυστής (δέλτα του Kronecker)

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι:

$$\sigma = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{3.4}$$

Όπου σ = η τάση που επιβάλλεται στο υλικό

Ε = το μέτρο ελαστικότητας του,

ε = η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται.

Επιπλέον αυτών, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν άλλα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς, όπως μοντέλα μη ισοτροπικής (ορθοτροπικής ή ανισοτροπικής) ελαστικής συμπεριφοράς, καθώς και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης, καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή μεν, αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατόν να οριστούν διαφορετικά μοντέλα υλικού σε διάφορα σημεία του σώματος.

3.6 Κριτήρια αστοχίας των γεωυλικών

Λόγω της φόρτισης ενός υλικού, υπάρχει περίπτωση, να επέλθει αστοχία αυτού, οπότε μαζί με την καταστατική συμπεριφορά του πρέπει να οριστεί και το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας ή διαρροής του υλικού.

Τα κριτήρια (μοντέλα) αστοχίας των υλικών είναι δυνατόν να επιδράσουν με δύο τρόπους:

- Είτε να θεωρήσουν ότι ένα στοιχείο αστοχεί, όταν η εντατική κατάσταση που δέχεται το υλικό υπερβαίνει το όριο αντοχής του και επομένως να εμποδίσει το στοιχείο αυτό να δεχτεί μια ανώτερη εντατική κατάσταση.
- Είτε να τροποποιήσουν (μειώσουν κατάλληλα) τις ελαστικές (ή πλαστικές)
 σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιάσουν την αστοχία, με την
 θεώρηση ότι στο υλικό αστόχησε στην παραπάνω εντατική κατάσταση.

Κατά την προσομοίωση, οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να επαναλαμβάνονται μέχρις ότου είτε αστοχήσουν όλα τα στοιχεία ενός σώματος, είτε σταθεροποιηθεί η κατάσταση και δεν υπάρχουν πλέον αλλαγές στα στοιχεία, είτε εάν η διαδικασία σταματήσει λόγω υπέρβασης του μέγιστου κύκλου επαναλήψεων της διαδικασίας επίλυσης.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά για πετρώματα και εδαφικά υλικά είναι το κριτήριο των Mohr-Coulomb, ενώ εφαρμογή έχουν και τα κριτήρια των Tresca, Von Misses, Drucker-Prager, κλπ. Σημειώνεται ότι συχνά χρησιμοποιούνται μοντέλα πλαστικής συμπεριφοράς για τα σημεία του υλικού σε δύο ή τρείς διαστάσεις, για τα οποία αναμένεται ολίσθηση ή αστοχία, όπως για παράδειγμα κατά μήκος ενός επιπέδου ή μιας επιφάνειας αστοχίας ενός πρανούς (Αγιουτάντης 2002).

3.6.1 Κριτήριο Mohr-Coulomb

Αν σε ένα σημείο (κάποιου επιπέδου) στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους η διατμητική τάση γίνει ίση με τη διατμητική αντοχή αυτού, στο σημείο αυτό θα επέλθει αστοχία. Η διατμητική αντοχή (τ) ενός εδάφους σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο και επίπεδο, εκφράστηκε αρχικά από τον Coulomb σαν γραμμική εξίσωση της ορθής τάσης (σ) στο επίπεδο και στο δεδομένο σημείο (Craig, 1997):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{3.5}$$

Όπου c και φ είναι οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα). Σύμφωνα με την θεμελιώδη αρχή του Terzaghi που θεωρεί ότι η διατμητική τάση του εδάφους οφείλεται στα στερεά σωματίδια που αποτελούν τον εδαφικό σκελετό, η διατμητική αντοχή εκφράζεται ως συνάρτηση της ενεργής τάσης:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \tag{3.6}$$

Όπου c' και φ' είναι οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής στην περίπτωση των ενεργών τάσεων. Έτσι, η αστοχία θα εμφανιστεί σε οποιαδήποτε σημείο αναπτυχθεί ένας κρίσιμος συνδυασμός της διατμητικής και της ενεργής τάσης (Craig, 1997).

Το κριτήριο αστοχίας των Mohr-Coulomb, λόγω κυρίως της απλότητάς του χρησιμοποιείται ευρύτατα παρόλο που δεν είναι το μόνο πιθανό κριτήριο αστοχίας για εδάφη. Ο φάκελος αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζει μια ελαφριά καμπυλότητα, αλλά στο εύρος των τάσεων που ενδιαφέρουν μπορεί να γίνει προσέγγιση της καμπύλης με ευθεία γραμμή, και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής να προσδιοριστούν γι' αυτό το εύρος (Μαραγκάκη, 2003 με πηγή Craig, 1997).

3.6.2. Κριτήριο Tresca

Στο κριτήριο αυτό η αστοχία εμφανίζεται όταν η μέγιστη διατμητική τάση σε ένα σημείο ενός υλικού λάβει μια κρίσιμη τιμή k. Εκφράζοντας τα παραπάνω με βάση τις κύριες τάσεις, η τιμή του k είναι ίση με το ήμισυ της μέγιστης απόλυτης τιμής της διαφοράς μεταξύ των κύριων τάσεων, όταν αυτές λαμβάνονται κατά ζεύγη (Chen and Han, 1998).Δηλαδή:

$$k = Max\left(\frac{\left|\sigma_{1}-\sigma_{2}\right|}{2}, \frac{\left|\sigma_{2}-\sigma_{3}\right|}{2}, \frac{\left|\sigma_{3}-\sigma_{1}\right|}{2}\right)$$
(3.7)

Όπου η σταθερά k του υλικού μπορεί να προσδιοριστεί από μια απλή δοκιμή εφελκυσμού. Έτσι :

$$k = \frac{\sigma_0}{2} \tag{3.8}$$

Όπου σ₀ είναι η μέγιστη αντοχή στην απλή δοκιμή εφελκυσμού. Το κριτήριο των Mohr-Coulomb θεωρείται γενίκευση του κριτηρίου Tresca λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της υδροστατικής πίεσης.

3.6.3. Κριτήριο von Mises

Παρόλο που το κριτήριο της μέγιστης διατμητικής τάσης (κριτήριο Tresca) είναι απλό, δεν είναι αντιπροσωπευτικό για οποιαδήποτε επιρροή της ενδιάμεσης κύριας τάσης στο υλικό. Η οκταεδρική διατμητική τάση ή η ενέργεια παραμόρφωσης είναι μια εναλλακτική επιλογή «κλειδί» έναντι της μέγιστης διατμητικής τάσης, όσον αφορά την αστοχία υλικών. Το κριτήριο αστοχίας του Von Mises, που χρονολογείται από το 1913, αποτελεί αυτή την εναλλακτική και θεωρεί ότι η αστοχία σε ένα υλικό ξεκινά όταν η οκταεδρική διατμητική τάση αγγίξει μια κρίσιμη τιμή k. Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση (Μαραγκάκη, 2003 με πηγή Chen and Han, 1998):

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}}k \tag{3.9}$$

Ή αλλιώς, συναρτήσει των κυρίων τάσεων είναι:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2$$
(3.10)

Όπου k είναι η τάση αστοχίας σε διάτμηση.

3.6.4. Κριτήριο Drucker-Prager

Το κριτήριο Drucker – Prager, που χρονολογείται από το 1952, είναι μια απλή τροποποίηση του κριτηρίου von Mises, όπου η επίδραση της υδροστατικής πίεσης στην αστοχία προκύπτει από προσθήκη ενός επιπλέον όρου στην έκφραση αυτού. Στο μεσημβρινό επίπεδο το κριτήριο των Drucker – Prager δίνεται από τη σχέση (Chen and Han, 1998):

$$f(\xi, \rho) = \sqrt{6\alpha\xi} + \rho - \sqrt{2k} = 0$$
 (3.11)

Όπου α, k σταθερές του υλικού. Όταν η παράμετρος α μηδενιστεί, η σχέση (3.11) μετατρέπεται στο κριτήριο von Mises.

Κεφάλαιο 4 Λογισμικό Plaxis

Το Plaxis είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στα γεωτεχνικά προβλήματα για την εκτίμηση των παραμορφώσεων και της αντοχής της ευστάθειας. Το Plaxis αποτελείται από τέσσερα βασικά υποπρογράμματα:

- 1. Εισαγωγή Δεδομένων (input)
- 2. Υπολογισμοί (calculations)
- 3. Αποτελέσματα (output)
- 4. Σχεδιασμός Καμπύλων (curves)

4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση χρησιμοποιώντας το Plaxis, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και να ορίσει τις ιδιότητες υλικών και τις συνοριακές συνθήκες. Αυτό γίνεται με το υποπρόγραμμα εισαγωγής δεομένων (input).

Αρχικά εισάγονται ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες στο γεωμετρικό μοντέλο ενώ η δημιουργία ενός κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων εκτελείται αυτόματα με βάση το μοντέλο γεωμετρίας. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη για τις ανάγκες του προβλήματος διακριτοποίηση, ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων από πολύ αραιό έως πολύ πυκνό. Στο τέλος της εισαγωγής δεδομένων σχεδιάζεται ο υδροφόρος ορίζοντας εκτιμόνται οι πιέσεις πόρων και οι αρχικές τάσεις.

4.1.1 Γενικές Ρυθμίσεις

Τύπος μοντέλου:

To Plaxis V8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναλύσεις θεωρώντας επίπεδη ανηγμένη παραμόρφωση και αξονοσυμμετρικές παραμορφώσεις:

- Επίπεδη ανοιγμένη παραμόρφωση: Στην περίπτωση που η τρίτη διάσταση
 (z) του σώματος είναι μεγάλη, σε σύγκριση με τις άλλες δύο (x,y) και τα φορτία που δέχεται το σώμα εφαρμόζονται πάνω στο επίπεδο (x,y), τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων (u) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση (u_z = 0 και επομένως ε_z = 0).
- Αξονοσυμμετρικό μοντέλο: Ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο (Axisymmetric model) χρησιμοποιείται για τις γεωμετρίες που περιέχουν κυκλικές διατομές με ομοιόμορφη ακτίνα γύρω από τον κεντρικό άξονα. Οι παραμορφώσεις και οι τάσεις θεωρούνται ίδιες γύρω από τον κεντρικό άξονα.

<u>Στοιχεία:</u>

Για μια δισδιάστατη ανάλυση (επίπεδη ανηγμένη παραμόρφωση ή αξονοσυμμετρική) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει είτε 6-κομβικά ή τα 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία.

4.1.2 Γεωμετρία προσομοιώματος

Η δημιουργία του προσομοιώματος αρχίζει με τη δημιουργία ενός γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο απεικονίζει το πρόβλημα που εξετάζεται. Ένα γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Τα σημεία και οι γραμμές εισάγονται από το χρήστη, ενώ οι επιφάνειες προκύπτουν σαν κλειστά γεωμετρικά σχήματα στο πρόγραμμα. Εκτός από αυτά τα βασικά συστατικά, μπορούν να οριστούν στο γεωμετρικό μοντέλο κατασκευαστικές δομές ή ειδικές συνθήκες.

Συστήνεται η δημιουργία ενός γεωμετρικού μοντέλου να ξεκινά με το σχεδιασμό του πλήρους περιγράμματος της γεωμετρίας. Έπειτα ο χρήστης εισάγει τα στρώματα των υλικών, τις κατασκευαστικές δομές, τα όρια των φάσεων κατασκευής, τα φορτία και στης συνοριακές συνθήκες. Το γεωμετρικό μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο την αρχική κατάσταση, αλλά και τα ενδεχόμενα διαδοχικά στάδια κατασκευής που εξετάζονται σε μεταγενέστερες φάσεις. Αφότου έχει

ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, ο χρήστης θέτει παραμέτρους των υλικών και ορίζει τα αντίστοιχα τμήματα γεωμετρίας στα οποία αυτές εφαρμόζονται. Όταν πλέον έχει καθοριστεί η πλήρης γεωμετρία και όλα τα γεωμετρικά τμήματα έχουν τις ιδιότητές τους, το γεωμετρικό πρότυπο είναι πλήρες και μπορεί να δημιουργηθεί το δικτύωμα.

Ιδιαίτερα στοιχεία που μπορούν να επιλεγούν και αφορούν την προσομοίωση είναι οι:

- <u>Πάσσαλοι</u>
- <u>Αρθρώσεις πασσάλων</u>
- <u>Αγκύρια</u>
- <u>Γεωυφάσματα</u>
- <u>Σήραγγες</u>
- Διεπιφάνειες



<u>Διεπιφάνειες:</u>

Ειδικότερα τα στοιχεία διεπιφανειών (interfaces) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και κάποιας κατασκευαστικής δομής. Τα στοιχεία αυτά είναι μηδενικού πάχους. Οι παράμετροι αντοχής των διεπιφανειών εξαρτώνται άμεσα από αυτές του εδαφικού στρώματος του οποίου σχετίζονται. Όλες οι παράμετροι αντοχής των εδαφών πολλαπλασιάζονται με έναν παράγονται μείωσης της αντοχής R_{inter}.

4.1.3 Φορτία και συνοριακές συνθήκες

Το υπο-μενού των φορτίων περιέχει επιλογές ώστε να εισαχθούν τα φορτία, οι σημειακές δυνάμεις και οι προκαθορισμένες μετατοπίσεις στο γεωμετρικό μοντέλο.

Κυλίσεις και πακτώσεις.

Οι κυλίσεις και οι πακτώσεις, μπορούν να εφαρμοστούν στις γεωμετρικές γραμμές καθώς επίσης και στα γεωμετρικά σημεία.

Προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις.

Οι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις είναι ειδικές συνθήκες που μπορούν να επιβληθούν στις γεωμετρικές γραμμές για να ελέγξουν τις μετατοπίσεις τους.

Φορτία.

∏₿

Δύο ανεξάρτητα συστήματα φόρτισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή σημειακών δυνάμεων και ελκτικών φορτίων.

Α <u>Σημειακές δυνάμεις:</u>

Οι σημειακές δυνάμεις (Point forces) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε γεωμετρικό σημείο. Οι μονάδες των σημειακών δυνάμεων είναι δύναμη

ανά μήκος (π.χ. kN/m).

<u>Φορτία επιφάνειας:</u>

Τα φορτία επιφάνειας (Tractions) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε γεωμετρική γραμμή, όχι μόνο σε αυτές του περιγράμματος της γεωμετρίας. Οι μονάδες στις οποίες δίνονται είναι δύναμη ανά επιφάνεια (π.χ. kN/m²) (Plaxis manual V8).

4.1.4 Ιδιότητες υλικών

Στο Plaxis οι ιδιότητες των εδαφών και των κατασκευαστικών δομών (διεπιφάνειες, πάσσαλοι, γεωυφάσματα, αγκύρια) εισάγονται στα ειδικά παράθυρα (σχήμα 4.1, 4.2, 4.3). Οι ιδιότητες αυτές μπορούν να επιλεγούν από μια διαθέσιμη βάση δεδομένων η οποία μπορεί να εμπλουτιστεί από το χρήστη.

Mohr-Coulomb - Brown_clay	
General Parameters Interfaces	
Material Set Identification: Brown_clay Material model: Mohr-Coulomb Material type: Drained	General properties Y _{unsat} 19,400 kN/m ³ Y _{sat} 20,400 kN/m ³
Comments	Permeability K _x : 8,600E-03 m/day K _y : 8,600E-03 m/day <u>A</u> dvanced
<u>N</u> ext <u>Q</u> k	



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

k	ohr-Coulomb - Brown_clay
	General Parameters Interfaces
L	Stiffness Strength
	E _{ref} : 1,500E+05 kN/m ² C _{ref} : 16,000 kN/m ²
L	ν (nu) : 0,300 φ(phi) : 24,700 °
L	ψ (psi) : 0,000 °
L	
	Alternatives
	G _{ref} : 5,769E+04 kN/m ² V _s : 170,700 ◆ m/s
L	E _{oed} : 2,019E+05 kN/m ² V _p : 319,400 € m/s
L	
L	
L	
L	<u>A</u> dvanced
	Next Ok Cancel Help

Σχήμα 4.2. Παράθυρο ιδιοτήτων εδαφικών υλικών και διεπιφανειών (Plaxis Tutorial Manual). Parameters window.

٨	Aohr-Coulomb - Brown_clay
	General Parameters Interfaces
	Strength © Rigid © Manual
	R _{inter} : 1,000
	Real interface thickness
	5-inter : 0,000
L	
L	
L	
L	
L	Next Ok Cancel Help

Σχήμα 4.3. Παράθυρο ιδιοτήτων εδαφικών υλικών και διεπιφανειών (Plaxis Tutorial Manual). Interfaces window.

Μοντέλα υλικών

Το Plaxis υποστηρίζει διάφορα μοντέλα συμπεριφοράς του εδάφους και των άλλων στοιχείων του μοντέλου. Μια σύντομη παρουσίαση των διαθέσιμων μοντέλων δίνεται στη συνέχεια:

Μοντέλο Mohr Coulomb:

Το ελαστοπλατικό μοντέλο Mohr Coulomb περιλαμβάνει 5 παραμέτρους, δηλαδή το Ε, το ν με την απόδοση της ελαστικότητας του υλικού, το φ και το c για τις πλαστικές ιδιότητες του υλικού και την ψ γωνία διασταλτικότητας. Το μοντέλο Mohr Coulomb αντιπροσωπεύει μία πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς εδάφους ή βράχου. Προτείνεται η χρήση του για μια πρώτη ανάλυση του προβλήματος. Για κάθε ένα στρώμα υπολογίζει μία σταθερή μέση δυστροπία. Εξαιτίας αυτής της σταθερής δυστροπίας οι υπολογισμοί είναι πολύ σύντομοι και προκύπτει εύκολα μία πρώτη εκτίμηση των παραμορφώσεων.

Χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό του συντελεστή ευστάθειας των εδαφικών πρανών με τη διαδικασία διαδοχής μείωσης των φ και c των υλικών. Εκτός από τις πέντε παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι αρχικές συνθήκες του γεωϋλικού παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στα περισσότερα προβλήματα παραμόρφωσης. Οι αρχικές οριζόντιες τάσεις του εδάφους προκύπτουν επιλέγοντας κατάλληλες τιμές του συντελεστή ώθησης σε ηρεμία K₀ (Plaxis manual V8).

Προηγμένα εδαφικά Μοντέλα:

Το Plaxis προσφέρει μια ποικιλία επιπλέον μοντέλων εδαφικής συμπεριφοράς εκτός από το μοντέλο Mohr – Coulomb:

Μοντέλο κράτυνσης εδάφους (Hardering soil model)

Αυτός είναι ένας τύπος ελαστοπλαστικού υπερβολικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς άμμων, αμμοχάλικων και υπερστερεοποιημένων αργίλων (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4. Μοντέλο κράτυνσης εδάφους (Plaxis manual V8).

Αντιπροσωπεύει ένα πιο αναβαθμισμένο μοντέλο σε σχέση με αυτό του Mohr Coulomb. Όπως και στο μοντέλο Mohr Coulomb, οριακές καταστάσεις τάσης περιγράφονται μέσω της γωνίας εσωτερικής τριβής φ, της συνοχής c και της γωνίας διασταλτικότητας ψ. Η εδαφική δυστροπία περιγράφεται με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές παραμέτρους: το μέτρο δυστροπίας E_{50} , την δυστροπία επαναφόρτισης E_{ur} που προκύπτουν από τριαξονική δοκιμή και το μέτρο δυστροπίας από τη φόρτιση οιδημέτρου E_{oed} . Σαν μέσες τιμές για τους διάφορους εδαφικούς τύπους θεωρούμε ότι $E_{ur} \approx 3E_{50}$ και το $E_{oed} \approx E_{50}$. Αλλά τόσο τα πολύ μαλακά όσο και τα πολύ στιφρά εδάφη τείνουν να δώσουν άλλες τιμές του λόγου E_{oed}/E_{50} .

Σε αντίθεση με το μοντέλο Mohr Coulomb, το μοντέλο εδαφικής κράτυνσης λαμβάνει υπόψη του επίσης την εξάρτηση του μέτρου δυστροπίας από την τάση. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι δυστροπίες αυξάνουν με την πίεση. Έτσι οι τρείς παράμετροι δυστροπίας συσχετίζονται με μία τάση αναφοράς, που συνήθως λαμβάνεται αυτή των 100 kPa (1 bar).

Mοντέλο μαλάκυνσης – ερπυσμού του εδάφους εδάφους (Soft soil model – Soft soil creep model) (σχήμα 4.5-4.6).







Σχήμα 4.6. Μοντέλο ερπυσμού μαλακών

(Plaxis manual V8).

εδαφών (Plaxis manual V8).

Στην πραγματικότητα όλα τα εδάφη επιδεικνύουν κάποιο ερπυσμό και η πρωτεύουσα συμπίεση ακολουθείται από μια δευτερεύουσα. Η τελευταία είναι η επικρατέστερη στα μαλακά εδάφη, δηλαδή στις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, στις ιλύς και στην τύρφη και κατά συνέπεια κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη του μοντέλου της μαλάκυνσης του εδάφους - ερπυσμού. Για προβλήματα αποφόρτισης, όπως για παράδειγμα τα προβλήματα εκσκαφών, το μοντέλο μαλάκυνσης του εδάφους – ερπυσμού (Soft Soil Creep), δύσκολα αντικαθιστά το απλό Mohr Coulomb μοντέλο. Όπως και για το μοντέλο Mohr Coulomb, οι κατάλληλες αρχικές εδαφικές συνθήκες είναι επίσης σημαντικές όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο μαλάκυνσης – ερπυσμού. Τόσο στο μοντέλο κράτυνσης όσο και στο μοντέλο μαλάκυνσης περιλαμβάνονται δεδομένα σχετικά με την τάση προστερεοποίησης, επειδή αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση της υπερστερεοποίησης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το Mohr Coulomb μοντέλο είναι ένα γρήγορο εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως όταν δεν υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα όσον αφορά το έδαφος. Το μοντέλο εδαφικής κράτυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα από τριαξονικές και δοκιμές οιδημέτρου ή από μία από τις δύο αυτές δοκιμές και δεδομένα από συσχετίσεις και από δοκιμές πεδίου. Τέλος η ανάλυση με το μοντέλο μαλάκυνσης – ερπυσμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στερεοποίηση σε πολλά μαλακά εδάφη.

<u>Τύπος – Ιδιότητες υλικού</u>

-Ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry} και γ_{wet})

Το φαινόμενο (μοναδιαίο) βάρος (γ) προκύπτει από το λόγο του βάρους (W) προς τον όγκο (V) που καταλαμβάνει ένα εδαφικό μείγμα:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \left(\frac{kN}{m^3}\right) \tag{4.1}$$

Το ξηρό και το υγρό φαινόμενο βάρος του υλικού αναφέρονται στο συνολικό βάρος της μονάδας όγκου του εδαφικού σκελετού, συμπεριλαμβανομένου και του υλικού που πληροί τους πόρους του. Το ξηρό φαινόμενο βάρος γ_{dry} εφαρμόζεται στα υλικά που βρίσκονται πάνω από τη ζώνη κορεσμού, ενώ το υγρό φαινόμενο βάρος γ_{wet} αναφέρεται στα υλικά που βρίσκονται κάτω από αυτή. Τα μοναδιαία βάρη εισάγονται ως δύναμη ανά μονάδα όγκου του υλικού.

-Διαπερατότητα.

Η διαπερατότητα (k_x και k_y) έχει μονάδες ταχύτητας (μονάδα μήκος ανά μονάδα χρόνου). Η εισαγωγή των παραμέτρων διαπερατότητας απαιτείται μόνο για αναλύσεις στερεοποίησης και υπολογισμούς υπόγειας ροής υδάτων. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητος ο καθορισμός της διαπερατότητας για όλα τα στρώματα, ακόμη και για τα αδιαπέραστα. Οι διαπερατότητες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εδαφικού υλικού. Το Plaxis διαχωρίζει την οριζόντια k_x και k_y διαπερατότητα, εφόσον σε ορισμένους τύπους εδαφών (π.χ. τύρφη) υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ τους.

-Μέτρο ελαστικότητας.

To Plaxis χρησιμοποιεί το Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus, E) ως το βασικό μέτρο ακαμψίας στα ελαστικά και στα Mohr-Coulomb μοντέλα.

-Λόγος Poisson (v)

Ο λόγος Poisson ορίζεται από τον λόγο της εγκάρσιας $(-\varepsilon_{\gamma})$ προς την αξονική (-ε_v) ανοιγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση. Κλασσικές τριαξονικές δοκιμές υπό στράγγιση μπορεί να επιτύχουν ένα σημαντικό ρυθμό μείωσης του όγκου στο πολύ αρχικό στάδιο της αξονικής φόρτισης και κατά συνέπεια ένα χαμηλό αρχικό λόγο Poisson v_0 . Για μερικές περιπτώσεις όπως στα προβλήματα αποφόρτισης, μπορεί να είναι ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί μία τέτοια αρχική χαμηλή τιμή, αλλά γενικά όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο Mohr Coulomb προτείνεται η χρήση μία υψηλότερης τιμής. Η επιλογή της τιμής του λόγου Poisson είναι ιδιαίτερα απλή όταν το ελαστικό μοντέλο ή το μοντέλο Mohr Coulomb χρησιμοποιείται για την επιβολή του ιδίου βάρους του υλικού – gravity loading (αυξάνοντας το ΣM_{weight} από 0 σε 1 στον πλαστικό υπολογισμό). Για αυτό τον τύπο φόρτισης το Plaxis θα δώσει ρεαλιστικές τιμές του $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$. Καθώς και τα δύο μοντέλα (ελαστικό και Mohr Coulomb) θα δώσουν τον καλά γνωστό λόγο του $\sigma_h/\sigma_v = v/1 - v$ για μία μονοδιάστατη στερεοποίηση, είναι εύκολο να επιλεγεί ένας λόγος Poisson ο οποίος θα δώσει μία ρεαλιστική τιμή του K_0 . ΩΣ εκ τούτου το ν εκτιμάται σε συνδυασμό με το K₀. Στις περισσότερες περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται τιμές εύρους από 0.3 έως 0,4. Γενικά τέτοιες τιμές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για συνθήκες φόρτισης διαφορετικές από μονοδιάστατη στερεοποίηση.

<u>-Συνοχή (c)</u>

Στο Plaxis μπορεί να ορισθούν εδαφομηχανικές παράμετροι για άμμο με μηδενική συνοχή (c=0 kPa), όμως αυτή η επιλογή οδηγεί σε λανθασμένη προσομοίωση κάποιων από τις παραμέτρους του προβλήματος. Για την αποφυγή τέτοιου είδους σφαλμάτων είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται μια μικρή τιμή για την συνοχή (c>0.2 kPa). Επίσης το Plaxis προσφέρει μία ειδική επιλογή για την εισαγωγή στρωμάτων στα οποία η συνοχή αυξάνει με το βάθος.

-Γωνίες εσωτερικής τριβής (φ)

Υψηλές τιμές γωνιών εσωτερικής τριβής, που προκύπτουν ορισμένες φορές από πυκνές άμμους, θα αυξήσουν κατά συνέπεια το πλαστικά υπολογιζόμενο έργο. Ο χρόνος υπολογισμού αυξάνει εκθετικά σε σχέση με τη γωνία εσωτερικής τριβής και γίνεται αρκετά μεγάλος όταν χρησιμοποιούνται τιμές άνω των 35°. Έτσι υψηλές τιμές γωνιών εσωτερικής τριβής πρέπει να αποφεύγονται, ειδικά στα προκαταρκτικά στάδια υπολογισμών ενός προβλήματος.

-Γωνία διαστολής ή διασταλτικότητας (ψ)

Εκτός από τα υπερστερεοποιημένα στρώματα, τα αργιλικά εδάφη τείνουν να έχουν μικρή γωνία διασταλτικότητας (ψ=0). Η διασταλτικότητα των άμμων εξαρτάται εκτός από την πυκνότητα, και από την γωνία εσωτερικής τριβής. Για χαλαζιακές άμμους η τάξη μεγέθους είναι $\psi \approx \phi - 30^{\circ}$. Για τιμές $\phi < 30^{\circ}$ εντούτοις η γωνία διασταλτικότητας είναι κατά το πλείστον μηδενική. Μια μικρή αρνητική τιμή της ψ είναι μόνο ρεαλιστική για εξαιρετικά χαλαρές άμμους (Plaxis manual V8).

4.1.5 Δημιουργία δικτυώματος στοιχείων

Στο Plaxis η δημιουργία του δικτυώματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα. Παρ' όλα αυτά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προχωρήσει στην ολική ή την τοπική πύκνωση του , ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση το δικτύωμα που δημιουργείται αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία.

-Ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων

Η δημιουργία του πλέγματος απαιτεί μια γενική παράμετρο πλέγματος, le που αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των στοιχείων. Στο Plaxis αυτή η παράμετρος υπολογίζεται με βάση τις εξωτερικές γεωμετρικές διαστάσεις (x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max},) και το n_c έναν ακέραιο συντελεστή ο οποίος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του δικτυώματος που χρησιμοποιείται για την διακριτοποίηση του εδαφικού μοντέλου που προσομοιώνεται:

$$le = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}}$$
(4.2)

Τα επίπεδα ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων είναι πέντε:

- Πολύ αραιό (very coarse)
- Αραιό (coarse)
- Μέσης πυκνότητας (medium)
- Пикио́ (fine)
- Πολύ πυκνό (very fine)

Εξ ορισμού, η ολική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων τίθεται αραιή. Ο ακριβής αριθμός των στοιχείων εξαρτάται από την ακριβή γεωμετρία και τις ενδεχόμενες τοπικές πυκνώσεις.

Πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων	Αριθμός στοιχείων	n _c
Πολύ αραιό	50	25
Αραιό	100	50
Μέσης πυκνότητας	250	100
Πυκνό	500	200
Πολύ πυκνό	1000	400

Πίνακας 4.1. Σχέση μεταξύ πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων και αριθμού στοιχείων (Plaxis V8 Manual).

4.1.6. Αρχικές συνθήκες

Αφού δημιουργηθεί το γεωμετρικό μοντέλο και το πλέγμα τον πεπερασμένων στοιχείων, το επόμενο βήμα είναι να οριστεί η αρχική κατάσταση όσο αφορά την πίεση πόρων και τις τάσεις. Αυτό γίνεται στο στάδιο ορισμού των αρχικών συνθηκών (Initial Conditions) που αποτελείται από τα παρακάτω κατά σειρά δύο βήματα.

<u>Α) Δημιουργία Υδατικών συνθηκών:</u> Με αυτή την επιλογή παράγονται οι αρχικές πιέσεις πόρων.

<u>B) Δημιουργία αρχικών τάσεων:</u> Με αυτή την επιλογή δημιουργούνται οι αρχικές τάσεις σε συνάρτηση με την αρχικά διαμορφωμένη γεωμετρία.

4.1.7. Δημιουργία υδατικών Συνθηκών

					Generate	Help							
Calc O	atput 1	Curves	ΤĚ	e		A	€	Q		×	0		
🔶 Ge	ometr	y input	Ŧ				++		•]++ +		+ Calculat	e
			-350	10,00	-3	000,00		-250	0,00	-20	00,00	-1500,00	-10

Σχήμα 4.7. Επιλογή αριστερού κύκλου για την εισαγωγή υδατικών συνθηκών.

Στο Plaxis γίνεται μια σαφής διάκριση μεταξύ των ενεργών πιέσεων πόρων, p_{active}, και των ενεργών τάσεων σ. Στις ενεργές πιέσεις πόρων γίνεται μια περαιτέρω

διάκριση μεταξύ της υφιστάμενης πιέσης πόρων (p_{steady}), και υπερπίεσης πόρων, (p_{excess}): $p_{active} = p_{steady} + p_{excess}$.

Η υπερπίεση των πόρων είναι η πίεση που εμφανίζεται λόγω της φόρτισης σε μη στραγγιζόμενο τμήμα του μοντέλου.

Η υφιστάμενη πίεση πόρων είναι που αποδίδει μια σταθερή υδραυλική κατάσταση. Μια τέτοια κατάσταση επικρατεί όταν οι εξωτερικές υδατικές συνθήκες παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης περιόδου.

Όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της πίεσης πόρων τότε το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα σχεδιάζεται στο κατώτατο σημείο του γεωμετρικού μοντέλου και όλες οι πιέσεις πόρων λαμβάνονται ίσες με το μηδέν.

Σταθερές πιέσεις πόρων.

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις για την επιβολή σταθερής πίεσης πόρων.

✓ Επίπεδο υδροφόρου ορίζοντα: Οι πιέσεις των πόρων δημιουργούνται με βάση
 το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα
 αντιπροσωπεύει εκείνα τα σημεία για τα οποία η πίεση του νερού είναι ίση με μηδέν.
 Κάτω από το επίπεδο αυτό, η πίεση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος (υδροστατική πίεση) και με βάση το μοναδιαίο βάρος του νερού.

Water pressure generation	
Generate by Phreatic level Groundwater calculation (steady state)	Change configuration
Groundwater calculation Standard settings Manual settings	
<u></u>	<u>Cancel</u> <u>H</u> elp

Σχήμα 4.8. Επιλογή του generate water pressure.

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης της πίεσης πόρων από τον υδροφόρο ορίζοντα ή από άλλες υδραυλικές πιέσεις σε συγκεκριμένα σημεία (σχήμα 4.8).

 Ανάλυση υπόγειας ροής: Οι ανομοιόμορφες κατανομές πίεσης πόρων μπορούν να παραχθούν βάσει μιας δισδιάστατης ανάλυσης ροής υπόγειων υδάτων. Σε μερικές περιπτώσεις ζητείται να αναπτυχθούν διαφορετικές πιέσεις πόρων σε κάποια συγκεκριμένα σημεία στα οποία παρατηρείται αλλαγή της υδραυλικής συμπεριφοράς. Για να επιτευχθεί αυτό επιλέγεται το επιθυμητό σημείο (σχήμα 4.9) και γίνεται αλλαγή στις πιέσεις αυτές οπότε αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα το υδραυλικό φορτίο (groundwater head). Το Plaxis υπολογίζει αυτόματα την πίεση πόρων με βάση το υδραυλικό φορτίο που ορίζεται.

Groundwater head	
Point 101 Groundwater head : <mark>720,000 </mark>	Point 102 Groundwater head : 785,000
-	QK Cancel Help

Σχήμα 4.9. Παράθυρο επιλογής υδραυλικού φορτίου.



Σχήμα 4.10. Η εμφάνιση της έντονης γραμμής μετά την εισαγωγή του groundwater head.

Για να αναπτυχθεί υπόγεια ροή τότε ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει δύο σημεία στην γραμμή ροής με διαφορετικό υδραυλικό φορτίο. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός επιλέγεται το generate water pressure.

Αφού πλέον έχουν οριστεί πλήρως τα ζητούμενα πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί και παρουσιάζονται με την ανάλογη σχηματική αναπαράσταση οι πιέσεις πόρων και πως αυτές οι πιέσεις διαμορφώνονται σε όλο το εύρος του μοντέλου.

Υπερπιέσεις πόρων:

Το Plaxis διακρίνει μεταξύ συνθηκών στράγγισης και μη στράγγισης για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά των διαπερατών άμμων και των στεγανών αργίλων αντίστοιχα. Όταν τα μη στραγγιζόμενα εδαφικά στρώματα δέχονται φορτία κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, υπολογίζονται οι πιέσεις πόρων. Οι φορτίσεις των μη στραγγιζόμενων εδαφών επηρεάζουν κατά πολύ την ευστάθεια. Σε περιπτώσεις ανεπαρκούς ευστάθειας, πρέπει να εισαχθούν οι ενδιάμεσες περίοδοι σταθεροποίησης για να μειωθούν οι υπερπιέσεις πόρων.

4.1.8. Προσδιορισμός αρχικών συνθηκών γεωμετρίας

Ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών γεωμετρίας επιτρέπει την απενεργοποίηση τμημάτων του μοντέλου, τα οποία δεν είναι ενεργά στην αρχική κατάσταση, αλλά ενεργοποιούνται στη συνέχεια. Επιπροσθέτως μπορούν να υπολογιστούν οι αρχικές ενεργές τάσεις μετά την διαμόρφωση του νέου γεωμετρικού σχήματος, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία K₀.



Σχήμα 4.11. Επιλογή δεξιού κύκλου δημιουργία αρχικών τάσεων (διαδικασία Κ₀).



<u>Δημιουργία αρχικών τάσεων (διαδικασία K₀)</u>

Οι αρχικές τάσεις στη μάζα του εδάφους εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το βάρος των υλικών που αποτελούν το μοντέλο. Η τασική αυτή κατάσταση περιγράφεται από μια αρχική κατακόρυφη τάση σ_{v,0} που σχετίζεται με το συντελεστή πλευρικής πίεσης K₀ (σ_{h,0}=K₀σ_{v,0}). Στο Plaxis, οι αρχικές τάσεις δημιουργούνται με τον ορισμό του K₀ ή με τη χρήση της επιλογής της φόρτισης λόγω του ίδιου του βάρους του μοντέλου, που γίνεται στη διαδικασία υπολογισμών. Στο σχήμα 4.11 φαίνεται το παράθυρο αρχικών τάσεων.

K	KO-procedure								
	ΣM-wei	ght: 1,0	000	•					
	Cluster	Material	OCR	POP	ко	^			
	1	мс	N/A	N/A	0,426				
	2	мс	N/A	N/A	0,470				
	3	мс	N/A	N/A	0,582				
	4	мс	N/A	N/A	0,500				
	5	МС	N/A	N/A	0,000				
	6	мс	N/A	N/A	0.603	~			
			<u>o</u> k	⊆ancel	Help				

Σχήμα 4.12. Παράθυρο αρχικών τάσεων

Στη διαδικασία K₀ εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου που περιέχει ένα πίνακα όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις τιμές του συντελεστή αυτού. Εξ' ορισμού, οι τιμές του K₀ που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προκύπτουν από τη σχέση του Jaky $K_0=(1-\sin\varphi)$, ενώ αν ο χρήστης επιθυμεί μπορεί να αλλάξει, με την επιφύλαξη ότι δεν πρέπει να εισάγονται πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές του K_0 .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση όπου στο πρώτο υπολογιστικό βήμα εφαρμόζεται η επιβολή ιδίου βάρους (gravity loading), τότε η διαδικασία δημιουργίας αρχικών τάσεων K₀, δεν πρέπει να εφαρμόζεται, αφού δεν υπάρχουν αρχικές τάσεις.

Με την δημιουργία των αρχικών τάσεων, η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων ολοκληρώνεται και ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμών.

4.2 Υπολογισμοί

Μετά την δημιουργία του μοντέλου, ακολουθεί το στάδιο των υπολογισμών (calculations). Στη φάση αυτή είναι απαραίτητο να καθοριστεί ποιοι τύποι φόρτισης πρόκειται να ενεργοποιηθούν κατά τα διάφορα στάδια υπολογισμών. Παρακάτω παρουσιάζεται το κύριο παράθυρο του προσδιορισμού της υπολογιστικής φάσης (σχήμα 4.13)

General Parameters	<u>M</u> ultipliers P	Preview						
Phase Number / ID.: Start from phase	1 <pha< th=""><th>ase 1> ;e</th><th>•</th><th>Calculation type</th><th>▼ <u>A</u>dvanced</th><th>]</th><th></th><th></th></pha<>	ase 1> ;e	•	Calculation type	▼ <u>A</u> dvanced]		
Log info Prescribed ultir	nate state fully i	reached	~	Comments				
					Paramet	ters		
					Next	Ers	rt l	🐺 Delete.
dentification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Next Time	Water	rt d	🐺 Delete.
identification Initial phase	Phase no.	Start from	Calculation N/A	Loading input	Next Time 0,00 day	Water 0	rt d First	Delete.
identification Initial phase	Phase no. 0 1	Start from 0	Calculation N/A Plastic	Loading input N/A Total multipliers	Next Time 0,00 day 0,00 day	Water 0	rt / First 0 1	Delete Last 0 2

Σχήμα 4.13. Κύριο παράθυρο υπολογιστικού προγράμματος (General).

4.2.1 Γενικά υπολογιστικά στοιχεία

Σε κάθε υπολογιστικής φάσης ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης:

- ο πλαστικής συμπεριφοράς (Plastic),
- ο στερεοποίησης (consolidation),
- ο απομοίωσης φ-c (phi-c reduction), ή
- ο Δυναμικής ανάλυσης

-Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς (Plastic). Η διαδικασία αυτή επιλέγεται με σκοπό την πραγματοποίηση μιας ελαστοπλαστικής ανάλυσης παραμόρφωσης όπου δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν επιδράσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Γενικά, η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές, ενώ δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του χρόνου, εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται το μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους (Soft soil creep model).

-Ανάλυση στερεοποίησης (consolidation): Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητη η ανάλυση της υπερπίεσης των πόρων που προκύπτει σε εδάφη τύπου κορεσμένων αργίλων σε συνάρτηση του χρόνου.

-Ανάλυση απομοίωσης φ-c: Η ανάλυση απομοίωσης φ-c χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης επιθυμεί την εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας στην συγκεκριμένη φάση.

-Δυναμική ανάλυση (dynamic analysis): Η ανάλυση αυτή είναι μια πρόσθετη λειτουργία η οποία χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί κατά πόσο ένας σχηματισμός ανταποκρίνεται σε δονήσεις στις οποίες υπόκεινται (π.χ. λόγω σεισμού).

4.2.2. Παράμετροι υπολογιστικού ελέγχου

Plaxis 8.2 Calcul a File Edit View Calcul	ations - Less ate Help	ion 3(1).pt	x					
Input Output Curves	🗠 🔒	A	-> Out	put				
General Parameters Control parameter Additional Steps	Multipliers P ers s: 100	review	 ✓ Reset displa ☐ Ignore undr ✓ Delete inter 	acements to zero ained behaviour mediate steps				
Iterative procedu Standard se Manual sett	Iterative procedure Loading input Image: Standard setting C Staged construction Image: Standard setting C Total multipliers Image: Standard setting C Incremental multipli							
					Next	💐 Ins	ert	Delete
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0
<pre>✓ <phase 1=""></phase></pre>	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 day	0	1	7
	2		- idde	, oxa makpiel 3	0,00 089	0	5	Ū

Εικόνα 4.14. Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων (parameters).

Επιπλέον Βήματα (additional steps):

Αυτή η παράμετρος (additional steps, σχήμα 4.14) ορίζει το (μέγιστο) αριθμό υπολογιστικών βημάτων που εκτελείται σε μια συγκεκριμένη υπολογιστική φάση. Ο αριθμός των βημάτων τίθεται από το πρόγραμμα εξ ορισμού (by default) σε 250.

Μηδενισμός μετακινήσεων (reset displacements to zero):

Αυτή η επιλογή ενεργοποιείται όταν οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από τα προηγούμενα βήματα υπολογισμού δεν θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αρχή της δεδομένης υπολογιστικής φάσης (π.χ. οι μετατοπίσεις που οφείλονται στη βαρύτητα).

Παράβλεψη αστράγγιστης συμπεριφοράς (ignore undrained behavior:

Η επιλογή αυτή ενεργοποιείται όταν επιδιώκεται να εξαιρεθούν παροδικά τα αποτελέσματα της αστράγγιστης συμπεριφοράς σε περιπτώσεις όπου αστράγγιστες ομάδες υλικών χρησιμοποιούνται. Σαν αποτέλεσμα, όλα αυτά τα υλικά θεωρούνται παροδικά σαν στραγγιζόμενα. Υπάρχουν πιέσεις πόρων, οι οποίες δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα στάδια, θα παραμείνουν αλλά καμιά επιπλέον πίεση πόρων δεν θα προστεθεί κατά τη παρούσα φάση υπολογισμού.

Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων (delete intermediate steps):

Αυτή η επιλογή μπορεί να ενεργοποιηθεί για υπολογισμούς του Load advancement ultimate level type προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστική μνήμη. Όταν επιλέγεται όλα τα επιπρόσθετα βήματα εξόδου, εκτός από το τελευταίο, διαγράφονται όταν μια φάση υπολογισμών έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς.

Παράμετροι επαναληπτικής διαδικασίας (iterative procedure control parameters):

Η διαδικασία των επαναλήψεων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Προτείνεται να χρησιμοποιηθούν οι εξ ορισμού (standard) ρυθμίσεις οι οποίες δίνουν στις περισσότερες των περιπτώσεων καλή συμπεριφορά της διαδικασίας των επαναλήψεων. Στην περίπτωση όμως που ο χρήστης θέλει να επιλέξει δικές του παραμέτρους ελέγχου, τότε θα πρέπει να προσδιορίσει τα παρακάτω (σχήμα 4.15):

М	anual Setting		×
	Parameters		
	Tolerated error:	0,0100	\$
	Over relaxation:	1,2000	\$
	Maximum iterations:	60	\$
	Desired minimum:	6	\$
	Desired maximum:	15	\$
	🔽 Arc-length control		
_	<u>O</u> K <u>C</u> anc	el	Help

Σχήμα 4.15. Manual εισαγωγή παραμέτρων επαναληπτικής διαδικασίας.

-Ανεκτό σφάλμα (Tolerated error): Σε οποιαδήποτε μη γραμμική ανάλυση, όπου ένας περιορισμένος αριθμός βημάτων υπολογισμού χρησιμοποιείται, θα υπάρξει κάποια απόκλιση από την ακριβή επίλυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Ο σκοπός του αλγόριθμου μιας επίλυσης είναι να επιβεβαιώσει ότι τα σφάλματα εξισορρόπησης τόσο τοπικά όσο και συνολικά παραμένουν μέσα σε ανεκτά όρια. Τα όρια του σφάλματος που υιοθετούνται από το Plaxis σχετίζονται με την προσδιορισμένη τιμή του ανεκτού σφάλματος. Σε κάθε βήμα, το Plaxis συνεχίζει να πραγματοποιεί επαναλήψεις έως ότου τα υπολογιστικά σφάλματα είναι μικρότερα από αυτή την προσδιορισμένη τιμή, για την οποία γενικά το 0,03 είναι κατάλληλη στις περισσότερες των περιπτώσεων.



Σχήμα 4.16. Σύγκριση αριθμητικής και ακριβούς λύσης (Plaxis V8 manual).

-Υπέρ – χαλάρωση (Over relaxation): Με σκοπό να μειωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται για την προσέγγιση, το Plaxis χρησιμοποιεί τη διαδικασία της υπερχαλάρωσης, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 4.17. Η παράμετρος η οποία χρησιμοποιείται για την Over relaxation έχει για τα εδάφη τα οποία έχουν γωνία εσωτερικής τριβής < 20, μια τιμή του 1,5, ενώ για τα εδάφη με υψηλότερη γωνία εσωτερικής τριβής απαιτείται μια χαμηλότερη τιμή. Γενικά αποδεκτή τιμή είναι το 1,2 στις περισσότερες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.17. Επαναληπτική διαδικασία με και χωρίς υπέρ-χαλάρωση (Plaxis V8 manual).

-Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum iterations): Αυτή η παράμετρος απαιτείται για να βεβαιωθεί ότι ο χρόνος υπολογισμού δεν γίνεται εξαιρετικά μεγάλος λόγω των σφαλμάτων στον προσδιορισμό των παραμέτρων. Υποδειγματική τιμή για τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων είναι το 50.

-Επιθυμητό μέγιστο και ελάχιστο (desired minimum and desired maximum): Προτεινόμενες τιμές είναι 4 και 10 αντίστοιχα. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιθυμητό να ρυθμιστούν αυτές οι τιμές, όπως για παράδειγμα όταν δημιουργούνται βήματα τα οποία είναι τόσο μεγάλα που δεν μπορούν να δώσουν μία ομαλή καμπύλη τάσης μετατόπισης. Και αυτό συχνά παρατηρείται στην περίπτωση εδαφών με μικρή γωνία εσωτερικής τριβής οπότε προτείνεται για παράδειγμα το επιθυμητό ελάχιστο = 3 και το επιθυμητό μέγιστο = 7.

-Ελεγχος μήκους τόζου (arc length control): Το Arc length control είναι μια τεχνική η οποία εξ ορισμού επιλέγεται από το Plaxis για να προκύψουν αξιόπιστες τιμές αστοχίας στη περίπτωση υπολογισμών με ελεγχόμενη φόρτιση. Η διαδικασία επαναλήψεων, η οποία υιοθετείται όταν χρησιμοποιείται ο έλεγχος μήκους τόξου, παρουσιάζεται στην σχήμα 4.18α στην περίπτωση που προσεγγίζεται ένα φορτίο θραύσης. Η χρήση του ελέγχου μήκους τόξου σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλεί ατεκμηρίωτες μεταβολές στο πρόσημο της μετατόπισης και της αύξησης του φορτίου όταν το εδαφικό δοκίμιο ή το έδαφος είναι μακριά από την αστοχία. Εάν αυτό εμφανιστεί, τότε ο χρήστης θα πρέπει να επαναλάβει τον υπολογισμό επιλέγοντας της επιλογές από το χρήστη και απενεργοποιώντας τον έλεγχο μήκους τόξου. Σημειώστε ότι δεν είναι δυνατόν να αυξηθούν τα φορτία μέχρι τη θραύση εάν το Arc length control δεν είναι ενεργοποιμένο.



Σχήμα 4.18. Επαναληπτική διαδικασία με load control (α) και με (b) Arc length control.

Εισαγωγή φορτίσεων: Η πινακίδα που αφορά την εισαγωγή φορτίσεων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του τύπου της φόρτισης ο οποίος θα θεωρηθεί σε μια επιμέρους φάση υπολογισμού. Στους υπολογισμούς πλαστικής συμπεριφοράς το Plaxis διακρίνει τους παρακάτω τύπους:

- Φόρτιση με την έννοια της αύξησης ή της μείωσης των εξωτερικών δυνάμεων, που ενεργοποιούνται από τους μεταβαλλόμενους πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης (incremental multipliers) ή τους συνολικούς πολλαπλασιαστές (total multipliers).
- Φόρτιση με την έννοια της μεταβολής του βάρους, της αντοχής ή της δυστροπίας των στοιχείων που ενεργοποιείται μεταβάλλοντας τη γεωμετρία ή την κατανομή της πίεσης πόρων στην επιλογή Stage construction.

Πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης (incremental multipliers).

Οι πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης επιτρέπουν στον χρήστη να ορίσει τις αυξήσεις ή μειώσεις των εξωτερικών φορτίων.

Συνολικοί πολλαπλασιαστές (total multipliers).

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης του τελικού σταδίου, τότε ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων επιλέγοντας την ρύθμιση των συνολικών πολλαπλασιαστών.

Σταδιακή κατασκευή (staged construction).

Είναι δυνατόν να προσομοιωθούν οι διαδικασίες μιας κατασκευής ή εκσκαφής με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση τμημάτων του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει μια ρεαλιστική αξιολόγηση των δημιουργούμενων τάσεων και παραμορφώσεων, (για παράδειγμα στην κατασκευής ενός χωμάτινου φράγματος ή της εκσκαφής ενός ορύγματος). Η επιλογή Staged construction χρησιμοποιείται επίσης για τον υποβιβασμό ή την άνοδο του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα.

4.2.3. Επιλογή σημείων για σχεδιασμό καμπύλων

Μετά από τον καθορισμό των φάσεων υπολογισμού και πριν την έναρξη της διαδικασίας υπολογισμών, μπορούν να επιλεγούν μερικά σημεία για την δημιουργία των καμπυλών όσο αναφορά τα φορτία, τις τάσεις και τις μετατοπίσεις. Μετά από τον υπολογισμό το πρόγραμμα καμπυλών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει τις καμπύλες φορτίων – μετατοπίσεων και τάσεων.

4.3. Αποτελέσματα



Μέσα από το πρόγραμμα των αποτελεσμάτων (Output) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αξιολογήσει και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα της επίλυσης και των υπολογισμών.

4.3.1 Παραμορφώσεις

Το μενού των παραμορφώσεων περιέχει διάφορες επιλογές για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις

Οι συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις αντιστοιχούν στις ανηγμένες παραμορφώσεις e_{ij} του τελικού βήματος του τρέχοντος υπολογισμού. Εξ' ορισμού οι συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις παρουσιάζονται ως κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις. <u>Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση λόγω συμπίεσης θεωρείται</u> <u>αρνητική</u>. Για την απεικόνιση των παραμορφώσεων, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις ισοπαραμορφωσιακές καμπύλες ή τις χρωματικές διαβαθμίσεις της συνολικής ανηγμένης παραμόρφωσης όγκου ή της συνολικής ισοδύναμης ανοιγμένης διατμητικής παραμόρφωσης.

4.3.2. Τάσεις

Το μενού των τάσεων περιέχει ποικίλες επιλογές για την απεικόνιση της κατανομής των τάσεων σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Σχετική διατμητική τάση: Η σχετική διατμητική τάση δίνει μια ένδειξη της εγγύτητας του σημείου τάσης στο φάκελο αστοχίας. Η σχετική διατμητική τάση τ_{rel,} ορίζεται ως:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{\max}} \tag{4.3}$$

Όπου τ είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης και τ_{max} η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης για την περίπτωση όπου ο κύκλος του Mohr διογκώνεται για να αγγίξει το φάκελο αστοχίας του Coulomb, διατηρώντας την κύρια τάση σταθερή.

Σημεία αστοχίας: Τα σημεία αστοχίας είναι σημεία τα οποία υποδεικνύουν αστοχία σε δεδομένο σημείο της γεωμετρίας.

Τα σημεία αστοχίας του Mohr Coulomb είναι ενδεικτικά για το αν το μέγεθος του μοντέλου είναι ικανοποιητικό. Εάν η ζώνη της πλαστικότητας Coulomb φθάνει σε κάποιο από τα όρια του μοντέλου (εκτός από την κεντρική γραμμή σε ένα συμμετρικό μοντέλο) τότε το μέγεθος του μοντέλου είναι μικρό. Σε αυτήν την περίπτωση ο υπολογισμός πρέπει να επαναληφθεί με μοντέλο μεγαλύτερων διαστάσεων.

4.3.3 Διαγράμματα και τομές του προτύπου

Για την απεικόνιση της κατανομής μιας δεδομένης παραμέτρου κατά μήκος τυχαίας γραμμής στο μοντέλο, μπορούν να σχεδιαστούν τομές αυτού. Στις τομές αυτές οι ποσότητες που απεικονίζονται προκύπτουν από παρεμβολή των δεδομένων των κόμβων (όσον αφορά τις μετατοπίσεις) ή κατά προσέγγιση υπολογισμό των δεδομένων των τασικών σημείων (όσο αφορά τις τάσεις).

4.4. Καμπύλες φορτίων – μετατοπίσεων και κατανομή φορτίων

Το πρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών (Curves) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία καμπύλων φορτίου και μετατοπίσεων, διαγράμματα τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων και κατανομή τάσεων σε επιλεγμένα εκ των προτέρων σημεία στη γεωμετρία. Γενικά, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των καμπύλων φορτίου και μετατοπίσεων ενώ τα σημεία τάσης χρησιμοποιούνται για διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων και για την κατανομή των τάσεων.
4.4.1 Δημιουργία καμπύλης

<u>Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης:</u> Τέτοιου είδους καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της (μη γραμμικής) σχέσης των φορτίων με τις μετατοπίσεις ενός σημείου. Οι μετατοπίσεις μπορεί να αναφέρονται είτε στο μέτρο των μετατοπίσεων (|u|) ή στις οριζόντιες (u_x) ή στις κατακόρυφες (u_y) μετατοπίσεις. Οι μετατοπίσεις έχουν μονάδες μήκους, όπως αυτές ορίστηκαν στις γενικές ρυθμίσεις του προτύπου.

<u>Καμπύλες χρόνου μετατόπισης</u>: Τέτοιου είδους καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από επίλυση προτύπων στα οποία η εξαρτώμενη από το χρόνο συμπεριφορά των εδαφών παίζει σημαντικό ρόλο (ανάλυση στερεοποίησης, μοντέλα ερπυσμού, δυναμικές αναλύσεις κλπ.). Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος χρόνος επιλέγεται για τον άξονα των x και στον άξονα των y απεικονίζεται η μετατόπιση ενός δεδομένου κόμβου. Ο χρόνος εκφράζεται στις μονάδες που έχουν οριστεί στις αρχικές ρυθμίσεις του προτύπου που στην συνηθέστερη περίπτωση αντιστοιχεί σε μέρες.

<u>Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης</u>: Τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της τοπικής συμπεριφοράς τάσης – παραμόρφωσης του εδάφους. Στην πραγματικότητα, τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης αντιστοιχούν στην ιδανική συμπεριφορά του εδάφους, με βάση το επιλεγμένο εδαφικό πρότυπο. Οι διαθέσιμες παράμετροι για το σχεδιασμό καμπυλών παρουσιάζονται στον πίνακας 4.2. Επισημαίνεται και πάλι ότι με τον όρο παραμόρφωση εννοείται η ανοιγμένη παραμόρφωση των εδαφικών υλικών.

Τάσεις	Παραμορφώσεις
$\sigma'_{xx} = ενεργή οριζόντια τάση \sigma'_{yy} = ενεργή κατακόρυφη τάση \sigma_{xy} = διατμητική τάση \sigma'_{zz} = ενεργή πλευρική τάση \sigma'_1 = μέγιστη ενεργή κύρια τάση \sigma'_2 = ενδιάμεση κύρια τάση \sigma'_3 = ελάχιστη ενεργή κύρια τάση p = μέση ενεργή τάσηq = αποκλίνουσα τάση (ισοδύναμη διατμητική τάση)$	$\begin{split} \epsilon_{xx} &= oriζόντια παραμόρφωση \\ \epsilon_{yy} &= κατακόρυφη παραμόρφωση \\ \gamma_{xy} &= διατμητική παραμόρφωση \\ \epsilon_{zz} &= πλευρική παραμόρφωση \\ \epsilon_1 &= μέγιστη κύρια παραμόρφωση \\ \epsilon_2 &= δευτερεύουσα κύρια παραμόρφωση \\ \epsilon_3 &= ελάχιστη κύρια παραμόρφωση \\ \epsilon_v &= oγκική παραμόρφωση \\ \epsilon_q &= αποκλίνουσα παραμόρφωση \\ (ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση) \end{split}$



<u>Τασικές διαδρομές και διαδρομές παραμορφώσεων</u>: Μια τασική διαδρομή αντιπροσωπεύει την πορεία ανάπτυξης της εντατικής κατάστασης σε ένα δεδομένο σημείο του εδαφικού προτύπου. Αυτού του είδους οι καμπύλες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους σε τοπικό επίπεδο.

Κεφάλαιο 5

Κατολίσθηση εξωτερικής απόθεσης Νοτίου Πεδίου

5.1. Εισαγωγή

Το ορυχείο Νοτίου Πεδίου, που καταλαμβάνει το Νότιο τμήμα των λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων της λεκάνης Πτολεμαΐδας-Κοζάνης, (σχήμα 5.1) αποτελεί το μεγαλύτερο λιγνιτωρυχείο της ΔΕΗ και είναι από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης με ετήσια παραγωγή λιγνίτη 18-22 Μτον. και ετήσιο ρυθμό συνολικών εκσκαφών 100 Mm³ περίπου. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η θέση των λιγνιτωρυχείων της περιοχής Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου (Steiakakis et al, 2008).



Σχήμα 5.1. Θέση λιγνιτωρυχείων Λ.Κ.Δ.Μ. (Steiakakis et al, 2008).

Η παραγωγή λιγνίτη του ορυχείου τροφοδοτεί τις 5 μονάδες του ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου συνολικής ισχύος 1.595 MW, που αποτελεί το μεγαλύτερο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας συμβάλλοντας με ποσοστό περίπου 24% στην κάλυψη των συνολικών αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια το ορυχείο λειτουργεί με 10 τομές (5 τομές υπερκειμένων και 5 λιγνιτικές) με αντίστοιχους καδοφόρους εκσκαφείς θεωρητικής δυναμικότητας 5.760-11.100 m³ x/h (Bozinis et al., 2004).

Στη μάζα των υπερκειμένων απαντούν σε ποσοστό 30-40 % σκληροί σχηματισμοί (ψαμμιτοκροκα-λοπαγή, λατυποκροκαλοπαγή, ψηφιδοπαγή με ψαμμίτες), οι οποίοι λόγω του πάχους, συνεκτικότητας και σκληρότητάς τους δεν εκσκάπτονται με τους καδοφόρους εκσκαφείς, αλλά με ειδικό βαρύ χωματουργικό εξοπλισμό (Agioutantis and Kavouridis 1998). Οι μαλακοί υπερκείμενοι σχηματισμοί, που είναι αργιλικής συστάσεως με προσμίξεις αμμωδών υλικών και ιλύος σ' ορισμένους ορίζοντες και οι οποίοι εκσκάπτονται από τους καδοφόρους εκσκαφείς οδηγούνται στο σύνολό τους μέχρι σήμερα στην εξωτερική απόθεση, όπου λειτουργούν τρείς αποθέτες δυναμικότητας 11.100 m³ x/h. Η εξωτερική απόθεση διαμορφώνεται ΒΑ της περιοχής εκσκαφής σε τρείς φάσεις συνολικού ύψους 110m περίπου.

Την 30.04.2004 εκδηλώθηκε ευρείας έκτασης κατολίσθηση στην κεντρική περιοχή της εξωτερικής απόθεσης του ορυχείου Νοτίου Πεδίου, η οποία συνοδεύτηκε από διαρροή των υλικών της διαταραχθείσας περιοχής προς τα κατάντη του χώρου της απόθεσης. Λόγω της κατολίσθησης διακόπηκε η λειτουργία των τριών αποθετών και των πέντε καδοφόρων εκσκαφέων των τομών υπερκειμένων, καθώς επίσης επηρεάσθηκε και η διακίνηση λιγνίτη με ταινιόδρομους προς ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου. Η διαταραχθείσα περιοχή είχε πλάτος στον πόδα της κατολίσθησης 600m, μήκος περίπου 1.500m, πάχος μετακινηθέντων υλικών 30-90m και συνολικό ύψος απόθεσης 110m (σχήμα 5.4). Η βάση της διαταραχθείσας απόθεσης ξεκίνησε με ρυθμό μετακίνησης 1-2m/ώρα. Με την κατασκευή ανασχετικών φραγμάτων ο ρυθμός διαρροής μειώθηκε δραστικά μετά την παρέλευση 15 ημερών περίπου και το φαινόμενο αποσβέσθηκε πλήρως σε δύο μήνες από την εκδήλωσή του. Η συνολική μάζα που επηρεάστηκε εκτιμάται σε 40 Mm³ και ο όγκος των υλικών που διέρρευσε έξω από τα όρια της απόθεσης, ανέρχεται περίπου σε 2,5 Mm³ με μέγιστη διαδρομή εκτός του χώρου απόθεσης 350m (Kavouridis and Agioutantis 2006).



Σχήμα 5.3. Μορφολογία περιοχής διαταραχθείσας ζώνης (Steiakakis et al, 2008).





5.2 Γεωλογία - Υδρογεωλογία

Η ευρύτερη περιοχή καλύπτεται από Τεταρτογενείς σχηματισμούς ηλικίας Πλειστοκαίνου (κροκαλοπαγή, ερυθρογαίες, κώνους κορημάτων, ριπίδια χειμαρικών αποθέσεων κ.α.) και σύγχρονες αποθέσεις. Στο ρέμα της Χαραυγής όπου εδράζεται η κεντρική περιοχή της εξωτερικής απόθεσης του Ορυχείου, εμφανίζεται ασβεστολιθικό λατυποκροκαλοπαγές που υπέρκεινται καστανέρυθρης αργίλου, γκρί γκριζοπράσινης αργίλου (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5. Διαμήκης κατακόρυφος τομή (Steiakakis et al, 2008)

Όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες, οι τεταρτογενείς σχηματισμοί και οι σύγχρονες αποθέσεις της περιοχής φιλοξενούν τοπική ή διάχυτη υδροφορία. Σειρά μικροπηγών αναβλύζει στην επαφή των αργίλων και των παλαιών και νέων προσχωματικών αποθέσεων. Στην περιοχή που εκδηλώθηκε η κατολίσθηση υπήρχε η μικροπηγή της «Χαραυγής» που ανάβλυζε μέσα στο ομώνυμο ρέμα, σε απόλυτο υψόμετρο +763m επί του φυσικού εδάφους και η οποία υδρομαστευόταν για τις ανάγκες ύδρευσης του ομώνυμου οικισμού.

Αναβλύσεις νερού που παρατηρήθηκαν μετά την αστοχία μέσα από την κατολισθαίνουσα μάζα, 200-220m κατάντη της φυσικής πηγής (και περί το υψόμετρο +770m έως +780m), και είχαν παροχή που υπερέβαινε τα 35 – 40 m³/h (Ιούνιος 2004). Οι αναβλύσεις αυτές όπως προκύπτει από τα χαρακτηριστικά τους, αφορούν αφενός μεν εγκλωβισμένα νερά (προϊόντα στερεοποίησης των αργιλικών υλικών) που βρήκαν διόδους διαφυγής με τον τεμαχισμό και την κινητοποίηση της μάζας,

αφετέρου δε, πηγαία νερά που τροφοδοτούνται από τα υποκείμενα κροκαλοπαγή (Μονόπωλης, 2004).

Η πιθανότερη ζώνη μέσω της οποίας η υδροφορία αυτή έρχεται σε υδραυλική επικοινωνία με τα υλικά της απόθεσης φαίνεται να είναι η περιοχή που επισημαίνεται η πηγή της Χαραυγής και τοπογραφικά υψηλότερα απ' τη θέση της πηγής (+763m). Στην περιοχή αυτή τα αργιλικά υλικά διατηρούνται κορεσμένα, το νερό κυκλοφορεί μέσα στις αδρομερέστερες ζώνες απόθεσης και η πίεση του νερού των πόρων αυξάνει περιοδικά ανάλογα με την πίεση του υπό πίεση υδροφόρου ορίζονται στα ανάντη.

Η περιοχή αυτή συμπίπτει με την θέση που καταγράφηκαν οι πρώτες αναθολώσεις κατά την εκδήλωση της αστοχίας. Η ελεύθερη πιεζομετρική επιφάνεια διαμορφώνεται την καλοκαιρινή περίοδο ανάντη της κατολίσθησης στα +833m (γεωτρήσεις YE2 και YE3) και στα +775m έως +761m στα κατάντη (γεωτρήσεις YKNP2, EANAP1) (σχήμα 5.4). Αυτό το ύψος στήλης νερού των 72m προκύπτει διαφορά υδραυλικού φορτίου που αναπτύσσει πίεση 720 kPa στο κροκαλοπαγές στη βάση της απόθεσης (Steiakakis et al, 2008).

Λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση την στάθμης στον υδροφορέα ανάντη της κατολίσθησης, που μπορεί να φθάνει τα 30m μεταξύ χειμερινής και καλοκαιρινής περιόδου, η ανώτερη πιεζομετρική επιφάνεια στην YE2 εκτιμάται στα +863m και το υδραυλικό φορτίο στη θέση της πηγής υπολογίζεται στα 100m πριν την εμφάνιση της κατολίσθησης. Η πίεση αυτή, που όπως είναι φυσικό μεταβιβάσθηκε στα υπερκείμενα υλικά της απόθεσης, είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πίεσης πόρων στο τέλος της χειμερινής περιόδου του 2004 περί τα 1000 kPa περίπου.

5.3. Περιγραφή της κατολίσθησης

5.3.1 Γενική περιγραφή της διαταραχθείσας εξωτερικής απόθεσης

Τα υπερκείμενα υλικά του ορυχείου Ν. Πεδίου αποτέθηκαν στο ρέμα της «Χαραυγής» (κεντρική περιοχή εξωτερικής απόθεσης) σε τρεις φάσεις. Κατά την 1^η φάση, που πραγματοποιήθηκε την περίοδο 1980-85, αποτέθηκαν υλικά πάχους 30-40m, προερχόμενα κυρίως από τις αργιλικές στρώσεις που υπέρκεινται των λιγνιτοφόρων οριζόντων του Νοτίου Πεδίου

Η απόθεση γινόταν σε σωρούς ύψους 7-8m (φωτογραφία 5.6) με βαθμιαία μετακίνηση του αποθέτη, προκειμένου το διαμορφούμενο επίχωμα να μη ξεπερνά το προαναφερόμενο ύψος. Ακολουθούσε εναπόθεση ξανά στο αρχικό σημείο, σε σωρούς άλλων 6-7m. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε επίχωμα ύψους 30-40m (μέχρι το απόλυτο υψόμετρο +840m έως +850m) με 4 ή 5 διαδοχικές αποθέσεις σωρών που είχαν χρονική διαφορά απόθεσης μερικές μέρες ή εβδομάδες.



Φωτογραφία 5.6. Αποθέτης σε λειτουργία. Κώνοι απόθεσης.

Κατά την αρχική απόθεση, τα λεπτόκοκκα υλικά με μικρή γωνία τριβής και υψηλό ποσοστό υγρασίας, πιθανολογείται ότι κύλησαν και αποτέθηκαν στη μισγάγγεια του εδάφους δημιουργώντας στη βάση της απόθεσης, αργιλικές στρώσεις με υψηλό ποσοστό υγρασίας (Προκαταρκτική Έκθεση Επιτροπής Εμπειρογνωμόνων που γνωμοδότησε για την κατολίσθηση, Σεπτ. 2004). Στην υπόθεση αυτή συνηγορεί και η μαρτυρία ότι προ 20ετίας, όταν άρχιζε η απόθεση παρουσιάσθηκαν προβλήματα βραχυχρόνιας ευστάθειας, με το αποτιθέμενο υλικό να κινείται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από το σημείο απόθεσής του. Για τον εγκιβωτισμό της μάζας του ποδιού της απόθεσης κατασκευάσθηκε σταθεροποιητικό ανάχωμα από χονδρόκοκκα υλικά.

Η σύσταση των αποθέσεων είναι βέβαιο ότι διαφέρει από κώνο σε κώνο ή και στον ίδιο κώνο, με συνέπεια να δημιουργούνται θύλακες άμμου ή ιλύος μέσα στην κατά το πλείστον αργιλική μάζα. Οι συνήθως μη διασταυρούμενοι κώνοι της απόθεσης ευνοούν τη συγκέντρωση νερών στα κενά που δημιουργούνται στους αλλεπάλληλα σχηματιζόμενους κώνους. Η τυχαία αυτή απόθεση των υλικών ποικίλης προέλευσης συμπεριλαμβανομένης της τέφρας που διαμορφώνεται σε ποζολάνη, δημιουργεί όπως είναι φυσικό, δυσκολία στην εκτίμηση αντιπροσωπευτικών μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων της όλης μάζας (Steiakakis et al, 2008).

Στη 2^η φάση απόθεσης, που πραγματοποιήθηκε το χρονικό διάστημα 1982-90, προστέθηκαν άλλα 30-40m, ανάλογης σύστασης με τα εδαφικά υλικά της πρώτης φάσης και η απόθεση έφθασε σε απόλυτο υψόμετρο τα +870 έως +880m.

Τέλος, από τις αρχές του 2004 άρχισε η 3^η φάση της απόθεσης (σχήμα 5.4 θέση ταινιόδρομου ΤΔ 153 – αποθέτη Α7) κατά την οποία προστέθηκαν άλλα 40m στείρων υλικών προσεγγίζοντας το υψόμετρο των +910m. Με την εξέλιξη αυτή, δημιουργήθηκε απόθεση συνολικού ύψους 100-110m. Τα υλικά της απόθεσης εστεροποιούντο κάτω από το ίδιο τους το βάρος. Όμως στα κοιλώματα που διαμορφώνονται μεταξύ των κώνων απόθεσης, συγκεντρωνόταν νερό από τα κατακρημνίσματα που συνέβαλε στη διατήρηση υψηλού ποσοστού υγρασίας (μέχρι κορεσμού) των εδαφικών υλικών με αρνητικές συνέπειες στην αποστράγγιση – στερεοποίησή τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν άρχισε η αστοχία (Απρίλιος 2004), η γενική κλίση από την κατώτερη μέχρι την ανώτερη βαθμίδα ήταν πιο ομαλή (περίπου 1:10 ή 10%) σε σχέση με την προβλεπόμενη (1:5,5) η οποία δεν είχε ακόμα διαμορφωθεί.

Τέλος όσον αφορά τις μέσες μορφολογικές κλίσεις του φυσικού εδάφους στο οποίο έγινε η απόθεση, (δηλαδή του ρέματος της Χαραυγής), κυμαίνονται από 3,6-4,2% (2,3 μοίρες) και είναι ευνοϊκές προς τη φορά εκδήλωσης της κατολίσθησης. Όσον αφορά δε τις εγκάρσιες στη διεύθυνση του ρέματος κλίσεις είναι σαφώς μεγαλύτερες (Steiakakis et al, 2008).

5.3.2. Χρονική εξέλιξη και μετρήσεις μετακινήσεων της κατολίσθησης

Η πρώτη πρόδρομη ένδειξη αστοχίας εμφανίστηκε στις 30.04.04 με τη μορφή μικρών ρωγμών στο δάπεδο λειτουργίας του αποθέτη Α7, που λειτουργεί στο υψηλότερο σημείο της απόθεσης (ύψος περίπου 110m). Την 01.05.04 εμφανίστηκαν ρωγμές και στο δάπεδο του ταινιόδρομου που λειτουργεί σε ενδιάμεσο επίπεδο απόθεσης (ύψους περίπου 80m.).

Την 08.05.2004 και λόγω υποχώρησης του αναχώματος της βάσης της απόθεσης και περαιτέρω εξέλιξης του φαινομένου διεκόπη η λειτουργία και του τρίτου αποθέτη Α7. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι ρωγματώσεις και μετακινήσεις των πρανών εντοπίσθηκαν έγκαιρα από τους υπεύθυνους του ορυχείου και λήφθηκαν τα απαιτούμενα μέτρα για την ασφάλεια του προσωπικού, την προστασία και ασφάλεια των εγκαταστάσεων, καθώς και για τον έλεγχο της εξέλιξης του φαινομένου και την ασφαλή τροφοδοσία του ΑΗΣ (Καβουρίδης 2008).

Από την 08.05.2004 που υποχώρησε το ανάχωμα της βάσης της απόθεσης υπήρξε συστηματική παρακολούθηση των μετακινήσεων σε διάφορα σημεία της κατολισθαίνουσας μάζας όχι μόνο για λόγους ασφάλειας αλλά και για το σχεδιασμό των μέτρων σταθεροποίησης. Για την παρουσίαση των μετακινήσεων επιλέχθηκε η μέτρηση της μετακίνησης αντιπροσωπευτικών σημείων της κατολισθαίνουσας μάζας. Συγκεκριμένα στη μετακινούμενη μάζα πακτώθηκαν σωλήνες διαμέτρου Φ100 και μήκους 1,5m., στους οποίους τοποθετήθηκαν ανακλαστήρες (πρίσματα). Από σταθερή περιοχή πραγματοποιούνται συνεχείς μετρήσεις προς όλους του ιοπογραφικούς στόχους σε ημερήσια βάση και στη φάση επιτάχυνσης του φαινομένου κάθε μια ώρα. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το total station leica ter με ακρίβεια στη μέτρηση αποστάσεων 5mm + 2ppm. Ο έλεγχος των σταθερών σημείων βάσης γινόταν με το gps turbos2 της topcom με ακρίβεια 10mm + 1ppm στον προσδιορισμό των χ, ψ και 20ppm +1ppm στο υψόμετρο Ζ. Στα σχήματα 5.7 και 5.8 δίνονται η ταχύτητα μετακίνησης και η αθροιστική μετακίνηση αντίστοιχα (Καβουρίδης, 2008).



Σχήμα 5.7. Ταχύτητα μετακίνησης (Steiakakis et al, 2008).



Σχήμα 5.8. Αθροιστική μετακίνηση (Καβουρίδης 2008).

Από τις επί τόπου παρατηρήσεις εξέλιξης του φαινομένου και από τα διαγράμματα μετακινήσεων της κατολισθαίνουσας μάζας προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Μετά την υποχώρηση του παλιού αναχώματος της βάσης της απόθεσης την 08.05.2004 (8 ημέρες μετά την εκδήλωση των πρώτων ρωγμών) το μέτωπο της διαρροής των υλικών κινείται με ταχύτητα 40-50 m/ημέρα
- Την 05.05.2004 και πριν από την υποχώρηση του παλιού αναχώματος άρχισε η κατασκευή του πρώτου αναχώματος για την ανάσχεση των μετακινήσεων στην κεντρική περιοχή της αστοχίας. Στο σχήμα 5.9 δίνεται το μέτωπο διαρροής του υλικού και η έναρξη κατασκευής του πρώτου ανασχετικού φράγματος.



Σχήμα 5.9. Μέτωπο κατολισθαίνουσας μάζας και θέσης πρώτου ανασχετικού φράγματος (Steiakakis et al, 2008).

- Η ταχύτητα του μετώπου διαρροής μειώνεται σε 10-20 m/ημέρα όταν η κατολισθαίνουσα μάζα συναντά το 1° ανάχωμα ύψους 20m. Όμως την 16.05.2004 το μέτωπο της διαρροής υπερπηδά το 1° ανάχωμα και συνεχίζει με ταχύτητα 10-15 m/ ημέρα.
- Την 16.05.2004 αρχίζει η κατασκευή 2^{ου} αναχώματος σε απόσταση 250-300
 μ. από το σημείο που ξεκίνησε η διαρροή του υλικού ακριβώς μπροστά από της εγκαταστάσεις του bunker λιγνίτη.
- Η κατολισθαίνουσα μάζα από τις 23.05.2004 με ταχύτητα 8 μ./ημέρα πιέζει το 2° ανάχωμα. Για την ενίσχυση και ανύψωση του 2^{ου} αναχώματος έγινε επιβράχυνση του bunker κατά 150m. Μεταξύ 25.05.2004 και 15.06.2004 το ανάχωμα (κεντρικό και πλευρικό) απέκτησε τις απαιτούμενες διαστάσεις και αντοχές και έτσι επιτεύχθηκε ο πλήρης εγκλωβισμός της διαρρέουσας μάζας. Σ' αυτό το διάστημα ο ρυθμός των μετακινήσεων κυμάνθηκε μεταξύ 5 έως 10 μ./ημέρα.
- Την 15.07.2004 οι μετακινήσεις μηδενίσθηκαν και το φαινόμενο αποσβέθηκε πλήρως. Στο σχήμα 5.10 δίνεται το τελικό φράγμα σταθεροποίησης της κατολίσθησης (Καβουρίδης 2008).



Σχήμα 5.10. Τελικό φράγμα σταθεροποίησης της κατολίσθησης. Α) Στη φάση κατασκευής (Ιούνιος 2004), Β) Κατάσταση το Σεπτέμβριο του 2006 (Καβουρίδης 2008).

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση της απόθεσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

6.1 Εισαγωγή δεδομένων

6.1.1. Γενικές ρυθμίσεις

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε η ανάλυση της επίπεδης ανηγμένης παραμόρφωσης (plane strain). Ορίσθηκαν τα τριγωνικά στοιχεία να είναι 6-κομβικά και για το πλέγμα σχεδιασμού επιλέχθηκε διάσταση 1m.

6.1.2. Γεωμετρία

Η γεωμετρία του μοντέλου διαμορφώθηκε με βάση την γεωλογία της περιοχής. Η γενική κλίση πρανών είναι της τάξεως του 10%.

Τα εδαφικά υλικά (σχήμα 6.2) διαχωρίζονται από τα ανώτερα προς τα κατώτερα ως εξής:

Τρία στρώματα απόθεσης (dump soil) συνολικού ύψους 117m τα οποία αποτέθηκαν σταδιακά και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους το καθένα. Κάτω από την απόθεση ορίσθηκε ένα στρώμα αργίλου με αμμοχάλικα (clay with gravels) και ένα στρώμα κροκαλοπαγών (conglomerate). Σε μεγαλύτερο βάθος ακολουθεί ένα στρώμα καστανής αργίλου (brown clay) μέσα στο οποίο περιλαμβάνεται ένα λεπτό στρώμα αμμοχάλικου (sand and gravel). Το υποκείμενο στρώμα αποτελείται στο σύνολό του από γκρίζα άργιλο (gray clay). Τα επιμέρους γεωμετρικά στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

Εδαφικό Υλικό	Πάχος (m)	Υψόμετρο στη κορυφή κάθε στρώματος (m)
Γκρίζα άργιλος (Gray Clay)	716	+716
Άμμος και αμμοχάλικο (Sand and Gravel)	3	+719
Καστανή άργιλος (Brown Clay)	39	+758
Κροκαλοπαγή (Conglomerate)	20	+778
Άργιλος με αμμοχάλικα (Clay with gravels)	16	+794
Απόθεση (1) (Dump Soil 1)	39	+833
Απόθεση (2) (Dump Soil 2)	39	+872
Απόθεση (3) (Dump Soil 3)	39	+911

Πίνακας 6.1.Γεωμετρία στρωμάτων.

Στα όρια της γεωμετρίας έχουν ορισθεί συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε:

- Στη βάση της γεωμετρίας υπάρχει πάκτωση η οποία εμποδίζει τόσο τις οριζόντιες
 όσο και τις κατακόρυφες μετακινήσεις.

- Στο κατακόρυφο δεξί και αριστερό όριο ορίζεται κύλιση ως προς τον y-άξονα
 επιτρέποντας έτσι μόνο τις κατακόρυφες μετακινήσεις.

6.1.3. Γεωτεχνικές παράμετροι

Σύμφωνα με προγενέστερες μελέτες (Steiakakis et al, 2008), θεωρήθηκαν τιμές και γεωτεχνικοί παράμετροι που αφορούν το υγρό – ξηρό φαινόμενο βάρος (γ_{sat} – γ_{unsat}), την διαπερατότητα (k), την συνοχή (c), την γωνία εσωτερικής τριβής (φ), την γωνία διασταλτικότητας (ψ), το λόγο Poisson (ν) και συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2. Για τα στρώματα των αποθέσεων οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson, θεωρήθηκαν ίσες με E = 80.000 kN/m² και ν = 0,3, ενώ για τα υπόλοιπα στρώματα με E = 150.000 kN/m², και ν = 0.3 αντίστοιχα. Επίσης θεωρήθηκε ότι η απόθεση εδράζεται σε κορεσμένους σχηματισμούς με δυνατότητα στράγγισης (drained condition). Όλες οι υπόλοιπες τιμές ορίσθηκαν εξ ορισμού από το πρόγραμμα.



Πίνακας 6.2. Γεωτεχνικοί παράμετροι των σχηματισμών.

Mohr-Co	oulomb	1 Dump_soil	2 Clay_with_gravels	3 Conglomerate	4 Brown_clay	5 Sand_ and_ gravel	6 Grey_clay
Туј	pe	Undrained/ Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γunsat	[kN/m ³]	19	19,4	18,5	19,4	18,5	18
γ _{sat}	[kN/m ³]	20	20,4	19,5	20,4	19,5	19
k _x	[m/day]	0,086	0,086	8,600	0,009	0,860	0,009
k _y	[m/day]	0,086	0,086	8,600	0,009	0,860	0,009
G _{ref*}	[kN/m ²]	30.769	57.692	55.555	57.692	57.692	57.692
E _{oed*}	$[kN/m^2]$	107.692	201.923	240.740	201.923	201.923	201.923
C _{ref}	[kN/m ²]	13,5	16	20	16	10	20
φ	[°]	23,4	24,7	38	24,7	32	35
ψ	[°]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E _{inc*}	[kN/m²/m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
yref*	[m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C _{increment} *	$[kN/m^2/m]$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T _{str.*}	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R _{inter.*}	[-]	1	1	1	1	1	1
Inter Permea	face bility*	Drained	Drain	Drain	Drain	Drain	Impermeable

*Όσοι συντελεστές έχουν αστερίσκο ορίζονται από το πρόγραμμα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο λογισμικό Plaxis ορίζονται και για τις δύο περιπτώσεις επίλυσης (στραγγιζόμενη και αστράγγιστη συμπεριφορά), οι ενεργές παράμετροι αντοχής και ακαμψίας Το πρόγραμμα επιπροσθέτως της ακαμψίας και της αντοχής του εδαφικού σκελετού, αυτόματα προσθέτει την ακαμψία του νερού και διακρίνει μεταξύ ενεργών τάσεων και υπερπιέσεων πόρων.

6.1.4. Μέθοδος Αριθμητικής Ανάλυσης

Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συμπεριφορά ελαστοπλαστική ανάλυση. Θεωρήθηκε ότι ισχύει το πρότυπο Mohr-Coulomb (MC), και προτείνεται να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος. Παράλληλα το πρότυπο αυτό έδωσε τη δυνατότητα να υπολογιστεί ο συντελεστής ευστάθειας με την τεχνική απομείωσης του c, φ.

6.1.5. Δημιουργία δυκτυώματος

Για την δημιουργία του δικτυώματος χρησιμοποιήθηκε κάναβος τριγωνικών στοιχείων με σταθερή πυκνότητα σε όλο το μήκος του. Δεδομένου ότι με μεγάλη πυκνότητα επιτυγχάνεται καλύτερη προσομοίωση, επιλέχθηκε ο κάναβος τον τριγωνικών στοιχείων να είναι πολύ πυκνός (very fine) σχήμα 6.3.

6.1.6. Ορισμός πίεσης πόρων

Αφού έγινε εισαγωγή των γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε υλικό, ο προσδιορισμός της γεωμετρίας και η δημιουργία του δικτυώματος, ακολούθησε το επόμενο στάδιο όπου εισήχθησαν οι πιέσεις του νερού, και ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών.

Ενεργοποιώντας την επιλογή του προσδιορισμού γεωμετρίας απενεργοποιούνται τα τρία στρώματα της απόθεσης (σχήμα 6.4), έτσι ώστε να μην ληφθούν υπόψη στο πρώτο υπολογιστικό βήμα. Αυτό γίνεται γιατί στο πρώτο βήμα υπολογισμών εφαρμόζεται μόνο η επιβολή του ίδιου του βάρους του υπόβαθρου (gravity loading), στο οποίο εν συνεχεία τοποθετήθηκαν οι αποθέσεις.

Συνήθως μετά τον προσδιορισμό της αρχικής γεωμετρίας ζητείται και η δημιουργία αρχικών τάσεων (διαδικασία K₀). Πρέπει να τονιστεί ότι στην

συγκεκριμένη περίπτωση εξαιτίας του ότι έχει υιοθετηθεί η φόρτιση βαρύτητας (gravity loading), δεν εφαρμόσθηκε η διαδικασία αυτή (K_0) στη παρούσα φάση.



Σχήμα 6.3. Δημιουργία Δικτυώματος (Very Fine).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένας γενικός φρεάτιος ορίζοντας, στην επιφάνεια του υποβάθρου, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις φυσικές πιέσεις που προκαλεί το νερό σε αυτό (σχήμα 6.5). Το υψόμετρο που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί ο υδροφόρος ορίζοντας είναι στα +740m και 54m κάτω από την ανώτερη επιφάνεια του υποβάθρου. Επιλέγοντας την δημιουργία πίεσης νερού (generate water pressure) το λογισμικό ορίζει τις πιέσεις που δέχεται ο σχηματισμός σε όλο το ανάπτυγμά του όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6. Εδώ τελειώνει η φάση εισαγωγής των δεδομένων (input). Η επόμενη φάση είναι των υπολογισμών (calculation).



Σχήμα 6.4. Προσδιορισμός αρχικής γεωμετρίας.



Σχήμα 6.5. Δημιουργία του γενικού υδροφόρου ορίζοντα στα +740m.



Σχήμα 6.6. Ανάπτυξη πίεσης πόρων στο υπόβαθρο.

6.2 Υπολογιστική Φάση

Στα πλαίσια της παραμετρικής ανάλυσης αναπτύχθηκαν δύο βασικά σενάρια υπολογιστικής επίλυσης:

- Σενάριο ανάλυσης προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργείται από τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Σενάριο ανάλυση προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργείται από υπόγεια ροή στο υποκείμενο κροκαλοπαγή και αστράγγιστες συνθήκες απόθεσης.

Στο πρώτο σενάριο ανάλυσης θεωρήθηκαν 2 περιπτώσεις:

- a) Τα στρώματα της απόθεσης είναι αστράγγιστα (undrained),
- b) Τα στρώματα της απόθεσης είναι στραγγιζόμενα (drained).

Πριν από κάθε ενέργεια ορίσθηκαν τα σημεία πάνω στο δικτύωμα για τα οποία μετά τις υπολογιστικές πράξεις θα είναι δυνατόν να αποδοθούν οι γραφικές παραστάσεις της μεταβολής των φορτίων, των τάσεων και των μετατοπίσεων. Τα σημεία επιλέχθηκαν στο μέτωπο του πρανούς δεδομένου ότι στην περιοχή αυτή αναμένεται να εκδηλωθεί η μεγαλύτερη κινητικότητα (σχήμα 6.7)

Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε για όλες τις αναλύσεις, συνοψίζεται στο πίνακα 6.3. Αρχικά έγινε η επιβολή της βαρύτητας στο υπόβαθρο (gravity loading) υπολογιστική φάση 1^η. Ακολουθεί η κατασκευή της απόθεσης (υπολογιστική φάση 2,5,8). Για κάθε φάση απόθεσης υπολογίζεται ο συντελεστής ευστάθειας (υπολογιστική φάση 3,6,9). Ενδιάμεσα μετά το στάδιο του προσδιορισμού της ευστάθειας, ακολούθησε υπολογιστική φάση για την απαλοιφή υπολογιστικών σφαλμάτων. Αναλυτικά τα βήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Υπολογιστική Φάση (Phase)	Υπολογιστικός τύπος (Calculation type)	Εισαγωγή φορτίσεων (Loading Input)	Ορισμός πίεσης πόρων με ανάπτυξη υδροφόρου ορίζοντα (αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες)	Ορισμός πίεσης πόρων στο στρώμα του κροκαλοπαγούς (συνθήκες αστράγγιστες)
Φάση 1 ^η	Plastic	Total multipliers	Επιβολή ιδίου βάρους (gravity loading). Γενικός υδροφόρος στα +740m.	Επιβολή ιδίου βάρους (gravity loading). Γενικός υδροφόρος στα +740m.
Φάση 2 ^η	Plastic	Staged Construction	Προσθήκη 1 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Υδροφόρος +813m.	Προσθήκη 1 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Ύψος στήλης νερού 20m.
Φάση 3 ^η	Phi-c reduction	Incremental Multipliers	Συντελεστής ευστάθειας	Συντελεστής ευστάθειας
Φάση 4 ^η	Plastic	Staged Construction	Βήμα απαλοιφής υπολογιστικών σφαλμάτων	Βήμα απαλοιφής υπολογιστικών σφαλμάτων
Φάση 5 ^η	Plastic	Staged Construction	Προσθήκη 2 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Υδροφόρος +852m.	Προσθήκη 2 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Ύψος στήλης νερού 59m.
Φάση 6 ^η	Phi-c reduction	Incremental Multipliers	Συντελεστής ευστάθειας	Συντελεστής ευστάθειας
Φάση 7 ^η	Plastic	Staged Construction	Βήμα απαλοιφής υπολογιστικών σφαλμάτων	Βήμα απαλοιφής υπολογιστικών σφαλμάτων
Φάση 8 ^η	Plastic	Staged Construction	Προσθήκη 3 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Υδροφόρος +891m.	Προσθήκη 3 ^{ου} στρώματος απόθεσης ύψους 39m. Ύψος στήλης νερού 98m. Αστοχία
Φάση 9 ^η	Phi-c reduction	Incremental Multipliers	Συντελεστής ευστάθειας	Συντελεστής ευστάθειας

Πίνακας 6.3. Σύνοψη υπολογιστικών φάσεων.

6.2.1. Ανάλυση του προβλήματος με ανύψωση υδροφόρου ορίζοντα και συνθήκες στράγγισης

Στο πρώτο στάδιο (υπολογιστική φάση 1, πίνακας 6.3) εφαρμόζεται η επιβολή του ιδίου βάρους των σχηματισμών και η πίεση πόρων λόγω του γενικού υδροφόρου ορίζοντα όπως ορίσθηκαν στην εισαγωγή αρχικών συνθηκών (initial conditions) (σχήμα 6.4). Στον υπολογιστικό τύπο επιλέγουμε την ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς. (plastic) (σχήμα 6.8).

🚟 Plaxis 8.2 Calcula	ations - Me y	droforoys.	plx					
File Edit View Calcula	ate Help							
Input Output Curves	🗠 🔒	A ++	+++ ++ -> Outj	out				
General Parameters	<u>M</u> ultipliers P	review						
Phase				Calculation type				
Number / ID.:	1 <pha< td=""><td>se 1></td><td></td><td>Plastic</td><td>-</td><td></td><td></td><td></td></pha<>	se 1>		Plastic	-			
Start from phase:	0 - Initial phas	е	•		Advanced			
Log info				Comments		_		
Prescribed ultima	ate state fully r	eached	<					
					Paramete	rs		
					Rext	🚉 Inser	rt 📕	Delete.
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0
<pre><pre><pre><pre><pre><pre><pre><pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre>			Plastic	Total multipliers	0,00 day	0		6

Σχήμα 6.8. Δεδομένα πρώτης φάσης

Στο φύλλο των παραμέτρων υπολογιστικού ελέγχου (parameters) επιλέγεται ο αριθμός των βημάτων 100, ενώ επιλέγονται οι επιλογές του μηδενισμού των μετακινήσεων (reset displacements to zero) και της παράβλεψης αποτελεσμάτων αστράγγιστης συμπεριφοράς (ignore undrained behaviour). Για τους παραμέτρους επαναληπτικής διαδικασίας (iterative procedure) επιλέγονται οι εξ ορισμού ρυθμίσεις.

Στη συνέχεια ακολουθεί η κατασκευή της απόθεσης. Η επιλογή staged construction είναι η κατάλληλη για να αποδώσει με τον καλύτερο τρόπο τη διαδικασία της απόθεσης των υλικών κατά στάδια (σε διαφορετικές χρονικές περιόδους). Η επιλογή αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να ελεγχτεί η κινητική συμπεριφορά της απόθεσης με την σταδιακή ανάπτυξη.

Όπως είναι γνωστό (κεφάλαιο 5), η απόθεση πραγματοποιήθηκε σε τρείς φάσεις. Στην πρώτη φάση αποτέθηκαν υλικά, αργιλικής σύστασης, πάχους 30-40m σε χρονική διάρκεια περίπου πέντε (5) ετών από το 1980-1985.

Στη δεύτερη φάση της απόθεσης προστέθηκαν υλικά 30-40m ίδιας σύστασης κατά τη χρονική διάρκεια 1982-1990. Στην τρίτη και τελευταία φάση κατά την διάρκεια της οποίας εκδηλώθηκε και η αστοχία ξεκίνησε στις αρχές του 2004 και προστέθηκαν υλικά 30-40m ίδιας ποιότητας με τα προηγούμενα. Αυτές οι τρείς φάσεις (φάση 2,5,8 πίνακας 6.3) ορίζονται και επιχειρείται η εκτίμηση της κινητικής συμπεριφοράς της απόθεσης. Ποιο αναλυτικά προστίθεται η 1^η φάση απόθεσης (2^η υπολογιστική φάση). Επιλέγεται ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς (plastic) σχήμα 6.10.

			•					
File Edit View Calcula	ite Help							
Input Output Curves	👄 🔒	₽ ₽ ++	++ ++ -> Out	put				
General Parameters	Multipliers P	review						
Phase				Calculation type		_		
Number / ID.:	8 <	se 8>		Phi/c reduction	•			
Start from phase:	4 - <phase 4=""></phase>		•		Advanced			
Log info				Comments		_		
ок			~					
			~					
					Paramete	ers		
							1	
				_	Next	💐 Inse	rt 🗎	Delete
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0
✓ <phase 1=""></phase>	1	0	Plastic	Total multipliers	0,00 day	0	1	6
✓ <phase 2=""></phase>	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 day	2	7	11

Σχήμα 6.10. Δημιουργία δεύτερης φάσης

Στο φύλλο των παραμέτρων υπολογιστικού ελέγχου επιλέγονται εξ ορισμού 250 βήματα, και επιβεβαιώνονται οι επιλογές μηδενισμός μετακινήσεων και διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων (delete intermediate steps). Ενεργοποιείται ο μηδενισμός των μετακινήσεων ώστε να διαγραφούν μετατοπίσεις οι οποίες δημιουργήθηκαν από το προηγούμενο στάδιο της φόρτισης βαρύτητας και δεν πρέπει να συμπεριληφθούν στα επόμενα βήματα. Παρόλο που η όλη απόθεση θεωρείται στραγγιζόμενη, το συγκεκριμένο στρώμα ορίζεται αστράγγιστο καθώς τα υλικά αποτέθηκαν πολύ γρήγορα, ήταν κορεσμένα και τα κατώτερα μέλη της απόθεσης κύλισαν και εγκλωβίσθηκαν μέσα στην μισγάγγεια που διαμόρφωνε το ανάγλυφο. Παράμετροι επαναληπτικής διαδικασίας επιλέγονται αυτές που εξ ορισμού προτείνει το πρόγραμμα.

Με την επιλογή define (σχήμα 6.11). το λογισμικό ανατρέχει στο παράθυρο εισαγωγής υδατικών συνθηκών και προσδιορισμού αρχικών συνθηκών (σχήμα 6.12).

Ενεργοποιείται το πρώτο στρώμα της απόθεσης (πάχους 39m) σχήμα 6.12. Αφού ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός της νέα γεωμετρίας ορίζονται οι υδατικές συνθήκες.

File Edit View Calcula	ite Help							
Input Output Curves	🗠 🔒	A +++	++ ++ -> Outp	put				
General Parameters	Multipliers P	review						
Control paramete Additional Steps	rs : 100	\$	✓ Reset displa✓ Ignore undr✓ Delete inter	icements to zero ained behaviour mediate steps				
□Iterative procedu ⓒ Standard set ⓒ Manual settir	re tting ng	Define,	Loading input Staged con: Total multip Incrementa Time interval : Realised end tin	struction liers I multipliers 0,0000 € day ne : 0,0000 € day	<u>A</u> dvance Define	d 		
					Next	💐 Inse	rt _	🐺 Delete
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0
✓ <phase 1=""></phase>	1	0	Plastic	Total multipliers	0,00 day	0	1	6
A Phase 2>			Plastic	Staged construction	0,00 day	2		11

Σχήμα 6.11. 2^η Φάση. Επιλογή Staged construction.



Σχήμα 6.12. Ενεργοποίηση πρώτου στρώματος απόθεσης.

Στο σημείο αυτό ανυψώνεται ο υδροφόρος ορίζοντας σε υψηλότερο σημείο (+813m) του αρχικού (σχήμα 6.13). Ο νέος αυτός υπερυψωμένος υδροφόρος ευθύνεται πλέον για την δημιουργία πιέσεων πόρων στον σχηματισμό. Οι πιέσεις που διαμορφώνονται φαίνονται στο σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.13. Ανύψωση υδροφόρου ορίζοντα με την σχεδίαση νέου σε υψόμετρο +813m.





Σχήμα 6.15 Πιέσεις πόρων μετά την πρώτη ανύψωση του υδροφόρου (φάση 2^η).

Με την επιλογή update εισάγονται νέα δεδομένα για την συγκεκριμένη υπολογιστική φάση καθώς έχει προστεθεί το πρώτο στρώμα της απόθεσης και ο υδροφόρος έχει ανυψωθεί κατά 64m.

Με ανάλογα βήματα δημιουργούνται και οι επόμενες δύο φάσεις (φάση 5, 8) ενεργοποιώντας αρχικά το δεύτερο στρώμα απόθεσης και εν συνεχεία το τρίτο, με ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα κατ' αντιστοιχία σε +852m και +891m. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι κατά την ενεργοποίηση της δεύτερης και τρίτης απόθεσης θεωρήθηκε ότι τα δύο αυτά στρώματα συμπεριφέρονταν σαν στραγγιζόμενα, ενώ το πρώτο στρώμα απόθεσης όπως προαναφέρθηκε θεωρήθηκε αστράγγιστο.

Για να εκτιμηθεί ο συντελεστής ευστάθειας ο οποίος διαμορφώνεται σταδιακά με την προσθήκη των επιμέρους στρωμάτων της απόθεσης δημιουργήθηκαν τρείς υπολογιστικές φάσεις (πίνακας 6.3, φάσεις 3, 6, 9), η οποίες προκαλούν απομείωση των παραμέτρων c-φ. Οι φάσεις αυτές εισήχθησαν σταδιακά αμέσως μετά την απόθεση κάθε στρώματος. Στο υπολογιστικό φύλλο των παραμέτρων ο αριθμός των

βημάτων ορίζεται 100 (σχήμα 6.16), και ενεργοποιείται η επιλογή μηδενισμός μετακινήσεων.

Ας σημειωθεί ότι μετά από κάθε βήμα υπολογισμού του συντελεστή ευστάθειας εισάγεται μία υπολογιστική φάση (φάσεις 4,7,10 πίνακας 6.3) με την επιλογή staged construction, κατά την οποία γίνεται απαλοιφή των υπολογιστικών σφαλμάτων, με σκοπό να αποφευχθούν φαινόμενα αστάθειας του υπολογιστικού συστήματος. Τα στάδια αυτά εφαρμόζονται μετά την διαδικασία c - φ (φάσεις 3, 6, 9, πίνακας 6.3) και πριν τη διαδικασία ανύψωσης του υδροφόρου και της προσθήκης του επόμενου στρώματος της απόθεσης (φάσεις 6, 8, 11, πίνακας 6.3).

🚟 Plaxis 8.2 Calcula	ations - Yd	roforoi_Dra	ained.plx						
File Edit View Calcula	ate Help								
Input Output Curves	🗠 🔒	₽ [‡]	+++ +++ + ++	tput					
General Parameters	General Parameters Multipliers Preview								
Phase				Calculation type					
Number / ID.:	8	ase 11>		Plastic		•			
Start from phase:	7 - <phase 9<="" td=""><td>></td><td>•</td><td></td><td>Advanced</td><td></td><td></td><td></td></phase>	>	•		Advanced				
Log info				Comments					
Prescribed ultima Load advanceme Inspect output a Accuracy conditi	Prescribed ultimate state not reached! Load advancement procedure fails, try manual control Inspect output and load-displacement curve Accuracy condition not reached in last step								
]	Parame	eters			
					Rext	💐 Ins	ert	🐺 Delete	
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last	
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 day	0	0	0	
✓ <phase 1=""></phase>	1	0	Plastic	Total multipliers	0,00 day	0	1	6	
✓ <phase 2=""></phase>	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 day	2	7	12	
✓ <phase 3=""></phase>	3	2	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 day	2	13	212	
✓ <phase 4=""></phase>	9	3	Plastic	Staged construction	0,00 day	2	213	214	
✓ <phase 5=""></phase>	4		pla atta	channel and show that			215	221	
	4	9	Plastic	Staged construction	0,00 day	4		221	
✓ <phase 6=""></phase>	5	4	Plastic Phi/c reduction	Staged construction Incremental multipliers	0,00 day 0,00 day	4	222	321	
✓ <phase 6=""> ✓ <phase 7=""></phase></phase>	7 5 10	9 4 5	Plastic Phi/c reduction Plastic	Staged construction Incremental multipliers Staged construction	0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 4	222 322	321 323	
✓ <phase 6=""> ✓ <phase 7=""> ✓ <phase 8=""></phase></phase></phase>	4 5 10 6	9 4 5 5	Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic	Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction	0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 6	222 322 324	321 323 331	
 ✓ <phase 6=""></phase> ✓ <phase 7=""></phase> ✓ <phase 8=""></phase> ✓ <phase 9=""></phase> 	4 5 10 6 7	9 4 5 5 6	Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction	Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers	0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 6 6	222 322 324 332	321 323 331 531	
 ✓ <phase 6=""></phase> ✓ <phase 7=""></phase> ✓ <phase 8=""></phase> ✓ <phase 9=""></phase> ✓ <phase 10=""></phase> 	4 5 10 6 7 11	9 4 5 5 6 7	Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic	Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction	0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 6 6	222 322 324 332 532	321 323 331 531 538	
 ✓ <phase 6=""></phase> ✓ <phase 7=""></phase> ✓ <phase 8=""></phase> ✓ <phase 8=""></phase> ✓ <phase 9=""></phase> ✓ <phase 10=""></phase> X <phase 11=""></phase> 	4 5 10 6 7 11 8	9 4 5 5 6 7 7	Plastic Phi/c reduction Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic	Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction	0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 6 6 8	222 322 324 332 532 539	321 323 331 531 538 545	
 ✓ <phase 6=""></phase> ✓ <phase 7=""></phase> ✓ <phase 7=""></phase> ✓ <phase 8=""></phase> ✓ <phase 9=""></phase> ✓ <phase 10=""></phase> X <phase 11=""></phase> 	4 5 10 6 7 11 8	9 4 5 6 7 7	Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic	Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction	0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	4 4 6 6 8	222 322 324 332 532 539	321 323 331 531 538 545	

Σχήμα 6.16. Τελική άποψη υπολογιστικών φάσεων.

Μετά από την σταδιακή εισαγωγή των τριών στρωμάτων απόθεσης, και την εύρεση του συντελεστή ευστάθειας γίνεται η εισαγωγή ακόμα μιας υπολογιστικής φάσης (φάση 11^η, πίνακας 6.3). Στη φάση αυτή θα διερευνηθεί η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα που προκαλεί πιέσεις πόρων ικανές να προκαλέσουν αστοχία. Μετά από επαναλαμβανόμενες δοκιμές, προέκυψε ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, πάνω από το οποίο, η απόθεση αστοχεί, είναι τα +899m δηλαδή 12m από την επιφάνεια της απόθεσης. Αν ο υδροφόρος ορίζοντας φτάσει ή ξεπεράσει το σημείο αυτό τότε εκδηλώνεται αστοχία στο πρανές της απόθεσης.

6.2.2. Ανάλυση προβλήματος με ανύψωση υδροφόρου ορίζοντα και αστράγγιστες συνθήκες.

Στην ανάλυση αυτή ακολουθούνται τα ίδια βήματα, όπως και στην προηγούμενη ανάλυση (κεφάλαιο 6.2.1). Οι υπολογισμοί εφαρμόζονται εισάγοντας τα ίδια δεδομένα για κάθε φάση, μόνο που στην περίπτωση αυτή, τα τρία στρώματα της απόθεσης θεωρήθηκαν αστράγγιστα. Ακολουθήθηκε ίδια διαδικασία για την επιβολή ιδίου βάρους (gravity loading) των υποκείμενων, την σταδιακή ενεργοποίηση στρωμάτων απόθεσης με ταυτόχρονη ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και για την εύρεση του συντελεστή ευστάθειας (πίνακας 6.3). Οι υπολογιστικές φάσεις φαίνονται στο σχήμα 6.20.

e Edit View Cal	ulations - Yd culate Help	roforoi_un	drained.plx						
Input Output Curves	🗠 🔒	A [‡]		Itput					
General Parameters Multipliers Preview									
Phase				Calculation type					
Number / ID.:	6 <ph< td=""><td>iase 8></td><td></td><td>Plastic</td><td></td><td>-</td><td></td><td></td></ph<>	iase 8>		Plastic		-			
Start from phas	e: 5 - «Phase6"	<u></u>	-		Advanced				
Stare from prids	or jo - kritasco,	·			Manancea				
Log info				Comments					
Prescribed ult	imate state not i	reached!	~			-			
Load advance	ement procedure	fails, try man	ual control 🛛 🗧						
Accuracy con	ut and load-displa idition not reache	acement curve ad in last step							
					Param	eters			
					📮 Next	🛛 🗸 In:	sert	🖳 Delete	
* 1									
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last	
Identification Initial phase	Phase no. 0	Start from 0	Calculation N/A	Loading input N/A	Time 0,00 day	Water 0	First	Last	
Identification Initial phase <pre> </pre> <pre> <pre> </pre> </pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <pre> <</pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre></pre>	Phase no. 0 1	Start from 0 0	Calculation N/A Plastic	Loading input N/A Total multipliers	Time 0,00 day 0,00 day	Water 0 0	First 0 1	Last 0 6	
Identification Initial phase <pre></pre> <pre>Initial phase 1> <pre></pre> <pre></pre> <pre>Initial phase 1></pre> <pre></pre> <pre>Initial phase 2></pre></pre>	Phase no. 0 1 2	Start from 0 0 1	Calculation N/A Plastic Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction	Time 0,00 day 0,00 day 0,00 day	Water 0 0 2	First 0 1 7	Last 0 6 12	
Initial phase V <phase 1=""> V <phase 2=""> V <phase 3=""></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3	Start from 0 1 2	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers	Time 0,00 day 0,00 day 0,00 day 0,00 day	Water 0 0 2 2	First 0 1 7 13	Last 0 6 12 112	
Initial phase V <phase 1=""> V <phase 2=""> V <phase 3=""> V <phase 4=""> V</phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9	Start from 0 1 2 3	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2	First 0 1 7 13 113	Last 0 6 12 112 114	
Initial phase ✓ <phase 1=""> ✓ <phase 2=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 4=""> ✓ <phase 5=""></phase></phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9 4	Start from 0 1 2 3 9	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2 2 4	First 0 1 7 13 113 115	Last 0 6 12 112 114 120	
Initial phase Initial phase <phase 1=""> <phase 2=""> <phase 3=""> <phase 4=""> <phase 5=""> <phase 5=""></phase></phase></phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5	Start from 0 1 2 3 9 4	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2 4 4	First 0 1 7 13 113 115 121	Last 0 6 12 112 114 120 220	
Interdification Initial phase ✓ <phase 1=""> ✓ <phase 2=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 4=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 7=""></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10	Start from 0 1 2 3 9 4 5	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2 4 4 4 4	First 0 1 7 13 113 115 121 221	Last 0 6 12 112 114 120 220 222	
Initial phase ✓ Phase 1> ✓ Phase 2> ✓ Phase 2> ✓ Phase 4> ✓ Phase 5> ✓ Phase 5> ✓ Phase 7> X < Phase 8>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10 6	Start from 0 1 2 3 9 4 5 5	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Phi/c reduction Phi/c reduction Plastic Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2 4 4 4 4	First 0 1 7 13 113 115 121 221 223	Last 0 6 12 112 114 120 220 222 228	
Identification Initial phase ✓ Phase 1> ✓ Phase 2> ✓ Phase 2> ✓ Phase 3> ✓ Phase 4> ✓ Phase 5> ✓ Phase 5> ✓ Phase 7> ✓ Phase 8> ✓ Phase 9>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10 6 7	Start from 0 1 2 3 9 4 5 6	Calculation N/A Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Incremental multipliers	Time 0,00 day	Water 0 2 2 4 4 4 4 6	First 0 1 7 13 113 115 121 221 223	Last 0 6 12 112 114 120 220 222 228	
Initial phase ✓ <phase 1=""> ✓ <phase 2=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 7=""> ✓ <phase 9=""> ➡ <phase 10=""></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10 6 7 11	Start from 0 0 1 2 3 9 4 5 6 7	Calculation N/A Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Plastic Pli/c reduction Plastic Plastic Plistic Phi/c reduction Plastic Phi/c reduction Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction	Time 0,00 day	Water 0 2 2 2 4 4 4 4 6 6 6	First 0 1 7 13 113 115 121 221 223	Last 0 6 12 112 114 120 220 222 228	
Initial phase ✓ <phase 1=""> ✓ <phase 2=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 3=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 5=""> ✓ <phase 7=""> ✓ <phase 9=""> ➡ <phase 10=""> ➡ <phase 11=""></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase></phase>	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10 6 7 11 8	Start from 0 1 2 3 9 4 5 5 6 7 7	Calculation N/A Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction	Time 0,00 day 0,00 day	Water 0 2 2 2 4 4 4 4 6 6 6 8	First 0 1 7 13 113 115 121 221 223	Last 0 6 12 112 114 120 220 222 228	
Internetication Initial phase	Phase no. 0 1 2 3 9 4 5 10 6 7 11 11 8	Start from 0 1 2 3 9 4 5 6 7	Calculation N/A Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Phi/c reduction Plastic Phi/c reduction Plastic Plastic Plastic	Loading input N/A Total multipliers Staged construction Incremental multipliers Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction Staged construction	Time 0,00 day 0,00 day	Water 0 2 2 4 4 4 4 6 6 6 8	First 0 1 7 13 113 115 121 221 223	Last 0 6 12 112 114 120 220 222 228	



Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς, κατά την προσθήκη της τρίτης φάσης απόθεσης και της παράλληλης ανύψωσης του υδροφόρου στα +891m η απόθεση αστοχεί και οι υπολογισμοί σταματάνε. Συνεπώς όταν οι αποθέσεις θεωρηθούν σε συνθήκες αστράγγιστες παρατηρείται αστάθεια με μικρότερη πίεση πόρων σε σχέση με την περίπτωση όπου τα στρώματα της απόθεσης θεωρούνταν στραγγιζόμενα.

6.2.3. Ανάλυση προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργείται από το οριζόμενο υδραυλικό φορτίο

Η διαφοροποίηση των ενεργειών σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση (που αφορούσε τον ορισμό υδροφόρου ορίζοντα) έγκειται στο γεγονός ότι η πιεζομετρία που διαμορφώνεται στην απόθεση καθορίζεται με βάση τις πιέσεις που διαμορφώνονται στο υποκείμενο στρώμα κροκαλοπαγών.

Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, σε κάθε στάδιο της απόθεσης βρέθηκε ο συντελεστής ευστάθειας, ενώ τέλος με επαναλαμβανόμενες δοκιμές προσδιορίστηκε η πίεση που προκαλεί αστοχία.

Μετά την φόρτιση ιδίου βάρους και την κατασκευή της απόθεσης κατά στάδια επιλέγεται η εντολή define. Το πρόγραμμα ανατρέχει στο παράθυρο προσδιορισμού αρχικών συνθηκών γεωμετρίας και εισαγωγής υδατικών συνθηκών. Στο φύλλο προσδιορισμού της αρχικής γεωμετρίας ενεργοποιείται το πρώτο στρώμα απόθεσης. Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι υδατικές συνθήκες. Θεωρείται θέση Η στην οποία ορίζεται σταθερή μόνιμη ροή. Η θέση αυτή βρίσκεται στο αριστερό πλευρικό όριο του μοντέλου σε απόλυτο υψόμετρο +794m. Ξεκινάει από την βάση του στρώματος των κροκαλοπαγών (+758m) και φτάνει μέχρι την επιφάνεια του υποβάθρου (+794m σχήμα 6.18, σημεία 76-77-81). Οι αριθμητικές τιμές στο ύψος στήλης νερού (groundwater head) υποδείχθηκαν από την διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής (Steiakakis et al., 2008).

Το υδραυλικό φορτίο ορίσθηκε ίσο με το ύψος στήλης νερού 20m για την πρώτη φάση απόθεσης (σχήμα 6.18).

86	•		
90 81 77	91 Groundwater head Point 81 Groundwater head : 813.000 ♀ m Pore pressure : -193.000 ♀ khym 2	Point 77 Groundwater head : 798.000 🔮 m Pore pressure : 203.000 🔮 ^{Jkl} ,m ²	
76		QK <u>Cance</u>	
59 75			

Σχήμα 6.18. Υπολογιστική φάση 2^η. Εισαγωγή groundwater head μετά την απόθεση του πρώτου στρώματος.

Για την διαμόρφωση της υπόγειας ροής με κατεύθυνση από τη θέση Η προς το πρανές της απόθεσης, θα πρέπει να οριστεί και ένα δεύτερο σημείο με μικρότερο ή ίσο υδραυλικό φορτίο. Το σημείο αυτό βρίσκεται στη θέση όπου παλαιότερα υπήρχε διαλείπουσα πηγή που καλύφθηκε από τις αποθέσεις του λιγνιτωρυχείου (σχήμα 6.19). Ορίζοντας στην περιοχή αυτή (θέση h), υδραυλικό φορτίο ισοδύναμο με ύψος στήλης νερού 19m. προκύπτει υδραυλική βαθμίδα που προκαλεί ροή του νερού προς τη πηγή.



Σχήμα 6.19. Θέση διαλείπουσας πηγής.

Ενεργοποιώντας την επιλογή για τη δημιουργία πίεσης πόρων (generate water pressure) εμφανίζεται ένα παράθυρο (σχήμα 6.20) στο οποίο ζητείται να επιλεγεί με ποια μορφή θα δημιουργηθούν οι υδατικές συνθήκες. Επιλέγεται το groundwater

head, ενώ για τους παραμέτρους υπολογισμού (groundwater calculations) επιλέγονται οι εξ ορισμού ρυθμίσεις (standard settings).

Water pressure generation	×
Generate by ○ Phreatic level ⓒ Groundwater calculation (steady state)	ration
Groundwater calculation Standard settings Manual settings Define	
<u>O</u> K <u>C</u> ancel	Help

Σχήμα 6.20. Παράθυρο επιλογής υδατικών συνθηκών.

Το πρόγραμμα παρουσιάζει τις υδατικές συνθήκες που διαμορφώνονται με τις οριακές συνθήκες του επιβάλλονται.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η ενεργοποίηση του πρώτου στρώματος απόθεσης και έχουν οριστεί οι υδατικές του συνθήκες, ακολουθείται η ίδια διαδικασία για το δεύτερο και το τρίτο στρώμα απόθεσης.

Με την εισαγωγή του τρίτου στρώματος απόθεσης και την αύξηση του ύψους στήλης νερού στα 98m η απόθεση αστοχεί και οι υπολογισμοί σταματάνε Τα αποτελέσματα των υδατικών συνθηκών παρουσιάζονται στο σχήμα 6.21, 6.22, 6.23 για τα διάφορα στάδια απόθεσης.



Σχήμα 6.21. Δημιουργία υπόγειας ροής, πρώτο στρώμα απόθεσης.

Στον πίνακα 6.4. δίνονται οι τιμές του ύψους στήλης νερού που εισάγονται σε κάθε φάση απόθεσης σε δύο θέσεις του δικτυώματος.

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Φάση	Υδραυλικό φορτίο (ύψος στήλης νερού) στην θέση Η	Υδραυλικό φορτίο (ύψος στήλης νερού) στη θέση h
1° στρώμα απόθεσης	20m	19m
2° στρώμα απόθεσης	59m	58m
3° στρώμα απόθεσης	98m	97m

Πίνακας 6.4. Τιμές ύψους στήλης νερού στην θέση Η και h, στα διάφορα στάδια απόθεσης.



Σχήμα 6.22. Υπόγεια ροή μετά την απόθεση του δεύτερου στρώματος.



Σχήμα 6.23. Υπόγεια ροή μετά την απόθεση του τρίτου στρώματος.

<u>Υπολογισμός συντελεστή ευστάθειας (c – phi reduction)</u>

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ευστάθειας δημιουργούνται τρείς υπολογιστικές φάσεις, που ακολουθούν την κάθε φάση απόθεσης. Επιλέγοντας:

- Υπολογιστικός τύπος: c phi reduction
- Additional steps: 100

υπολογίζεται ο συντελεστής ευστάθειας μετά την κάθε απόθεση κάθε φάσης. Αφού τελειώσουν όλα τα βήματα υπολογισμού προχωράμε στο επόμενο τμήμα του Plaxis αυτό των αποτελεσμάτων.

6.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά με διάφορα γραφήματα με την επιλογή (Output) του Plaxis 2D. Παρουσιάζονται τα κυριότερα τα οποία αφορούν:

- → Αθροιστικές μετακινήσεις (Total displacement)
- -> Αυξητικές μετατοπίσεις (Total increments)
- → Ολικές παραμορφώσεις (Total strains)
- → Σημεία αστοχίας (Plastic Points)
- \rightarrow Διάγραμμα ροής (Flow Field)
- → Σχετική διατμητική τάση (Relative shear stress)
- → Ενεργή πίεση πόρων (Active pore pressure)
- → Υδραυλικό φορτίο (Groundwater Head)

<u>Αθροιστικές μετακινήσεις (total displacement)</u>: Παρουσιάζονται οι αθροιστικές μετακινήσεις στο κάναβο σε x-y συντεταγμένες. Συνήθως επιλέγεται η χρωματική διαβάθμιση, καθώς και οι διαβάθμιση με βέλη (arrows). Παρέχεται η δυνατότητα παρουσίασης των οριζόντιων (χ) ή των κατακόρυφων ολικών μετακινήσεων (y).

<u>Αυξητικές μετατοπίσεις (total increments)</u>: Παρουσιάζονται οι αυξητικές μετατοπίσεις και χρησιμεύουν για την οριοθέτηση της περιοχής αστοχίας. Και σε αυτή την περίπτωση προτιμάται η επιλογή χρωματικής διαβάθμισης για την παρουσίαση.

<u>Ολικές παραμορφώσεις (total strains)</u>: Παρουσιάζονται οι ολικές παραμορφώσεις. Επιλέγεται χρωματική διαβάθμιση.

<u>Πλαστικά σημεία (plastic points)</u>: Παρουσιάζονται τα σημεία του υλικού της απόθεσης στα οποία προήλθε αστοχία, δηλαδή τα σημεία εκείνα τα οποία αστόχησαν σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Σχετική διατμητική τάση (relative shear stress): πλησιάζει την μονάδα σε περίπτωση αστοχίας.

Διάγραμμα ροής (flow field): Μόνο στην περίπτωση προβλήματος μόνιμης ροής. Παρουσιάζεται η ροή που δημιουργείται από το ύψος στήλης νερού. Επιλέγεται η διαβάθμιση με βέλη και η χρωματική διαβάθμιση.

<u>Ύψος στήλης νερού (groundwater head)</u>: παρουσιάζεται η η πιεζομετρία στο εσωτερικό του σχηματισμού. Επιλέγεται η χρωματική διαβάθμιση και η διαβάθμιση με ισοϋψείς καμπύλες.

<u>Ενεργή πίεση πόρων (active pore pressure)</u>: εμφανίζεται η ενεργή πίεση πόρων όπως αυτή αναπτύσσεται στο σύνολο του σχηματισμού.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από κάθε ανάλυση. Για την ανάλυση με υδροφόρους ορίζοντες θα παρουσιάζονται οι ολικές μετακινήσεις, οι αυξητικές μετατοπίσεις, οι ολικές παραμορφώσεις, τα σημεία αστοχίας λόγω φόρτισης και η ενεργή πίεση πόρων, ενώ για την ανάλυση με υδραυλικό φορτίο στο στρώμα του κροκαλοπαγούς θα παρουσιαστεί επιπλέον το διάγραμμα ροής. Για κάθε φάση απόθεσης θα παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις, και ο συντελεστής ευστάθειας ενώ για το τελικό υπολογιστικό στάδιο όπου και επέρχεται αστοχία παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα.

6.3.1 Αποτελέσματα ανάλυσης με ορισμό υδροφόρου ορίζοντα και συνθήκες στράγγισης

<u>Υπολογιστική φάση 2^η (Πρώτη φάση απόθεσης)</u>

Το πρώτο στάδιο επιβολής επιπλέον φορτίου στο υπόβαθρο, πραγματοποιείται με την απόθεση υλικού πάχους 39m. Παράλληλα ανυψώθηκε ο υδροφόρος ορίζοντας στα +813m από τα +740m όπου βρισκόταν. Το πρώτο στρώμα της απόθεσης θεωρήθηκε αστράγγιστο. Από τα αποτελέσματα εμφανίζεται μία μέγιστη μετατόπιση 3.92m (σχήμα 6.24) η οποία οφείλεται στο βάρος του στρώματος που προστέθηκε. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις παρουσιάζονται στο στρώμα απόθεσης και συγκεκριμένα στο σημείο ανάβλυσης πηγής, ενώ όσο απομακρύνονται από αυτό μειώνονται. Οι προκαλούμενες μετατοπίσεις δεν είναι ικανές να προκαλέσουν αστοχία στο σχηματισμό, πράγμα που επιβεβαιώνεται με τον συντελεστή ευστάθειας ο οποίος εκτιμάται SF = 2.4 (σχήμα 6.25), αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας.



Σχήμα 6.24 Μέγιστη μετακίνηση πρώτης φάσης απόθεσης.



Σχήμα 6.25. Συντελεστής ευστάθειας 2,4

<u>Υπολογιστική φάση 5^η (Δεύτερη φάση απόθεσης)</u>

Η διαδικασία απόθεσης του δεύτερου στρώματος, περιλαμβάνει την προσθήκη 39m στείρων υλικών και παράλληλη ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα στα +852m. Το στρώμα της απόθεσης θεωρείται στραγγιζόμενο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει μέγιστη μετατόπιση της τάξεως των 2,89m (σχήμα 6.26) που συγκεντρώνεται στο μέτωπο του πρανούς. Η μετατόπιση αυτή σε συνδυασμό με τη πίεση πόρων δεν είναι ικανή να προκαλέσει αστοχία καθώς ο συντελεστής ευστάθειας παραμένει υψηλός SF = 2.39 (σχήμα 6.27). Η απόθεση θεωρείται ευσταθής.






Σχήμα 6.27. Συντελεστής ευστάθειας 2.39.

Υπολογιστική φάση όγδοη (Τρίτη φάση απόθεσης)

Η φάση αυτή αφορά το τελικό στάδιο απόθεσης στείρων υλικών με την προσθήκη στρώματος πάχους 39m και παράλληλη ανύψωση του υδροφόρου στα +891m. Η αύξηση αυτή της πίεσης των πόρων στο εσωτερικό της απόθεσης, σε συνάρτηση με την προσθήκη ακόμα ενός στρώματος απόθεσης έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ευστάθειας, και τελικά την εκδήλωση αστοχίας σε αυτήν.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η κύρια διαταραχθείσα περιοχή έχει μήκος 450m, με την κορυφή της κατολίσθησης να ξεκινά 400m ανάντη του πόδα του πρανούς εκτείνεται 50m προς τα κατάντη (σχήμα 6.28). Το πάχος των μετακινούμενων μαζών ανέρχεται σε 75m επηρεάζοντας και το υπόβαθρο.



Σχήμα 6.28. Αθροιστική μετακίνηση



Σχήμα 6.29. Χρωματική διαβάθμιση αθροιστικών μετακινήσεων.

Στο σχήμα 6.30 παρουσιάζονται οι αυξητικές μετατοπίσεις οι οποίες οριοθετούν την περιοχή της αστοχίας στο σχηματισμό.



Σχήμα 6.30. Αυξητικές μετατοπίσεις.

Εν συνεχεία δίνονται οι διατμητικές παραμορφώσεις οι οποίες εμφανίζον [*106%] κυρίως στα όρια επαφής της μάζας κατολίσθησης. 22.000 20.000 18,000



Στο σχήμα 6.32 παρουσιάζονται τα σημεία τα οποία αστόχησαν σύμφωνα με την θεωρία Mohr Coulomb. Οριοθετούν την περιοχή αστοχίας ενώ παρουσιάζονται και σημεία ανάντη του πόδα του πρανούς, πράγμα που σημαίνει ότι, αφού επέλθει αστοχία στο πόδα, εν συνεχεία ο σχηματισμός θα αστοχήσει και σε υψηλότερο σημείο.

.000



Σχήμα 6.32. Σημεία αστοχίας κριτήριου Mohr Coulomb.



Τέλος παρουσιάζονται η ενεργή πίεση πόρων όπως αυτή διαμορφώνεται στο

6.3.2 Ανάλυση με ορισμό υδροφόρου ορίζοντα και αστράγγιστες συνθήκες

<u>Υπολογιστική φάση 2^η (δεύτερη φάση απόθεσης)</u>

Στη φάση αυτή επιβάλλεται το πρώτο φορτίο στο υπόβαθρο, με την απόθεση άγονων υλικών πάχους 39m. Παράλληλα ανυψώνεται ο υδροφόρος ορίζοντας στα +813m από το αρχικό επίπεδο +740m όπου βρισκόταν. Το πρώτου στρώματος της απόθεσης θεωρείται αστράγγιστο.

Εμφανίζεται μια μέγιστη μετατόπιση της τάξεως των 3,92m (σχήμα 6.34) που οφείλεται κυρίως στο βάρος του στρώματος που αποτέθηκε. Όπως αναμενόταν η μετακίνηση, είναι ίδια με εκείνα του πρώτου σταδίου απόθεσης της προηγούμενης ανάλυσης (με ορισμό υδροφόρου ορίζοντα θεωρώντας τα υπόλοιπα στάδια της απόθεσης σε συνθήκες στράγγισης). Αυτό οφείλεται στο ότι και στις δύο περιπτώσεις οι θεωρούμενοι παράμετροι μέχρι αυτό το στάδιο είναι ίδιοι και συνεπώς τα αποτελέσματα συμπίπτουν. Ο συντελεστής ευστάθειας είναι SF = 2,3, (σχήμα 6.35)





Σχήμα 6.35. Συντελεστής ευστάθειας 2,3.

<u>Υπολογιστική φάση 5^η (δεύτερη φάση απόθεσης)</u>

Η φάση αυτή αφορά την απόθεση του δεύτερου στρώματος, με την προσθήκη 39m στείρου υλικού και παράλληλη ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα στα +849m. Το στρώμα της απόθεσης θεωρείται αστράγγιστο. Εμφανίζεται μια μετατόπιση της τάξεως των 2.90m (σχήμα 6.36) που οριοθετείται στη κορυφή του πρανούς. Η μετατόπιση αυτή σε συνδυασμό με τη πίεση πόρων δεν είναι ικανά να προκαλέσουν αστοχία καθώς ο συντελεστής ευστάθειας είναι υψηλός SF=2.03 (σχήμα 6.37).





Σχήμα 6.37. Συντελεστής ευστάθειας 2,03.

Υπολογιστική φάση όγδοη (Τρίτη φάση απόθεσης, δημιουργία αστοχίας)

Η φάση αυτή αφορά το τελικό στάδιο απόθεσης στείρων υλικών με την προσθήκη ενός επιπλέον στρώματος πάχους 39m και παράλληλη ανύψωση του υδροφόρου στα +891m. Το στρώμα απόθεσης θεωρείται αστράγγιστο. Στο σχηματισμό επέρχεται αστοχία και οι υπολογισμοί σταματάνε.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η προσθήκη του τελευταίου στρώματος απόθεσης το οποίο θεωρείται αστράγγιστο, σε συνδυασμό με την αύξηση της πίεσης των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα την πρόκληση αστοχίας (σχήμα 6.38). Η κύρια διαταραχθείσα περιοχή έχει μήκος 500m, με την κορυφή της κατολίσθησης να ξεκινά 50m πριν το φρύδι του πρανούς και να εκτείνεται 450m προς τα κατάντη. Το πάχος των μετακινούμενων μαζών ανέρχεται σε 95m, ενώ το ύψος απόθεσης είναι 110m. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η κατολίσθηση επηρεάζει οριακά και τα τρία στρώματα της απόθεσης.

Η αστοχία αυτή παρουσιάζει κάποιες διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη της προηγούμενης ανάλυσης (συνθήκες στράγγισης). Εμφανίζεται κατάντη της κορυφής του πρανούς ενώ στην προηγούμενη περίπτωση εμφανιζόταν στο πόδα του πρανούς, ενώ το μέγεθός της παρουσιάζεται μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της επίλυσης με συνθήκες στράγγισης.

Στα σχήματα 6.38-6.39 παρουσιάζονται οι αυξητικές μετακινήσεις στο διαμορφούμενο πρανές της απόθεσης,



Στο σχήμα 6.40 παρουσιάζονται οι αυξητικές μετατοπίσεις οι οποίες



Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις. Εμφανίζονται κυρίως στη βάση της ζώνης κατολίσθησης.



Τα σημεία αστοχίας τα οποία οριοθετούν την ζώνη διαταραχής παρουσιάζονται στο σχήμα 6.42. Οριοθετούν την περιοχή αστοχίας ενώ δεν εμφανίζονται σημεία στη βάση του διαμορφούμενου πρανούς της απόθεσης.



Σχήμα 6.42. Σημεία αστοχίας κριτήριου Mohr Coulomb.



Τέλος παρουσιάζονται η υπερπίεση πόρων όπως αυτή διαμορφώνεται στο

6.3.3 Ανάλυση προβλήματος με πίεση πόρων που δημιουργείται από υπόγεια ροή και αστράγγιστες συνθήκες απόθεσης

<u>Υπολογιστική φάση 2^η (Πρώτη φάση απόθεσης)</u>

Η φάση αυτή αφορά το πρώτο στάδιο απόθεσης στείρων υλικών (πάχους 39m) και αύξηση του υδραυλικού φορτίου (20m του ύψους στήλης νερού), στο κροκαλοπαγές (κεφάλαιο 6.2.3). Το πρώτο στρώμα θεωρείται αστράγγιστο. Εμφανίζεται μέγιστη μετατόπιση της τάξεως των 3.97m, (σχήμα 6.44). Ο συντελεστής ευστάθειας είναι SF=2.17, και ο σχηματισμός θεωρείται ευσταθής (σχήμα 6.45). Η επίλυση αυτή σε σχέση με την επίλυση του υδροφόρου ορίζοντα και αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζει μικρή αύξηση στην μετατόπιση (έναντι 3.92) και μια μικρή διαφορά στον συντελεστή ευστάθειας.



Σχήμα 6.44. Μέγιστη μετακίνηση πρώτου στρώματος απόθεσης.





<u>Υπολογιστική φάση 5^η (Δεύτερη φάση απόθεσης)</u>

Η φάση αυτή αναφέρεται στην διαδικασία απόθεσης του δεύτερου στρώματος στείρων υλικών (πάχος 39m). Το υδραυλικό φορτίο ορίζεται με αύξηση του ύψους στήλης νερού στα 59m (από 20m). Από τα αποτελέσματα προκύπτει μέγιστη μετατόπιση 3.01m (σχήμα 6.46) εξαιτίας του βάρους απόθεσης με τον συντελεστή ευστάθειας να μειώνεται σε SF=2.09 (σχήμα 6.47). Η απόθεση θεωρείται ευσταθής.









Υπολογιστική φάση 8^η (Τρίτη φάση απόθεσης, ανάπτυξη αστοχίας)

Η φάση αυτή αναφέρεται στο τελικό στάδιο απόθεσης στείρων υλικών με την προσθήκη στρώματος πάχους 39m και παράλληλη αύξηση του ύψους στήλης νερού στα 98m. Στο μηχανισμό επέρχεται αστοχία και οι υπολογισμοί σταματάνε.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, η προσθήκη του τελευταίου στρώματος απόθεσης σε συνδυασμό με την αύξηση του ύψους στήλης νερού προκαλεί αστοχία (σχήμα 6.48). Η κύρια διαταραχθείσα ζώνη έχει μήκος 550m με την κορυφή της κατολίσθησης να ξεκινά 50m πριν το φρύδι του πρανούς και εκτείνεται 500m προς τα κατάντη. Το πάχος των μετακινούμενων μαζών ανέρχεται σε 100m, (ύψος απόθεσης να φτάνει τα 117m). Συνεπώς η αστοχία επηρεάζει οριακά το υπόβαθρο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (σχήμα 6.48 – 6.54).

Η μέγιστες μετακινήσεις που προκύπτουν από τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.48-6.49



Σχήμα 6.48. Αυξητικές μετακινήσεις

	12 _{m]}
	20.000
	.00.000
	0.000
	0.000
	0.000
	0.000
 	0.000
Total displacements (Utot)	0.000
Extreme Litot 112 63*10 ¹² m	0.000
	10.000

Σχήμα 6.49. Χρωματική διαβάθμιση αυξητικής μετακίνησης στην τρίτη φάση απόθεσης.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι αυξητικές μετατοπίσεις οι οποίες οριοθετούν



Ακολούθως παρουσιάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις. Εμφανίζονται κυρίως στη βάση της ζώνης κατολίσθησης



Τα σημεία στα οποία προκύπτει αστοχία του κριτηρίου Mohr Coulomb παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Τα σημεία αυτά οριοθετούν την ζώνη

διαταραχής ενώ παρουσιάζονται σημεία αστοχίας στην βάση του διαμορφούμενου πρανούς της απόθεσης.



Σχήμα 6.52. Σημεία αστοχίας κριτηρίου Mohr Coulomb.

Το διάγραμμα ροής όπως αυτό ορίζεται από το αντίστοιχο υδραυλικό φορτίο παρουσιάζεται στο σχήμα 6.53.



Τέλος παρουσιάζονται η υπερπίεση πόρων όπως αυτή διαμορφώνεται στο μοντέλο.



Για συγκριτικούς λόγους παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 6.5 όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συντελεστές ευστάθειας όπως διαμορφώνονται σε κάθε φάση απόθεσης.

	Συντελεστής ευστάθειας SF			
Φάση απόθεσης	Επίλυση με ορισμό υδροφόρου και στραγγιζόμενες συνθήκες	Επίλυση με ορισμό υδροφόρου και αστράγγιστες συνθήκες	Επίλυση με ορισμό υδραυλικού φορτίου και αστράγγιστες συνθήκες	
1 ^η φάση απόθεσης	2,4 (Στάθμη Υ.Ο. +813)	2,3 (Στάθμη Υ.Ο. +813)	2,17 (Υψος στήλης νερού 20m)	
2 ^η φάση απόθεσης	2,39 (Στάθμη Υ.Ο +852)	2,03 (Στάθμη Υ.Ο +852)	2,09 (Υψος στήλης νερού 59m)	
3 ^η φάση απόθεσης	<1 (Αστοχία) (Στάθμη Υ.Ο. +891)	<1 (Αστοχία) (Στάθμη Υ.Ο. +891)	<1 (Αστοχία) (Ύψος στήλης νερού 98m)	

Πίνακας 6.5.	Συνοπτικός πίνακας	ς συντελεστών	ευστάθειας.
moundy 0.5.	Lovontinos nivana	,	coordocias.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Θεωρώντας ότι η απόθεση διαμορφώνεται σε τρεις φάσεις (υπό συνθήκες στράγγισης), με ταυτόχρονη ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι στάθμης κάθε φορά 20m από την ανώτερη επιφάνεια, επέρχεται αστοχία με την απόθεση της 3^{ης} φάσης με τον υδροφόρο ορίζοντα στα +892m.
 Η υπόθεση της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα αιτιολογείται από τα

Η υπόθεση της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα αιτιολογείται από τα αυξημένα κατακρημνίσματα της χειμερινής περιόδου 2003-2004 και τον εγκλωβισμό νερού ανάμεσα στους κώνους που σχηματίζονται με την διαδικασία απόθεσης.

 Διερεύνηση της ευστάθειας της απόθεσης θεωρώντας αστράγγιστες συνθήκες, υποδεικνύει ότι η αστοχία επέρχεται με την απόθεση της 3ης φάσης και την ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου στα +891m.

Η παραμετρική ανάλυση υπέδειξε ότι το μέγιστο ύψος που μπορεί να φτάσει η απόθεση χωρίς να αστοχήσει είναι τα 78m (+872m απόλυτο υψόμετρο) με αντίστοιχο ύψος υδροφόρου ορίζοντα στα +852m.

Για να αποτεθούν και τα τρία στρώματα στείρων υλικών (ύψους 117m) χωρίς αστοχία, είναι αναγκαία η δημιουργία υποδομών για την καλύτερη στράγγιση των στρωμάτων (π.χ. δημιουργία στραγγιστηριών) και την εκτόνωση της πίεσης των πόρων.

 Και στις δύο περιπτώσεις ανάλυσης (συνθήκες στράγγισης και μη στράγγισης) η αστοχία έχει την μορφή κάθισης.

Στην περίπτωση που θεωρηθούν συνθήκες στράγγισης η ζώνη διαταραχής περιορίζεται στο πόδα του πρανούς και φτάνει μέχρι βάθους 75m, ενώ στην περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών η αστοχία είναι στην κορυφή του πρανούς και κατάντη και φτάνει μέχρι βάθους 95m και περιορίζεται στο μέσο της πρώτης φάσης απόθεσης. Επιπλέον, η αστοχία που υποδεικνύεται από την ανάλυση με συνθήκες στράγγισης, οδηγεί σε διαταραχή μικρότερης έκτασης από αυτή που προκύπτει θεωρώντας αστράγγιστες συνθήκες.

- 4. Στην περίπτωση που θεωρηθεί (i) η ύπαρξη της διαλείπουσας πηγής (πηγή Χαραυγής) που κατά ισχυρισμούς ανέβλυζε στο υψόμετρο +775m και (ii) ανάπτυξη υψηλής πίεσης στο στρώμα του κροκαλοπαγούς και κατ' επέκταση στην απόθεση ως αποτέλεσμα κάλυψης της πηγής, τότε η επίλυση με αστράγγιστες συνθήκες υποδεικνύει αστοχία μόλις αποτεθεί η τρίτη φάση. Η διαταραχθείσα μάζα έχει μεγαλύτερη έκταση (550m) σε σχέση με τις προηγούμενες επιλύσεις και φτάνει σε βάθος μέχρι την βάση της απόθεσης, επηρεάζοντας και το υπόβαθρο.
- 5. Με βάση τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι οι υδρολογικές συνθήκες που διαμορφώνονται είναι ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια μιας απόθεσης. Η σταδιακή προσθήκη στρωμάτων σε συνδυασμό με την αύξηση της πίεσης πόρων που προκύπτει με την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, οδηγούν σε αστοχία. Συνεπώς φαινόμενα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τις πιέσεις πόρων, (όπως παραδείγματος χάριν κατακρημνίσματα και υδροφόροι ορίζοντες), θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη για τον σχεδιασμό των αποθέσεων ώστε να αποφεύγονται αστοχίες.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

<u>Ελληνική</u>

- Αγιουτάντης Ζ., (2001). Στοιχεία Γεωμηχανικής Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων.
- Καβουρίδης Κ., (2008). Υπαίθριες εκμεταλλεύσεις: Η μεγάλη κλίμακας κατολίσθηση στην εξωτερική απόθεση του ορυχείου νοτίου πεδίου. Η διαχείριση της κρίσης και το κόστος σταθεροποίησης της κατολίσθησης, Ορυκτός Πλούτος 146/2008.
- Καλογήρου Ε., (2003). Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μεταπτυχιακή εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καροτσιέρης Ζ. (1993). Στοιχεία μηχανικής πετρωμάτων και γεωτρήσεων.
 Εδαφομηχανική Βραχομηχανική Γεωτρήσεις. Εθνικό και καποδιστριακό
 Πανεπηστίμιο Αθηνών. Γεωλογικό Τμήμα. Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής –
 Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.
- Μαραγκάκη Α. (2003). Μελέτη ευστάθειας του δυτικού πρανούς του όρους Αιγάλεω με ανάδρομη ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μονόπωλης Δ. (2004). Κατολισθητικά φαινόμενα στην εξωτερική απόθεση του
 Ν. Πεδίου. Έκθεση γνωμάτευσης (Αδημοσίευτη τεχνική έκθεση).
- Παπαντωνόπουλος Κ.Ι., Καπόπουλος Χ.Α., Ψαρρόπουλος Α.Τ. (2003), Κατολίσθηση Τσάκωνας: Ανάλυση και παρατήρηση πεδίου. 5° Πανελλήνιο

Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.

- Πασσάς Ν. (2007). Σημειώσεις Γεωτεχνική Μηχανική Γεωτεχνικά Έργα, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Στειακάκης Ε. (2008). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης,
- Στειακάκης Ε. (2003). Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους, έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 11. Στειακάκης Ε. (2001). Συνοπτικές οδηγίες χρήσης του Plaxis (αδημοσίευτη).
- Τσάιμου Α. (2006). Παραμετρική διερεύνηση ευστάθειας και παραμορφωσιμότητας πρανών σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις λιγνίτη με χρήση ελαστοπλαστικών μοντέλων, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

<u>Διεθνής</u>

- Agioutantis, Z., Kavouridis, K., (1998). "Technological enhancements in the drilling and blasting procedures for removing hard formations at the South Field Lignite Mine, Ptolemais, Greece", 7th International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection, 1998, Calgary, Alberta, pp. 173-177.
- Bosinis, S., Pavloudakis, F., Triantafyllou, M., Agioutantis, Z. (2004). Design considerations when blasting in the proximity of inhabited areas. Proceeding of the 1st International Conference an Advanced in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, Hania, June 2004, pp 25-27.
- 15. Kavouridis, K., Agioutantis, Z. (2006). The impact of a large scale failure of the outer waste dump to the operations at the South Field mine, Ptolemais, Greece.

Proceeding of the 2nd International Conference on AMIREG, Hania, Greece, September 2006, pp. 183 -190.

- 16. Plaxis 2D Version 8 Manual.
- Steiakakis, E., K. Kavouridis, D. Monopolis (2008). Large scale failure of the external waste dump at the "South field" lignite mine, (Northern Greece). Engineering Geology 104, 269-279.
- Ter Stepanian G. (1980). Creep on natural slopes and cuttings. Proc 3rd ISL, New Delhi 2, pp. 95-108.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. Landslides: Analysis and Control. Transport Research Board Special Report Report, 176. Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (Editors). National Academy of Science, Washington D.C.
- Zaruba, Q. and Mencl, V. (1982). Landslides and their control. Second Edition.
 Developments in geotechnical Engineering 31. Elsevier Scientific Publ. Co.
- Zaruba, Q. and Mencl, V. (1982). Engineering Geology. Developments in Geotechnical Engineering 10. Elsevier Scientific Publ.Co.