

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ**  
**ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παναγιώτης Γ. Χριστόπουλος**

**Εξεταστική επιτροπή:**

**Στειακάκης Εμμανουήλ (Επίκουρος Καθηγητής, Επιβλέπων)**

**Εξαδάκτυλος Γεώργιος (Καθηγητής)**

**Γαλετάκης Μιχαήλ (Καθηγητής)**

**Χανιά**

**Οκτώβριος 2018**

---

**Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στο παρόν έγγραφο, εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης και της επιτροπής εξέτασης.**

---

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της ευστάθειας εδαφικών πρανών σε συνθήκες μερικού κορεσμού, λόγω μεταβολής της μύζησης.

Διερευνήθηκε η ευστάθεια ενός πρανού που δομείται από εδαφικό γεωϋλικό (μανδύα αποσάθρωσης) με ή χωρίς υποκείμενο μητρικό πέτρωμα. Εξετάσθηκε η συμπεριφορά για δύο διαφορετικούς τύπους εδαφικού σχηματισμού: α) μιας ιλυώδους άμμου και β) μιας αργίλου.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της μύζησης στην ευστάθεια των πρανών, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση, με προσομοίωση της κατείσδυσης από βροχόπτωση σταθερής έντασης  $7.2 \text{ mm/hr}$  και διάρκειας 24 ωρών.

Οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν με χρήση του λογισμικού GeoStudio. Αρχικά έγινε προσομοίωση της ροής του νερού και της μεταβολής της πίεσης των πόρων λόγω βροχόπτωσης, (με το λογισμικό SEEP/W). Στη συνέχεια ακολούθησε η διερεύνηση της ευστάθειας (με το λογισμικό SLOPE/W), με χρήση του εκτεταμένου Mohr – Coulomb κριτηρίου, προκειμένου να συμπεριληφθεί στην ανάλυση και η επίδραση της μύζησης.

Από τις αναλύσεις προέκυψε σημαντική μείωση του συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 40% για την περίπτωση της ιλυώδους άμμου και 7% στην περίπτωση του συνεκτικού αργιλικού εδάφους μετά από τη διακοπή της παρατεταμένης βροχόπτωσης. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η παρουσία συνεκτικού υποβάθρου σε μικρό βάθος επιδεινώνει τις συνθήκες ευστάθειας.

Ακολούθησε η διερεύνηση της ευστάθειας απόθεσης στείων υλικών λιγνιτωρυχείου, με σκοπό να εκτιμηθούν οι κυριότεροι παράγοντες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχίες απόθεσης άγονων υλικών σε συνθήκες παραταγμένης βροχόπτωσης. Προσδιορίστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη των στείων υλικών της απόθεσης και εκτιμήθηκε η συμπεριφορά του πρανού. Η ανάλυση, έδειξε σημαντική μείωση του συντελεστή ασφάλειας, της τάξεως του 20% με το πέρας της βροχόπτωσης χωρίς την εκδήλωση φαινομένων αστοχίας.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης κατά το έτος 2018. Θα ήθελα να ευχαριστήσω, όσους συνέβαλλαν στο σκοπό αυτό και πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Επίκουρο Καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας, κ. Εμμανουήλ Στειακάκη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για την πολύτιμη βοήθεια που πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και το χρόνο που διέθεσε.

Τους Καθηγητές κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο και κ. Μιχαήλ Γαλετάκη που δέχτηκαν να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Διονύσιο Βαβαδάκη για τις υποδείξεις και τη βοήθεια, πάνω στην εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους για τη διαρκή υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	iii
Πρόλογος .....	iv
Κατάλογος σχημάτων .....	vii
Κατάλογος πινάκων .....	x
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	11
1.2 Σχέδιο ανάπτυξης της εργασίας.....	12
<b>Κεφάλαιο 2: Τα μερικώς κορεσμένα εδάφη .....</b>	<b>13</b>
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2 Ο ρόλος του κλίματος και της βλάστησης.....	14
2.3 Ο ρόλος της τοπογραφίας .....	16
2.4 Οι φάσεις των μερικώς κορεσμένων εδαφών και οι ιδιότητες αυτών .....	17
2.5 Η θεωρία της μύζησης του εδάφους. ....	21
2.6 Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (Soil Water characteristic Curve (SWCC)).	24
2.7 Πειραματικός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού (SWCC).	27
2.7.1 Εξισώσεις αποτύπωσης των πειραματικών δεδομένων .....	28
2.8 Έμμεσος προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού.....	31
2.9 Η μηχανική συμπεριφορά των μερικώς κορεσμένων εδαφών.....	37
2.10 Η διατμητική αντοχή των μερικώς κορεσμένων εδαφών .....	39
2.11 Συσχέτιση της διατμητικής αντοχής με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού	40
2.12 Συσχέτιση της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού	42
<b>Κεφάλαιο 3: Ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρηνών .....</b>	<b>46</b>
3.1 Εισαγωγή .....	46

3.2	Τύποι κατολισθήσεων.....	47
3.3	Διαδικασίες γένεσης των κατολισθήσεων .....	53
3.4	Συνθήκες για την εκδήλωση κυκλικών αστοχιών.....	57
3.5	Μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας με τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας	62
3.6	Σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων λωρίδων που βασίζονται στην οριακή ισορροπία	69
<b>Κεφάλαιο 4: Η επίδραση της βροχόπτωσης στην ευστάθεια εδαφικών πρανών ...</b>		<b>71</b>
4.1	Εισαγωγή .....	71
4.2	Λογισμικό για την παραμετρική ανάλυση.....	72
4.3	Ανάλυση ευστάθειας τυπικού πρανούς .....	74
4.3.1	Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος .....	74
4.4	Περιγραφή της παραμετρικής ανάλυσης και επίλυση .....	76
4.4.1	Επίλυση πρανούς με ιλυώδη άμμο .....	77
4.4.2	Επίλυση πρανούς με άργιλο .....	81
4.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	85
<b>Κεφάλαιο 5: Η περίπτωση των αποθέσεων στείων υλικών λιγνιτωρυχείων .....</b>		<b>86</b>
5.1	Εισαγωγή .....	86
5.2	Ο λιγνίτης στην Ελλάδα .....	86
5.3	Πρανές αποθέσεων στείων υλικών και γεωτεχνικές παράμετροι γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή της απόθεσης.....	87
5.3.1	Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού των άγονων υλικών της απόθεσης.....	88
5.4	Περιγραφή της ανάλυσης και αποτελέσματα .....	90
5.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	94
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα .....</b>		<b>95</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>		<b>97</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>101</b>

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση της μηχανικής των εδαφών (τροποποιημένο από: Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	14
Σχήμα 2: Διαδικασίες ύγρυνσης και ξήρανσης του εδάφους (Wyllie and Mah, 2004).15	
Σχήμα 3: Σχέση μεταξύ στάθμης υδροφόρου ορίζοντα και ποσότητας βροχής, ανάλογα με το κλίμα (Wyllie and Mah, 2004). .....	16
Σχήμα 4: Διαφοροποίηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με την τοπογραφία (πηγή: <a href="http://www.fao.org">www.fao.org</a> ). .....	16
Σχήμα 5: Στοιχείο μερικώς κορεσμένου εδάφους και οι φάσεις αυτού (Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	17
Σχήμα 6: Διάγραμμα συστήματος φάσεων μερικώς κορεσμένου και κορεσμένου εδάφους (Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	18
Σχήμα 7: Οι ενδομοριακές δυνάμεις που ασκούνται στη διεπιφάνεια και το νερό (πηγή: <a href="http://www.rezasalehi.com">www.rezasalehi.com</a> ). .....	18
Σχήμα 8: Μεταβολή επιφανειακής τάσης με τη θερμοκρασία (τροποποιημένο από: Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	19
Σχήμα 9: Μεταβολή πιέσεων κατά μήκος δισδιάστατης μεμβράνης (Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	19
Σχήμα 10: Επιφανειακές τάσεις σε τρισδιάστατη μεμβράνη (Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	20
Σχήμα 11: Κατηγοριοποίηση της δυναμικής ενέργειας του νερού και των πιέσεων πόρων που αναπτύσσονται ανά περίπτωση (πηγή: <a href="http://www.css.cornell.edu">www.css.cornell.edu</a> ). .....	23
Σχήμα 12: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, όπου φαίνονται οι διάφορες περιοχές υγρασίας (πηγή: Sillers et al., 2001). .....	25
Σχήμα 13: Καμπύλες ύγρυνσης και ξήρανσης (πηγή: <a href="http://www.rezasalehi.com">www.rezasalehi.com</a> ). .....	26
Σχήμα 14: Οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που περιγράφουν την εντατική κατάσταση για ένα μη κορεσμένο έδαφος (Fredlund and Vanapalli, 2002). .....	38
Σχήμα 15: Η περιβάλλουσα θραύσης του εκτεταμένου κριτηρίου Mohr - Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993). .....	40
Σχήμα 16: Μεταβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους σαν συνάρτηση της μύζησης (Fredlund and Vanapalli, 2002). .....	41
Σχήμα 17: Μονοπάτια ροής για τις διάφορες καταστάσεις κορεσμού του εδάφους (πηγή: Seep/W 2007). .....	42

Σχήμα 18: Μεταβολές στη μύζηση και την ποσότητα του νερού με την ύγρανση του εδάφους (πηγή: people.ucalgary.ca).....	43
Σχήμα 19: Διάφοροι τύποι ανατροπών, (Wyllie and Mah, 2003, από Goodman και Bray, 1976).....	49
Σχήμα 20: Πιθανή περιστροφική αστοχία σε εδαφικό υλικό (Wyllie and Mah, 2003). 50	
Σχήμα 21: Μεταθετική ολίσθηση ενιαίας μάζας (Wyllie and Mah, 2003). ....	51
Σχήμα 22: Τα χαρακτηριστικά των κυκλικών αστοχιών (Wyllie and Mah, 2003). ....	58
Σχήμα 23: Χαρακτηριστικά των διαστάσεων των κυκλικών ολισθήσεων (Wyllie and Mah, 2003).....	59
Σχήμα 24: Οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα, (Wyllie and Mah, 2003).....	61
Σχήμα 25: Στο άνω σχήμα φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται σε τυχαία λωρίδα σε κυκλικής μορφής αστοχία και στο κάτω οι δυνάμεις που σκουντιάζ σε σύνθετη μορφή αστοχίας (πηγή: SLOPE/W, 2007). ....	64
Σχήμα 26: Ο μηχανισμός ενυδάτωσης των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους, λόγω βροχόπτωσης (Kwon, 2009). ....	72
Σχήμα 27: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο πρανές κατά την ανάλυση σε σταθερές συνθήκες. ....	74
Σχήμα 28: Μεταβολή της μύζησης κατά μήκος της ζώνης αερισμού προς την επιφάνεια, στην περίπτωση εφαρμογής μηδενικής και μη μηδενικής ροής στην επιφάνεια (SEEP/W, 2007). ....	75
Σχήμα 29: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές με μητρικό πέτρωμα και μανδύα ιλυώδους άμμου: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από συνεχή βροχόπτωση 24 ωρών.....	77
Σχήμα 30: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, περίπτωση ύπαρξης μητρικού πετρώματος, με υπερκείμενο ιλυώδους άμμου .....	78
Σχήμα 31: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές ιλυώδους άμμου: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 24 ώρες. ....	79
Σχήμα 32: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, ομογενές εδαφικό πρανές ιλυώδους άμμου. ....	80
Σχήμα 33: Οριακές τιμές συντελεστή ασφάλειας, στην περίπτωση ιλυώδους άμμου: (α) με μητρικό πέτρωμα; (β) χωρίς μητρικό πέτρωμα. ....	80



Σχήμα 34: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές με μητρικό πέτρωμα και άργιλο: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων έπειτα από 24 ώρες.....	81
Σχήμα 35: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, περίπτωση μητρικού πετρώματος και αργίλου.....	82
Σχήμα 36: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές εξ' ολοκλήρου από άργιλο: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 24 ώρες.....	83
Σχήμα 37: Μεταβολή συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο , περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από άργιλο.....	84
Σχήμα 38: Οριακές τιμές συντελεστή ασφάλειας, στην περίπτωση συνεκτικού υπερκειμένου: (α) με βραχώδες υπόβαθρο; (β) χωρίς βραχώδες υπόβαθρο. ....	84
Σχήμα 39: Τομή του πρανούς της απόθεσης των στεírων υλικών (Steiakakis et al., 2009, τροποποιημένο).....	87
Σχήμα 40: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους νερού, για τις διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού.....	89
Σχήμα 41: Μεταβολή της υδραυλική αγωγιμότητάς με τη μύζηση για κάθε μία από τις υπολογισμένες χαρακτηριστικές καμπύλες. ....	90
Σχήμα 42: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο για κάθε μία από τις χαρακτηριστικές καμπύλες. ....	92
Σχήμα 43: Ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφάλειας ανά περίπτωση. Αποχωρίζονται κατά σειρά οι μέθοδοι: Aubertiin et al., (2003)m, Perera et al., (2005), SEEP/W, Zapata et al., (2000). ....	93
Σχήμα 44: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη SEEP/W, μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής. ....	97
Σχήμα 45: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Perera et al. (2003), μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής. ....	98
Σχήμα 46: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Aubertin et al. (2003), μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής. ....	99
Σχήμα 47: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Zapata (2000, μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής.....	100

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Τα διάφορα είδη τριαξονικών δοκιμών που εφαρμόζονται στον προσδιορισμό της μύζησης των μερικώς κορεσμένων εδαφών (Fredlund and Vanapalli, 2002). .....	27
Πίνακας 2: Τύποι κατολισθήσεων κατά Varnes (1978), (πηγή: pubs.usgs.gov) .....	48
Πίνακας 3: Ταχύτητες φαινομένων κατολίσθησης (WP/WLI 1995 και Cruden και Varnes, 1996).....	48
Πίνακας 4: Ορισμοί των χαρακτηριστικών των κυκλικών αστοχιών (τροποποιημένο από Wyllie and Mah, 2003).....	58
Πίνακας 5: Ορισμοί στις διαστάσεις των κυκλικών ολισθήσεων (τροποποιημένο από Wyllie and Mah, 2003).....	60
Πίνακας 6: Οι συνθήκες που ικανοποιούνται σε κάθε μέθοδο. ....	63
Πίνακας 7: Παράμετροι εδαφικών υλικών και μητρικού πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση. ....	76
Πίνακας 8: Παράμετροι προσαρμογής για το μητρικό πέτρωμα που υπόκειται του εδαφικού υλικού. ....	77
Πίνακας 9: Παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών. ....	88
Πίνακας 10: Παράμετροι υπολογισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών, μέσω εμπειρικών τύπων. ....	89
Πίνακας 11: Δεδομένα μεταβολής του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο για κάθε μία από τις περιπτώσεις προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης. ....	91

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η κατανομή της πίεσης των πόρων εντός του εδάφους, επηρεάζεται από τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του σχηματισμού και τις συνθήκες ροής που διαμορφώνονται με βάση τις οριακές συνθήκες.

Τα εδάφη που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα χαρακτηρίζονται ως μερικώς κορεσμένα και αναπτύσσουν αρνητικές πιέσεις πόρων (μύζηση) με αποτέλεσμα την αύξηση τη διατμητικής αντοχής. Όσο ένας σχηματισμός παραμένει σε κατάσταση μερικού κορεσμού, η γωνία του πρανούς μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής του υλικού, εξαιτίας της επιπλέον αντοχής που προσδίδει η μύζηση.

Κατά την εκδήλωση καιρικών φαινομένων, το νερό κατεισδύει στο έδαφος, μειώνοντας την μύζηση και συνεπώς τη διατμητική αντοχή, με αποτέλεσμα την εκδήλωση αστοχιών. Οι αστοχίες που λαμβάνουν χώρα σε μερικώς κορεσμένα εδάφη, είναι επιφανειακές, με το βάθος τους να κυμαίνεται από μερικά δεκάδες εκατοστά, έως λίγα μέτρα (Fredlund and Khan, 1989).

Στο μεγαλύτερο μέρος των εδαφικών σχηματισμών του πλανήτη, κυρίως σε ξηρά και εύκρατα κλίματα, όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται χαμηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους, αναπτύσσεται μερικώς κορεσμένη ζώνη. Οι περισσότερες εφαρμογές γεωτεχνικής μηχανικής, που λαμβάνουν χώρα σε μικρό βάθος κοντά στην επιφάνεια, πραγματοποιούνται εντός μερικώς κορεσμένων εδαφών και οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά αυτών παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής της μύζησης στην ευστάθεια εδαφικών πρανών. Μελετήθηκε η επίδραση της βροχόπτωσης σε δύο διαφορετικούς τύπους εδαφικών σχηματισμών, καθώς και η περίπτωση απόθεσης στείων υλικών λιγνιτωρυχείων.

## 1.2 Σχέδιο ανάπτυξης της εργασίας

Η εργασία, περιλαμβάνει τα παρακάτω κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας και ο τρόπος με τον οποίο διαρθρώνεται.

Κεφάλαιο 2: Παρουσιάζεται η θεωρία της μύξης του εδάφους και η έννοια των μερικώς κορεσμένων εδαφών, καθώς και του εκτεταμένου κριτηρίου Mohr – Coulomb. Ακόμη παρουσιάζεται η έννοια της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού και ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται με διατμητική αντοχή και την υδραυλική αγωγιμότητα των μερικώς κορεσμένων εδαφών, ενώ παρατίθενται και εμπειρικές εξισώσεις προσδιορισμού της χαρακτηριστική καμπύλης από βασικές παραμέτρους του εδαφικού υλικού.

Κεφάλαιο 3: Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι κατολισθήσεων κατά Varnes σε εδαφικούς σχηματισμούς και αναλύονται οι συνηθέστερες μέθοδοι οριακής ισορροπίας για την εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας.

Κεφάλαιο 4: Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η ανάλυση ευστάθειας, πρανούς με δύο διαφορετικούς τύπους εδαφικού σχηματισμού και γίνεται σύγκριση της επίδρασης βραχώδους υπόβαθρου.

Κεφάλαιο 5: Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μελέτη ευστάθειας εξωτερικής απόθεσης στείρων υλικών λιγνιτωρυχείου. Παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές επιλύσεις, με βάση τις διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν από τέσσερις εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες αξιοποιούν κοκκομετρικά δεδομένα και τα όρια Atterberg.

Κεφάλαιο 6: Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 2: Τα μερικώς κορεσμένα εδάφη

### 2.1 Εισαγωγή

Ο τρόπος με τον οποίο εξελίχθηκε η εδαφομηχανική, οδήγησε στο να δοθεί έμφαση σε εδάφη που αποτελούνται από δύο φάσεις, την στερεή και την υγρή (ή την αέρια φάση). Τα εδάφη αυτά, χαρακτηρίζονται ως κορεσμένα.

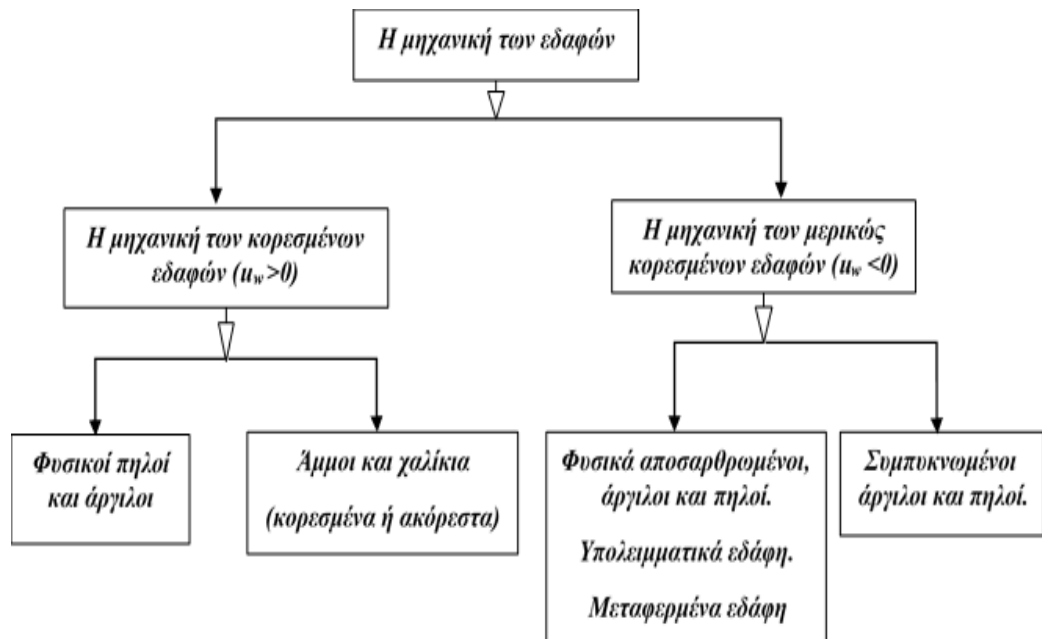
Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί μεγαλύτερη σημασία σε ένα ευρύτερο φάσμα εδαφικών υλικών, των οποίων η συμπεριφορά δεν μπορεί να περιγραφεί πλήρως από έννοιες της κλασσικής εδαφομηχανικής των κορεσμένων εδαφών (Fredlund and Rahardjo, 1993). Τα εδάφη αυτά, τα οποία χαρακτηρίζονται ως μερικώς κορεσμένα, αποτελούνται από περισσότερες από δύο φάσεις και συγκεκριμένα τέσσερις, οι οποίες έχουν ως εξής:

- 1) Η στερεή φάση (εδαφικοί κόκκοι)
- 2) Η υγρή φάση (νερό πόρων)
- 3) Η αέρια φάση (φυσαλίδες αέρα)
- 4) Και η τέταρτη φάση η οποία αποτελεί την διεπιφάνεια υγρής και αέριας φάσης (Contractile Skin) (Fredlund and Morgenstern, 1977).

Η ανάγκη διαχωρισμού των εδαφών, έγκειται στη διαφορετική φύση και μηχανική συμπεριφορά που τα διέπουν. Οι διαφορές αυτές, οφείλονται στο ότι στα μερικώς κορεσμένα εδάφη, αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων, σε αντίθεση με τα κορεσμένα, όπου οι πιέσεις των πόρων του νερού είναι θετικές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1 (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Σε οποιαδήποτε έδαφος κοντά στην επιφάνεια και σε ξηρά κλίματα, αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων. Ακόμη υλικά εκσκαφών, επανατοποθετημένα, καθώς και επανασυμπιεσμένα εδαφικά υλικά, περιγράφονται από τις έννοιες της μηχανικής των μερικώς κορεσμένων εδαφών (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Επιπλέον, τα υπολειμματικά εδάφη, δηλαδή εδάφη που έχουν σχηματιστεί από την αποσάθρωση πετρωμάτων, χωρίς να έχει απομακρυνθεί το υλικό από την αρχική του θέση, ενώ μπορεί να έχει επέλθει και εξαλλοίωση με αποτέλεσμα τον σχηματισμό δευτερογενών ορυκτών αποτελούν περίπτωση, όπου αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων και χαρακτηρίζονται ως μερικώς κορεσμένα (Fredlund and Rahardjo, 1993).



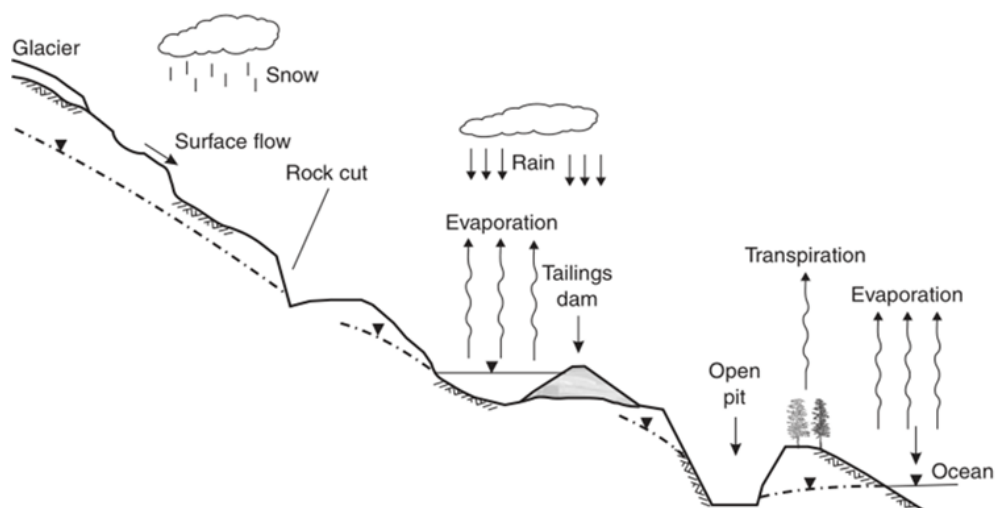
Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση της μηχανικής των εδαφών (τροποποιημένο από: Fredlund and Rahardjo, 1993).

## 2.2 Ο ρόλος του κλίματος και της βλάστησης

Πέραν της φύσεως του γεωϋλικού, καθοριστικός παράγοντας για να χαρακτηριστεί ένα έδαφος ως κορεσμένο ή μερικώς κορεσμένο, παίζει το κλίμα της εκάστοτε περιοχής. Το νερό απομακρύνεται από το έδαφος με τη διαδικασία της εξάτμισης (Evaporation) ή και μέσω των φυτών κατά την εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration) (Σχήμα 2). Οι παραπάνω διεργασίες, έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ανοδικής διαφυγής του νερού από το έδαφος.

Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει και η βλάστηση. Η απομάκρυνση του νερού στην περίπτωση αυτή, έγκειται στο γεγονός ότι τα περισσότερα φυτά, είναι ικανά να ασκούν μέσω των ριζών τους εφελκυστικές τάσεις της τάξεως των  $1 - 2 \text{ MPa}$ , στην υγρή φάση και κατά συνέπεια στο εδαφικό υλικό, με αποτέλεσμα την αστοχία του εδάφους και τη δημιουργία ρωγμών, από όπου διαφεύγει το νερό (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Από την άλλη, η βροχή και άλλες μορφές κατακρημνισμάτων, δημιουργούν μια καθοδική ροή, εμπλουτίζοντας την ποσότητα του νερού στο έδαφος.



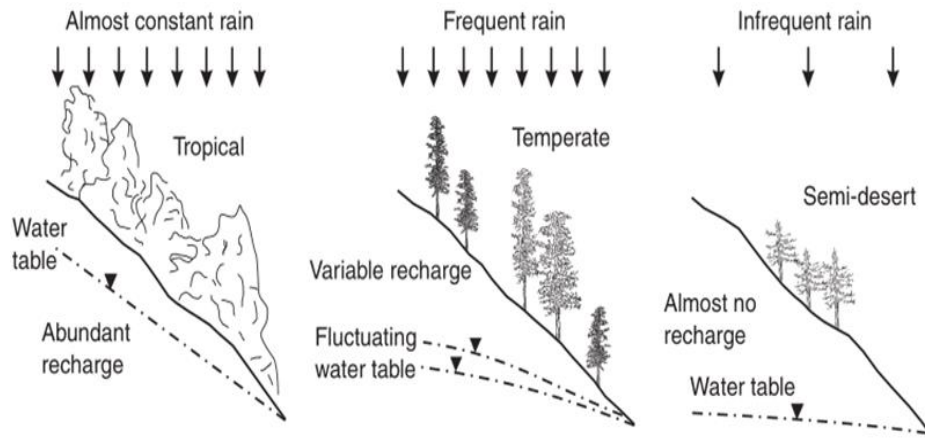
Σχήμα 2: Διαδικασίες ύγρυνσης και ξήρανσης του εδάφους (Wyllie and Mah, 2004).

Οι διαφορές αυτές στις συνθήκες ροής έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του μεγέθους της κορεσμένης ζώνης σε σχέση με τη μερικώς κορεσμένη ζώνη (Vadose Zone) και το αντίστροφο, και άρα το εύρος και τις τιμές των πιέσεων των πόρων που αναπτύσσονται στο εδαφικό υλικό.

Το μέγεθος και η σύσταση της μερικώς κορεσμένης ζώνης, αποτελεί σημαντικό παράγοντα που ελέγχει την κίνηση του νερού από και προς τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ σπουδαίο ρόλο στον ρυθμό της ροής παίζουν και οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται λόγω σύστασης του εδάφους.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, ανάλογα με το κλίμα που επικρατεί στην εκάστοτε περιοχή, υπάρχει και διαφορετική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στο αριστερό εδαφικό προφίλ που επικρατεί τροπικό κλίμα και οι βροχοπτώσεις είναι σχεδόν συνεχείς καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια και το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως κορεσμένο. Στην περίπτωση του ενδιάμεσου προφίλ που επικρατεί εύκρατο κλίμα, όπως και στην περίπτωση της Ελλάδας υπάρχουν εποχιακές διακυμάνσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και άρα και της μερικώς κορεσμένης ζώνης.

Ενώ στην δεξιά εικόνα που το κλίμα είναι ερημικό ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πολύ χαμηλά και το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους, καθίσταται από την μερικώς κορεσμένης ζώνη.

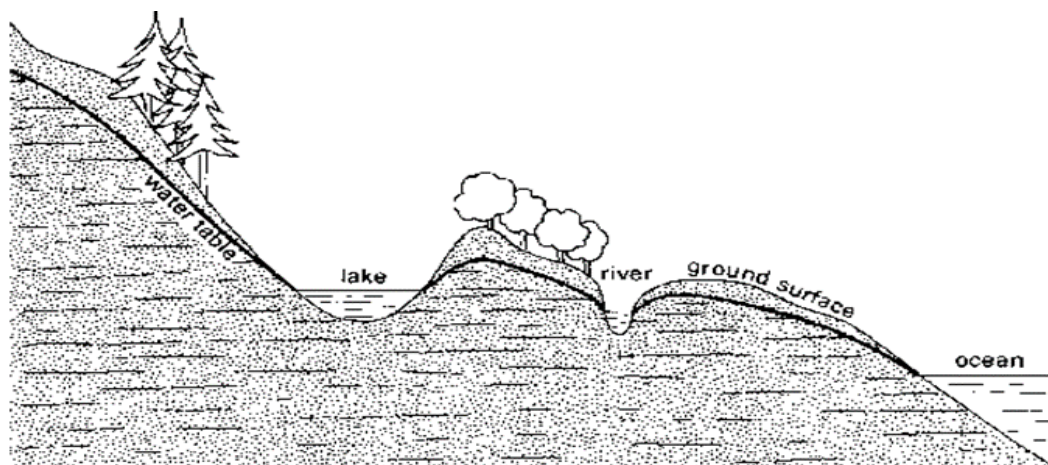


Σχήμα 3: Σχέση μεταξύ στάθμης υδροφόρου ορίζοντα και ποσότητας βροχής, ανάλογα με το κλίμα (Wyllie and Mah, 2004).

### 2.3 Ο ρόλος της τοπογραφίας

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, είναι η τοπογραφία. Έντονο ανάγλυφο, συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού νερού που απορρέει επιφανειακά, καθώς και αύξηση του ρυθμού στράγγισης του εδάφους. Αντίθετα ηπιότερο ανάγλυφο, συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού του νερού του κατεισδύει και μείωση του ρυθμού απομάκρυνσης αυτού.

Τέλος το έντονο ανάγλυφο, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού αποσάθρωσης και της μεταφοράς των γεωϋλικών (Transported Soils), που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελούν χαρακτηριστικά υλικά στα οποία επικρατούν αρνητικές πιέσεις πόρων.



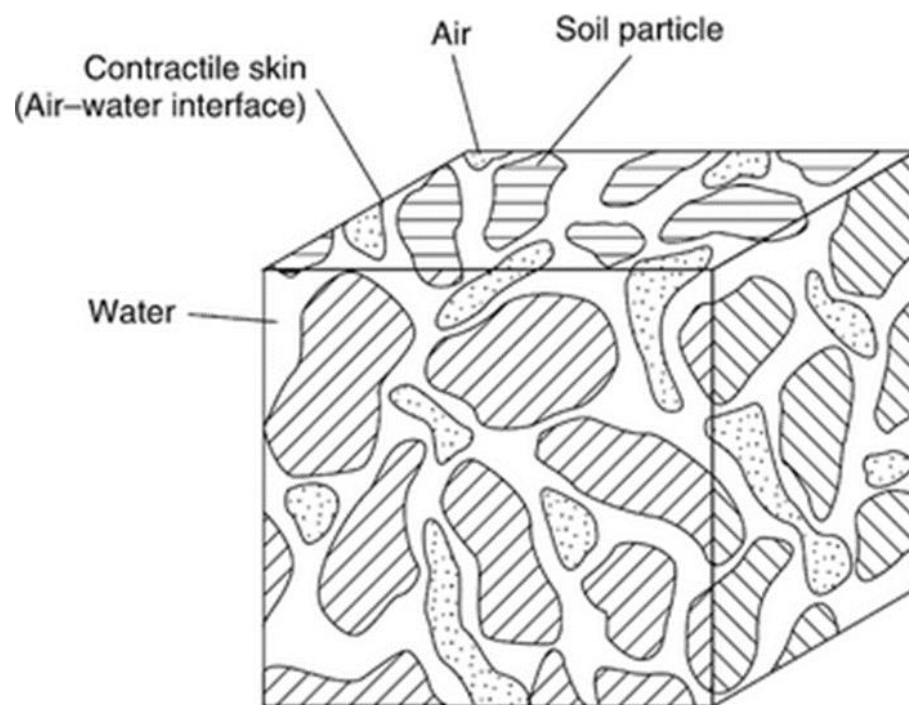
Σχήμα 4: Διαφοροποίηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με την τοπογραφία (πηγή: [www.fao.org](http://www.fao.org)).



## 2.4 Οι φάσεις των μερικώς κορεσμένων εδαφών και οι ιδιότητες αυτών

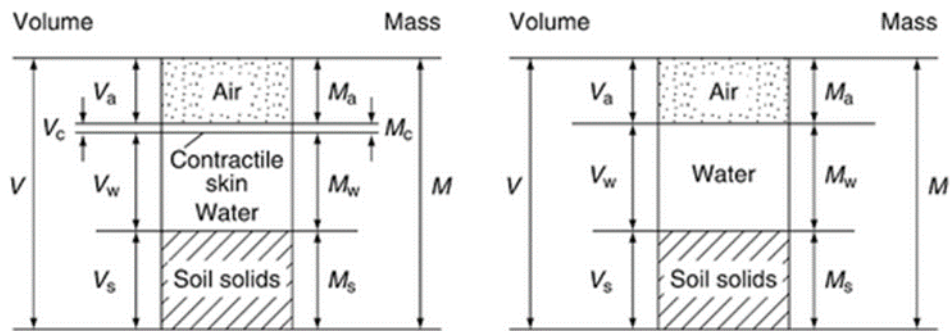
Όπως διατυπώθηκε και στην ενότητα 2.1, ένα μερικώς κορεσμένο έδαφος αποτελεί σύστημα τεσσάρων φάσεων (στερεή, υγρή, αέρια και η διεπιφάνεια μεταξύ υγρής και αέριας φάσης) (Fredlund and Rahardjo, 1993). Όλο και περισσότερο, δίνεται έμφαση από ερευνητές στη σπουδαιότητα της τέταρτης φάσης. Αυτό, γιατί όταν η αέρια φάση είναι συνεχής, η διεπιφάνεια αλληλοεπιδρά με τους εδαφικούς κόκκους, επηρεάζοντας τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

Το πάχος αυτής, είναι της τάξης των μόλις μερικών μοριακών στρωμάτων και για αυτό μπορεί να θεωρηθεί σαν τμήμα της υγρής φάσης του νερού, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις (Fredlund and Rahardjo, 1993). Στο Σχήμα 5, φαίνεται ένα στοιχείο μερικώς κορεσμένου εδάφους με συνεχή την αέρια φάση σε ολόκληρη την ύπαρξή του.



Σχήμα 5: Στοιχείο μερικώς κορεσμένου εδάφους και οι φάσεις αυτού (Fredlund and Rahardjo, 1993).

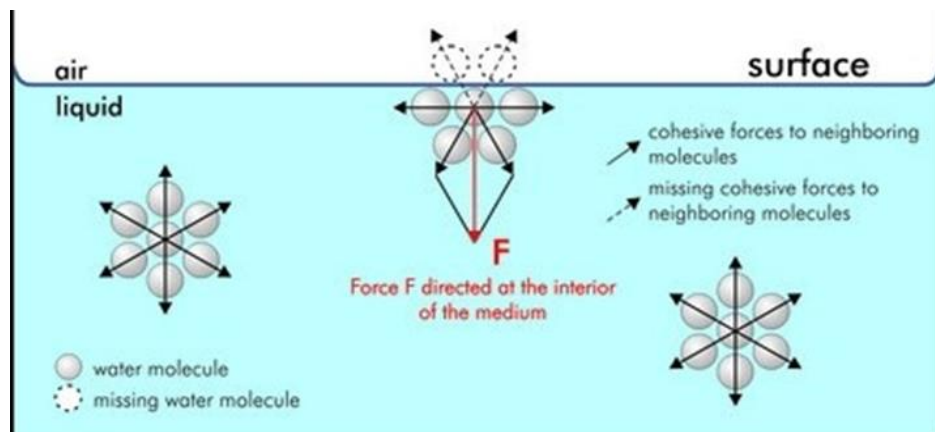
Η μάζα και ο όγκος κάθε φάσης μπορούν να αναπαρασταθούν σχηματικά, κατά αναλογία που εμπεριέχονται στο στοιχείο του εδάφους, με τη διεπιφάνεια να συμπεριλαμβάνεται στην υγρή φάση του νερού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 (Fredlund and Rahardjo, 1993).



Σχήμα 6: Διάγραμμα συστήματος φάσεων μερικώς κορεσμένου και κορεσμένου εδάφους (Fredlund and Rahardjo, 1993).

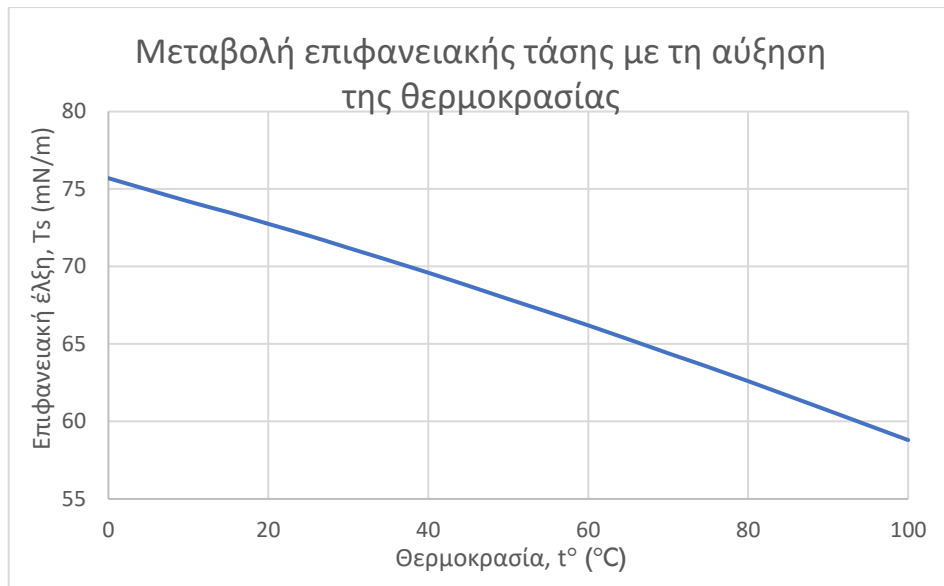
Η διεπιφάνεια αέρα - νερού, έχει τις δικές της ιδιότητες και πιο συγκεκριμένα, μικρότερη πυκνότητα και μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με την υγρή φάση, όμως η σημαντικότερη ιδιότητα, είναι η επιφανειακή τάση (Surface Tension) (Fredlund and Rahardjo, 1993). Η επιφανειακή τάση, είναι αποτέλεσμα ενδομοριακών δυνάμεων που ασκούνται στη διεπιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.

Κάθε μόριο, εντός της υγρής φάσης δέχεται ίσες δυνάμεις από όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να επέρχεται ισορροπία. Αντίθετα τα μόρια της τέταρτης φάσης, δέχονται δυνάμεις με φορά προς το εσωτερικό της υγρής φάσης, προκαλώντας έτσι μια εφελκυστική τάση σε αυτή, ώστε να επέρχεται ισορροπία (Fredlund and Rahardjo, 1993).



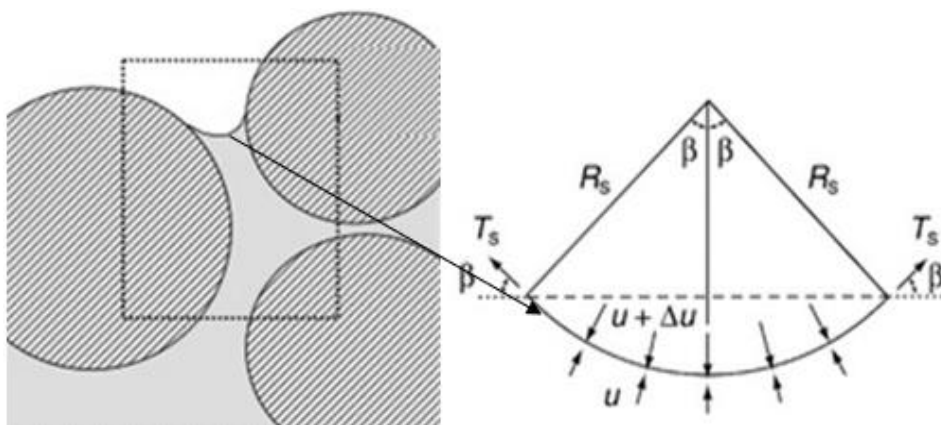
Σχήμα 7: Οι ενδομοριακές δυνάμεις που ασκούνται στη διεπιφάνεια και το νερό (πηγή: [www.rezasalehi.com](http://www.rezasalehi.com)).

Η επιφανειακή τάση  $T_s$  μετριέται σε μονάδες δύναμης ανά μοναδιαίο μήκος της διεπιφάνειας (N/m). Η επιφανειακή τάση εφάπτεται στη διεπιφάνεια, ενώ το μέγεθός της εξαρτάται από την θερμοκρασία. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Fredlund and Rahardjo, 1993).



Σχήμα 8: Μεταβολή επιφανειακής τάσης με τη θερμοκρασία (τροποποιημένο από: Fredlund and Rahardjo, 1993).

Η επιφανειακή τάση  $T_s$ , κάνει τη διεπιφάνεια να συμπεριφέρεται σαν μία ελαστική μεμβράνη με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μεγαλύτερη πίεση εντός από ότι εκτός αυτής. Αν μια ελαστική μεμβράνη υποβληθεί σε διαφορετικές πιέσεις σε κάθε πλευρά, αποκτά μια καμπυλότητα προς το μέρος με τη μεγαλύτερη πίεση. Για να επέλθει ισορροπία ασκείται πάνω της μια εφελκυστική δύναμη (Fredlund and Rahardjo, 1993). Η διαφορά πίεσης κατά μήκος της καμπύλης (Σχήμα 9), μπορεί να συσχετιστεί με την επιφανειακή τάση και την ακτίνα καμπυλότητας αυτής.



Σχήμα 9: Μεταβολή πιέσεων κατά μήκος διαστάσεως μεμβράνης (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Αν  $u$ ,  $(u + \Delta u)$  οι πιέσεις στην μεμβράνη, θεωρώντας οριακή ισορροπία, προκύπτει ότι (Fredlund and Rahardjo, 1993):

$$2T_s \sin\beta = 2\Delta u R_s \sin\beta \quad (2.1)$$

Όπου:

- $\Delta u$  η διαφορά πίεσης κατά μήκος δισδιάστατης ελαστικής μεμβράνης
- $R_s$  η ακτίνα καμπυλότητας
- $T_s$  η επιφανειακή τάση και
- $2R_s \sin\beta$  το μήκος της προβολής της μεμβράνης στο οριζόντιο επίπεδο.

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η σχέση (2.2), η οποία δίνει τη διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης (Fredlund and Rahardjo, 1993):

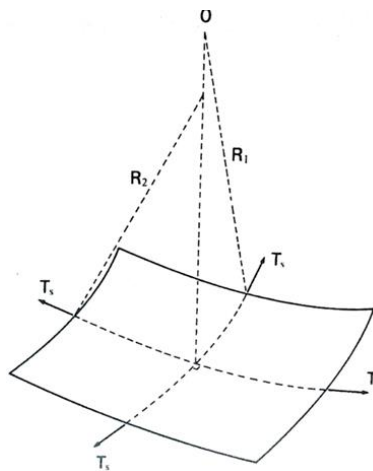
$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.2)$$

Ενώ για την περίπτωση ελαστικής μεμβράνης στις τρεις διαστάσεις (Σχήμα 10) η παραπάνω σχέση γίνεται (Fredlund and Rahardjo, 1993):

$$\Delta u = T_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

Όπου:

- $R_1, R_2$  οι ακτίνες καμπυλότητας σε δύο ορθογώνια κύρια επίπεδα.



Σχήμα 10: Επιφανειακές τάσεις σε τρισδιάστατη μεμβράνη (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Τέλος στην περίπτωση η ακτίνα καμπυλότητας παραμένει ίδια σε όλες τις διευθύνσεις, ισχύει ότι (Fredlund and Rahardjo, 1993):

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.4)$$

Σε κάθε μερικώς κορεσμένο έδαφος, η διεπιφάνεια υποβάλλεται σε μια πίεση αέρα  $u_a$  που είναι μεγαλύτερη από την πίεση του νερού  $u_w$ . Η διαφορά πίεσης αέρα και νερού ( $u_a - u_w$ ), καλείται μύζηση. Προκύπτει ότι (Fredlund and Rahardjo, 1993):

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

Η εξίσωση (2.5), αναφέρεται ως «η εξίσωση του τριχοειδούς μοντέλου του Kelvin (Kelvin's capillary model equation)». Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, καθώς αυξάνεται η μύζηση, η ακτίνα καμπυλότητας μειώνεται και το αντίστροφο, με αποτέλεσμα όταν η μύζηση τείνει στο μηδέν η διεπιφάνεια υγρής και αέριας φάσης, τείνει να γίνει επίπεδη (Fredlund and Rahardjo, 1993).

## 2.5 Η θεωρία της μύζησης του εδάφους.

Η θεωρητική έννοια της μύζησης, αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα. Αρχικά χρησιμοποιούνταν για να εξηγήσει φαινόμενα που σχετίζονται με το σύστημα εδάφους, νερού και φυτών. Η σπουδαιότητα της μύζησης στη μηχανική των μερικώς κορεσμένων εδαφών, πρωτοεμφανίστηκε στην Αγγλία από τους Croney και Coley στα μέσα του προηγούμενου αιώνα.

Η εδαφική μύζηση, αναφέρεται ως η δυναμική ενέργεια του νερού ανά μονάδα όγκου ( $J/m^3$  ή  $Pa$  στη μηχανική) και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ( $\Psi$ ). Παρ' όλο που η κλασσική φυσική αναγνωρίζει και την κινητική συνιστώσα τη ενέργειας, στην περίπτωση των εδαφών, θεωρείται αμελητέα λόγω του αργού ρυθμού με τον οποίο κινείται το νερό στο υπέδαφος.

Πολλοί είναι οι παράγοντας που συνιστούν την συνολική μύζηση (Total Suction) ή δυναμικό του νερού (Water Potential). Οι σημαντικότεροι, από την οπτική της μηχανικής των εδαφών έχουν ως εξής:

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m \quad (2.6)$$

Όπου:

I)  $\Psi_g$ : είναι το βαρυτικό δυναμικό (Gravitational Potential), το οποίο αναπαριστά την επίδραση της βαρύτητας του εδάφους. Υπολογίζεται από το ύψος υλικού, πάνω από κάποιο σημείο αναφοράς  $z_0$ .

$$\Psi_g = Mg(z_{\text{soil}} - z_0) \quad (2.7)$$

Όπου:

- $M$ , η μάζα του υλικού του
- $g$ , η σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας

II)  $\Psi_s$ : είναι το ωσμωτικό δυναμικό (Osmotic Potential) ή ωσμωτική μύζηση και σχετίζεται με την συγκέντρωση του νερού σε άλατα. Επειδή παίρνει αρνητικές τιμές, νερά με μεγάλη συγκέντρωση αλάτων μειώνουν την συνολική μύζηση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα φυτά να δυσκολεύονται περισσότερο στο να απομακρύνουν το νερό από το έδαφος. Στην εδαφομηχανική όμως γενικά αποτελεί αμελητέα ποσότητα.

$$\Psi_s = MiRT \quad (2.8)$$

Όπου:

- $R$  η σταθερά των ιδανικών αερίων
- $T$  η θερμοκρασία
- $i$  ο παράγοντας van't Hoff
- $M$  η συγκέντρωση των αλάτων

III)  $\Psi_p$ : είναι το δυναμικό πίεσης (Pressure Potential) και υπολογίζεται με βάση την πίεση που επιβάλλεται στο εδαφικό νερό. Αναφέρεται τόσο σε κορεσμένα, όσο και σε μερικώς κορεσμένα εδάφη και παίρνει θετικές, όσο και αρνητικές τιμές.

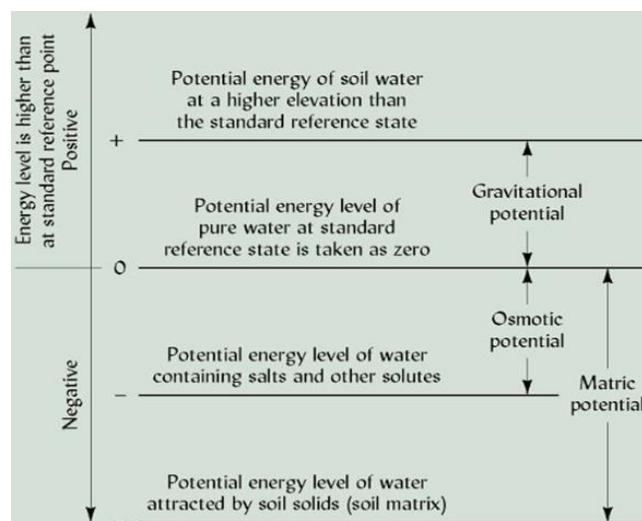
$$\Psi_p = \rho_w gh \quad (2.9)$$

Όπου:

- $\rho_w$ , η πυκνότητα του νερού
- $h$ , το ύψος στήλης νερού
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας

IV)  $\Psi_M$ : είναι το δυναμικό μύζησης (Matric Protentional) ή μύζηση (Matric Suction) όπως συνηθίζεται να λέγεται. Παίρνει αρνητικές τιμές και προσδιορίζεται με βάση την ελκτική δύναμη του νερού στο εδαφικό υλικό. Αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα στην περίπτωση των μερικώς κορεσμένων εδαφών και με αυτή σχετίζονται οι σημαντικότερες ιδιότητές τους.

$$\Psi_M = (u_a - u_w) \quad (2.10)$$



Σχήμα 11: Κατηγοριοποίηση της δυναμικής ενέργειας του νερού και των πιέσεων πόρων που αναπτύσσονται ανά περίπτωση (πηγή: [www.css.cornell.edu](http://www.css.cornell.edu)).

## 2.6 Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (Soil Water characteristic Curve (SWCC)).

Οι μηχανικές και υδραυλικές ιδιότητες των μερικώς κορεσμένων εδαφών, είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη μύζηση ( $\psi_M$ ) που αναπτύσσεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού (Soil Water Characteristic Curve ή SWCC), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστούν οι διάφοροι παράμετροι που είναι αναγκαίοι για την πλήρη περιγραφή ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους. Η πρώτη χαρακτηριστική καμπύλη, κατασκευάστηκε το 1907 από τον Edgar Buckingham.

Ουσιαστικά αποτελεί μια συνάρτηση που συσχετίζει την ποσότητα υγρασίας στο έδαφος με την αναπτυσσόμενη μύζηση. Η ποσότητα υγρασίας στο έδαφος, μπορεί να καθοριστεί με περισσότερες από μία μεταβλητές. Οι κυριότερες είναι: η βαρυτική ποσότητα υγρασίας (gravimetric water content)  $W$ , η ογκομετρική ποσότητα (volumetric water content)  $\theta$  και ο βαθμός κορεσμού  $S(\%)$ .

$$W = \frac{M_W}{M_s} \quad (2.11) \quad \theta = \frac{V_W}{V_{wet}} \quad (2.12) \quad S = \frac{V_W}{V_v} \quad (2.13)$$

Όπου:

- $V_w$ , ο όγκος του νερού και  $V_{wet}$ , είναι ο συνολικός όγκος του μέσου
- $V_v$ , είναι ο όγκος των πόρων
- $M_s$ , είναι η μάζα του νερού και  $M_s$ , είναι η μάζα του μέσου.

Η ποσότητα του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος για συγκεκριμένη τιμή μύζησης εξαρτάται από παράγοντες όπως (Aubertin et al., 2003):

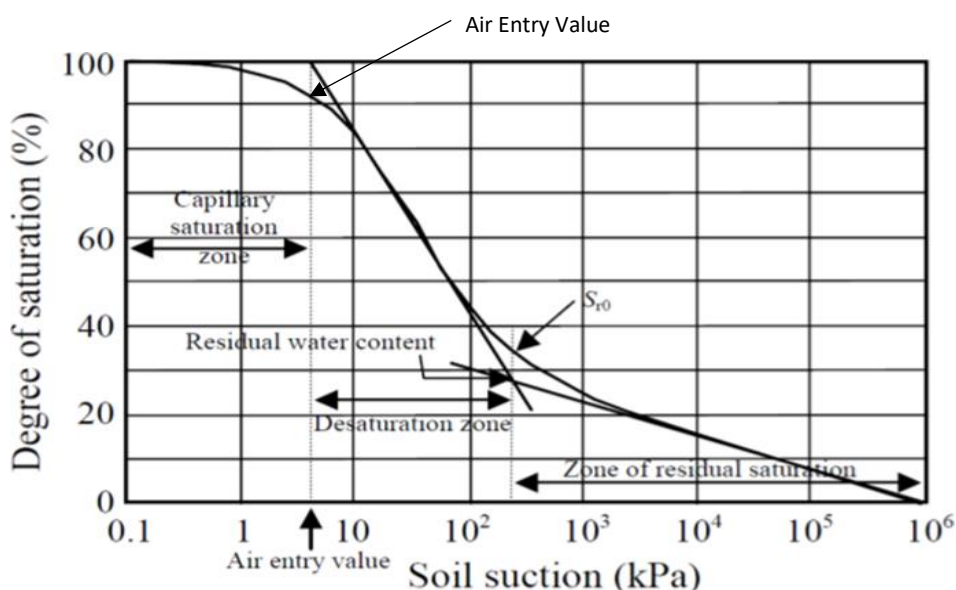
- Το σχήμα των κόκκων
- Το μέγεθος των κόκκων
- Την κατανομή των πόρων στο εδαφικό υλικό
- Την ορυκτολογική σύσταση
- Τις χημικές ενώσεις που μπορεί να είναι διαλυμένες στο νερό



Ενώ η μορφή και το σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης, εξαρτώνται από:

- Το πως κατανέμεται το πορώδες στο εδαφικό υλικό
- Το ιστορικό προ φορτίσεων
- Την πλαστικότητα του εδάφους.

Στο Σχήμα 12, φαίνεται μια χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, η οποία συσχετίζει την αναπτυσσόμενη μύζηση με το βαθμό κορεσμού. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει μια σταθερή αύξηση της μύζησης κατά την οποία δεν μεταβάλλεται η ποσότητα υγρασίας. Αυτό συμβαίνει μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή μύζησης η οποία χαρακτηρίζεται ως τιμή εισόδου του αέρα (Air Entry Value). Στο σημείο αυτό ο αέρας εισέρχεται στους μεγαλύτερους πόρους με αποτέλεσμα να αρχίζει η στράγγιση του εδάφους. Στη συνέχεια ο ρυθμός στράγγισης αυξάνει μέχρι την τιμή μύζησης που αναφέρεται ως παραμένουσα τιμή νερού (Residual Water Content), πέραν της οποίας χρειάζεται να ασκηθούν πολύ μεγάλες πιέσεις για να απομακρυνθεί περισσότερο νερό από το έδαφος.



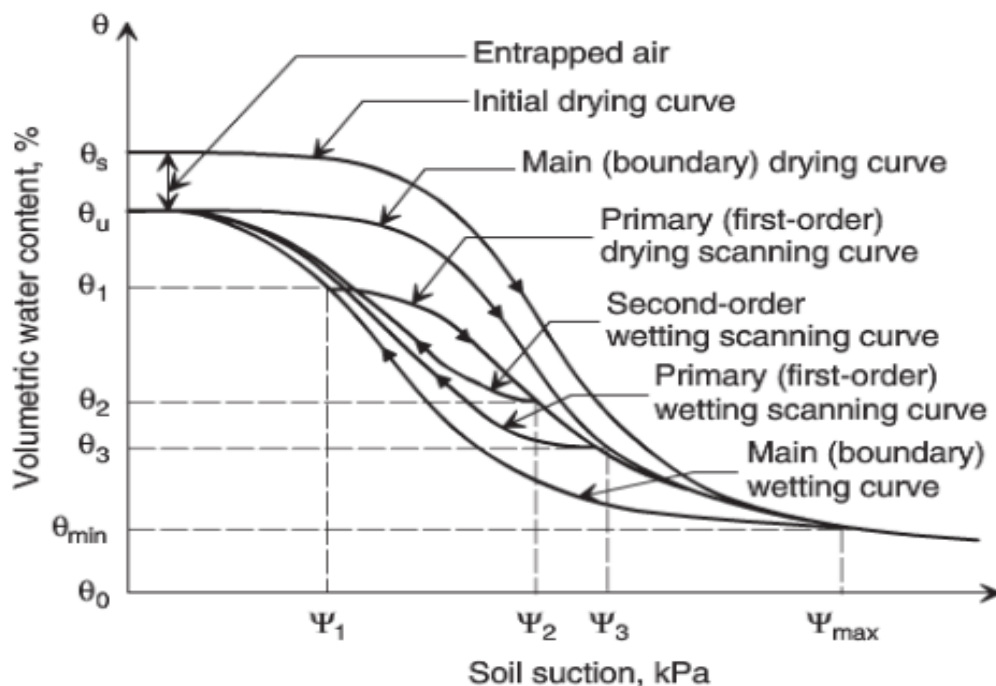
Σχήμα 12: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, όπου φαίνονται οι διάφορες περιοχές υγρασίας (πηγή: Sillers et al., 2001).

Εκτός από τις διαδικασίες ξήρανσης, το έδαφος υποβάλλεται και σε διαδικασίες ύγρυνσης, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Η χαρακτηριστική καμπύλη για το ίδιο εδαφικό υλικό έχει διαφορετική μορφή και εξαρτάται από τις συνθήκες που επιβάλλονται σε αυτό.

Υπάρχει η ανάγκη διαχωρισμού της καμπύλης ξήρανσης (Drying Curve) από την καμπύλη ύγρυνσης (Adsorption Curve) κυρίως για εντόνως διογκούμενα αργιλικά εδάφη και επιδεκτικά σε κατάρρευση εδάφη στα οποία επέρχεται έντονη αλλαγή της γεωμετρίας τους ανάλογα με τις συνθήκες που υποβάλλονται. Η απόκλιση αυτή ή υστέρηση, οφείλεται:

- 1) Στο ιστορικό ύγρυνσης και ξήρανσης
- 2) Στο ότι κατά την ύγρυνση του εδάφους πληρούνται πρώτα οι μικροί πόροι, ενώ κατά την ξήρανση αδειάζουν αρχικά οι μεγαλύτεροι πόροι.
- 3) Ακόμη η επιφανειακή τάση μεταβάλλεται, γιατί η ακτίνα του μηνίσκου είναι μεγαλύτερη κατά την ύγρυνση από ότι κατά την ξήρανση του εδάφους.

Οι ενδιάμεσοι βρόχοι, όπως φαίνονται στο Σχήμα 13 καλούνται καμπύλες διαβάθμισης (Scanning Curves) και υποδεικνύουν τη μετάβαση ανάμεσα στις διαδικασίες ξήρανσης και ύγρυνσης.



Σχήμα 13: Καμπύλες ύγρυνσης και ξήρανσης (πηγή: [www.rezasalehi.com](http://www.rezasalehi.com)).

## 2.7 Πειραματικός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού (SWCC).

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές μέτρησης. Οι περισσότερες, βασίζονται σε πρωτότυπες συσκευές που έχουν αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό. Ο συνηθέστερος τρόπος μέτρησης, γίνεται με τη χρήση του εξοπλισμού τριαξονικών δοκιμών (Fredlund and Vanapalli, 2002). Για να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές σε μερικώς κορεσμένα εδάφη, πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στη συσκευή μέτρησης. Οι τροποποιήσεις αυτές, θα πρέπει να συνοδεύονται με συσκευές μέτρησης ή ελέγχου της πίεσης του αέρα των πόρων  $u_a$  και της πίεση του νερού των πόρων  $u_w$  (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Ακόμη, καθίσταται αναγκαία η χρήση ενός κεραμικού δίσκου με λεπτούς πόρους (High Air – Entry Disk ή HAEPD) στη θέση του συμβατικού δίσκου της τριαξονικής δοκιμής, που χρησιμοποιείται στα κορεσμένα εδάφη, ο οποίος λειτουργεί ως ημι-διαπερατή μεμβράνη η οποία διαχωρίζει την αέρια από την υγρή φάση. Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί, όσο η τιμή εισόδου αέρα του δίσκου είναι μεγαλύτερη από τη μύζηση που αναπτύσσεται στο εδαφικό δοκίμιο κατά τη διαδικασία φόρτισης (δηλαδή όσο  $(u_a - u_w) < 1500$  kPa) (Fredlund and Vanapalli, 2002). Στην περίπτωση που η μύζηση ξεπεράσει αυτή την τιμή εισέρχεται αέρας στο δίσκο με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός και επομένως η μέτρηση των μεταβλητών των πιέσεων αέρα και νερού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τριαξονικών δοκιμών ανάλογα με τις συνθήκες στράγγισης που επιβάλλονται στο δοκίμιο κατά τη φόρτιση, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 (Fredlund and Vanapalli, 2002). Ανάλογα με την επιλογή της μεθόδου, είναι δυνατός ο έλεγχος ή η μέτρηση του πιέσεων των πόρων που αναπτύσσονται.

Πίνακας 1: Τα διάφορα είδη τριαξονικών δοκιμών που εφαρμόζονται στον προσδιορισμό της μύζησης των μερικώς κορεσμένων εδαφών (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Test methods	Consolidation prior to shearing process	Drainage		Shearing process†		
		Pore air	Pore water	Pore air pressure, $u_a$	Pore water pressure, $u_w$	Soil volume change, $V$
Consolidated drained	Yes	Yes	Yes	C	C	M
Constant water content	Yes	Yes	No	C	M	M
Consolidated undrained	Yes	No	No	M	M	--
Undrained compression	No	No	No	--	--	--
Unconfined compression	No	No	No	--	--	--

† M = measurement, C = controlled.

### 2.7.1 Εξισώσεις αποτύπωσης των πειραματικών δεδομένων

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές εξισώσεις για την αποτύπωση πειραματικών δεδομένων για ένα περιορισμένο εύρος μύζησης (Brooks και Corey, 1964). Το 1994 οι Fredlund and Xing παρείχαν μια αναλυτική βάση για τον μαθηματικό προσδιορισμό ολόκληρης της χαρακτηριστικής καμπύλης για ένα μεγάλο εύρος μύζησης ( $0 - 10^6 \text{ kPa}$ ), αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που είναι δυνατόν να υπάρξει σε πρακτικά προβλήματα.

Ο προσδιορισμός της εξίσωσης, βασίζεται στην υπόθεση ότι το σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εξαρτάται από την κατανομή των πόρων στο έδαφος (Fredlund and Xing, 1994).

Οι πόροι του εδάφους, χαρακτηρίζονται από την ακτίνα  $r$  και περιγράφονται από μία συνάρτηση  $f(r)$ , όπου  $f(r)dr$ , είναι ο σχετικός όγκος των πόρων ακτίνας  $r$  μέχρι  $(r + dr)$  που είναι πληρωμένοι με νερό, δηλαδή το πορώδες.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας (Volumetric Water Content) στο έδαφος, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη συνάρτηση (2.14) ως εξής (Fredlund and Xing, 1994):

$$\theta(R) = \int_{R_{\min}}^R f(r)dr \quad (2.14)$$

Όπου:

- $\theta(R)$  η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας στους πόρους ακτίνας μικρότερης ή ίσης με  $R$
- $R_{\min}$  η μικρότερη ακτίνα των πόρων του εδαφικού υλικού που μελετάται

Έστω ότι  $R_{\max}$  είναι η μέγιστη ακτίνα των πόρων. Τότε για την περίπτωση πλήρους κορεσμού ισχύει ότι (Fredlund and Xing, 1994):

$$\theta(R_{\max}) = \theta_s \quad (2.15)$$

Ο νόμος των τριχοειδών δυνάμεων (Capillary Law), δηλώνει ότι υπάρχει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της αναπτυσσόμενης μύζησης και της ακτίνας καμπυλότητας της διεπιφάνειας αέρα νερού (Fredlund and Xing, 1994).

$$r = \frac{C}{\Psi} \quad (2.16)$$

Όπου:

- $C = 2T_s \cos \phi$  είναι μια σταθερά και  $T_s$  η επιφανειακή τάση του νερού και  $\phi$  η γωνία επαφής μεταξύ εδάφους και νερού.
- $\Psi$  η τιμή μύζησης που αναφέρεται στην ακτίνα  $r$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω δύο συγκεκριμένες καταστάσεις μύζησης, μπορούν να περιγραφούν όπως φαίνεται στις εξισώσεις (2.17) και (2.18) (Fredlund and Xing, 1994):

$$\Psi_{\max} = \frac{C}{R_{\min}} \quad (2.17)$$

και

$$\Psi_{\text{aev}} = \frac{C}{R_{\max}} \quad (2.18)$$

Όπου:

- $\Psi_{\text{aev}}$  η τιμή μύζησης που αντιστοιχεί στην τιμή εισόδου του αέρα στους μεγαλύτερους πόρους, προκαλώντας τη στράγγιση αυτών.
- $\Psi_{\max}$  η τιμή μύζησης που σχετίζεται με τη μικρότερη ακτίνα πόρων.

Από τις συναρτήσεις (2.14) και (2.16) προκύπτει ότι (Fredlund and Xing, 1994):

$$\theta(\Psi) = \int_{\Psi_{\max}}^{\Psi} f\left(\frac{C}{h}\right) d\left(\frac{C}{h}\right) = \int_{\Psi}^{\Psi_{\max}} f\left(\frac{C}{h}\right) \frac{C}{h^2} dh \quad (2.19)$$

Όπου :

- $h$  η μεταβλητή ολοκλήρωσης που αναφέρεται στη μύζηση

Από την εξίσωση (2.19), εφόσον είναι γνωστή η κατανομή των πόρων  $f(r)$  μπορεί να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη του υλικού.

Για την αναπαράσταση της χαρακτηριστικής καμπύλης, σε όλο το εύρος της μύζησης, η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας μπορεί να κανονικοποιηθεί. Η κανονικοποιημένη ποσότητα υγρασίας  $\theta$  να ισούται με:

$$\theta = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (2.20)$$

Τότε από την εξίσωση (2.14), προκύπτει ότι η ακόλουθη μορφή ολοκλήρωσης (2.21) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού ως προς τη μύζηση (Fredlund and Xing, 1994).

$$\theta(\Psi) = \theta_s \int_{\Psi}^{\infty} f(h) dh \quad (2.21)$$

Όπου:

- $f(h)$  κατανομή του μεγέθους των πόρων ως συνάρτηση της μύζησης

Οι Fredlund and Xing, πρότειναν την εξής κατανομή:

$$f(\Psi) = \frac{mn \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^{n-1}}{\alpha \left[ e + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n \right] \left\{ \log \left[ e + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n \right] \right\}^{m+1}} \quad (2.22)$$

Όπου:

- $m, n, a$  παράμετροι προσαρμογής της συνάρτησης στα δεδομένα.

Από τις εξισώσεις (2.21) και (2.22), προκύπτει η εξίσωση (2.23) που συσχετίζει την ογκομετρική ποσότητα υγρασίας στο έδαφος με την αναπτυσσόμενη μύζηση:

$$\theta = \theta_s \left[ \frac{1}{\ln[e + \left(\frac{\Psi}{\alpha}\right)^n]} \right]^m \quad (2.23)$$

Η εξίσωση (2.23) μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να περνάει από ένα εύρος μύζησης ( $0 - 10^6 \text{ kPa}$ ), έχοντας την εξής μορφή:

$$\theta(\Psi, \alpha, m, n) = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{\alpha} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2.24)$$

και

$$C(\Psi) = \frac{-\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{1.000.000}{\Psi_r} \right) \right]} \quad (2.25)$$

Όπου:

- $C(\Psi)$  ένας διορθωτικός συντελεστής
- Και  $\Psi_r$  η τιμή μύζησης που ανταποκρίνεται στην παραμένουσα ποσότητα υγρασίας  $\theta_r$

## 2.8 Έμμεσος προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού

Οι έμμεσοι τρόποι προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού, χρησιμοποιούνται αντί των πειραματικών δοκιμών με τις τριαξονικές δοκιμές οι οποίοι προϋποθέτουν την ύπαρξη συσκευής.

Πρόκειται για εμπειρικούς τύπους που χρησιμοποιούν βασικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών, όπως η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και τα όρια Atterberg.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τρεις από τις μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία για την κατασκευή των χαρακτηριστικών καμπυλών.

1) Η πρώτη μέθοδος, αναπτύχθηκε από τον Aubertin et al., (2003) και αποτελεί μια τροποποιημένη μέθοδο, αυτής που παρουσίασε ο Kovacs (1981). Οι αλλαγές, έγιναν για να είναι καλύτερη η αναπαράσταση κυρίως αργιλικών εδαφών. Η συνάρτηση αρχικά προσδιορίζεται με βάση το βαθμό κορεσμού  $S_r$  και στη συνέχεια εκφράζεται σε σχέση με την ογκομετρική ποσότητα υγρασίας  $\theta_w$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta_w = nS_r \quad (2.25)$$

Η συνάρτηση αυτή αναπτύσσεται, με τον καθορισμό του βαθμού κορεσμού δύο διαφορετικών συνιστωσών. Η πρώτη συνιστώσα, αφορά την ποσότητα υγρασίας που μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος λόγω τριχοειδών δυνάμεων (Capillary Forces), οι οποίες αναπτύσσονται σε σχετικά μικρές αρνητικές πιέσεις πόρων.

Η δεύτερη συνιστώσα, αναφέρεται στην ογκομετρική ποσότητα υγρασίας που υπάρχει λόγω της ανάπτυξης μεγάλων αρνητικών πιέσεων πόρων, όπου η ποσότητα της υγρασίας που συγκρατείται οφείλεται στις δυνάμεις συνάφειας (Adhesion Forces) που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του εδάφους και αυτών του νερού.

Οι δύο αυτές συνιστώσες μπορούν να υπολογιστούν με βάση εμπειρικούς τύπους οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω και αξιοποιούν την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού κατά USCS, το πορώδες, τα όρια Atterberg και το σχήμα των κόκκων.

Ο βαθμός κορεσμού με βάση τις δύο παραπάνω συνιστώσες, δίνεται από την σχέση (2.26):

$$S_r = \frac{\theta_w}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (2.26)$$

Όπου:

- $S_r$ : ο βαθμός κορεσμού
- $\theta_w$ : η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας
- $n$ : το πορώδες του εδάφους
- $S_c$ : ο βαθμός κορεσμού λόγω τριχοειδών δυνάμεων
- $S_a^*$ : ο βαθμός κορεσμού λόγω δυνάμεων συνάφειας, όπου



$$S_a^* = \langle 1 - S_a \rangle + 1 \quad (2.27)$$

και

$$S_a = aC_\Psi \left[ \frac{\left( \frac{h_{CO}}{\Psi_n} \right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Psi}{\Psi_n} \right)^{\frac{1}{6}}} \right] \quad (2.28)$$

Όπου:

- $a$ : παράμετρος προσαρμογής (Curve Fitting Parameters)
- $\Psi$ : η μύζηση ( $\Psi_M$ )
- $\Psi_n$ : όρος ώστε να εξασφαλίζεται αδιάστατος λόγος
- $e$ : ο λόγος κενών
- $h_{CO}$ : η μέση ανύψωση λόγω τριχοειδών δυνάμεων σε  $cm$ , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_{CO} = \frac{b(cm^2)}{eD_{10}(cm)} \quad (2.29)$$

Και για συνεκτικά εδάφη:

$$h_{CO} = \frac{\xi w_L^{1,75}}{e} \quad (2.30)$$

Όπου:

- $D_{10}$ : η διάμετρος σε  $cm$  των κόκκων που αντιστοιχούν στο 10% διερχόμενο ποσοστό.

$$b(cm^2) = \frac{0,75}{1,17 \log C_u + 1} \quad (2.31)$$

Όπου:

- $C_u$ : ο συντελεστής ομοιομορφίας
- $w_L$ : το όριο υδαρότητας (%)
- $\xi$ : σταθερά περίπου ίση με  $402,2 \text{ cm}^2$
- $C_\Psi$ : ο διορθωτικός συντελεστής κατά Fredlund and Xing, όπως δίνεται από τη σχέση (2.25) και για τον οποίο, ισχύει ότι:

$$\Psi_r = 0,86 \left( \frac{\xi}{e} \right)^{1,2} w_L^{1,74} \quad (2.32)$$

2) Ο Zapata et al., (2000) χρησιμοποίησε μια βάση δεδομένων από περίπου 190 εδάφη, από παλιότερες δημοσιεύσεις. Τα εδάφη αυτά, τα διαχώρισε σε δύο κατηγορίες τα πλαστικά (Plastic) για τα οποία ισχύει ότι  $PI > 0$ , όπου  $PI$  ο δείκτης πλαστικότητας και σε μη πλαστικά (non Plastic) για τα οποία ισχύει ότι  $PI = 0$ . Η βάση αυτή δεδομένων, αποτελούνταν από 70 πλαστικά και 120 μη πλαστικά εδάφη. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την εξίσωση (2.24) των Fredlund and Xing, της οποίας οι παράμετροι  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\Psi_r$  για πλαστικά εδάφη, υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$wPI = P_{200} \times PI \quad (2.32)$$

$$a = 0,00364(wPI)^{3,35} + 4(wPI) + 11 \quad (2.33)$$

$$\frac{b}{c} = -2,313(wPI)^{0,14} + 5 \quad (2.34)$$

$$c = 0,0514(wPI)^{0,465} + 0,5 \quad (2.35)$$

$$\frac{\Psi_r}{a} = 32,44e^{0,0186(wPI)} \quad (2.36)$$

Όπου:

- $P_{200}$ : το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού που περνά από το κόσκινο Νο. 200, εκφρασμένο σε δεκαδική μορφή.

Για μη πλαστικά εδάφη, οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.37 έως 2.40):

$$a = 0,8627(D_{60})^{-0,751} \quad (2.37)$$

$$\bar{b} = 7,5 \quad (2.38)$$

$$c = 0,177 \ln(D_{60}) + 0,7734 \quad (2.39)$$

$$\frac{\Psi_r}{a} = \frac{1}{D_{60} + 9,7e^{-4}} \quad (2.40)$$

Όπου:

- $D_{60}$ : είναι το μέγεθος κόκκων για το οποίο το 60% του υλικό είναι μικρότερο από το  $\bar{b}$ .

3) Η τρίτη μέθοδος, αναπτύχθηκε από τον Perera et al., (2005) και εξέλιξη της προηγούμενης. Και αυτή η μέθοδος διαχωρίζει τα υλικά, θεωρώντας ως πλαστικά αυτά για τα οποία ισχύει ότι  $wPI \geq 1$  και ως μη πλαστικά αυτά για τα οποία ισχύει ότι  $wPI = 0$ . Για την ανάπτυξη των εξισώσεων (2.41) έως (2.44) χρησιμοποιήθηκαν 154 μη πλαστικά και 63 πλαστικά εδάφη. Και στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η σχέση (2.24), για την οποία υπολογίζονται οι παράμετροι  $a_f$ ,  $b_f$ ,  $c_f$ ,  $\Psi_{rf}$  της εξίσωσης. Για μη πλαστικά εδάφη ισχύει ότι:

$$a_f = 1,14a - 0,5 \quad (2.41)$$

$$b_f = 0,936b - 3,8 \quad (2.42)$$

$$c_f = 0,26e^{0,758c} + 1,4D_{10} \quad (2.43)$$

$$\Psi_{rf} = 100 \quad (2.44)$$

$\kappa\alpha l$

$$a = -2,79 - 14,1 \log(D_{20}) - 1,9(10^{-6})(P_{200})^{4,34} + 7 \log(D_{30}) + 0,055D_{100} \quad (2.45)$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]} \quad (2.46)$$

$$m_1 = \frac{30}{\left[\log\left(\frac{D_{90}}{D_{60}}\right)\right]} \quad (2.47)$$

$$b = \left\{ 5,39 - 0,29 \ln \left[ P_{200} \left( \frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0,57} + 0.02(P_{200})^{1,19} \right\} m_1^{0,1} \quad (2.48)$$

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{m_2} + \log(D_{30})\right]} \quad (2.49)$$

$$m_2 = \frac{20}{\log\left(\frac{D_{30}}{D_{90}}\right)} \quad (2.50)$$

$$c = \log((m_2)^{1,15}) - \left(1 - \frac{1}{b_f}\right) \quad (2.51)$$

Όπου:

- $D_x$ : η διάμετρος των κόκκων που ανταποκρίνεται στο  $x(\%)$  λεπτότερο υλικό.

Για πλαστικά εδάφη, οι σχέσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων, έχουν ως εξής:

$$a_f = 32,835\{\ln(wPI)\} + 32,438 \quad (2.52)$$

$$b_f = 1,421(wPI)^{-0,3185} \quad (2.53)$$

$$c_f = -0,2154\{\ln(wPI)\} + 0,7145 \quad (2.54)$$

$$\Psi_{rf} = 500 \quad (2.55)$$

## 2.9 Η μηχανική συμπεριφορά των μερικώς κορεσμένων εδαφών

Η μηχανική συμπεριφορά των κορεσμένων εδαφών, σχετίζεται με μία μεταβλητή που περιγράφει την εντατική κατάσταση (Stress State Variable). Αυτή είναι η ενεργός τάση ( $\sigma'$ ), που ορίζεται ως η διαφορά της ολικής τάσης μείον την πίεση των πόρων του νερού ( $\sigma - u_w$ ). Οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στα κορεσμένα εδάφη είναι συνήθως θετικές ή μηδέν (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Στον αντίποδα, η μηχανική συμπεριφορά των μερικώς κορεσμένων εδαφών εξαρτάται από δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους μεταβλητές που περιγράφουν την εντατική κατάσταση. Αυτές, είναι η ολική τάση (Net Normal Stress) ( $\sigma - u_a$ ) και η μαθηματική διαφοράς της πίεσης των πόρων του αέρα ( $u_a$ ) μείον την πίεση των πόρων του νερού ( $u_w$ ) που αναπτύσσονται δηλαδή η μύζηση (matric suction) ( $u_a - u_w$ ) (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Η πίεση του αέρα των πόρων είναι συνήθως μηδέν και γι' αυτό στα μερικώς κορεσμένα εδάφη αναπτύσσονται αρνητικές πιέσεις πόρων. Η ολοκληρωμένη μορφή της

εντατικής κατάστασης του μη κορεσμένου εδάφους σε όρους δύο ανεξάρτητων τανυστών τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί με τους παρακάτω πίνακες:

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

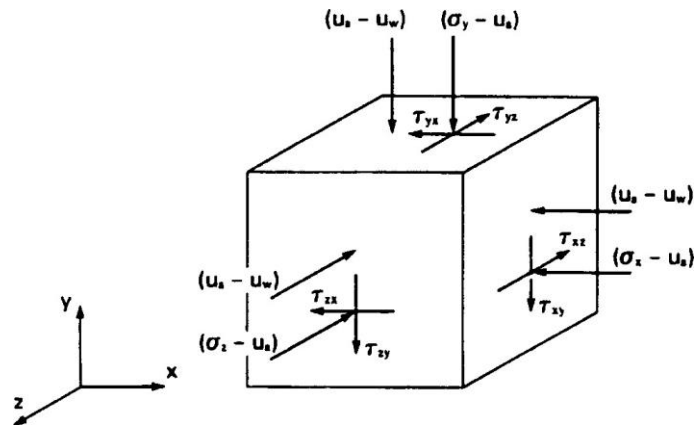
και

$$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Οι πίνακες, είναι συμμετρικοί ως προς την κύρια διαγώνιο ( $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ ), ενώ στο επίπεδο των κυρίων τάσεων ο πίνακας των ολικών τάσεων παίρνει την εξής μορφή:

$$\begin{bmatrix} (\sigma_1 - u_a) & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_2 - u_a) & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_3 - u_a) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Όπου τα διαγώνια στοιχεία αποτελούν τις ιδιοτιμές του πίνακα (2.56) και  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  οι κύριες τάσεις, για τις οποίες ισχύει ότι  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .



Σχήμα 14: Οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που περιγράφουν την εντατική κατάσταση για ένα μη κορεσμένο έδαφος (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Η διατμητική αντοχή των μερικώς κορεσμένων εδαφών μετριέται με συμβατικές εργαστηριακές μεθόδους, φορτίζοντας σε θλιπτικό εντατικό πεδίο κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιώντας εξοπλισμό τριαξονικής δοκιμής. Τα δοκίμια πρέπει να έχουν την ίδια αρχική ποσότητα σε νερό, καθώς και ίδια ξηρή πυκνότητα (Fredlund and Rahardjo, 1993).

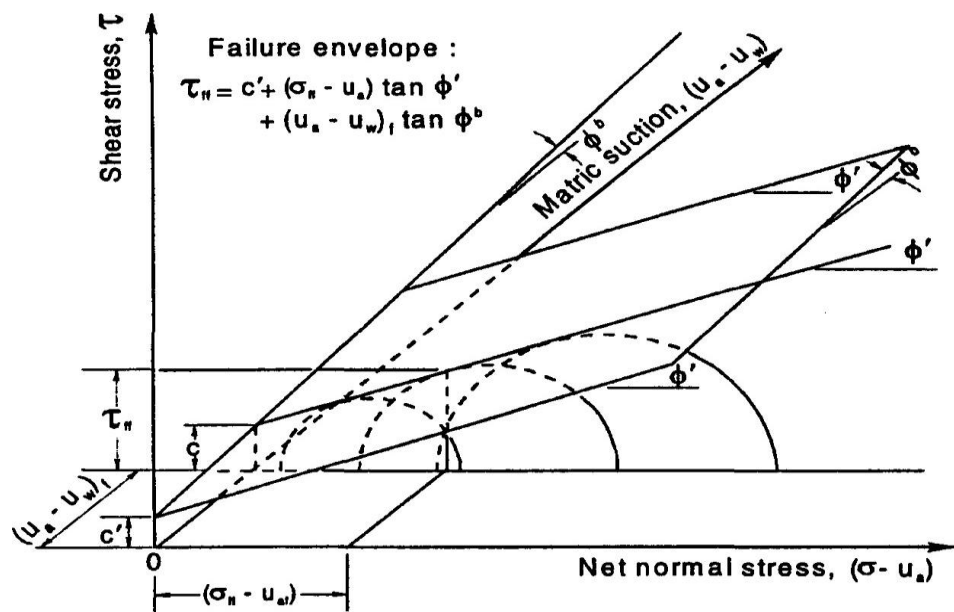
Οι πιέσεις των πόρων  $u_a$  και  $u_w$ , όπως και οι κύριες τάσεις  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ελέγχονται ή μετριοούνται, ξεχωριστά εντός του κελιού της τριαξονικής δοκιμής. Χρησιμοποιείται συμβατικός εξοπλισμός μετρήσεων, για το οποίο ισχύει ότι  $\sigma_1 > (\sigma_2 = \sigma_3)$ . Οι τιμές των μικρότερων κύριων τάσεων παραμένουν σταθερές εντός του κελιού από τη στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η στερεοποίηση (Consolidation), ενώ η αξονική κύρια τάση συνεχώς αυξάνεται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μετρίεται η αποκλίνουσα τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) (Fredlund and Vanapalli, 2002).

## 2.10 Η διατμητική αντοχή των μερικώς κορεσμένων εδαφών

Ο Fredlund et al., (1978) πρότεινε την εξίσωση (2.59) για την αποτύπωση της διατμητικής αντοχής των μερικώς κορεσμένων εδαφών σε όρους δύο ανεξάρτητων μεταβλητών ( $\sigma_a - u_a$ ) και ( $u_a - u_w$ ).

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b \quad (2.59)$$

- $\tau_{ff}$  η διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας (διατμητική αντοχή)
- $c'$  η ενεργός συνοχή που ορίζεται ως το σημείο τομής του εκτεταμένου Mohr – Coulomb κριτηρίου (εξίσωση 2.59) με τον άξονα των διατμητικών τάσεων στο σημείο όπου  $(\sigma_f - u_a) = (u_a - u_w) = 0$ .
- $(\sigma_f - u_a)_f$  η ολική τάση στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία
- $u_{af}$  η πίεση του αέρα των πόρων κατά την αστοχία
- $\varphi'$  η ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής
- $(u_a - u_w)_f$  η τιμή της μύζησης στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία.
- Και  $\varphi^b$  η γωνία που αποδίδει τον βαθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής, καθώς μεταβάλλεται η μύζηση ( $u_a - u_w$ ).



Σχήμα 15: Η περιβάλλουσα θραύσης του εκτεταμένου κριτηρίου Mohr - Coulomb (Fredlund and Rahardjo, 1993).

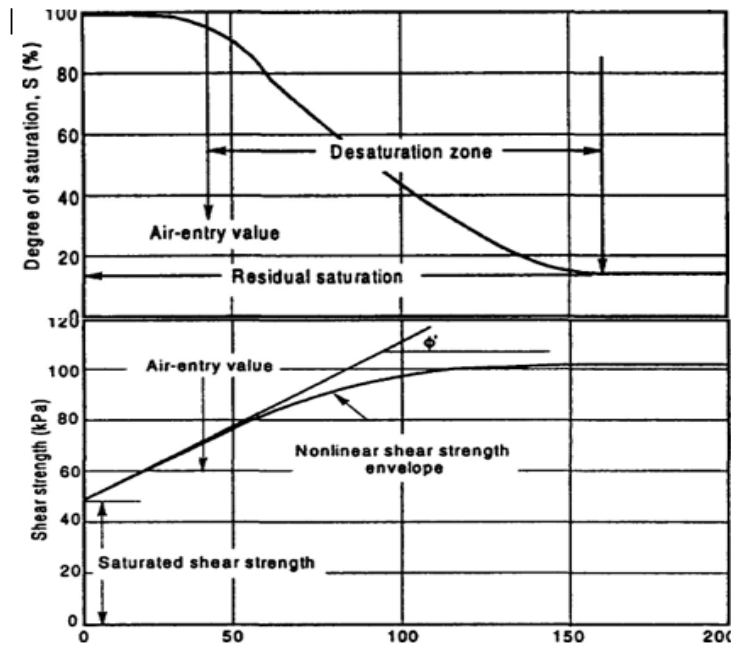
Όπως φάνηκε από πειράματα η διατμητική αντοχή των μερικώς κορεσμένων εδαφών δεν είναι γραμμική (Gan et al., 1988; Escario and Juca, 1989). Η εξίσωση (2.59) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτύπωση τόσο γραμμικών, όσο και μη γραμμικών περιβαλλουσών θραύσης (Fredlund and Vanapalli, 2002).

## 2.11 Συσχέτιση της διατμητικής αντοχής με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού

Η ανάγκη προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής, έγκειται στο γεγονός ότι η μεταβολή της μύζησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διατμητική αντοχή και την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Με την αύξηση της μύζησης ή μείωσης της ποσότητας υγρασίας στο έδαφος, αυξάνεται η διατμητική αντοχή (Fredlund and Vanapalli, 2002). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 16, υπάρχει μια γραμμική αύξηση της αντοχής μέχρι την τιμή εισόδου αέρα (Air Entry Value) που στη συνέχεια γίνεται μη γραμμική καθώς ο αέρας εισέρχεται στους μεγαλύτερους πόρους του δοκιμίου, προκαλώντας την στράγγισή του, μέχρι την σταθεροποίηση της τιμής μετά την παραμένουσα ποσότητα υγρασίας (Residual Water Content) (Fredlund and Vanapalli, 2002).





Σχήμα 16: Μεταβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους σαν συνάρτηση της μύζησης (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, μπορεί να γίνει από την εξίσωση (2.60) που πρότειναν οι Vanapalli και Fredlund (1996).

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi'] + (u_a - u_w)(\theta^k \tan\phi') \quad (2.60)$$

Το πρώτο τμήμα της εξίσωσης είναι η διατμητική αντοχή για την κορεσμένη περίπτωση ( $u_a = u_w$ ) και το δεύτερο μέρος προσδίδει την αύξηση στη διατμητική αντοχή λόγω μύζησης. Επεκτείνοντας την παραπάνω εξίσωση ο Vanapalli (2002) πρότεινε μία άλλη μορφή για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής χωρίς την ανάγκη χρήσης του  $k$  (παράμετρος προσαρμογής) και η οποία έχει ως εξής:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left\{ [\tan\phi'] \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \right\} \quad (2.61)$$

Όπου:

- $\theta_s$ , η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας σε συνθήκες κορεσμού
- $\theta_r$ , η παραμένουσα ογκομετρική ποσότητα υγρασίας

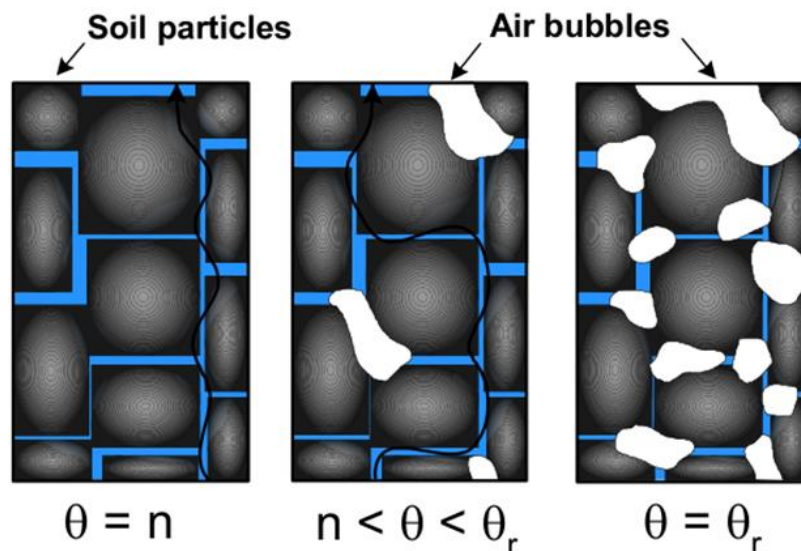
## 2.12 Συσχέτιση της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού

Η ικανότητα ενός εδάφους να μεταφέρει αλλά και να άγει νερό τόσο σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, όσο και σε συνθήκες μερικού κορεσμού περιγράφεται από την συνάρτηση υδραυλικής αγωγιμότητας.

Σε ένα κορεσμένο έδαφος, οι πόροι ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους είναι γεμάτοι νερό. Λόγω διεργασιών κατά τις οποίες μεταβάλλεται η ποσότητα υγρασίας στο έδαφος (βλέπε ενότητες 2.2, 2.3) αναπτύσσεται μύζηση. Μόλις η τιμή της φτάσει την τιμή εισόδου του αέρα αρχίζει η ξήρανση του εδάφους (Fredlund and Vanapalli, 2002).

Καθώς μειώνεται η ποσότητα της υγρασίας, αντικαθίσταται από την αέρια φάση, με αποτέλεσμα να λιγοστεύουν τα μονοπάτια που έχει διαθέσιμα το νερό για να κινηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Αποτέλεσμα η ροή να γίνεται συνεχώς δυσκολότερη. Αντίθετα, κατά την ύγρανση του εδάφους η ποσότητα του νερού αυξάνει και η ροή γίνεται ευκολότερη.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα μερικώς κορεσμένο έδαφος είναι συνάρτηση της ποσότητας του νερού στο έδαφος ή της μύζησης. Μάλιστα όσο αυξάνει η μύζηση τόσο μειώνεται η υδραυλική αγωγιμότητα.



Σχήμα 17: Μονοπάτια ροής για τις διάφορες καταστάσεις κορεσμού του εδάφους (πηγή: Seep/W 2007).

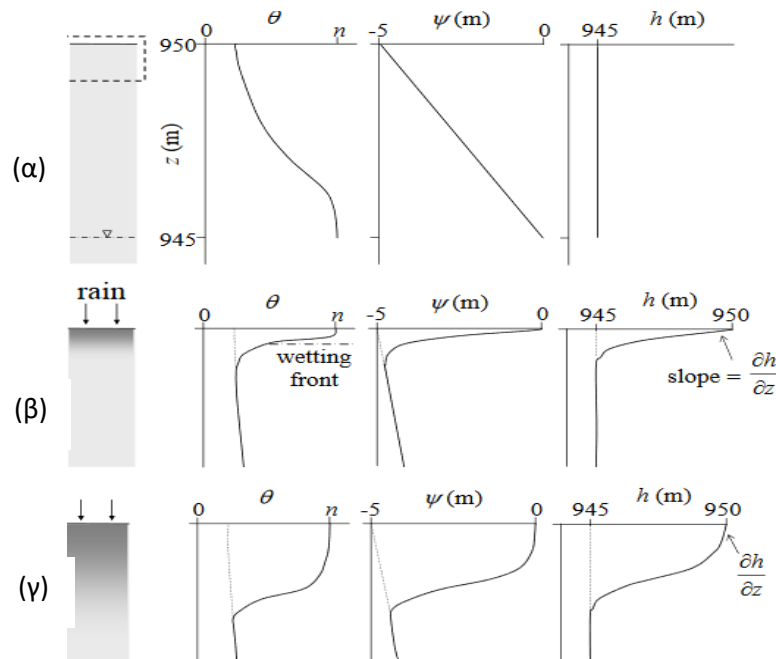
Στο Σχήμα 18 (α) φαίνεται ένα εδαφικό προφίλ σε υδροστατική ισορροπία ( $\frac{\partial h}{\partial z} = i = 0$ ) δηλαδή δεν υπάρχει ροή όπως διαφαίνεται και από το νόμο του Darcy (εξίσωση 2.62). Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πέντε μέτρα κάτω από την επιφάνεια.

$$q = -K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.62)$$

Η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τον υδροφόρο ορίζοντα προ την επιφάνεια, ενώ το δυναμικό της μύζησης ισούται με την απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Καθώς αρχίζει να βρέχει Σχήμα 18 (β), η ποσότητα του νερού στο έδαφος συνεχώς αυξάνει, (αρχικά κοντά στην επιφάνεια) και η μύζηση διαφοροποιείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η αγωγιμότητα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η υδραυλική αγωγιμότητα, συμβαίνει όταν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο ( $\Psi = 0$ ) και καλείται κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (Saturated Hydraulic Conductivity)  $k_{sat}$ .

Μέσα στην κορεσμένη ζώνη κάτω από την επιφάνεια η υδραυλική κλίση  $\frac{\partial h}{\partial z}$  είναι αρχικά πολύ μεγάλη και μειώνεται με το χρόνο όπως συμβαίνει και με το ρυθμό κατεΐσδυσης (Infiltration Rate) ( $-q$ ) (Σχήμα 18 (γ)) καθώς επέρχεται κορεσμός.



Σχήμα 18: Μεταβολές στη μύζηση και την ποσότητα του νερού με την ύγρανση του εδάφους (πηγή: people.ucalgary.ca).

Η διασύνδεση της ποσότητας του νερού στο εδάφους που αποτελεί συνάρτηση της αναπτυσσόμενης μύζησης με την υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να γίνει αν είναι γνωστή η συνάρτηση  $\theta(\Psi)$ , δηλαδή η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού. Παρακάτω αναφέρονται δύο μέθοδοι προσδιορισμού της συνάρτησης υδραυλικής αγωγιμότητας:

1) Η πρώτη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Fredlund et al., (1994) και υπολογίζει την συνάρτηση τη υδραυλικής αγωγιμότητας ολοκληρώνοντας ολόκληρη την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού. Ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2.63)$$

Όπου:

- $k_w$ : η υδραυλική αγωγιμότητα για συγκεκριμένη ποσότητα υγρασίας ή μύζησης
- $k_s$ : η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- $\theta_s$ : η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας  $\approx$  με το πορώδες του υλικού
- $e \approx 2,7$
- $y$ : παράμετρος ολοκλήρωσης
- $\theta'$ : η πρώτη παράγωγος της εξίσωσης
- $\Psi$ : η μύζηση

2) Ο Van Genuchten (1980), πρότεινε μια κλειστού τύπου λύση για να περιγράψει την υδραυλική αγωγιμότητα σαν συνάρτηση της μύζησης. Η εξίσωση που πρότεινε έχει ως εξής:

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\Psi^{(n-1)})(1 + (a\Psi^n)^{-m})]^2}{(((1 + a\Psi^n)^{\frac{m}{2}}))} \quad (2.64)$$

Όπου:

- $k_s$ : η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- $\alpha, m, n$ : παράμετροι προσαρμογής
- $n = 1/(1 - m)$
- $\Psi$ : η μύζηση

Οι παράμετροι προσαρμογής, μπορούν να υπολογιστούν γραφικά με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη. Σύμφωνα με τον Van Ganuchten το καλύτερο σημείο για τον υπολογισμό των παραμέτρων, είναι περίπου στο μέσον της καμπύλης. Η κλίση της συνάρτησης στο σημείο αυτό, υπολογίζεται από τη σχέση (3.64).

$$S_p = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \left| \frac{d\theta_p}{d(\log \Psi_p)} \right| \quad (2.65)$$

Όπου:

- $\theta_p$ : η ογκομετρική ποσότητα υγρασίας στο μέσο της χαρακτηριστικής καμπύλης.
- $\Psi_p$ : η μύζηση στο ίδιο σημείο

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι παράμετροι προσαρμογής υπολογίζονται ως εξής:

i. Για  $0 < S_p < 1$

$$m = 1 - \exp(-0,8S_p) \quad (2.66)$$

ii. Για  $S_p > 1$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \quad (2.67)$$

$$\alpha = \frac{1}{\Psi_p} \left( 2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{(1-m)} \quad (2.68)$$

## Κεφάλαιο 3: Ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρανών

### 3.1 Εισαγωγή

Για την κατασκευή διάφορων τεχνικών έργων, όπως για παράδειγμα της διανοιγής δρόμων ή την εκμετάλλευση ορυκτών πόρων σε ανοιχτές εκσκαφές, είναι αναγκαία η δημιουργία πρανών σε βραχώδη ή εδαφικά υλικά.

Οι απαιτούμενες συνθήκες ευστάθειας των πρανών αυτών, εξαρτώνται από τον τύπο του έργου και τις συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει μια πιθανή αστοχία. Για παράδειγμα πρανή δρόμων είναι αναγκαίο να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται ευστάθεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, σε σχέση με πρανή ορυχείων που δεν αποτελούν μόνιμα έργα και άρα σχεδιάζονται με λιγότερο αυστηρά πρότυπα.

Για κάθε είδος πρανούς, η ευστάθεια μπορεί να εκφραστεί με έναν εκ' των ακόλουθων τρόπων(Wyllie and Mah, 2003):

α) Τον συντελεστή ασφάλειας (Factor of Safety ή  $FS$ ), όπου η ευστάθεια προσδιορίζεται θεωρώντας οριακή ισορροπία και για  $FS > 1$  δεν υπάρχει αστοχία.

β) Από τις παραμορφώσεις (Strain), οι οποίες μετά από κάποιο βαθμό επηρεάζουν την ευστάθεια του πρανούς λόγω μεγάλης κινητικότητας.

γ) Η πιθανότητα αστοχίας (Probability of Failure), όπου η ευστάθεια ποσοτικοποιείται με βάση την κατανομή της διαφοράς ανάμεσα στις δυνάμεις που συγκρατούν το πρανές και αυτές που τείνουν να προκαλέσουν αστοχία, κάθε μία από τις οποίες εκφράζεται με μια κατανομή πιθανότητας.

δ) Η μέθοδος LRFD ή Load and Resistance Factor Design, με την οποία η ευστάθεια προσδιορίζεται με βάση το αν η διαθέσιμη αντίσταση είναι μεγαλύτερη ή ίση με το άθροισμα των επιβαλλόμενων φορτίων.

Σύμφωνα με τους Wyllie and Mah (2003), η μέθοδος ανάλυσης της ευστάθειας που χρησιμοποιείται περισσότερο, είναι αυτή με τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας.

Στις παρακάτω ενότητες, περιγράφονται διάφοροι τύποι αστοχιών και μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας με εύρεση του συντελεστή ασφάλειας, ενώ γίνεται και σύγκριση των μεθόδων.

### 3.2 Τύποι κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους, κάθε ένας εκ' των οποίων δίνει έμφαση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αυτών (αναγνώριση, αποφυγή, έλεγχο και διόρθωση) (Varnes, 1978). Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται σαν κριτήρια για την αναγνώριση και την κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων, είναι:

- Ο τύπος της μετακίνησης
- Το είδος του υλικού
- Ο ρυθμός μετακίνησης
- Η γεωμετρία της περιοχής αστοχίας και το αποτέλεσμα της αστοχίας
- Ο βαθμός διατάραξης της εκτοπισμένης μάζας
- Ο βαθμός εξέλιξης του φαινομένου
- Η σχέση ανάμεσα στη μορφή της αστοχίας και τη γεωλογία

Ο Varnes (1978), πρότεινε την κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων πρωταρχικά με βάση τον τύπο της μετακίνησης και δευτερεύοντος με τον τύπο του υλικού. Οι τύποι των μετακινήσεων, διακρίνονται σε πέντε κύριες ομάδες:

- 1) Τις πτώσεις (Falls)
- 2) Τις ανατροπές (Topples)
- 3) Τις ολισθήσεις (Slides)
- 4) Τις εξαπλώσεις (Spreads)
- 5) Και τις ροές (Flows)

Στις παραπάνω κύριες ομάδες, ο Varnes (1978), συμπεριέλαβε και μια έκκτη ομάδα σύνθετων μετακινήσεων (Complex), που περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους κύριους τύπους μετακινήσεων.

Τα υλικά, χωρίζονται σε δύο κλάσεις. Τα πετρώματα και τα εδαφικά υλικά (Engineering Soils), ενώ τα εδαφικά υλικά, χωρίζονται επιπλέον σε θραύσματα (Debris) και έδαφος (Earth). Στον Πίνακα 2, φαίνονται οι διάφοροι συνδυασμοί μετακινήσεων και υλικών.

Πίνακας 2: Τύποι κατολισθήσεων κατά Varnes (1978), (πηγή: pubs.usgs.gov)

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL	
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS
			Predominantly coarse      Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall      Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple      Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide      Earth slide
	TRANSLATIONAL		
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread      Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow      Earth flow (soil creep)
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement	

### Πτώσεις (Falls):

Στις πτώσεις, μάζα οποιασδήποτε μεγέθους, αποκολλιέται από πολύ απότομες πλαγιές ή γκρεμούς, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία λίγη ή καθόλου διατμητική μετατόπιση λαμβάνει χώρα. Η μάζα κάνει κυρίως ελεύθερη πτώση, ενώ μπορεί να αναπηδά ή να κατρακυλά. Η ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου αυτού, χαρακτηρίζεται σαν πολύ γρήγορη (Very Rapid) έως και εξαιρετικά γρήγορη (Extremely Rapid), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, ενώ μπορεί να προηγηθεί από άλλου τύπου φαινόμενα μετακίνησης (Varnes, 1978).

Πίνακας 3: Ταχύτητες φαινομένων κατολίσθησης (WP/WLI 1995 και Cruden και Varnes, 1996).

Velocity Class	Description	Velocity ( $mm/s$ )	Typical Velocity	Response (Hung, 1981)
7	Extremely rapid	$5 \times 10^3$	5 m/s	Nil
6	Very rapid	$5 \times 10^1$	3 m/min	Nil
5	Rapid	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/h	Evacuation
4	Moderate	$5 \times 10^{-3}$	13 m/month	Evacuation
3	Slow	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/year	Maintenance
2	Very slow	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely slow			Nil

Ο Rapp (1960), πρότεινε οι πτώσεις που προέρχονται από προσφάτως αποκολλημένο υλικό να αποκαλούνται πρωτεύοντες, ενώ όταν προέρχονται από χαλαρό ή μεταφερμένο υλικό να χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντες. Ακόμα ανάλογα με το μέγεθος των θραυσμάτων, πρότεινε για τεμάχια μέχρι 20 mm να αποκαλούνται πτώσεις χαλικιών



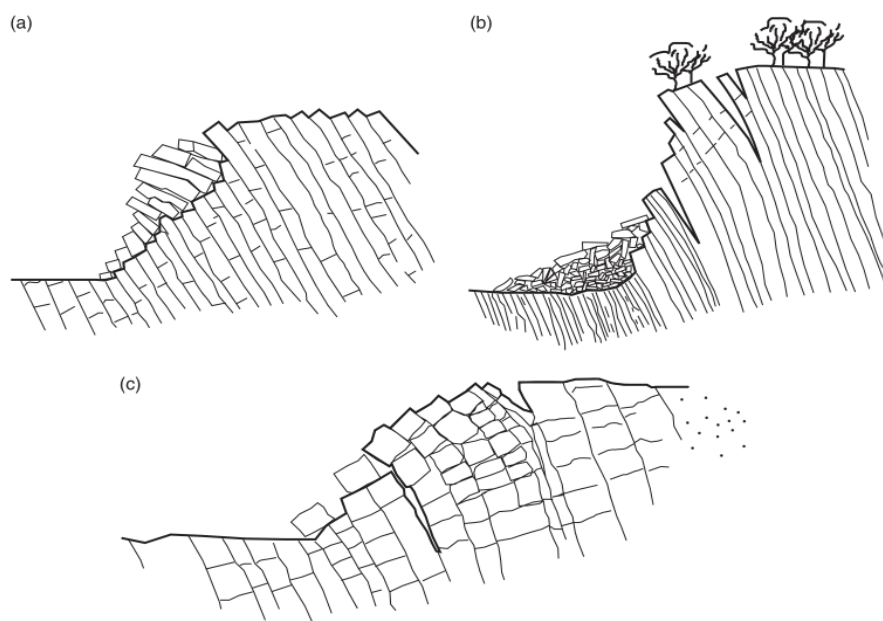
(Pebble Falls), για μεγέθη από 20 mm μέχρι 200 mm, πτώσεις κροκάλων (Cobble Falls) και για τεμάχια μεγαλύτερα των 200 mm, πτώσεις ογκολίθων (Boulder Falls).

### Ανατροπές (Topples):

Οι ανατροπές, αποτελούν περιστροφικές μετακινήσεις γύρω από έναν άξονα (συνήθως στη βάση της προς ανατροπή μάζας), υπό την επίδραση της βαρύτητας και άλλων δυνάμεων από γειτονικά τεμάχια βράχων, καθώς και λόγω ρευστών σε ρωγμές που ασκούν σημαντική πίεση ή μπορεί να επηρεάσουν την τριβή, λειτουργώντας ως λιπαντικό (Varnes, 1978).

Στο Σχήμα 19, φαίνονται μορφές ανατροπών σε σχέση με την επικρατούσα γεωλογία. Στο πρώτο σχήμα, διακρίνεται η ανατροπή στύλων πετρώματος που περιέχει ορθογώνιες ασυνέχειες (Joints) σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, στο δεύτερο σχήμα, φαίνεται η ανατροπή λόγω καμπτικής αστοχίας τμημάτων πετρώματος, με απότομη κλίση και στο τελευταίο σχήμα, είναι ορατή ανατροπή που χαρακτηρίζεται από ψεύδο-συνεχή κάμψη μακριών στύλων πετρώματος, διάμεσου συσσωρευμένων κινήσεων κατά μήκος πολυάριθμων και μεταξύ τους διασταυρούμενων ασυνεχειών.

Το μέγεθος του όγκου που μπορεί να ανατραπεί, μπορεί να είναι από μερικά κυβικά του μέτρου, έως και περισσότερο από 1 Gm<sup>3</sup>. Οι όγκοι αυτοί, στη συνέχεια μπορούν είτε να ολισθήσουν, είτε να καταπέσουν.



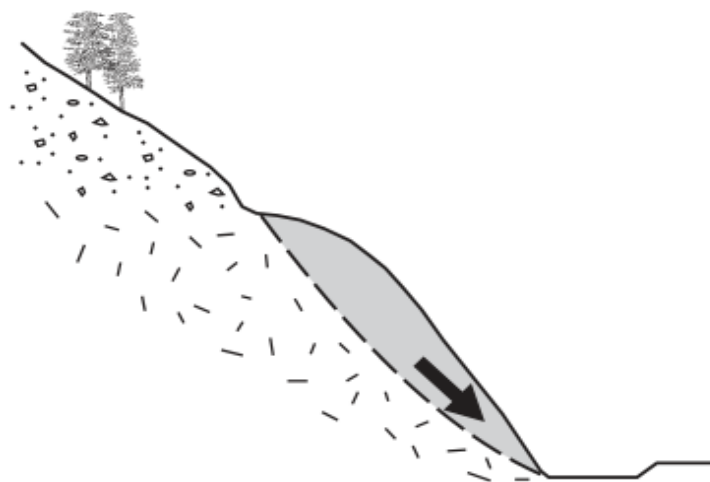
Σχήμα 19: Διάφοροι τύποι ανατροπών, (Wyllie and Mah, 2003, από Goodman και Bray, 1976).

### Ολισθήσεις (Slides):

Στις ολισθήσεις, η κίνηση αποτελείται από διατμητικές μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης ή περισσοτέρων επιφανειών. Η κίνηση, μπορεί να συμβαίνει προοδευτικά, αν η αστοχία δεν συντελείται ταυτόχρονα σε όλες τις επιφάνειες αδυναμίας, ή άμεσα. Η ολισθήσα μάζα, μπορεί να κινηθεί και πέρα από της επιφάνεια αστοχίας, κατά μήκος του εδάφους, το οποίο σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται σαν επιφάνεια διαχωρισμού (Varnes, 1978).

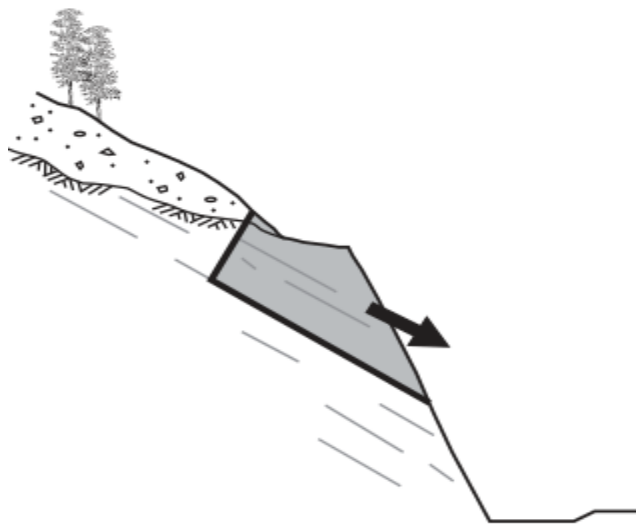
Ο Varnes (1978), διαχώρισε περεταίρω τις ολισθήσεις, δίνοντας έμφαση στις διαφορές ανάμεσα σε περιστροφικές ολισθήσεις (Rotational Slides) και μεταθετικές ολισθήσεις (Translational Slides). Η διαφοροποίηση αυτή, αποσκοπεί στην ξεχωριστή μελέτη ανάλυση της ευστάθειας, καθώς και των διαφορετικών μέτρων ελέγχου και πρόσληψης της αστοχίας.

Περιστροφικές ολισθήσεις (Rotational Slides): Οι περιστροφικές ολισθήσεις, αποτελούν αστοχίες που λαμβάνουν χώρα σε γενικά καμπυλωμένη επιφάνεια, με τα κοίλα προς τα πάνω. Η περιστροφή, πραγματοποιείται γύρω από άξονα παράλληλο με την παράταξη του πρανούς. Στο άνω σημείο της ολίσθησης, η αστοχία μπορεί να είναι κατακόρυφη. Ενώ το σχήμα της αστοχίας, επηρεάζεται από τα ρήγματα, τις ασυνέχειες, τη στρωματογραφία και την αντοχή του υποκείμενου υλικού. Αυτού του τύπου οι ολισθήσεις, συμβαίνουν σε ομογενή κυρίως υλικά (Varnes, 1978).



Σχήμα 20: Πιθανή περιστροφική αστοχία σε εδαφικό υλικό (Wyllie and Mah, 2003).

Μεταθετικές ολισθήσεις (Translational Slides): Στις μεταθετικές ολισθήσεις, η μάζα ολισθαίνει κατά μήκος επίπεδων ή παραεπίπεδων επιφανειών. Σε αυτού του είδους τις αστοχίες, αν η ολισθήσα μάζα είναι ενιαία και ελάχιστα παραμορφωμένη, χαρακτηρίζεται ως ολίσθηση τεμάχους (Block Slide), ενώ αντίθετα αν αποτελείται από πολλά ανεξάρτητα μεταξύ τους τεμάχια, χαρακτηρίζεται σαν διαταραγμένη μεταθετική ολίσθηση (Disrupted Slide). Η κινητικότητα των μεταθετικών ολισθήσεων, ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από επιφάνειες αδυναμίας, όπως ρήγματα και ασυνέχειες (Varnes, 1978).



Σχήμα 21: Μεταθετική ολίσθηση ενιαίας μάζας (Wyllie and Mah, 2003).

### **Πλευρικές εξαπλώσεις (Lateral Spreads):**

Στις πλευρικές εξαπλώσεις, ο κυρίαρχος τρόπος ολίσθησης είναι η πλευρική επέκταση, η οποία συνοδεύεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές του υλικού. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου αυτού σε βραχώδη υπόβαθρο, χαρακτηρίζεται σαν αρκετά αργός (Extremely Slow), ενώ σε εδαφικά υλικά η εξέλιξη, είναι προοδευτική με αυξανόμενο ρυθμό (Varnes, 1978). Κατά βάση η μετακίνηση είναι μεταθετική και όχι περιστροφική και η μορφή της επηρεάζεται από γεωλογικούς και τοπογραφικούς παράγοντες.

## **Ροές (Flows):**

Οι ροές, συμβαίνουν κυρίως σε μη στερεοποιημένα υλικά (Unconsolidated) και μπορεί να εξελίσσονται με γρήγορο (Fast) ή αργό ρυθμό (Slow). Υπάρχουν πέντε επιμέρους κατηγορίες ολισθήσεων αυτού του τύπου (Varnes, 1978):

α) Ροές θραυσμάτων (Debris Flow): Οι ροές θραυσμάτων, αποτελούν ταχύτατες (Rapid) μορφές ολίσθησης, στις οποίες ένας συνδυασμός από χαλαρά εδάφη, λίθους, οργανικό υλικό, αέρα και νερό, κινητοποιούνται σε ρευστή μορφή. Αποτελούνται σε ποσοστό μικρότερο του πενήντα τις εκατό ( $< 50\%$ ) από λεπτομερές υλικό, ενώ ο συννηθέστερος μηχανισμός ανάπτυξης αυτού του φαινομένου, είναι τα έντονα φαινόμενα κατακρήμνισης και η έντονη επιφανειακή απορροή που διαβρώνει και κινητοποιεί το χαλαρό εδαφικό υλικό ή το βραχώδες υλικό σε απότομες πλαγιές (Varnes, 1978). Ακόμη αυτού του είδους οι ροές, μπορούν να δημιουργηθούν έπειτα από διαφορετικούς τύπους κατολισθήσεων που συμβαίνουν σε απότομες πλαγιές σε κορεσμένα εδάφη, αποτελούμενα από μεγάλες ποσότητες ιλυώδους και αμμώδους μεγέθους υλικά (Varnes, 1978).

β) Χιονοστιβάδες θραυσμάτων (Debris Avalanche): Αυτού του είδους οι ροές, αποτελούν φαινόμενα αστοχίας που εξελίσσονται με πολύ γρήγορο ρυθμό (Extremely Rapid).

γ) Ροή εδαφών (Earth Flow): Το εδαφικό υλικό ρευστοποιείται και ολισθαίνει, ενώ δημιουργείται κυρίως σε λεπτόκοκκα υλικά ή πλαγιές με μέτρια κλίση σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Είναι όμως δυνατή και εμφάνιση αστοχίας αυτού του είδους και σε αδρόκοκκα υλικά χωρίς νερό (Varnes, 1978).

δ) Ροές λάσπης (Mud Flow): Οι ροές λάσπης, αποτελούνται από υλικά που περιέχουν μεγάλη ποσότητα υγρασίας και η εξέλιξη του φαινομένου χαρακτηρίζεται σαν ταχύτατη (Rapid). Δημιουργούνται σε εδάφη που περιέχουν τουλάχιστον πενήντα τις εκατό (50%) άμμο, και τεμαχίδια ιλυώδους και αργιλικού μεγέθους .

ε) Ερπυσμός (Creep): Ερπυσμός, καλείται η εξαιρετικά αργή και με σταθερό ρυθμό εξέλιξης αστοχία, που λαμβάνει χώρα σε πρανή από εδαφικά ή βραχώδη υλικά. Η μετακίνηση, οφείλεται στις διατμητικές τάσεις, που έχουν σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό μόνιμων παραμορφώσεων, αλλά δεν επαρκούν για να δημιουργήσουν διατμητικές αστοχίες. Υπάρχουν τρεις τύποι ερπυσμού (Varnes, 1978):

- 1) Εποχιακός (Seasonal), όπου η μετακίνηση συμβαίνει σε εδαφικό υλικό, που έχει επηρεαστεί μέχρι συγκεκριμένο βάθος από εποχιακές διακυμάνσεις στην υγρασία του εδάφους.

- 2) Συνεχής (Continuous), όπου οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται, συνεχώς ξεπερνούν την διατμητική αντοχή του υλικού.
- 3) Προοδευτικός (Progressive), όπου ο ερπυσμός είναι ένδειξη, ότι οι πλαγίες φτάνουν σε ένα οριακό σημείο και αστοχούν με άλλο κύριο τύπο αστοχιών.

### **Σύνθετες (Complex):**

Οι σύνθετες ολισθήσεις, αναφέρονται σε περιπτώσεις αστοχίας πρανών, οι οποίες εκδηλώνονται με περισσότερους από ένα, εκ' των κύριων τύπων μετακίνησης. Αποτελούν τον συνηθέστερο τύπο αστοχίας στη φύση (Varnes, 1978).

### **3.3 Διαδικασίες γένεσης των κατολισθήσεων**

Η εκδήλωση φαινομένων ολίσθησης, προκαλείται από ένα σύνολο γεγονότων που περιλαμβάνει στοιχεία που σχετίζονται με τις ενδείξεις, μέχρι την εκδήλωση της αστοχίας (Varnes, 1978).

Οι περισσότερες κατολισθήσεις είναι αποτέλεσμα γεωλογικών, τοπογραφικών και κλιματικών παραγόντων που επηρεάζουν μια περιοχή (Varnes, 1978). Οι παράγοντες αυτοί, επιδρούν είτε αυξάνοντας τις τάσεις που επιβάλλεται το υλικό, είτε μειώνοντας την διατμητική αντοχή του υλικού (Varnes, 1978).

Οι παράγοντες που επιδρούν αυξάνοντας τις διατμητικές τάσεις που υποβάλλεται το έδαφος, έχουν ως εξής (Varnes, 1978):

Απώλεια της πλευρικής υποστήριξης (Removal of Lateral Support): Η απώλεια της πλευρικής υποστήριξης, είναι ο συνηθέστερος λόγος που οδηγεί σε αστοχία και οφείλεται στις ακόλουθες δράσεις:

1) Διάβρωση (Erosion), από ποτάμια ή ρυάκια, λόγω της δράσης του νερού, παγετός, η δράση των κυμάτων και των παλιρροιών, καθώς και λόγω κλιματικών συνθηκών (Weathering).

2) Απώλεια τη υποστήριξης, λόγω προηγούμενων κατολισθήσεων ή ρήγματα μεγάλης κλίμακας.

3) Τεχνικές εργασίες που περιλαμβάνουν, οδοποιία, μεταλλευτική, κατασκευή τοίχων αντιστήριξης κα.

Επιφορτίσεις (Surcharge): Η επιφόρτιση, μπορεί να είναι αποτέλεσμα φυσικών, αλλά και ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Οι φυσικοί παράγοντες που συμβάλουν αυξάνοντας το βάρος, είναι (Varnes, 1978):

- 1) Το βάρος του νερού, από κατακριμνήσματα, καθώς και το νερό από πηγές.
- 2) Η συσσώρευση υπερκείμενου υλικού από διάφορες διεργασίες ολίσθησης.
- 4) Η βλάστηση και
- 5) Οι πιέσεις των πόρων που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω κατακρημνίσεων.

Οι ανθρωπογενείς παράγοντες, που επιδρούν στην επιφόρτιση, είναι (Varnes, 1978):

- 1) Οι αποθέσεις στερίων ή άλλων υλικών από μεταλλευτικές ή τεχνικές εργασίες.
- 2) Το βάρος κτηρίων, καθώς και άλλων κατασκευών.
- 3) Το βάρος του νερού από τεχνικά έργα, όπως φράγματα, κανάλια κα.

Παροδικές τάσεις (Transitory Earth Stresses): Η επίδραση φορτίων που δημιουργούνται από σεισμικές δονήσεις, αποτελεί εκ' των σημαντικότερων παραγόντων εμφάνισης κατολισθήσεων (Varnes, 1978). Η δράση των σεισμών, αποτελεί σύνθετο φαινόμενο, διότι μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των διατμητικών τάσεων, λόγω οριζόντιων επιταχύνσεων, καθώς και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η εντατική κατάσταση του εδάφους. Παράλληλα μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής, λόγω αναδιάταξης των εδαφικών κόκκων. Ακόμη δονήσεις από ανατινάξεις, κινούμενα φορτία σε δρόμους και αστοχίες σε γειτονικά πρανή, διαφοροποιούν τις τάσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος (Varnes, 1978).

Τοπική αλλαγή στο ανάγλυφο (Regional Tilting): Η προοδευτική αύξηση της κλίσης του πρανού, μπορεί να προκαλέσει αστοχία. Για να επέλθει αυτή, το πρανές πρέπει να βρίσκεται σε οριακή ισορροπία, ώστε η παραμικρή αλλαγή στην κλίση να διαταράσσει την ισορροπία (Varnes, 1978).

Αφαίρεση της υποκείμενης υποστήριξης (Removal of Underlying Support): Η υποκείμενη υποστήριξη, μπορεί να απομακρυνθεί για διάφορους λόγους, όπως (Varnes, 1978):

- Υποσκαφή των πρανών από ποτάμια ή από τη δράση κυμάτων.

- Δευτερεύουσα διάβρωση λόγω κλιματικών συνθηκών, από τις διεργασίες ύγρρανσης και ξήρανσης του εδάφους, καθώς και τη από τη δράση του παγετού.
- Υπο-επιφανειακή διάβρωση ανθρακικών ή γυψούχων σχηματισμών από την δάση του νερού.
- Αστοχία του υποκείμενου γεωλογικού σχηματισμού, λόγω υπέρβασης της αντοχής του.
- Διόγκωση του υποκείμενου αργιλικού σχηματισμού

Πλευρικές ωθήσεις (Lateral Pressure): Η ανάπτυξη πλευρικών ωθήσεων, μπορεί να οφείλεται στη δράση, παραγόντων όπως (Varnes, 1978):

- Η ύπαρξη νερού στις ασυνέχειες και στα έγκοιλα.
- Οι πιέσεις λόγω ψύξης του νερού στις ασυνέχειες και διόγκωσης αυτού.
- Η κατάρρευση (Swelling) αργιλικών εδαφών λόγω ξήρανσης.

Στον αντίποδα, οι παράγοντες που επιδρούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες (Varnes, 1978). Η πρώτη αφορά την αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό και απορρέει από τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, ακόμη και για μεγάλο χρονικό διάστημα πριν συμβεί η αστοχία και η δεύτερη περιλαμβάνει αλλαγές στις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την αντοχή του σχηματισμού (Varnes, 1978).

Οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το έδαφος και έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής, είναι η σύσταση (Composition), η υφή (Texture), η δομή (Gross Structure) και η γεωμετρία του πρανούς (Slope Geometry) (Varnes, 1978).

Σύνθεση (Composition): Τα διάφορα εδαφικά υλικά, μπορεί να απωλέσουν αντοχή, λόγω μεταβολής στη σύνθεσή τους. Ιδιαίτερα οργανικά υλικά, ιζηματογενείς αργιλοί σχηματισμοί, σχιστόλιθοι, αποσαθρωμένο βραχώδες υλικό και υλικά αποτελούμενα κυρίως από μαλακά και πλακοειδή ορυκτά, όπως μαρμαρυγίες, σερπεντίνης, τάλκης κα. (Varnes, 1978).

Υφή (Texture): Υφή, είναι μια χαλαρή δομή από ανεξάρτητα μεταξύ τους τεμαχίδια σε υλικά όπως, άργιλοι, άμμοι, μικρής πυκνότητας οργανικής ύλης (Varnes, 1978). Το σχήμα των κόκκων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή, καθώς σε υλικά με γωνιώδη τεμαχίδια η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μεγαλύτερη.

Δομή και Γεωμετρία του πρανούς (Gross Structure και Slope Geometry): Τα χαρακτηριστικά στη δομή και τη γεωμετρία που επιδρούν στη μείωση της αντοχής, είναι (Varnes, 1978):

- Οι ασυνέχειες, ρήγματα, τα επίπεδα στρώσης κα.
- Μεγάλου πάχους στρώσεις πάνω από πλαστικά ή αδύναμα (Weak) υλικά.
- Η κλίση των στρωμάτων
- Η διαφορά στη διαπερατότητα των διαφόρων στρωμάτων.
- Ο προσανατολισμός του πρανού σε σχέση με την κλίση.

Στην δεύτερη κατηγορία, που περιλαμβάνει αλλαγές στις παραμέτρους αντοχής, λόγω αλλαγής στις συνθήκες, ανήκουν (Varnes, 1978):

1) Αλλαγές εξαιτίας διάβρωσης που οφείλεται σε κλιματικές αλλαγές και φυσικοχημικές διεργασίες, όπως (Varnes, 1978):

- Μαλάκυνση (Softening) ρωγματομένων αργιλικών σχηματισμών (Fissured Clays).
- Φυσική αποσάθρωση αδρόκοκκων πετρωμάτων, όπως γρανιτών και ασβεστολίθων από την επίδραση έντονων θερμοκρασιακών αλλαγών.
- Η αποξήρανση αργιλικών σχηματισμών, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της συνοχής, ενώ επιτρέπει και την εισροή νερού από τις ρωγμές.
- Απόπλυση της συνδετικής ύλης των κόκκων λόγω διάλυσης.

2) Αλλαγές στις δυνάμεις μεταξύ των κόκκων, εξαιτίας της ποσότητας του νερού, των πιέσεων των πόρων και των ρωγμών: Η άνωση (Buoyancy) σε κατάσταση κορεσμού έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των ενεργών πιέσεων και της τριβής (Varnes, 1978). Ακόμη οι εφελκυστικές τάσεις μεταξύ των κόκκων λόγω τριχοειδούς εφελκυσμού στα



μερικώς κορεσμένα εδάφη, απαλείφονται με τον κορεσμό και συντελείται μείωση της διατμητικής αντοχής (Varnes, 1978).

3) Αλλαγές στη δομή: Οι αλλαγές στη δομή, προέρχονται από ρωγματώσεις στους σχιστολίθους και σε προστερεοποιημένες αργίλους (Preconsolidated Clays). Επίσης η επανατοποθέτηση υλικού, μπορεί να επηρεάσει τη διατμητική αντοχή υλικών.

4) Διάφορες αιτίες: Άλλες αιτίες μείωσης τη διατμητικής αντοχής, είναι η δράση των ριζών των φυτών, η αποδυνάμωση λόγω ερπυσμού (Varnes, 1978).

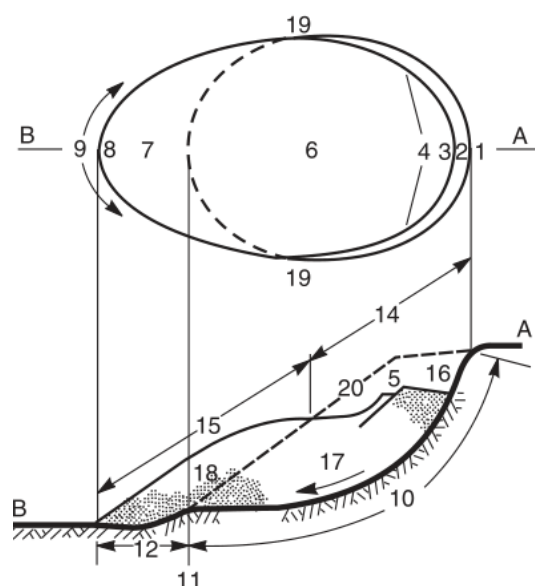
### 3.4 Συνθήκες για την εκδήλωση κυκλικών αστοχιών

Στα βραχώδη πρανή, η αστοχία ελέγχεται από σε μεγάλο βαθμό από τις ασυνέχειες, και τα επίπεδα στρώσης. Υπό αυτές τις συνθήκες, μία η περισσότερες ασυνέχειες, ορίζουν το επίπεδο αστοχίας (Wyllie and Mah, 2003).

Στην περίπτωση όμως, εντόνως θρυμματισμένης βραχώμαζας ή στην περίπτωση εδαφικών υλικών, δεν υπάρχει σαφώς καθορισμένη δομή και για αυτό η επιφάνεια ολίσθησης, αναπτύσσεται κατά μήκος της επιφάνειας με τη μικρότερη διατμητική αντοχή. Παρατηρήσεις σε τέτοιου είδους πρανή, έδειξαν ότι η επιφάνεια ολίσθησης τείνει να πάρει τη μορφή κύκλου (Wyllie and Mah, 2003).

Το πραγματικό σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης, εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες στο πρανές. Στην περίπτωση για παράδειγμα, ομογενούς και εντόνως κατακερματισμένης βραχώμαζας, η επιφάνεια ολίσθησης είναι πιθανόν να έχει τη μορφή ενός “ρηχού” κύκλου μεγάλης ακτίνας που εκτείνεται μέχρι το πόδα του πρανούς, ενώ στην περίπτωση εδαφικών υλικών με μεγάλη συνοχή και μικρή γωνία εσωτερικής τριβής όπως άργιλοι, η επιφάνεια ολίσθησης, τείνει να πάρει τη μορφή ενός “βαθύτερου” κύκλου, με μικρή ακτίνα που μπορεί και να εξέρχεται από το πόδα του πρανούς στην επιφάνεια του εδάφους (Wyllie and Mah, 2003).

Η διεθνής ένωση τεχνικής γεωλογίας (International Association of Engineering Geology, 1996), πρότεινε κάποιους ορισμούς (Πίνακας 4 και Πίνακας 5) για τα διάφορα χαρακτηριστικά των κυκλικών κατολισθήσεων σε εδαφικά υλικά, όσο και σε βραχώδη (Σχήματα 22 και 23) (Wyllie and Mah, 2003).

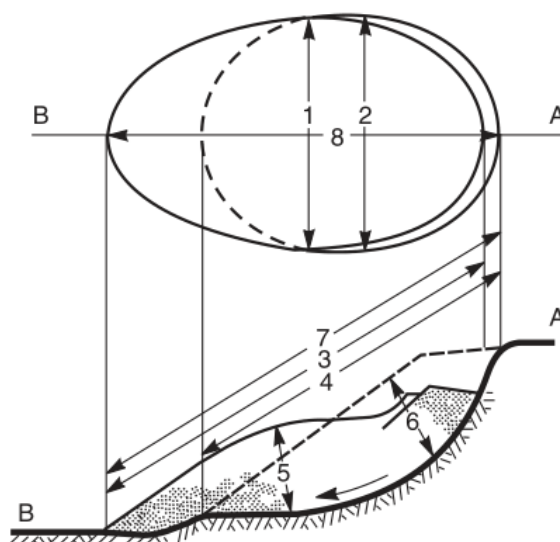


Σχήμα 22: Τα χαρακτηριστικά των κυκλικών αστοχιών (Wyllie and Mah, 2003).

Πίνακας 4: Ορισμοί των χαρακτηριστικών των κυκλικών αστοχιών (τροποποιημένο από Wyllie and Mah, 2003).

No.	Όνομα	Ορισμός
1	Στέψη (Crown)	Πρόκειται για μη διαταραγμένο υλικό, στα υψηλότερα σημεία της κορυφής της κεφαλής (Main Scarp).
2	Κορυφή της κεφαλής (Main Scarp)	Η απότομη επιφάνεια στην άνω γωνία της κατολίσθησης, μακριά από το μη διαταραγμένο έδαφος. Αποτελεί το ορατό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης.
3	Κορυφή (Top)	Το υψηλότερο σημείο επαφής, μεταξύ του μετακινούμενου υλικού (No. 13) και της κορυφής της κεφαλής (No. 2).
4	Κεφαλή (Head)	Το άνω τμήματα της κατολίσθησης, κατά μήκος της επαφής του υλικού που μετακινείται με τη κορυφή της κεφαλής (No. 2).
5	Μικρή κεφαλή (Minor Scarp)	Η απότομη επιφάνεια, που οφείλεται στις διαφορικές μετακινήσεις εντός της κατολίσθησης.
6	Κυρίως σώμα (Main Body)	Μέρος του μετακινούμενου υλικού που υπέρκειται της επιφάνειας αστοχίας και βρίσκεται ανάμεσα στην κορυφή της κεφαλής (No. 2) και το δάκτυλο της επιφάνειας αστοχίας (No. 11).
7	Πόδα (Foot)	Τμήμα της κατολίσθησης, που έχει μετακινηθεί περεταίρω στην επιφάνεια του εδάφους.
8	Άκρο (Tip)	Το άκρο της κατολίσθησης προς τη φορά της κίνησης αυτής.
9	Δάκτυλο (Toe)	Τα χαμηλότερα και συνήθως καμπύλα περιθώρια του μετακινούμενου υλικού, που επέχουν περισσότερο την κορυφή της κεφαλής (No. 2).
10	Η επιφάνεια ολίσθησης (surface of Rapture)	Η επιφάνεια που αποτελεί το κάτω όριο της ολίσθησης.

11	Το δάκτυλο της επιφάνειας αστοχίας (Toe of surface of rupture)	Το σημείο τομής του κάτω μέρους της επιφάνειας ολίσθησης με την αρχική επιφάνεια του εδάφους. Συνήθως είναι καλυμμένο από υλικό που έχει αστοχήσει.
12	Επιφάνεια διαχωρισμού (Surface of Separation)	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (No. 20), που έχει καλυφθεί από το πόδα (Foot) της κατολίσθησης.
13	Μετακινούμενο υλικό (Displaced Material)	Υλικό που έχει μετακινηθεί από την αρχική του θέση στο πρηνές και αποτελεί το σύνολο της μάζας που έχει αστοχήσει
14	Ζώνη μείωσης (Zone of Depletion)	Η επιφάνεια της κατολίσθησης, όπου το υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (No. 20).
15	Ζώνη συσσώρευσης (Zone of accumulation)	Η επιφάνεια της κατολίσθησης, που το υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (No. 20).
16	Εξάντληση (Depletion)	Ο όγκος που οριοθετείται από την κορυφή της κεφαλής (No. 20), την μετακινούμενη μάζα (No. 17) και την αρχική επιφάνεια του εδάφους (No. 20).
17	Το υλικό της κένωσης (Depleted Material)	Ο όγκος του μετακινούμενου υλικού, που βρίσκεται κάτω από αρχική επιφάνεια του εδάφους (No. 20) και πάνω από την επιφάνεια ολίσθησης (No. 10).
18	Συσσώρευση (Accumulation)	Ο όγκος του μετακινούμενου υλικού (No. 13), που βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (No. 20).
19	Πλευρές (Flank)	Μη διαταραγμένο στις πλευρές της κατολίσθησης.
20	Αρχική επιφάνεια του εδάφους (Original Ground Surface)	Η επιφάνεια που καθιστούσε το πρηνές πριν την εκδήλωση της αστοχίας.



Σχήμα 23: Χαρακτηριστικά των διαστάσεων των κυκλικών ολισθήσεων (Wyllie and Mah, 2003).

Πίνακας 5: Ορισμοί στις διαστάσεις των κυκλικών ολισθήσεων (τροποποιημένο από Wyllie and Mah, 2003).

No.	Όνομα	Ορισμός
1	Πλάτος της μετακινούμενης μάζας, $W_d$ .	Το μέγιστο πλάτος της μετακινούμενης μάζας, κάθετα στο μήκος $L_d$ .
2	Πλάτος της επιφάνειας αστοχίας, $W_r$ .	Το μέγιστο πλάτος ανάμεσα στις πλευρές (Flanks) της κατολίσθησης, κάθετο στο μήκος $L_r$ .
3	Μήκος της μετακινούμενης μάζας, $L_d$ .	Η ελάχιστη απόσταση από το άκρο (Tip), έως της κορυφή (Top).
4	Μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, $L_r$ .	Η ελάχιστη απόσταση από το δάκτυλο (Toe) της επιφάνειας ολίσθησης, έως τη στέψη (Crown).
5	Το βάθος ή πάχος μετακινούμενης μάζας, $D_d$ .	Το μέγιστο βάθος της επιφάνειας αστοχίας, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετρούμενο κάθετα στο επίπεδο των $W_d$ και $L_d$ .
6	Το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης, $D_r$ .	Το μέγιστο βάθος της επιφάνειας αστοχίας, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετρούμενο κάθετα στο επίπεδο των $W_r$ και $L_r$ .
7	Το συνολικό μήκος, $L$ .	Η ελάχιστη απόσταση από την άκρη (Tip) της κατολίσθησης, στη στέψη (Crown).
8	Το μήκος της κεντρικής γραμμής, $L_{cl}$ .	Η απόσταση από τη στέψη (Crown), στην άκρη (Tip) της κατολίσθησης, μέσω σημείων στην αρχική επιφάνεια του εδάφους που ισαπέχουν από τα πλευρικά όρια.

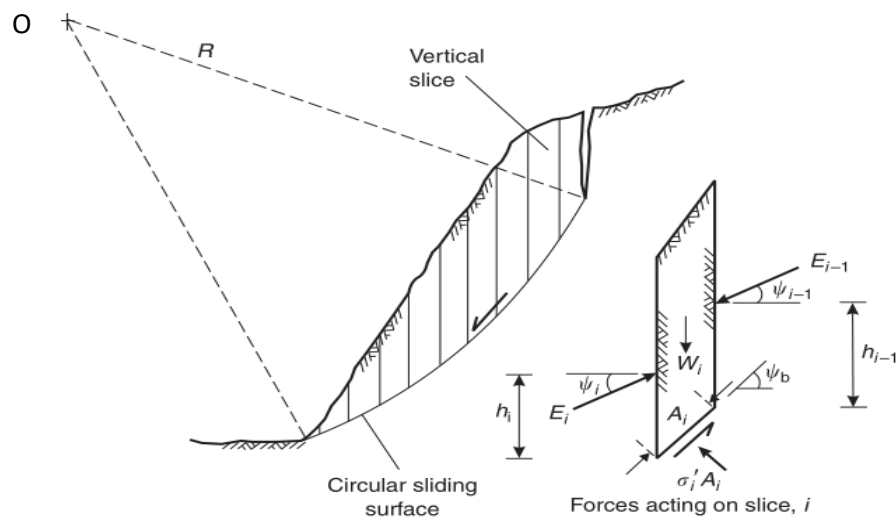
Για τον επακριβή προσδιορισμό της μορφής και των διαστάσεων της αστοχίας, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευστάθειας. Η ανάλυση αυτή, στην περίπτωση κυκλικών αστοχιών, διεξάγεται εφαρμόζοντας διαδικασίες οριακής ισορροπίας, που περιλαμβάνουν τη σύγκριση της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής κατά μήκος πιθανής επιφάνειας ολίσθησης, με την αντοχή που είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί η ισορροπία στο πρηνές (Wyllie and Mah, 2003).

Για την εφαρμογή των παραπάνω, είναι απαραίτητη η διαίρεση της πιθανής μάζας αστοχίας σε λωρίδες. Οι λωρίδες αυτές, είναι συνήθως κατακόρυφες, με μια κλίση  $\psi_b$  στη βάση τους. Στην απλούστερη περίπτωση, οι δυνάμεις που δρουν στη βάση κάθε λωρίδας είναι η διατμητική αντίσταση  $S$  λόγω της αντοχής που παρουσιάζει το υλικό και οφείλεται στη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής και οι πλευρικές ή ενδιάμεσες δυνάμεις  $E$  που ασκούνται σε ύψος  $h$  από τη βάση (Σχήμα 24).

Η διαδικασία ανάλυσης της ευστάθειας, πραγματοποιείται θεωρώντας ισορροπία για κάθε λωρίδα ξεχωριστά και κατά αυτόν τον τρόπο ικανοποιείται και για ολόκληρη την μάζα. Ο αριθμός των εξισώσεων που προκύπτουν από τη θεώρηση της ισορροπίας, εξαρτάται από τον αριθμό των λωρίδων  $N$  που έχει διαιρεθεί η μάζα και από τον αριθμό των συνθηκών ισορροπίας που υποβάλλεται (Wyllie and Mah, 2003).

Αν θεωρηθεί, ότι ικανοποιείται μόνο η ισορροπία δυνάμεων ( $\Sigma F_v = 0$  και  $\Sigma F_h = 0$ ), ο αριθμός των εξισώσεων διαμορφώνεται σε  $2N$  και ο αριθμός των αγνώστων ( $3N - 1$ ), ενώ αν συγχρόνως ικανοποιείται και η ισορροπία των ροπών  $\Sigma M_o = 0$ , τότε οι εξισώσεις που προκύπτουν, είναι  $3N$  και οι άγνωστοι ( $5N - 2$ ) (Wyllie and Mah, 2003).

Η υπέρβαση των αγνώστων σε σχέση με τον αριθμό των εξισώσεων, είναι ( $N - 1$ ) στην πρώτη περίπτωση και ( $2N - 2$ ) στη δεύτερη περίπτωση. Για αυτό, χρειάζεται να γίνουν κάποιες απλοποιητικές παραδοχές για τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης (Wyllie and Mah, 2003) κάποιες από τις οποίες περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 24: Οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα, (Wyllie and Mah, 2003).

Ο συντελεστής ασφάλειας (Factor of Safety ή FS), για της περίπτωση κυκλικής αστοχίας, ορίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{\text{διαθέσιμη διατμητική αντοχή } (c + \sigma \cdot \tan \varphi)}{\text{διατμητική τάση που είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ισορροπίας } (\tau_e)}$$

Θεωρώντας το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb, προκύπτει ότι:

$$\tau_e = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{FS} \quad (3.1)$$

Όπου:

- $c$ , η συνοχή
- $\sigma$ , η ορθή τάση
- $\varphi$ , η γωνία εσωτερικής τριβής

Στην περίπτωση του εκτεταμένου κριτηρίου Mohr – Coulomb για να συμπεριληφθούν και τα μερικώς κορεσμένα εδάφη, ισχύει ότι:

$$\tau_e = \frac{c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b}{FS} \quad (3.2)$$

Όπου:

- $c'$  η ενεργός συνοχή
- $(\sigma_f - u_a)_f$  η ολική τάση στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία
- $u_{af}$  η πίεση του αέρα των πόρων κατά την αστοχία
- $\varphi'$  η ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής
- $(u_a - u_w)_f$  η τιμή της μύζησης στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία.
- Και  $\varphi^b$  η γωνία που αποδίδει τον βαθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής, καθώς μεταβάλλεται η μύζηση  $(u_a - u_w)$ .

### 3.5 Μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας με τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας

Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας, ανάλυσης της ευστάθειας, χρησιμοποιούνται στη γεωτεχνική μηχανική από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα (Krahn, 2003). Το 1916 ο Patterson, παρουσίασε την ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς στη Σουηδία, θεωρώντας ότι η επιφάνεια ολίσθησης έχει κυκλική μορφή και διαιρώντας την ολισθήσα μάζα σε λωρίδες.

Τις δεκαετίες που ακολούθησαν, ο Fellenius (1936), παρουσίασε την σουηδική μέθοδο των λωρίδων, ενώ στα μέσα της δεκαετίας του πενήντα οι Janbu (1954) και Bishop (1956) ανέπτυξαν περαιτέρω αυτή τη μέθοδο. Αργότερα, αναπτύχθηκαν και άλλες μέθοδοι από τους Morgenstern and Price (1965) και τον Spencer (1967).

Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, η μάζα χωρίζεται σε λωρίδες, ενώ η κύρια διαφορά μεταξύ αυτών, είναι ποιες εξισώσεις ισορροπίας θεωρούνται, αλλά και ικανοποιούνται ανά περίπτωση, ποιες ενδιάμεσες δυνάμεις λαμβάνουν υπόψιν και ποια η σχέση μεταξύ αυτών. Στον Πίνακα 6, διαφαίνεται ποιες αρχές της στατικής ικανοποιούνται.

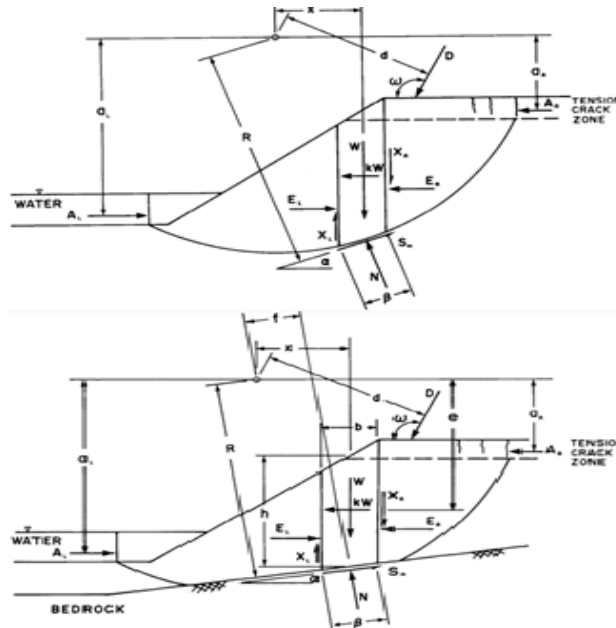
Πίνακας 6: Οι συνθήκες που ικανοποιούνται σε κάθε μέθοδο.

Method	Moment equilibrium	Horizontal force equilibrium	Interslice normal ( $E$ )	Interslice shear ( $X$ )	Inclination of $X/E$ resultant
Ordinary or Fellenius	Yes	No	No	No	No force
Bishop's simplified	Yes	No	Yes	No	Horizontal
Janbu's simplified	No	Yes	Yes	No	Horizontal
Spencer	Yes	Yes	Yes	Yes	Constant
Morgenstern-Price	Yes	Yes	Yes	Yes	Variable
Corps of Engineers – 1	No	Yes	Yes	Yes	Inclination of a line from crest to toe
Corps of Engineers – 2	No	Yes	Yes	Yes	Slice top ground surface inclination
Lowe-Karafiath	No	Yes	Yes	Yes	Average of ground surface slope and slice base inclination

Το 1981, ο Fredlund et al., πρότεινε μια γενική θεωρία στη μέθοδο λωρίδων, που βασίζεται στην οριακή ισορροπία. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως “γενική μέθοδος οριακής ισορροπίας των λωρίδων” ή GLE (General Limit Equilibrium Method of Slices) και περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία που διατρέχουν όλες τις μεθόδους στον Πίνακα 6. Στη μέθοδο αυτή, ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται με βάση δύο εξισώσεις.

Τα στοιχεία της στατικής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την “εξαγωγή” αυτών των εξισώσεων, είναι το άθροισμα των δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση και το άθροισμα των ροπών υπό συγκεκριμένο σημείο.

Στο Σχήμα 25, φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα της πιθανής μάζας αστοχίας, τόσο στην περίπτωση κυκλικής, όσο και στην περίπτωση σύνθετης αστοχίας (Composite).



Σχήμα 25: Στο άνω σχήμα φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται σε τυχαία λωρίδα σε κυκλικής μορφής αστοχία και στο κάτω οι δυνάμεις που σκουντιάζ σε σύνθετη μορφή αστοχίας (πηγή: SLOPE/W, 2007).

Οι διάφοροι παράμετροι στο σχήμα, χαρακτηρίζονται ως εξής:

$W$  = το συνολικό βάρος λωρίδας πλάτους  $b$  και ύψους  $h$

$N$  = η συνολική ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας

$S_m$  = η ενεργοποιημένη διατμητική αντοχή στη βάση της λωρίδας (shear force mobilized).

$E$  = η οριζόντια ενδιάμεση ορθή δύναμη. Όπου τα σύμβολα  $L, R$  υποδηλώνουν το αν ασκείται στη αριστερή ή τη δεξιά πλευρά της λωρίδας.

$X$  = η κατακόρυφη ενδιάμεση δύναμη. Όπου τα σύμβολα  $L, R$  υποδηλώνουν το αν ασκείται στη αριστερή ή τη δεξιά πλευρά της λωρίδας.

$D$  = η δράση εξωτερικού φορτίου

$kW$  = Το οριζόντιο σεισμικό φορτίο που ασκείται στο κέντρο μάζας της λωρίδας.

$R$  = η ακτίνα της κυκλική επιφάνειας αστοχίας ή ο μοχλοβραχίονας της  $S_m$  στη δεύτερη περίπτωση.

$f$  = η κάθετη μετατόπιση της ορθής δύναμης από το κέντρο περιστροφής, κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης.

$x$  = η οριζόντια απόσταση από την κεντρική γραμμή κάθε λωρίδας, σε σχέση με το σημείο περιστροφής.



$e$  = η κατακόρυφη απόσταση από το κέντρο μάζας της λωρίδας, σε σχέση με το σημείο περιστροφής.

$d$  = η κάθετη απόσταση ανάμεσα στη γραμμή ενέργειας του εξωτερικού φορτίου, σε σχέση με το σημείο περιστροφής.

$a$  = η απόσταση από τη δύναμη λόγω νερού που ασκείται στο 1/3 από τη βάση λόγω τριγωνικής κατανομής, σε σχέση με το σημείο περιστροφής. Όπου τα σύμβολα  $L, R$  υποδηλώνουν το αν ασκείται στη αριστερή ή τη δεξιά πλευρά του πρηνούς.

$A$  = η δύναμη που ασκείται λόγω του νερού. Όπου τα σύμβολα  $L, R$  υποδηλώνουν το αν ασκείται στη αριστερή ή τη δεξιά πλευρά του πρηνούς.

$\omega$  = η γωνία εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, μετρούμενη αντίθετα της φοράς του ρολογιού.

$\alpha$  = η γωνία μεταξύ στη βάση κάθε λωρίδας, η οποία μπορεί να έχει θετική ή αρνητική τιμή ανάλογα με την πλευρά.

$\beta$  = το μήκος της βάσης της λωρίδας

Το μέγεθος της ενεργοποιημένης διατμητικής αντοχής  $S_m$ , στη βάση της λωρίδας, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$S_m = \frac{S\beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u)\tan\varphi')}{F} \quad (3.3)$$

ή για την περίπτωση των μερικώς κορεσμένων εδαφών:

$$S_m = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi^b)}{F} \quad (3.4)$$

Το άθροισμα των ροπών, για όλες τις λωρίδες γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο, έχει ως εξής:

$$\sum Wx - \sum S_m R + \sum kWe \pm \sum Dd \pm \sum Aa = 0 \quad (3.5)$$

Οι ενδιάμεσες δυνάμεις, δεν εμφανίζονται στην παραπάνω εξίσωση, διότι το άθροισμά τους για όλο το πρανές, είναι μηδέν. Επιπλέον η ορθή δύναμη  $N$ , δίνει ροπή μόνο στην περίπτωση της σύνθετης αστοχίας, καθώς στην περίπτωση της κυκλικής αστοχίας η γραμμή ενέργειας αυτής, διέρχεται από το σημείο περιστροφής.

Επιλύοντας τις σχέσεις (3.3 ή 3.4) και (3.5), προκύπτει ο συντελεστής ασφάλειας έναντι περιστροφής  $F_m$ , όπου:

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R\tan\varphi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd \pm \sum Aa} \quad (3.6)$$

ή για την περίπτωση των μερικώς κορεσμένων εδαφών:

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + [N - u_w\beta \frac{\tan\varphi^b}{\tan\varphi'} - u_a\beta(1 - \frac{\tan\varphi^b}{\tan\varphi'})]R\tan\varphi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd \pm \sum Aa} \quad (3.7)$$

Η εξισώσεις (3.6 και 3.7) δεν είναι γραμμικές, διότι η ορθή δύναμη  $N$ , είναι συνάρτηση του συντελεστή ασφάλειας και χρειάζονται επαναληπτικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό της.

Το άθροισμα των δυνάμεων, στην οριζόντια διεύθυνση για όλες τις λωρίδες, έχει ως εξής:

$$\sum(N\sin\alpha) + \sum(S_m\cos\alpha) - \sum(kW) + \sum D\cos\omega \pm \sum A = 0 \quad (3.8)$$

Και σε αυτή την περίπτωση οι ενδιάμεσες δυνάμεις για το σύνολο του πρανούς απαλείφονται και ισχύει ότι  $\sum(E_L - E_R) = 0$ . Επιλύοντας τις σχέσεις (3.3 ή 3.4 και 3.8), προκύπτει ο συντελεστής ασφάλειας έναντι ολίσθησης, ο οποίος έχει ως εξής:

$$F_f = \frac{\sum(c'\beta\cos\alpha + (N - u\beta)\tan\varphi'\cos\alpha)}{\sum N\sin\alpha + \sum kW + \sum D\cos\omega \pm \sum A} \quad (3.9)$$

Για τα μερικώς κορεσμένα εδάφη, έχει την εξής μορφή:

$$F_f = \frac{\Sigma(c'\beta\cos\alpha + [N - u_w\beta\frac{\tan\varphi^b}{\tan\varphi'} - u_a\beta(1 - \frac{\tan\varphi^b}{\tan\varphi'})]\tan\varphi'\cos\alpha}{\Sigma N\sin\alpha + \Sigma kW + \Sigma D\cos\omega \pm \Sigma A} \quad (3.10)$$

Η ορθή δύναμη  $N$ , στη βάση των λωρίδων, υπολογίζεται αθροίζοντας τις δυνάμεις στην κατακόρυφη διεύθυνση ανά λωρίδα. Ισχύει, ότι:

$$(X_L - X_R) - W + N\cos\alpha + S_m\sin\alpha - S\sin\omega = 0 \quad (3.11)$$

Επιλύοντας τις σχέσεις (3.3 ή 3.4 και 3.11), προκύπτουν οι εξισώσεις υπολογισμού των ορθών δυνάμεων, ως εξής:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{(c'\beta\sin\alpha + u\beta\sin\alpha\tan\varphi')}{F} + D\sin\omega}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{F}} \quad (3.12)$$

και αντίστοιχα για τα μερικώς κορεσμένα εδάφη, ισχύει ότι:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{(c'\beta\sin\alpha + u_a\beta\sin\alpha(\tan\varphi' - \tan\varphi^b) + u_w\beta\sin\alpha\tan\varphi^b)}{F} + D\sin\omega}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{F}} \quad (3.13)$$

Η τιμή του  $F$ , στις παραπάνω εξισώσεις αλλάζει, ανάλογα με το αν υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας έναντι περιστροφής ή ο συντελεστής ασφάλειας έναντι ολίσθησης. Οπότε ανάλογα την περίπτωση ισχύει ότι  $F = F_m$  ή  $F = F_f$ .

Οι ενδιάμεσες ορθές δυνάμεις, υπολογίζονται αθροίζοντας τις οριζόντιες δυνάμεις κάθε λωρίδας και προκύπτει, ότι:

$$(E_L - E_R) - N\sin\alpha + S_m\cos\alpha - kW + D\cos\omega = 0 \quad (3.14)$$

Τελικά, προκύπτει αντικαθιστώντας το  $S_m$ , ότι:

$$E_R = E_L + \frac{(c'\beta - u\beta\tan\varphi')\cos\alpha}{F} + N\left(\frac{\tan\varphi'\cos\alpha}{F} - \sin\alpha\right) - kW + D\cos\omega \quad (3.15)$$

Η επίλυση γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά, αφού αρχικά για την πρώτη λωρίδα η ορθή τάση είναι μηδέν ( $E_L = 0$ ). Η ενδιάμεσες διατμητικές δυνάμεις, υπολογίζονται από μια σχέση που πρότειναν οι Morgenstern and Price (1965) και έχει ως εξής:

$$X = E \lambda f(x) \quad (3.16)$$

Όπου:

$\lambda$  = το μέγεθος της συνάρτησης (σε δεκαδική μορφή) που χρησιμοποιείται

$f(x)$  = συνάρτηση που αναπαριστά τη σχετική διεύθυνση της ενδιάμεσης δύναμης που προκύπτει

Αρχικά, η ορθή διατμητική δύναμη δεν μπορεί να υπολογιστεί, διότι ο συντελεστής ασφάλειας του οποίου είναι συνάρτηση δεν είναι γνωστός, καθώς επίσης και οι ενδιάμεσες διατμητικές δυνάμεις δεν είναι γνωστές αφού δεν μπορούν να καθοριστούν και οι ορθές. Η επίλυση του προβλήματος εύρεσης του συντελεστή ασφάλειας, αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία και μπορεί να διακριθεί σε τέσσερα βασικά στάδια επίλυσης.

Στάδιο 1: Αρχικά οι ενδιάμεσες δυνάμεις, τόσο οι ορθές, όσο και οι διατμητικές θεωρούνται ίσες με το μηδέν, με σκοπό την εξαγωγή ενός συντελεστή ασφάλειας. Η ορθή δύναμη  $N$ , υπολογίζεται από τις δυνάμεις με τις οποίες έχει την ίδια διεύθυνση, ως εξής:

$$N = W \cos a - kW \sin a + [D \cos(\omega + a - 90)] \quad (3.17)$$

Ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίζεται έπειτα με αυτόν τον τρόπο, αποτελεί τη μέθοδο επίλυσης που πρότεινε ο Fellenius (1936).

Στάδιο 2: Κατά το δεύτερο στάδιο, αγνοούνται όλες οι διατμητικές ενδιάμεσες δυνάμεις και η ορθή δύναμη στη βάση των λωρίδων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = \frac{W - \frac{(c' \beta \sin a + u \beta \sin a \tan \varphi')}{F} + [D \sin \omega]}{\cos a + \frac{\sin a \tan \varphi'}{F}} \quad (3.18)$$

Οι συντελεστές ασφάλειας που προκύπτουν κατά αυτόν τον τρόπο αποτελούν επιλύσεις της μεθόδου που πρότεινε ο Bishop (1956) στην περίπτωση που υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας θεωρώντας ισορροπία ροπών ( $F_m$ ) και της λύσης του Janbu (1954), στην περίπτωση που υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας θεωρώντας ισορροπία δυνάμεων ( $F_f$ ).

Στάδιο 3: Το στάδιο αυτό, είναι απαραίτητο για όλες τις μεθόδους που θεωρούν ενδιάμεσες δυνάμεις, εκτός της GLE. Η επίλυση αυτού του σταδίου, γίνεται από το SLOPE/W, ως εξής: Αρχικά, υπολογίζεται μία αρχική τιμή για το  $\lambda$ , θεωρώντας το ίσο με τα 2/3 της κλίσης του πρανούς, από όπου υπολογίζεται τιμή συντελεστή ασφάλειας. Ο συντελεστής ασφάλειας μαζί με αυτόν που υπολογίζεται για την τιμή  $\lambda = 0$  στα προηγούμενα στάδια, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τιμής  $\lambda$ , για την οποία ισχύει ότι:  $F_m = F_f$ .

Στάδιο 4: Το τελευταίο στάδιο, λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που επιλέγονται μια σειρά τιμών  $\lambda$ , για τις οποίες υπολογίζονται οι συντελεστές ασφάλειας. Εκείνος που ικανοποιεί τόσο την ισορροπία δυνάμεων, όσο και την ισορροπία ροπών, επιλέγεται.

### 3.6 Σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων λωρίδων που βασίζονται στην οριακή ισορροπία

Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι διάφορες μέθοδοι λωρίδων, υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας, αποτελούν υποπεριπτώσεις της γενικότερης μεθόδου που παρουσίασε ο Fredlund (1981). Παρακάτω, αναλύονται μερικές από τις διαφορές που έχει η γενική μέθοδος με τις υπόλοιπες.

1) Οι Morgenstern και Price (1965), πραγματοποίησαν επίλυση για την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας, αθροίζοντας τις δυνάμεις στη βάση κάθε λωρίδας και στις δύο διαστάσεις και τις ροπές γύρω από συγκεκριμένο σημείο. Οι παραδοχές που γίνονται σε αυτή τη μέθοδο, τόσο από πλευράς στατικής, όσο και από πλευράς ύπαρξης ενδιάμεσων δυνάμεων, είναι οι ίδιες που γίνονται και στη γενική μέθοδο. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων, απαντάται στο σημείο εφαρμογής της ορθής δύναμης  $N$  στη

βάση κάθε λωρίδας. Στη γενική μέθοδο, θεωρείται ότι ασκείται στο μέσον της λωρίδας, ενώ οι Morgenstern και Price, θεωρούν μια γραμμική μεταβολή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης του σημείου εφαρμογής της ορθής δύναμης (Fredlund, 1981).

2) Στη μέθοδο του Spencer (1967), θεωρείται ότι υπάρχει μια σταθερή εξάρτηση ανάμεσα στις ενδιάμεσες ορθές και διατμητικές δυνάμεις. Αυτές θεωρούνται ότι τέμνονται κάθετα, και άρα ισχύει ότι:

$$\frac{X}{E} = \tan\theta = \lambda = 0$$

3) Η απλοποιημένη μέθοδος του Bishop (1956) (Bishop's simplified method), θεωρεί ότι δεν υπάρχουν ενδιάμεσες διατμητικές δυνάμεις. Ταυτίζεται με τη μέθοδο του Spencer (1967), στην περίπτωση που  $\theta = 0$  (Fredlund, 1981).

4) Η απλοποιημένη μέθοδος του Janbu (1954) (Janbu's simplified method), λαμβάνει έμμεσα στους υπολογισμούς την ύπαρξη ενδιάμεσων διατμητικών δυνάμεων, πολλαπλασιάζοντας με έναν εμπειρικό συντελεστή  $f_0$ . Ο συντελεστής αυτός, εξαρτάται τόσο από τις παραμέτρους αντοχής, όσο και από το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης (Fredlund, 1981).

## Κεφάλαιο 4: Η επίδραση της βροχόπτωσης στην ευστάθεια εδαφικών πρανών

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται παραμετρική ανάλυση, διερεύνησης της μεταβολής της ευστάθειας, λόγω μεταβολής στην πίεση του νερού των πόρων, εξαιτίας παρατεταμένης βροχόπτωσης

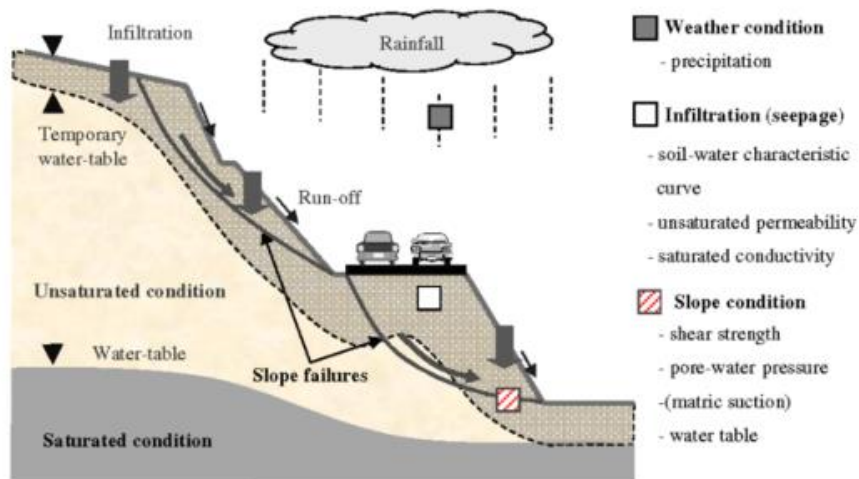
Ας σημειωθεί ότι λόγω έντονης βροχόπτωσης, έχουν παρατηρηθεί αρκετές αστοχίες, τόσο σε φυσικά, όσο και τεχνητά πρανή, παρ' όλο που τα τεχνητά πρανή αποτελούνται από υψηλής ποιότητας υλικά ή έχουν κατασκευαστεί με πολύ υψηλούς συντελεστές ασφάλειας. (Lee και Kim, 2009).

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, οι συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος μεταβάλλονται, με την κατείσδυση. Πιο συγκεκριμένα, προκαλείται μεταβολή στην πίεση των πόρων και άρα απομείωση της μύζησης και της διατμητικής αντοχής εδάφους. Το βάθος, μέχρι το οποίο παρατηρείται αλλαγή στις πιέσεις των πόρων, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως (Kwon, 2009):

- Η ένταση της βροχής
- Η διάρκεια της βροχόπτωσης
- Η περατότητα του εδαφικού σχηματισμού
- Η υφιστάμενη ποσότητα υγρασίας στο έδαφος
- Η γεωλογική δομή

Οι αστοχίες, λαμβάνουν χώρα από τη στιγμή που η κατείσδυση φτάσει σε συγκεκριμένο βάθος. Επιπλέον είναι δυνατόν να αναπτυχθούν και θετικές πιέσεις πόρων κοντά στην επιφάνεια αν δεν ευνοείται η επιφανειακή απορροή λόγω ήπιου αναγλύφου. Φαινόμενα αστοχίας αυτού του τύπου, δηλαδή αστοχίες που εκδηλώνονται μετά από έντονα καιρικά φαινόμενα, είναι υπό επιφανειακά ή σχετικά μικρού βάθους που μπορεί να κυμαίνεται από μερικά εκατοστά, έως και κάποια μέτρα (Krahn, 1989).

Στο Σχήμα 26 φαίνεται ο μηχανισμός ύγρανσης των επιφανειακών τμημάτων του εδάφους, λόγω της βροχής.



Σχήμα 26: Ο μηχανισμός ενυδάτωσης των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους, λόγω βροχόπτωσης (Kwon, 2009).

## 4.2 Λογισμικό για την παραμετρική ανάλυση

Η παραμετρική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό SEEP/W και SLOPE/W του προγράμματος GeoStudio. Αρχικά, μέσω του SEEP/W, έγινε προσομοίωση της ροής του νερού στο υπέδαφος, καθώς και της μεταβολής των πιέσεις των πόρων, λόγω επίδρασης της βροχόπτωσης. Για την προσομοίωση της ροής στις δύο διαστάσεις, η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιεί την εξίσωση (4.1), η οποία έχει ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.1)$$

ή

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x i_x) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y i_y) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.2)$$



Όπου:

- $k_x$  και  $k_y$  η αγωγιμότητα κατά την διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα.
- $Q$  είναι οι συνθήκες ροής που επιβάλλονται στο όριο της περιοχής
- $i_x$  και  $i_y$  η υδραυλική βαθμίδα στις δύο διευθύνσεις
- $\partial\theta/\partial t$  η μεταβολή της ογκομετρικής ποσότητας νερού στο έδαφος με το χρόνο.

Στην περίπτωση ανάλυσης σε σταθερές συνθήκες ροής (Steady State Analysis), ο λόγος μεταβολής της υγρασίας στο έδαφος με το χρόνο είναι μηδενικός, αφού το νερό που εισέρχεται στη περιοχή, εξέρχεται με τον ίδιο ρυθμό, ενώ στην περίπτωση ανάλυσης μεταβαλλόμενων συνθηκών (Transient Analysis), ο λόγος είναι διάφορος του μηδενός.

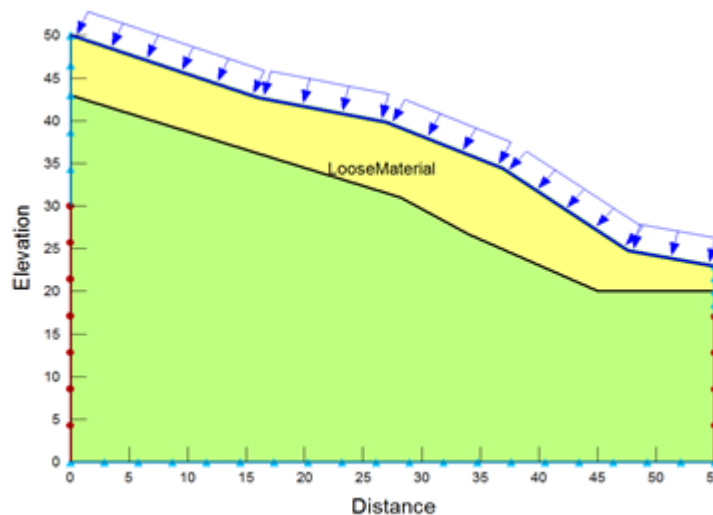
Δύο σημαντικοί περιορισμοί, άπτονται της χρήσης του λογισμικού SEEP/W, στην περίπτωση ανάλυσης μερικώς κορεσμένων εδαφών. Ο πρώτος περιορισμός, έγκειται στο γεγονός, ότι δεν λαμβάνει υπόψιν την υστέρηση που παρουσιάζει η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, κατά τις διεργασίες ύγρανσης και ξήρανσης του εδάφους (ενότητα 2.6), ενώ ο δεύτερος περιορισμός, έγκειται στο ότι δεν υπολογίζονται διαφυγές του νερού λόγω της εξάτμισης (evaporation) και της εξατμισοδιαπνοής (evapotranspiration). Στην περίπτωση ανάλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, ο πρώτος περιορισμός, παίζει μείζονα ρόλο, καθώς το έδαφος με τη βροχόπτωση υπόκειται, σε διεργασίες ύγρανσης.

Η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιήθηκε, με μεθόδους οριακής ισορροπίας και το λογισμικό SLOPE/W, όπου προσδιορίζεται η μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την πάροδο του χρόνου, λόγω της βροχόπτωσης. Στην παρούσα εργασία, μελετάτε το φαινόμενο εκδήλωσης αστοχιών εδαφικά υλικά. Σε αυτή την περίπτωση, η μορφή της επιφάνειας ολίσθησης, είναι κυκλική. Η πιθανή μάζα αστοχίας μπορεί να περιστρέφει γύρω από σημείο σαν ενιαίο σώμα χωρίς την επίδραση των ενδιάμεσων δυνάμεων (Khan, 2003). Για το λόγο αυτό οι επιλύσεις ευστάθειας έγιναν χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη μέθοδο του Bishop (Bishop's simplified method), όπου αποτελεί μέθοδο, που ικανοποιεί την ισορροπία των ροπών.

### 4.3 Ανάλυση ευστάθειας τυπικού πρανούς

#### 4.3.1 Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος

Για την παραμετρική ανάλυση, θεωρήθηκε πρανές ύψους 50 μέτρων και μέσης κλίσης περίπου  $26^\circ$  (Σχήμα 27). Το πρανές, θεωρείται ότι δομείται από μητρικό πέτρωμα, που υπόκειται εδαφικού καλύμματος, το πάχος του οποίου μεταβάλλεται κατά μήκος της γεωμετρίας. Η ροή του υπόγειου νερού, γίνεται από τα ανάντη στα κατόντη του πρανούς.



Σχήμα 27: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο πρανές κατά την ανάλυση σε σταθερές συνθήκες.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανάλυση ροής σε σταθερές συνθήκες, ώστε να οριστεί η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η τιμή της πίεσης του νερού των πόρων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση της βροχής και της μύζησης στην ευστάθεια. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικές.

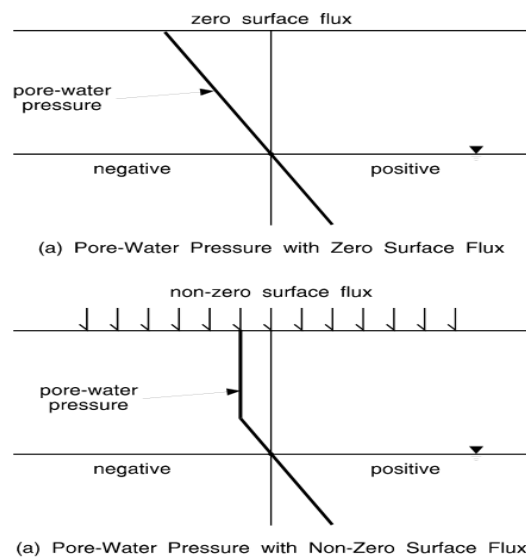
Στο πρότυπο που πραγματοποιείται η ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών συνοριακές συνθήκες. Αρχικά τόσο στην αριστερή όσο και στη δεξιά πλευρά του πρανού, θεωρήθηκε υδραυλικό φορτίο  $H$ , μεγέθους  $H_L = 30\text{ m}$  και  $H_R = 17\text{ m}$ , ώστε να οριστεί το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Το υδραυλικό φορτίο έχει μονάδες ( $m$ ) και ορίζεται ως εξής:

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + y$$

Όπου:

- $u$  η πίεση του νερού των πόρων που προκαλείται από ύψος στήλης νερού  $z$ .
- $\gamma_w$  το μοναδιαίο βάρος του νερού
- $y$  το απόλυτο υψόμετρο.

Στα ανάντη του πρανούς, πάνω από το υψόμετρο των 30 μέτρων στα δεξιά και άνω των 17 μέτρων στα αριστερά, καθώς και στο κάτω τμήμα της γεωμετρίας, ορίστηκαν συνοριακές συνθήκες μηδενικής ροής, ενώ στην άνω επιφάνεια, χρησιμοποιήθηκε μια μικρή μη μηδενική ροή ( $q_a \approx 0 \text{ m/s}$ ), ώστε να προσομοιώνεται καλύτερα η υγρασία του εδάφους και η μύζηση που αναπτύσσεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα να παίρνει ρεαλιστικές τιμές (Σχήμα 28) (SEEP/W, 2007).



Σχήμα 28: Μεταβολή της μύζησης κατά μήκος της ζώνης αερισμού προς την επιφάνεια, στην περίπτωση εφαρμογής μηδενικής και μη μηδενικής ροής στην επιφάνεια (SEEP/W, 2007).

Στην περίπτωση του προτύπου προσομοίωσης μεταβαλλόμενων συνθηκών, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνοριακές συνθήκες, με τη διαφορά, ότι στην άνω επιφάνεια του πρανούς επιβλήθηκε συνοριακή συνθήκη μοναδιαίας ροής μέγεθος  $q = 1.97 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  ανάλογο του ύψους βροχής που θεωρήθηκε.

#### 4.4 Περιγραφή της παραμετρικής ανάλυσης και επίλυση

Η παραμετρική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, σχετικά με το πως επηρεάζει η βροχόπτωση τη μύζηση και κατ' επέκταση την ευστάθεια των εδαφικών πρανών. Η ένταση της βροχόπτωσης που επιλέχθηκε, ανέρχεται σε  $7.2 \text{ mm/hr}$  για χρονική περίοδο 24 ωρών.

Οι αναλύσεις, έγιναν για δύο διαφορετικά εδαφικά καλύμματα. Επιλέχθηκαν, δύο τύποι εδαφικών γεωϋλικών για την ανάλυση, μια ιλυώδης άμμος (Loose Material) και μια συνεκτική άργιλος (Cohesive Material).

Μελετήθηκε πως επιδρά η παρουσία μητρικού πετρώματος που υπόκειται του εδαφικού σχηματισμού στην εξέλιξη της μεταβολής της πίεσης των πόρων και στην ευστάθεια, καθώς και η περίπτωση απουσίας αυτού, κατά την οποία το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από το εδαφικό γεωϋλικό. Οι παράμετροι για τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, αποτελούν τυπικές τιμές για τα συγκεκριμένα υλικά και έχουν ως εξής:

Πίνακας 7: Παράμετροι εδαφικών υλικών και μητρικού πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική ανάλυση.

Γεωϋλικό			
Παράμετρος	Ιλυώδης άμμος	Μητρικό πέτρωμα	Άργιλος
$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	18	22.7	20
$\gamma_s \text{ (kN/m}^3\text{)}$	20	22.7	22
$\theta_s \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}$	0.32	0.2	0.4
$c' \text{ (kPa)}$	3	5300	20
$\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$	30	63	32
$\phi^b \text{ (}^\circ\text{)}$	15	30	16
$k_s \text{ (m/s)}$	$8.25 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$
$\theta_r \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}$	0.032	0.02	0.04

Τα δεδομένα του Πίνακα 7, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού και της καμπύλης υδραυλικής αγωγιμότητας. Η χαρακτηριστική καμπύλη για κάθε διαφορετικό γεωϋλικό δίδεται από το λογισμικό προς επιλογή (Sample Functions). Στην περίπτωση του αργιλικού υλικού, επιλέχθηκε η καμπύλη της αργίλου (Clay), ενώ για την περίπτωση της ιλυώδους άμμου, επιλέχθηκε η καμπύλη της ιλυώδους άμμου (SiltySand). Για την περίπτωση του βραχώδους υποβάθρου, όπου δεν δίδεται καμπύλη, δόθηκαν οι παράμετροι προσαρμογής (a, m, n)

(Πίνακας 8), της εξίσωσης που προτάθηκε από τους Fredlund και Xing (εξίσωση 2.24) στο λογισμικό SEEP/W, οι οποίοι έχουν ως εξής:

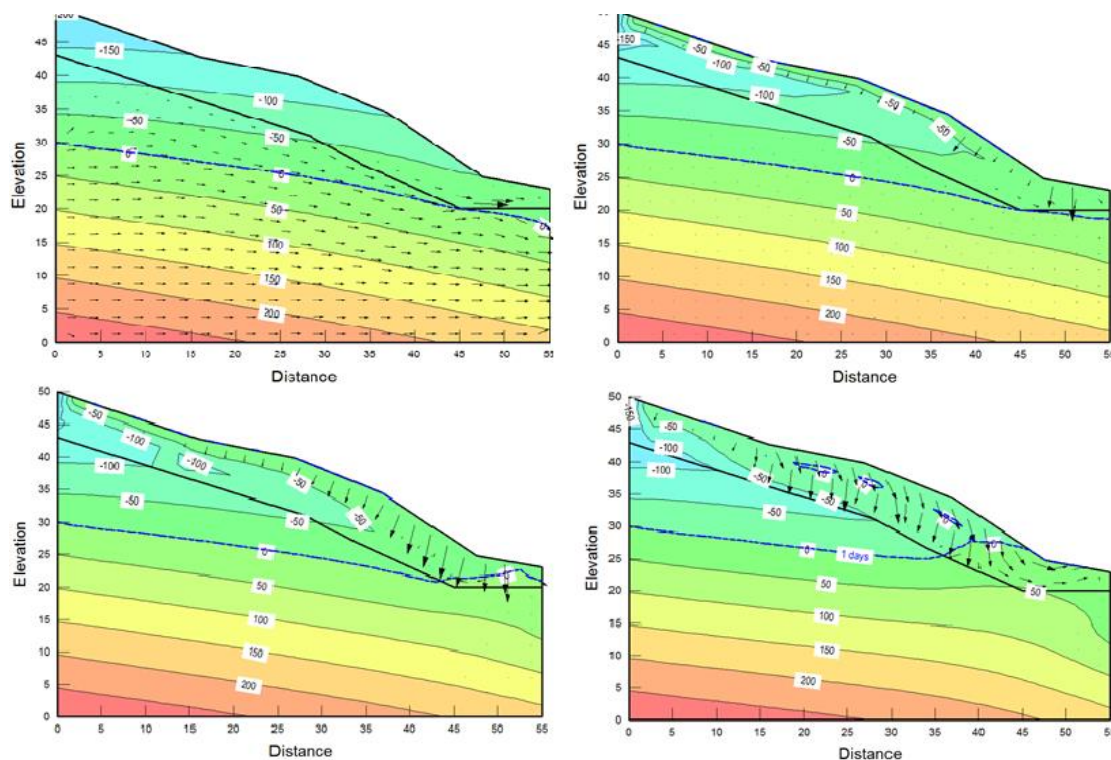
Πίνακας 8: Παράμετροι προσαρμογής για το μητρικό πέτρωμα που υπόκειται του εδαφικού υλικού.

Παράμετροι προσαρμογής		
a (kPa)	m	n
120	1.85	0.4

#### 4.4.1 Επίλυση πρανούς με ιλυώδη άμμο

- Εδαφικός μανδύας με υποκείμενο μητρικό πέτρωμα:

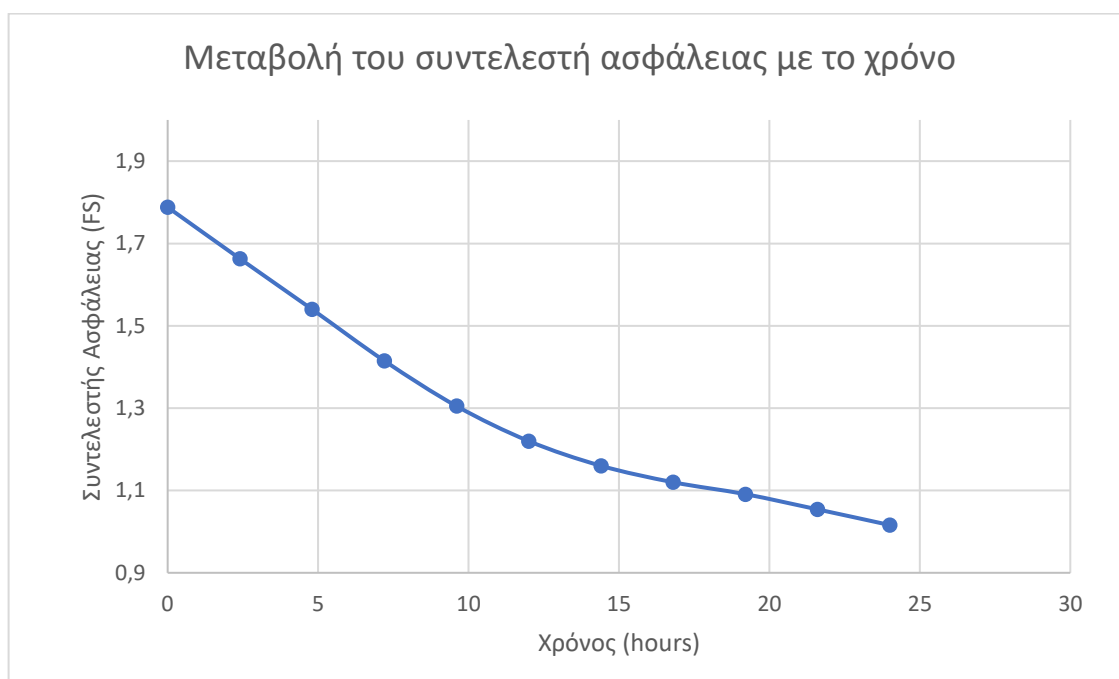
Θεωρήθηκε βροχόπτωση  $7.2 \text{ mm/hr}$ , επί 24 ώρες που αντιστοιχεί σε περίπου  $170 \text{ mm}$  ύψους βροχής. Το φαινόμενο είχε την ίδια ένταση καθ' όλη τη διάρκεια των 24 ωρών και τα αποτελέσματα της μεταβολής στη πίεση των πόρων μετά από 0, 4, 12 και 24 ώρες, φαίνονται στο Σχήμα 29:



Σχήμα 29: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές με μητρικό πέτρωμα και μανδύα ιλυώδους άμμου: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από συνεχή βροχόπτωση 24 ωρών.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 29, οι μεταβολές στις πιέσεις των πόρων διαμορφώνονται υπό επιφανειακά σε μικρό σχετικά βάθος. Οι αρχικές τιμές τη μύζησης, φτάνουν μέχρι τα  $-150\text{ kPa}$  κοντά στην επιφάνεια, με τον υδροφόρο ορίζοντα να συναντάται σε βάθος 20 μέτρων από την επιφάνεια και τη ροή του νερού να διαμορφώνεται από τα ανάντη στα κατόντη του πρανούς. Κατά την εξέλιξη της βροχόπτωσης παρατηρείται μεταβολή στη μύζηση μέχρι και  $100\text{ kPa}$  κοντά στην επιφάνεια, ενώ παρατηρείται και σημαντική ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα στο πόδα του πρανούς. Επιπλέον, με το πέρας των 24 ωρών, διακρίνονται κάποιοι επικρεμάμενοι υδροφορείς, εντός της εδαφικής μάζας, που αποτελούν νερό που έχει παγιδευτεί λόγω τοπικής μεταβολής της περατότητας του υλικού, εξαιτίας μεταβολής στη μύζηση.

Ο συντελεστής ασφάλειας, σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο του Bishop μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 30 προσεγγίζοντας κατάσταση οριακής ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της τάξης του 43%, με το πέρας της βροχόπτωσης.



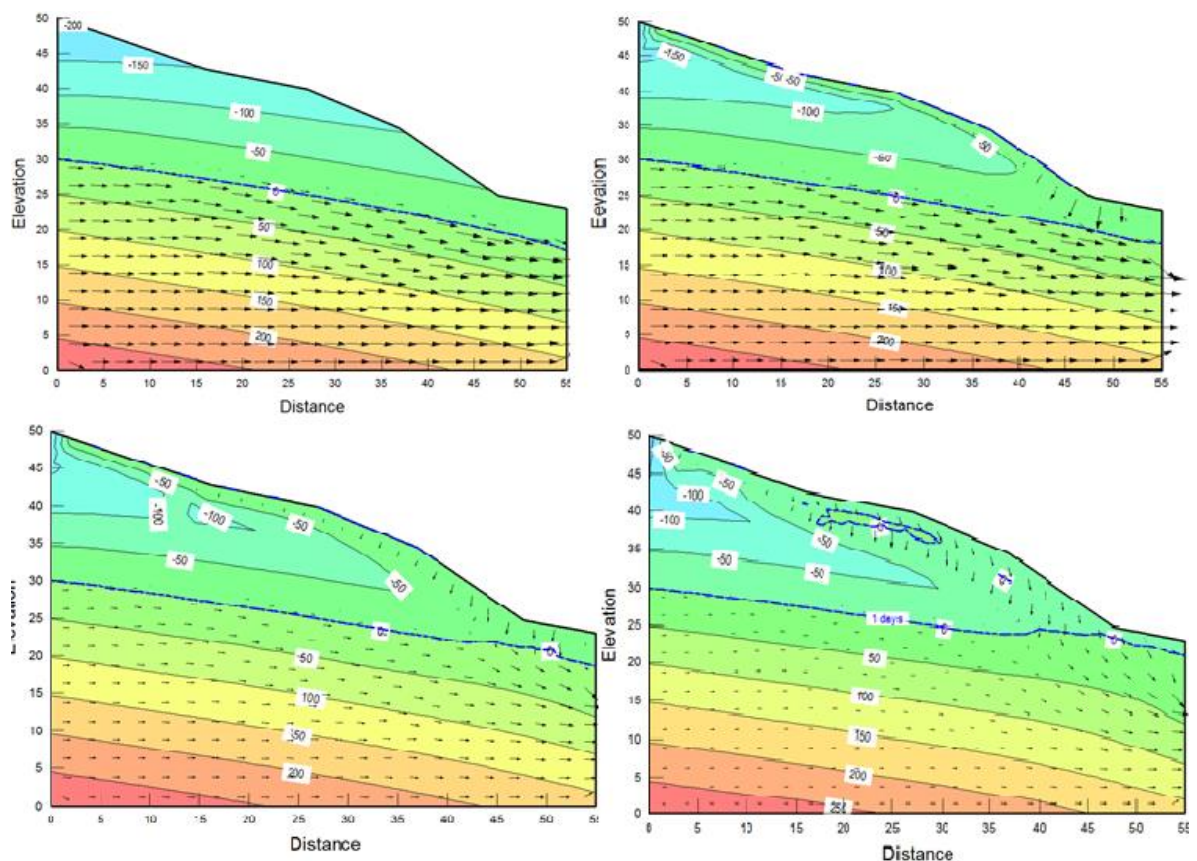
Σχήμα 30: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, περίπτωση ύπαρξης μητρικού πετρώματος, με υπερκείμενο ιλυώδους άμμου



- Ομογενές εδαφικό πρανές (χωρίς μητρικό πέτρωμα):

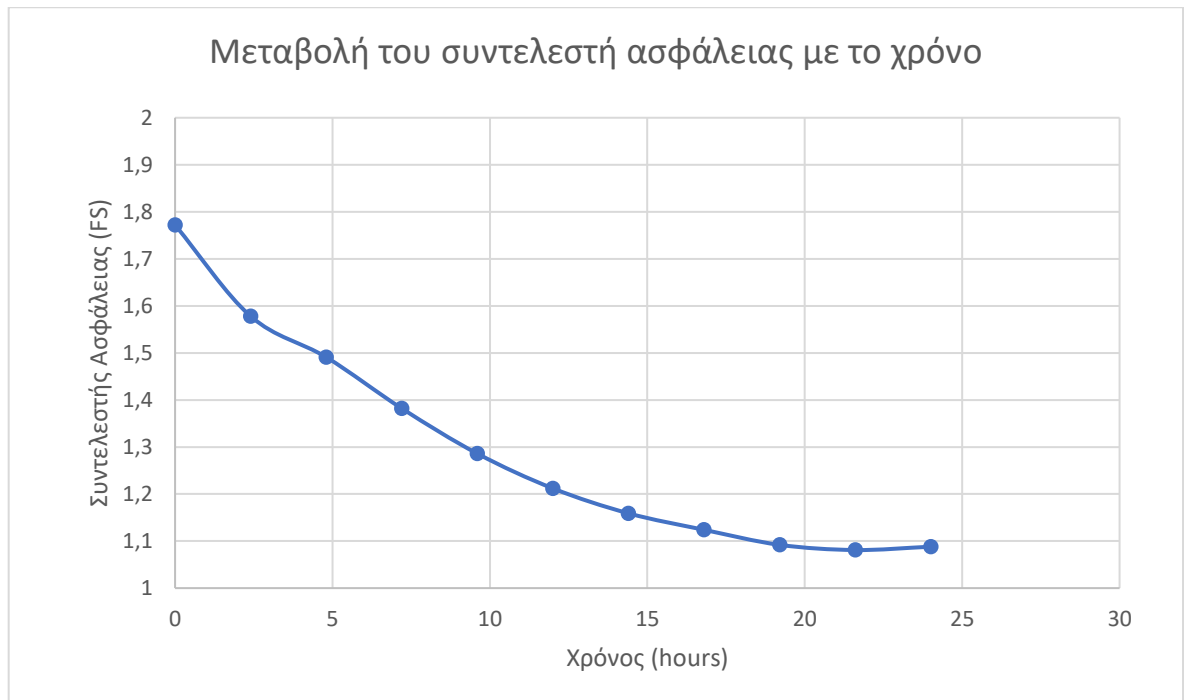
Επιβάλλοντας τις προαναφερόμενες συνθήκες βροχόπτωσης και στην περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από την ιλυώδη άμμο, προέκυψαν οι παρακάτω επιλύσεις, όπου φαίνεται επίσης η μεταβολή της μύζησης μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες.

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 31, η ροή είναι πιο ομαλή και το μέγεθος της τριχοειδούς ανύψωσης λιγότερο έντονο σε σχέση με την περίπτωση ύπαρξης του υποβάθρου, μητρικού πετρώματος. Επιπλέον, λόγω της καλύτερης περατότητας που παρουσιάζει το πρανές, πραγματοποιείται καλύτερη διαφυγή του νερού με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται σημαντική ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα στο πόδα του πρανούς. Και στην περίπτωση αυτή, με το πέρας των 24 ωρών παρατηρούνται επικρεμάμενοι υδροφορείς.

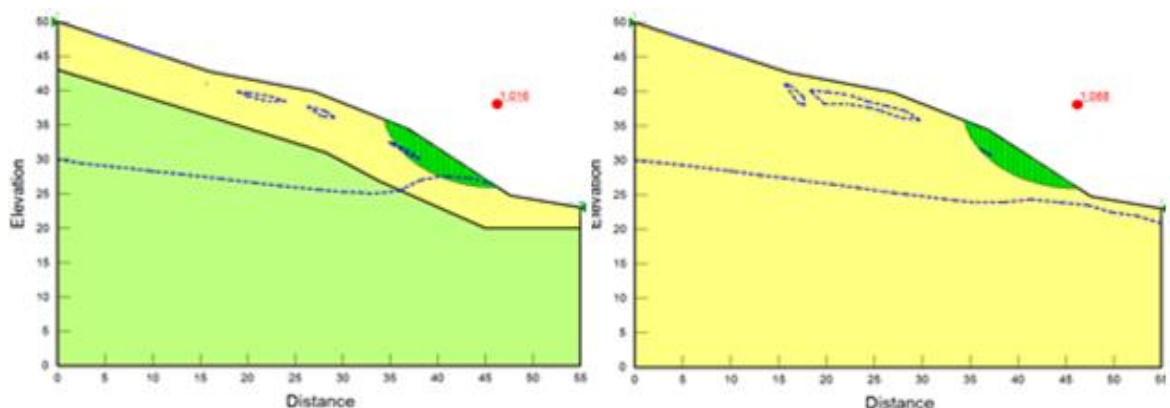


Σχήμα 31: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές ιλυώδους άμμου: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 24 ώρες.

Η μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την πάροδο του χρόνου, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση του συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 38%, με την τιμή αυτού μετά από 24 ώρες βροχής να βρίσκεται υψηλότερα από την περίπτωση της ανάλυσης με το υπόβαθρο.



Σχήμα 32: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, ομογενές εδαφικό πρανές ιλυώδους άμμου.



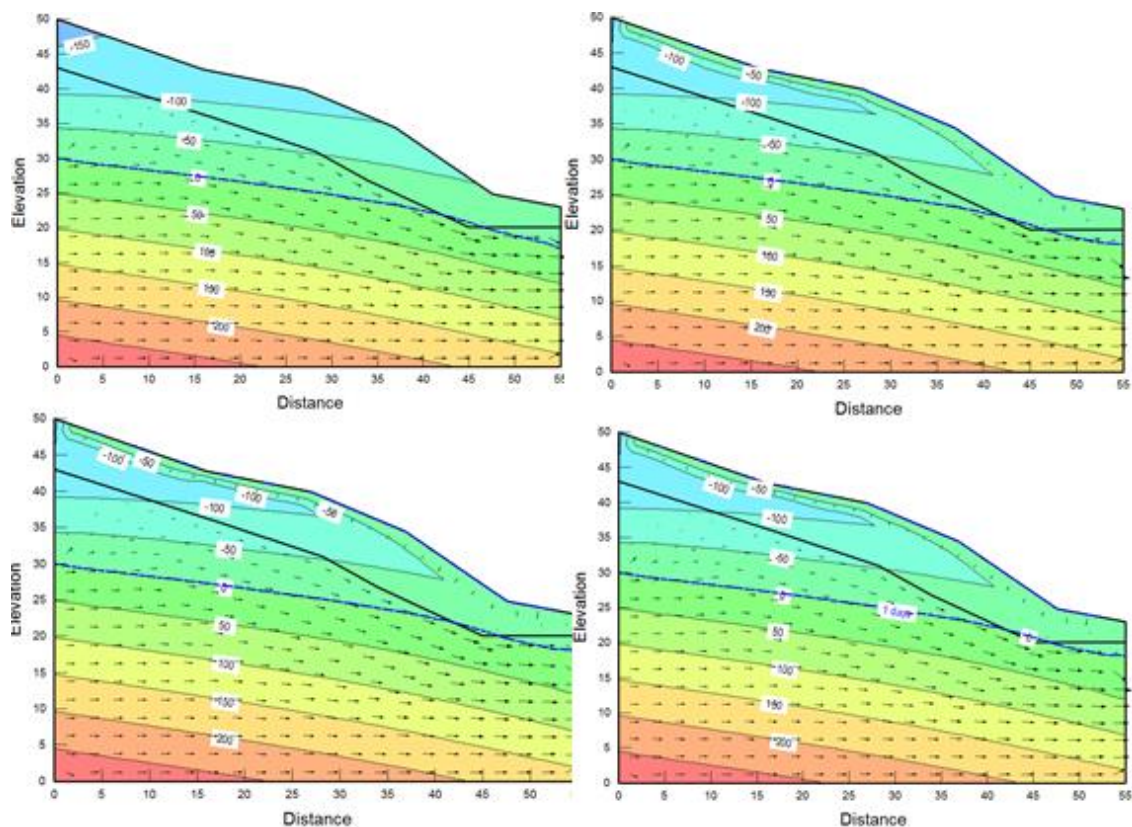
Σχήμα 33: Οριακές τιμές συντελεστή ασφάλειας, στην περίπτωση ιλυώδους άμμου: (α) με μητρικό πέτρωμα; (β) χωρίς μητρικό πέτρωμα.



#### 4.4.2 Επίλυση πρανού με άργιλο

- Εδαφικός μανδύας με υποκείμενο μητρικό πέτρωμα

Θεωρήθηκαν οι ίδιες συνθήκες βροχοπτώσης και εξετάστηκε η διαφορά στην περίπτωση ύπαρξης υποκειμένου μητρικού πετρώματος, με την περίπτωση πρανού που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από το αργιλικό υλικό. Στην περίπτωση ύπαρξης του υποβάθρου, η μεταβολή της πίεση των πόρων μετά από 0, 4, 12 και 24 ώρες φαίνεται στο Σχήμα 34.

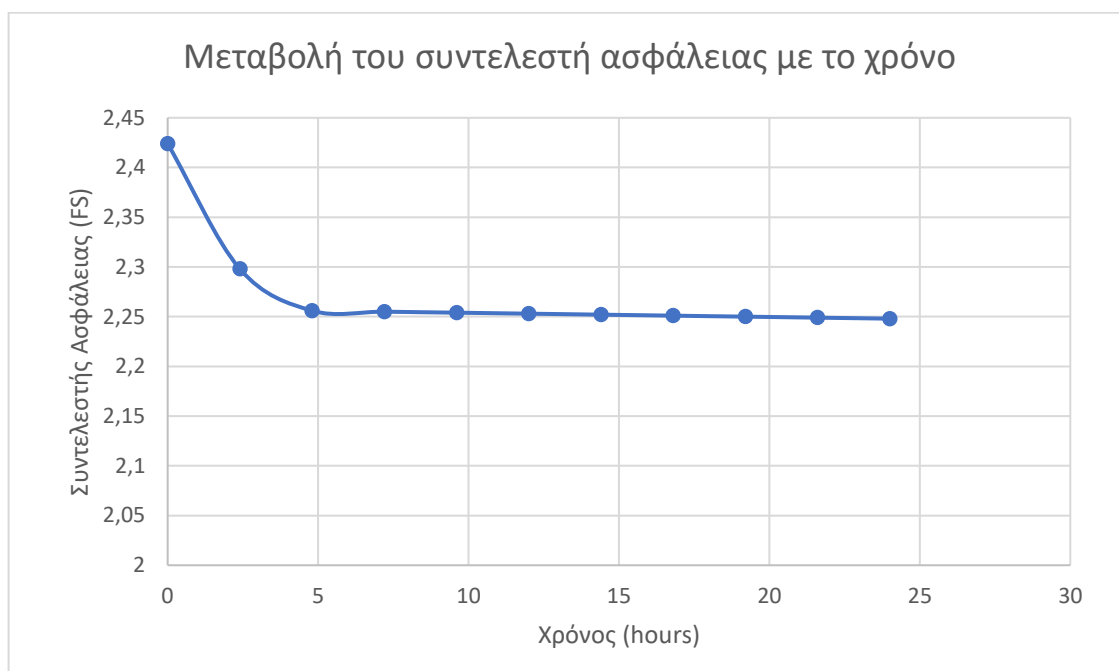


Σχήμα 34: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές με μητρικό πέτρωμα και άργιλο: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων έπειτα από 24 ώρες.

Στην περίπτωση του αργιλικού εδαφικού σχηματισμού που η περατότητα, είναι αρκετά μικρότερη η μεταβολή στην πίεση των πόρων λαμβάνει χώρα κοντά στην επιφάνεια και εξελίσσεται ταχύτερα στα πρώτα στάδια (χρονικά) της βροχοπτώσης. Οι μεταβολές που συμβαίνουν με την πάροδο του χρόνου, είναι λιγότερο έντονες, καθώς το

περισσότερο νερό απορρέει επιφανειακά, ενώ και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, μεταβάλλεται ελάχιστα.

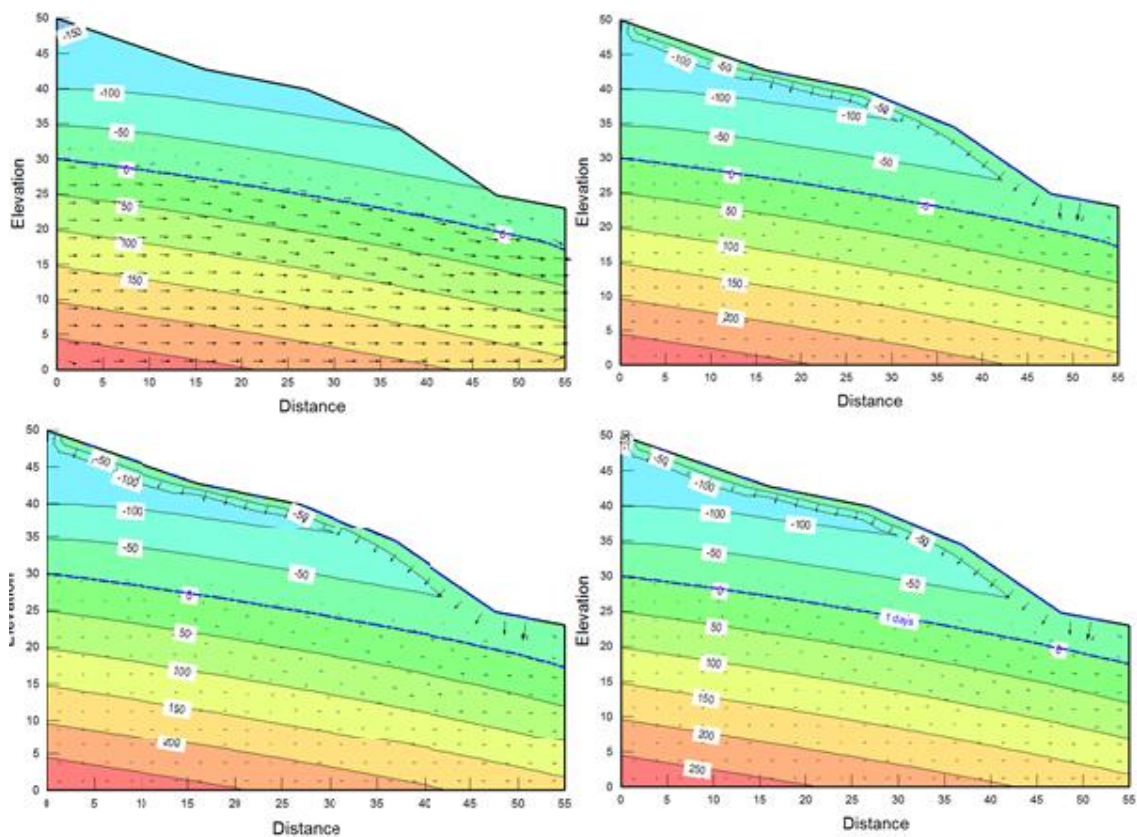
Στο Σχήμα 35, φαίνεται η μείωση του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο. Παρατηρείται μια μικρότερη (ποσοστιαία) μείωση σε σχέση με την περίπτωση της ιλυώδους άμμου, η οποία είναι της τάξης του 7%, ενώ το πραινές θεωρείται ασφαλές αφού ο συντελεστής ασφάλειας, είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας.



Σχήμα 35: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, περίπτωση μητρικού πετρώματος και αργίλου.

- Ομογενές εδαφικό πρανές (χωρίς μητρικό πέτρωμα):

Στην περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από άργιλο, προέκυψαν οι παρακάτω επιλύσεις, στο Σχήμα 36 φαίνεται η μεταβολή της πίεσης των πόρων μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχόπτωσης.

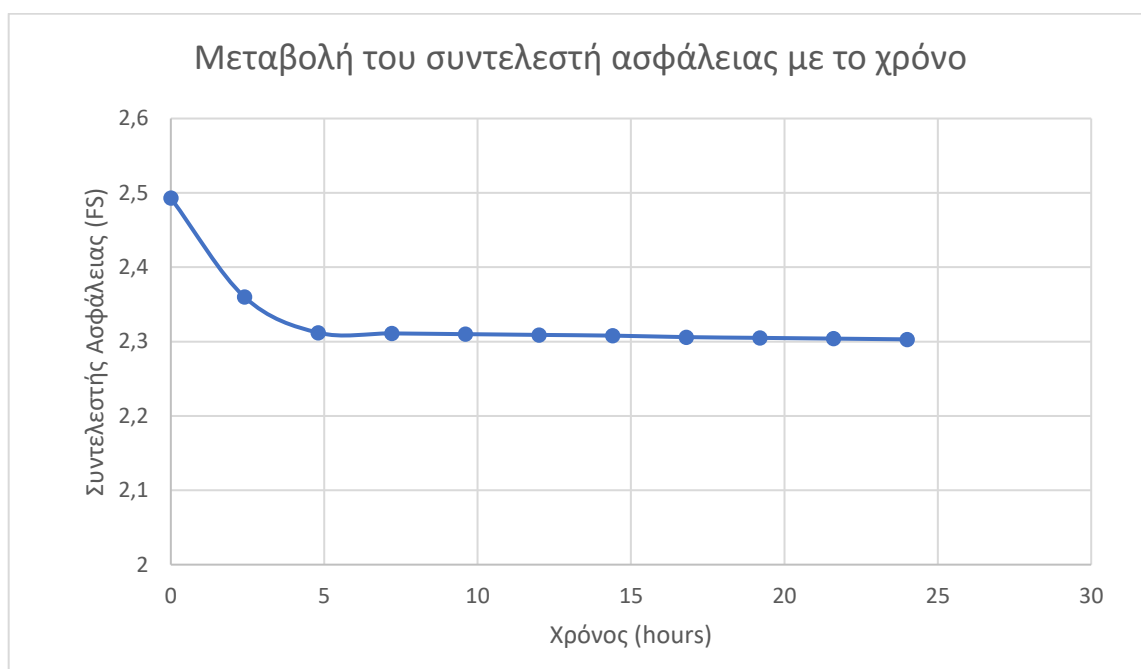


Σχήμα 36: Μεταβολή της πίεσης των πόρων σε πρανές εξ' ολοκλήρου από άργιλο: (α) οι αρχικές συνθήκες στις πιέσεις πόρων στο πρανές; (β) οι πιέσεις των πόρων μετά από 4 ώρες; (γ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 12 ώρες; (δ) οι πιέσεις των πόρων μετά από 24 ώρες.

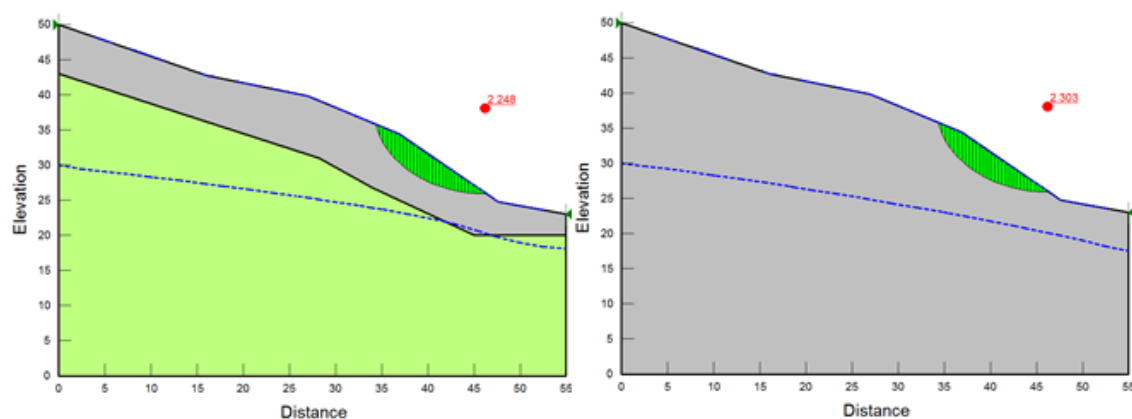
Στην περίπτωση που δεν υπάρχει το βραχώδες υπόβαθρο, παρατηρείται μια μικρή ροή πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και παράλληλη με αυτόν, η οποία είναι αποτέλεσμα τριχοειδών δυνάμεων. Το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης, είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση αργιλικών σχηματισμών.

Η μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Και σε αυτή την περίπτωση, η μεταβολή είναι αρκετά μικρότερη (ποσοστιαία) σε σχέση με το πρανές ιλυώδους άμμου και η οποία είναι της τάξης του 7%, ενώ σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, της ύπαρξης δηλαδή υποβάθρου, ο ελάχιστος

συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος, λόγω καλύτερης διαφυγής του νερού. Για αυτό το λόγο, δεν παρατηρείται και καμία μεταβολή στον υδροφόρο ορίζοντα.



Σχήμα 37: Μεταβολή συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο, περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από άργιλο



Σχήμα 38: Οριακές τιμές συντελεστή ασφάλειας, στην περίπτωση συνεκτικού υπερκειμένου: (α) με βραχώδες υπόβαθρο; (β) χωρίς βραχώδες υπόβαθρο.

#### 4.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φάνηκε από τις παραμετρικές αναλύσεις, προκύπτει σημαντική μείωση του συντελεστή ασφάλειας, λόγω μεταβολής στην πίεση των πόρων. Το φαινόμενο, επηρεάζει περισσότερο τον σχηματισμό της ιλυώδους άμμου, ο οποίος είναι περισσότερο περατός από τον αργιλικό σχηματισμό. Η μείωση του συντελεστή ασφάλειας στην περίπτωση της ύπαρξης εδαφικού μανδύα ιλυώδους άμμου, είναι της τάξης του 40%, ενώ στην περίπτωση του αργιλικού σχηματισμού ανέρχεται στο 7%.

Και στις δύο περιπτώσεις, ο μικρότερος συντελεστής ασφάλειας, παρουσιάζεται στην περίπτωση ύπαρξης μητρικού πετρώματος (βραχώδους υποβάθρου). Αυτό, στην περίπτωση του μη συνεκτικού καλύμματος, συμβαίνει γιατί το λιγότερο περατό υπόβαθρο, λειτουργεί ως φραγμός, που δεν επιτρέπει στο νερό να διαχυθεί και για αυτό παρατηρείται και σημαντική ανύψωση στον υδροφόρο ορίζοντα στο πόδα του πρανούς.

Στην περίπτωση του αργιλικού υλικού, λόγω της μικρότερης περατότητας, το βάθος κατείσδυσης της βροχής με την πάροδο του χρόνου είναι πολύ μικρότερο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να συντελείται αλλαγή στη μύζηση, υπό επιφανειακά και σε μικρότερο εύρος.

Επιπλέον, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, η μείωση του συντελεστή ασφάλειας στην περίπτωση του συνεκτικού υλικού, γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό στα αρχικά στάδια που εξελίσσεται η βροχόπτωση και στη συνέχεια ο ρυθμός μείωσης, γίνεται μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση της ιλυώδους άμμου. Αυτό οφείλεται, στη χαρακτηριστική καμπύλη του αργιλικού υλικού και συγκεκριμένα στη τιμή εισόδου του αέρα. Περισσότερο νερό εισέρχεται στο έδαφος σε μεγαλύτερες τιμές μύζησης, ενώ λόγω της μικρής διαπερατότητας και το βραχύ χρονικό διάστημα που εξελίσσεται η βροχόπτωση δεν προκύπτει σημαντική μεταβολή των πιέσεων των πόρων σε μεγαλύτερο βάθος και για αυτό η μείωση του συντελεστή ασφάλειας μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, γίνεται με πιο αργό ρυθμό.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το πρανές με το βραχώδες υπόβαθρο και το μανδύα ιλυώδους άμμου δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές με το πέρας των 24 ωρών, καθώς ο συντελεστής ασφάλειας είναι οριακά μεγαλύτερος της μονάδας. Στον αντίποδα το πρανές της αργίλου θεωρείται ασφαλές.

## Κεφάλαιο 5: Η περίπτωση των αποθέσεων στείρων υλικών λιγνιτωρυχείων

### 5.1 Εισαγωγή

Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε μελέτη της συμπεριφοράς των αποθέσεων στείρων υλικών λιγνιτωρυχείων, σε συνθήκες παρατεταμένης βροχόπτωσης.

Η ανάλυση, έγινε με το λογισμικό SLOPE/W και SEEP/W, σε χαρακτηριστικής γεωμετρίας πρανές. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού, τρεις από αυτές, από τους εμπειρικούς τύπους που παρατίθενται στο δεύτερο κεφάλαιο και χρησιμοποιούν βασικές παραμέτρους των εδαφών, τα όρια Atterberg και την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού και μία πρότυπη καμπύλη για τη συγκεκριμένη φύση υλικού που διατίθενται από το πρόγραμμα. θεωρήθηκε ύψος βροχής  $7.2 \text{ mm/hr}$ , επί 24 ώρες με σταθερό ρυθμό.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ευστάθειας που προέκυψαν για κάθε μία από τις διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες.

### 5.2 Ο λιγνίτης στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη της Ελλάδας βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα και κυρίως στο λιγνίτη, ο οποίος υπάρχει σε αρκετές περιοχές στο υπέδαφος της χώρας και ο οποίος αποτελεί μέχρι και σήμερα τη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας. Το 2009 η ποσοστιαία συμμετοχή λιγνίτη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 52% επί του συνόλου.

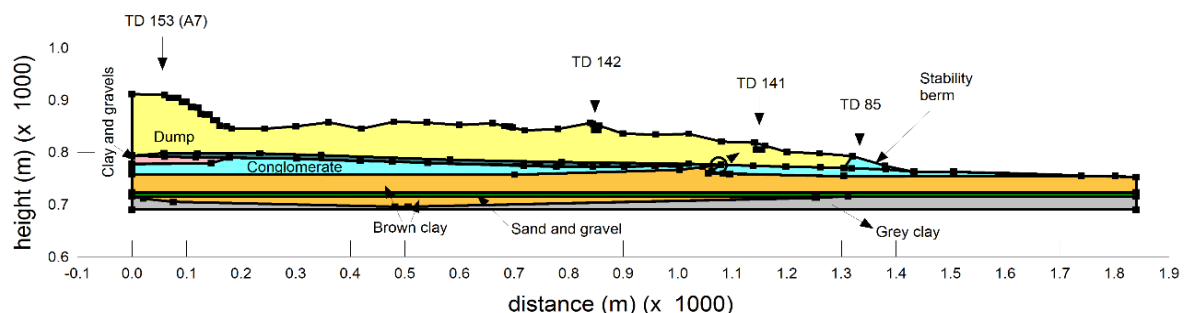
Ο λιγνίτης στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, σχηματίστηκε σε μια περίοδο περίπου 10 εκατομμυρίων ετών, με τις διεργασίες να εκτιμάται ότι ολοκληρώθηκαν πριν 1 εκατομμύρια χρόνια. Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή, ευνοούσαν την ανάπτυξη υδροχαρών φυτών (βρύα, καλάμια). Με την πάροδο του χρόνου τα τμήματα αυτών που δεν οξειδώθηκαν, θάφτηκαν κάτω από γεώδη υλικά, μία διαδικασία η οποία επαναλήφθηκε αρκετές φορές, με αποτέλεσμα το σχηματισμό κοιτασμάτων τύπου ζέβρα (Zebra). Το μέσο πάχος των απολήψιμων στρωμάτων λιγνίτη, είναι δύο μέτρα και ο αριθμός αυτών από 20 έως 30 περίπου.

Η πολυστρωματική φύση των λιγνιτών του ελλαδικού χώρου, σε συνδυασμό με την ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής και για χαμηλό κόστος εξόρυξης, λόγω οικονομικότητας του λιγνίτη, οδήγησε στην επιλογή επιφανειακών μεθόδων εκμετάλλευσης.

Τα κοιτάσματα, εκσκάπτονται κατά στρώσεις με συστήματα συνεχούς λειτουργίας, που αποτελούνται από καδοφόρους εκσκαφείς, ταινιοδρόμους και αποθέτες. Ο λιγνίτης, μέσω των ταινιοδρόμων, μεταφέρεται προς καύση στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ στα στείρα υλικά (υπερκείμενα και ενδιάμεσα), μεταφέρονται με τους ταινιοδρόμους στους αποθέτες σε συγκεκριμένες περιοχές. Οι περιοχές αυτές μπορεί να βρίσκονται εντός του χώρου που πραγματοποιείται η εκμετάλλευση, σε θέσεις που έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες απόληψης κοιτάσματος ή σε θέσεις εξωτερικά της εκμετάλλευσης. Τα στείρα υλικά, αποτελούνται από θρυμματισμένο υλικό, ενώ χαρακτηρίζονται από μεγάλες ποσότητες λεπτομερούς υλικού, κυρίως αργίλου και ιλύος. Συνήθως η διαμόρφωση των πρανών των αποθέσεων, λαμβάνει χώρα από κάτω προς τα πάνω σε διάφορες φάσεις, ώστε να επέρχεται στερεοποίηση του υλικού, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού, εξαρτώνται από της παραμέτρους αντοχής του υλικού και τις υδρογεωλογικές συνθήκες.

### 5.3 Πρανές αποθέσεων στείρων υλικών και γεωτεχνικές παράμετροι γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή της απόθεσης

Στο Σχήμα 39, φαίνεται το πρανές αποθέσεων στείρων υλικών. Το ύψος του στείρου υλικού, φτάνει μέχρι τα 110 μέτρα και η μέση κλίση του πρανούς είναι 7°, ενώ τοπικά παρουσιάζονται και μεγαλύτερες κλίσεις.



Σχήμα 39: Τομή του πρανούς της απόθεσης των στείρων υλικών (Steiakakis et al., 2009, τροποποιημένο).



Στο πρανές, απαντώνται έξι διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί. Στη βάση, υπάρχει ένας γκρίζος αργιλικός σχηματισμός (Gray Clay), που ακολουθείται προς τα πάνω από ένα κάστανο άργιλικό σχηματισμό (Brown Clay). Ανάμεσα στον κάστανο σχηματισμό, υπάρχει ένα λεπτό στρώμα αμμοχάλικων (Sand and Gravel).

Κατόπιν, συναντάται ένα κροκαλοπαγές (Conglomerate), ανάντη του οποίου υπάρχει ένας σχηματισμός αποτελούμενος από χαλίκια και άργιλο (Clay and Gravel) ενώ υπάρχει ένα λεπτό αργιλικό στρώμα (Σχήμα 39).

Στην επιφάνεια, έχει αποθεθεί το στείρο υλικό (Dump) από την εκμετάλλευση του λιγνίτη. Πρόκειται για ένα μίγμα πολλών διαφορετικών εδαφικών υλικών που παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια, λόγω της διαφορετικής γεωλογίας που συναντάται στους άγονους σχηματισμούς. Στο μεγαλύτερο μέρος του, αποτελείται από ήλυ και άργιλο, ενώ υπάρχει σε μικρότερο ποσοστό και αμμόδες υλικό.

Οι παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση προβλήματος, αποτελούν τις τιμές εισόδου για το λογισμικό και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9: Παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών.

Ιδιότητα	Στείρο υλικό	Κροκαλοπαγές	Καστανή άργιλος	Γκρίζα άργιλος	Λεπτό αργιλικό στρώμα	Αμμοχάλικα	Άργιλος με χαλίκια
$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	18	19.5	20.4	19	21	19.5	20.4
$\gamma_s$ ( $kN/m^3$ )	20	19.5	20.4	19	21	19.5	20.4
$\theta_s$ ( $m^3/m^3$ )	0.5	0.4	0.4	0.49	0.5	0.4	0.4
$c'$ ( $kPa$ )	13,4	10	16	20	50	10	16
$\varphi'$ ( $^\circ$ )	23	30	24.7	35	0	32	24.7
$\varphi^b$ ( $^\circ$ )	11	-	-	-	-	-	-
$k_s$ ( $m/s$ )	$8 \times 10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$\theta_r$ ( $m^3/m^3$ )	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04

### 5.3.1 Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού των άγονων υλικών της απόθεσης

Προσδιορίστηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.25 – 2.55). Οι εξισώσεις, αποτελούν εμπειρικούς τύπους και διατυπώθηκαν από τους Perera et al., (2005), Zapata et al., (2000) και Aubertin et al., (2003) και χρησιμοποιούν κοκκομετρικά δεδομένα και τα όρια Atterberg. Οι απαραίτητοι παράμετροι για τον

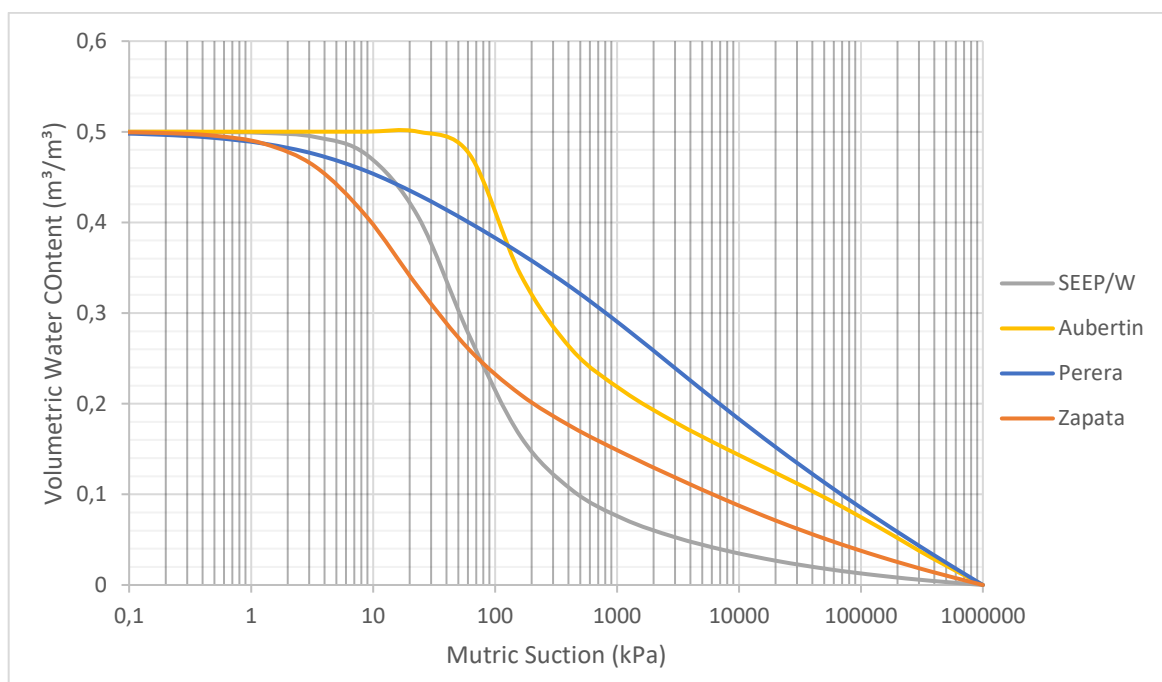


υπολογισμό των καμπυλών, είναι το όριο υδαρότητας  $LL$  (%), ο δείκτης πλαστικότητας  $PI$  (%), το ποσοστό του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο  $No. 200$  ( $0.075\text{ mm}$ ), εκφρασμένο σε δεκαδική μορφή και η διάμετρος των κόκκων, που ανταποκρίνεται στο 10 % και το 60% του λεπτότερου υλικού, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 10: Παράμετροι υπολογισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών, μέσω εμπειρικών τύπων.

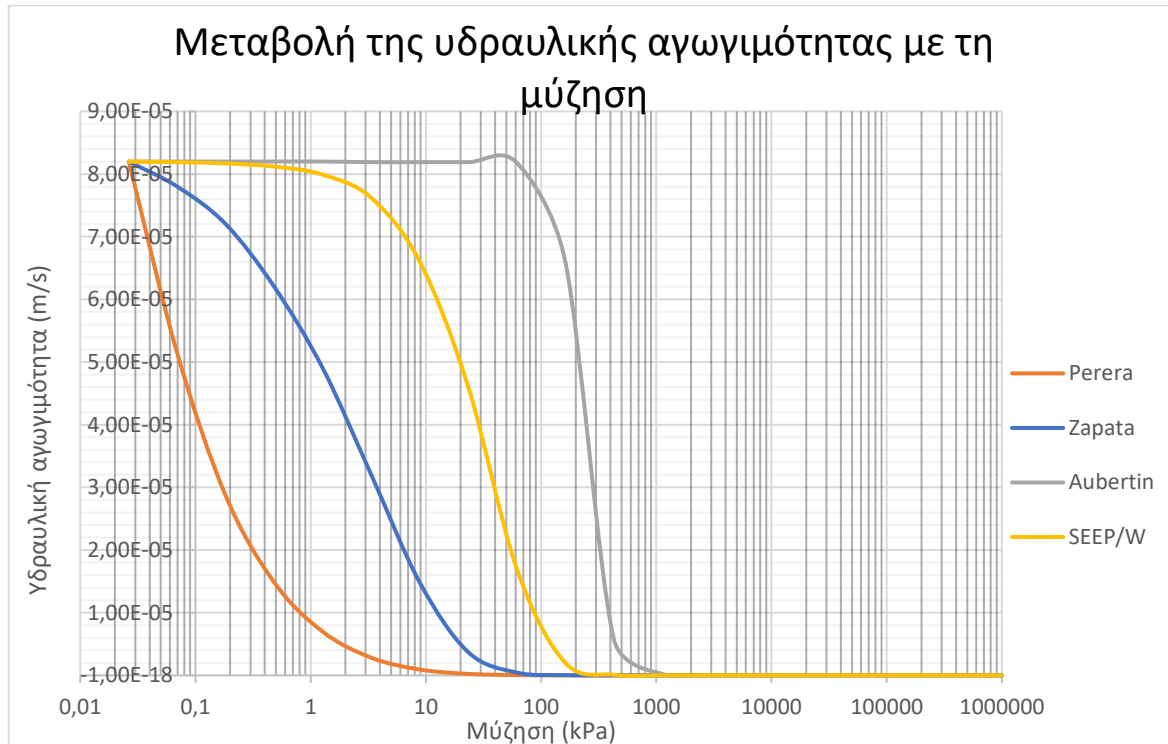
Παράμετρος	Μέγεθος
$D_{10}\text{ (mm)}$	0.002
$D_{60}\text{ (mm)}$	0.009
$LL\text{ (}\%\text{)}$	60.71
$PI\text{ (}\%\text{)}$	7.82
% Passing from No. 200	0.92
$\theta_s\text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}$	0.5
$k_{sat}\text{ (m/s)}$	$8 \times 10^{-5}$

Στο Σχήμα 40 παρουσιάζονται οι χαρακτηρίστηκες καμπύλες από κάθε ερευνητή, καθώς και μια χαρακτηριστική καμπύλη για ιλυώδες υλικό που δίδεται προς επιλογή από το λογισμικό SEEP/W, (Sample Functions). Υπολογίστηκαν καμπύλες, για το στείο υλικό, για το οποίο ελέγχεται η ευστάθεια και βρίσκεται σε κατάσταση (στο μεγαλύτερο μέρος του) μερικού κορεσμού. Τα υπόλοιπα στρώματα, βρίσκονται εντός του υδροφόρου ορίζοντα, είναι κορεσμένα και δεν απαιτούν τον προσδιορισμό χαρακτηριστικής καμπύλης.



Σχήμα 40: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους νερού, για τις διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού.

Στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη μύζηση χρησιμοποιώντας τη λύση που προτάθηκε από τους Fredlund και Xing (1994), (εξίσωση (2.63)).



Σχήμα 41: Μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητάς με τη μύζηση για κάθε μία από τις υπολογισμένες χαρακτηριστικές καμπύλες.

#### 5.4 Περιγραφή της ανάλυσης και αποτελέσματα

Για την επίλυση, πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε σταθερές συνθήκες ροής (Steady State Analysis), ώστε να καθοριστούν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, και το μέγεθος της μύζησης που αναπτύσσεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions), που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την περίπτωση, είναι υδραυλικό φορτίο (Hydraulic Head) μεγέθους 850 m στην αριστερή πλευρά του πρανούς και συγκεκριμένα επί του κροκαλοπαγούς που αποτελεί τον περισσότερο περατό σχηματισμό με σκοπό τη διαμόρφωση του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον επιβλήθηκε στο πόδα του πρανούς μηδενική πίεση (Zero Pressure), υποδηλώνοντας ότι μέχρι αυτό το ύψος, βρίσκεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η ροή του νερού, πραγματοποιείται από τα ανάντη στα κατάντη τμήματα του πρανούς με φορά προ το πόδα του. Στην άνω επιφάνεια, θεωρήθηκε μη μηδενική ροή  $q \approx 0 \text{ m/s}$ , κάποιες

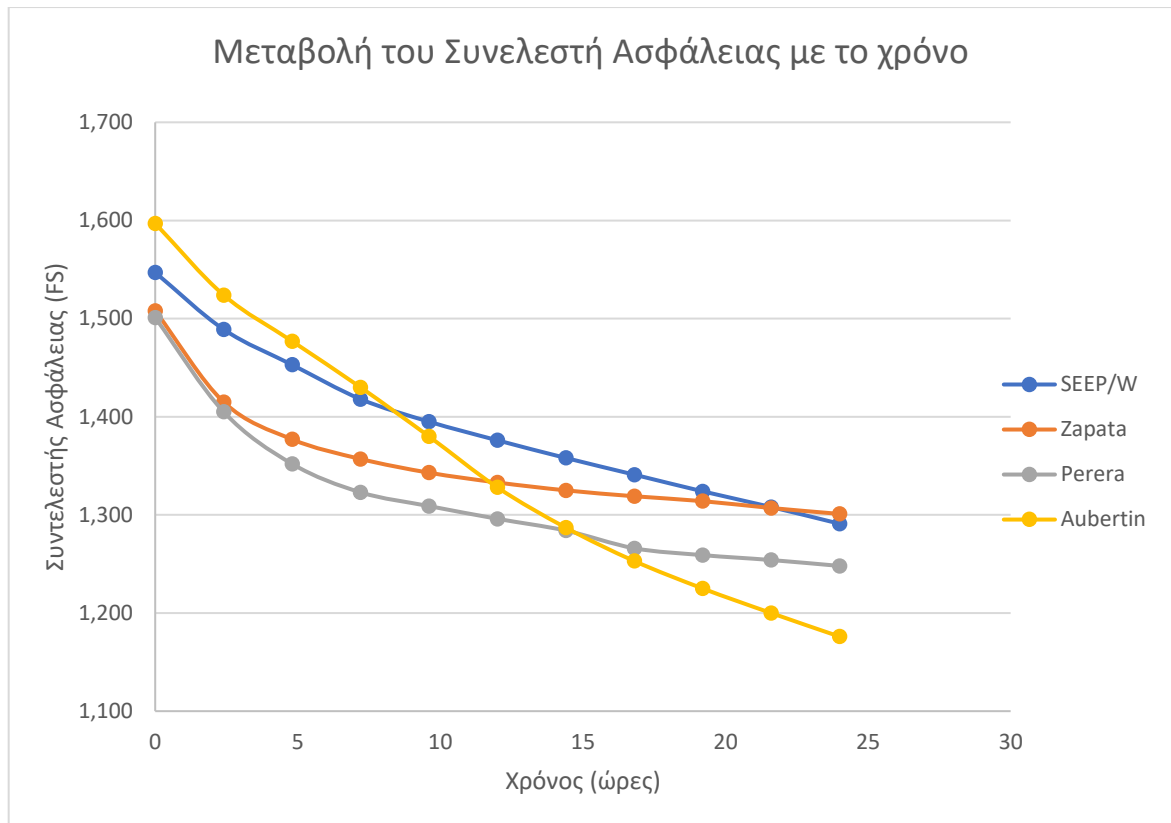
τάξεις μικρότερη της περατότητας της απόθεσης των στείων υλικών, ώστε η μεταβολή της μύζησης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα να ακολουθεί ρεαλιστικές τιμές (SEEP/W, 2007).

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής (Transient Analysis), ώστε να προσομοιωθεί η επίδραση τη βροχής και η μεταβολή της πίεσης των πόρων σε διάφορες χρονικές στιγμές. Σε αυτή την περίπτωση, οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν είναι οι ίδιες με αυτές της ανάλυσης σε σταθερές συνθήκες με εξαίρεση στην επιφάνεια, όπου επιβλήθηκε συνοριακή συνθήκη μοναδιαίας ροής με γέθους  $q_r = 1.97 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , ώστε να αποδοθεί η βροχόπτωση. Η ανάλυση, πραγματοποιήθηκε για χρονική διάρκεια 24 ωρών.

Στο Παράρτημα, παρατίθενται τα σχήματα με τη μεταβολή της πίεσης των πόρων, για κάθε μία από τις χαρακτηριστικές καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν, μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες σταθερής βροχόπτωσης. Με βάση τα παραπάνω προσδιορίστηκε η ευστάθεια στην ανάντη περιοχή του πρανούς με κλίση  $15^\circ$ . Όπως προαναφέρθηκε, η μέση κλίση για το σύνολο της απόθεσης, είναι περί της  $7^\circ$  και για αυτό το λόγο δεν προέκυψαν επισφαλείς μάζες. Στο Σχήμα 42, φαίνεται η μεταβολή στο συντελεστή ασφάλειας που επέρχεται με το χρόνο κατά τη διάρκεια των 24 ωρών λόγω της βροχόπτωσης.

Πίνακας 11: Δεδομένα μεταβολής του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο για κάθε μία από τις περιπτώσεις προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης.

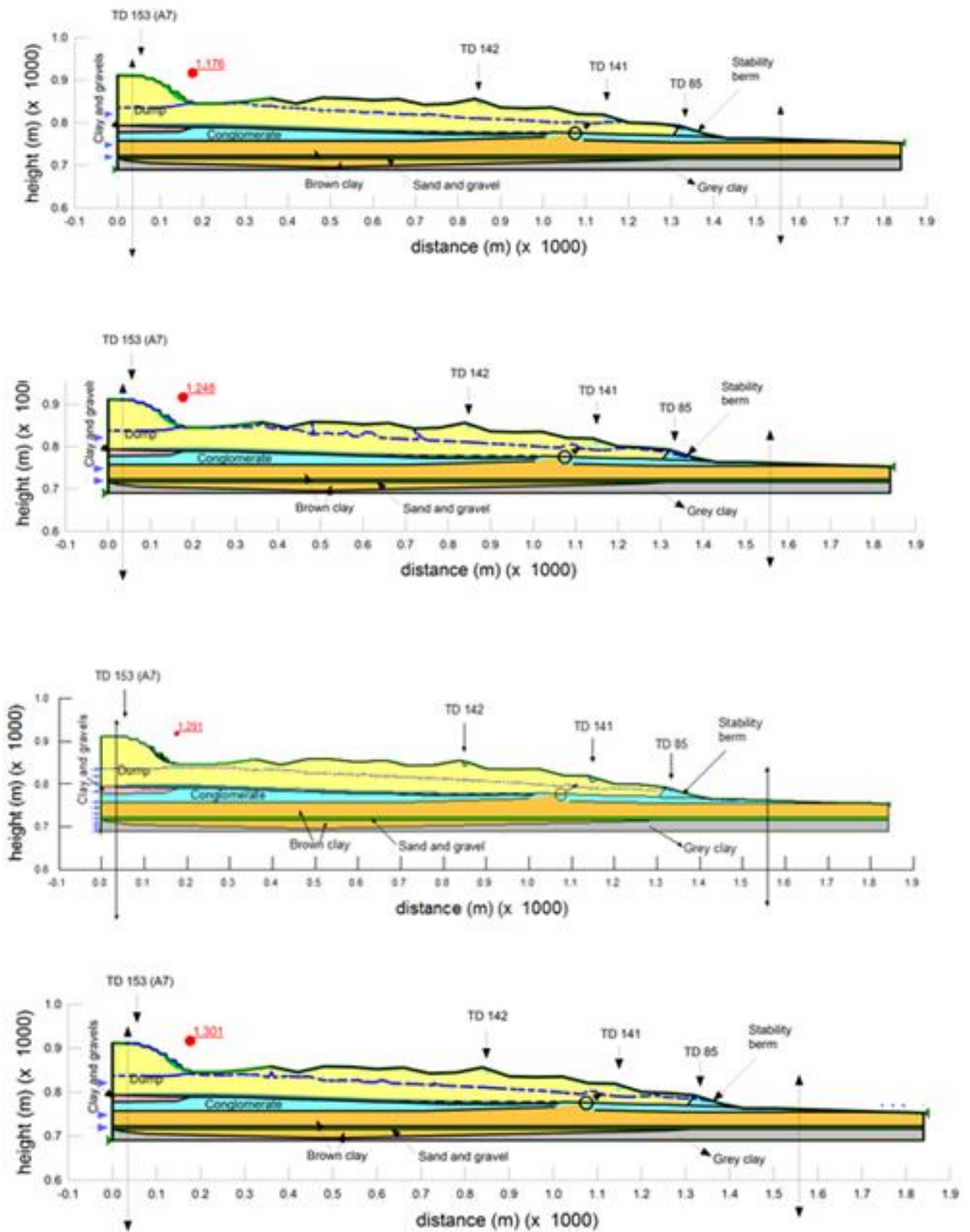
Χρόνος (ώρες)	Συντελεστής Ασφάλειας (FS)			
	SEEP/W	Zapata	Aubertin	Perera
0	1,547	1,508	1,597	1,501
2,4	1,489	1,415	1,524	1,405
4,8	1,453	1,377	1,477	1,352
7,2	1,418	1,357	1,430	1,323
9,6	1,395	1,343	1,380	1,309
12	1,376	1,333	1,328	1,296
14,4	1,358	1,325	1,287	1,284
16,8	1,341	1,319	1,253	1,266
19,2	1,324	1,314	1,225	1,259
21,6	1,308	1,307	1,200	1,254
24	1,291	1,301	1,176	1,248



Σχήμα 42: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο για κάθε μία από τις χαρακτηριστικές καμπύλες.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 42, κάθε μέθοδος έχει σαν αποτέλεσμα τον προσδιορισμό διαφορετικού συντελεστή ασφάλειας. Για κάθε μία από τις χαρακτηρίστηκες καμπύλες, προκύπτει ότι η αρχική τιμή του συντελεστή ασφάλειας, καθώς και η ελάχιστη τιμή αυτού με το πέρας των 24 ωρών, είναι διαφορετική.

Αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι η μύζηση που αναπτύσσεται και άρα η διατμητική αντοχή εξαρτάται από τη μορφή της χαρακτηριστική καμπύλη που επιλέγεται κάθε φορά και τη μορφή της συνάρτησης της υδραυλικής αγωγιμότητας που προσδιορίζεται με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, σύμφωνα με την εξίσωση (2.63) που προτάθηκε από τον Fredlund et al., (1994).



Σχήμα 43: Ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφάλειας ανά περίπτωση. Απεικονίζονται κατά σειρά οι μέθοδοι: Aubertiin et al., (2003)m, Perera et al., (2005), SEEP/W, Zapata et al., (2000).

## 5.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φάνηκε από τι επιλύσεις, για κάθε μία από τις διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες, προκύπτουν και διαφορετικές τιμές για το συντελεστή ασφάλειας. Οι διαφορές αυτές, τόσο στις τιμές που έχει αρχικά ο συντελεστής ασφάλειας, όσο και μετά από τις 24 ώρες βροχόπτωσης, οφείλονται στη διαφορετική μορφή κάθε χαρακτηριστικής καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα στην τιμές μύζησης που αντιστοιχούν στην τιμή εισόδου του αέρα και την τιμή που αντιστοιχεί στην παραμένουσα ποσότητα υγρασίας

Και στις τέσσερις περιπτώσεις σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή εισόδου του αέρα. Στην περίπτωση της χαρακτηριστικής καμπύλης που προτάθηκε από τον Aubertin et al. (2003), εισέρχεται συντομότερα περισσότερο νερό στην εδαφική μάζα, με αποτέλεσμα με το πέρας των 24 ωρών να συγκεντρώνεται περισσότερο νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη τιμή για τον συντελεστή ασφάλειας, από όλες τις μεθόδους.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η τιμή του συντελεστή ασφάλειας κυμαίνεται ελάχιστα πάνω από τη μέθοδο του Aubertin et al. (2003), ενώ η ποσότητα νερού στο έδαφος μετά τις 24 ώρες είναι λιγότερη. Με βάση τον αρχικό σχεδιασμό, και στις τέσσερις περιπτώσεις, ο συντελεστής ασφάλειας είναι αρχικά μεγαλύτερος από  $> 1.5$ . Με τη βροχόπτωση, μετά το πέρας των 24 ωρών, παρατηρείται σημαντική μείωση της τάξεως του 20%, χωρίς να προκαλείται αστοχία.

Όπως προαναφέρθηκε, τα στείρα υλικά των αποθέσεων, αποτελούν ετερογενή απόθεση διαφόρων εδαφικών σχηματισμών, λόγω της διαφορετικής γεωλογίας που απαντάται κατά την εκμετάλλευση. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού του υλικού, είναι ιλύς, άργιλος και λιγότερο άμμος.

Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η απόθεση δεν περιλαμβάνει την ομογενοποίηση του υλικού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών τμημάτων υλικού σε διάφορες θέσεις.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη μεταβολή στην πίεση των πόρων συμβαίνει υπό επιφανειακά, με εξαίρεση τα τμήματα του πρηνούς με τη μεγαλύτερη κλίση, όπου παρατηρείται τοπική ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, λόγω της έντασης της βροχόπτωσης.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε με στόχο τη διερεύνηση της ευστάθειας εδαφικών πρανών, συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων, εξαιτίας παρατεταμένης βροχόπτωσης.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με τη θεωρία της μύζησης και την έννοια των μερικώς κορεσμένων εδαφών, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους - νερού με την διατμητική αντοχή και τη υδραυλική αγωγιμότητα των γεωϋλικών. Επιπλέον παρουσιάζονται εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα της κοκκομετρίας του υλικού και τα όρια Atterberg.

Με βάση τη θεωρία, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Geostudio. Στις αναλύσεις τυπικού πρανούς, με μανδύα αποσάθρωσης και υπόβαθρο μητρικού πετρώματος, προέκυψε ότι: το πρανές με μανδύα ιλυώδους άμμου, επηρεάζεται περισσότερο από τη βροχόπτωση, σε σχέση με το πρανές με μανδύα αργίλου. Αυτό, οφείλεται στη μεγαλύτερη περατότητα που παρουσιάζει η ιλυώδης άμμος σε σχέση με την άργιλο. Επιπλέον το υπόβαθρο μητρικού πετρώματος, λειτουργεί αρνητικά, επιδεινώνοντας την ευστάθεια, με αποτέλεσμα οι ελάχιστοι συντελεστές ασφάλειας να παρουσιάζουν περεταίρω μείωση σε σχέση με την περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από το εδαφικό γεωϋλικό.

Το αποτέλεσμα αυτό, στην περίπτωση της ιλυώδους άμμου, οφείλεται στο ότι το λιγότερο περατό υπόβαθρο, λειτουργεί ως φραγμός, αποτρέποντας στο μικρό χρονικό διάστημα που εξελίσσεται η βροχόπτωση, τη διαφυγή του νερού, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται περισσότερο νερό στο πρανές και να παρατηρείται ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, στο πόδα του πρανούς. Αντίθετα στην περίπτωση που το πρανές αποτελείται εξ' ολοκλήρου από ιλυώδη άμμο, η ποσότητα του νερού που διαφεύγει είναι μεγαλύτερη.

Στην περίπτωση του πρανούς με αργιλικό μανδύα, λόγω της μικρής περατότητας, η μείωση της μύζησης, λαμβάνει χώρα σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και κυρίως στα πρώτα στάδια της βροχόπτωσης, δεδομένου ότι η τιμή εισόδου του αέρα, στην

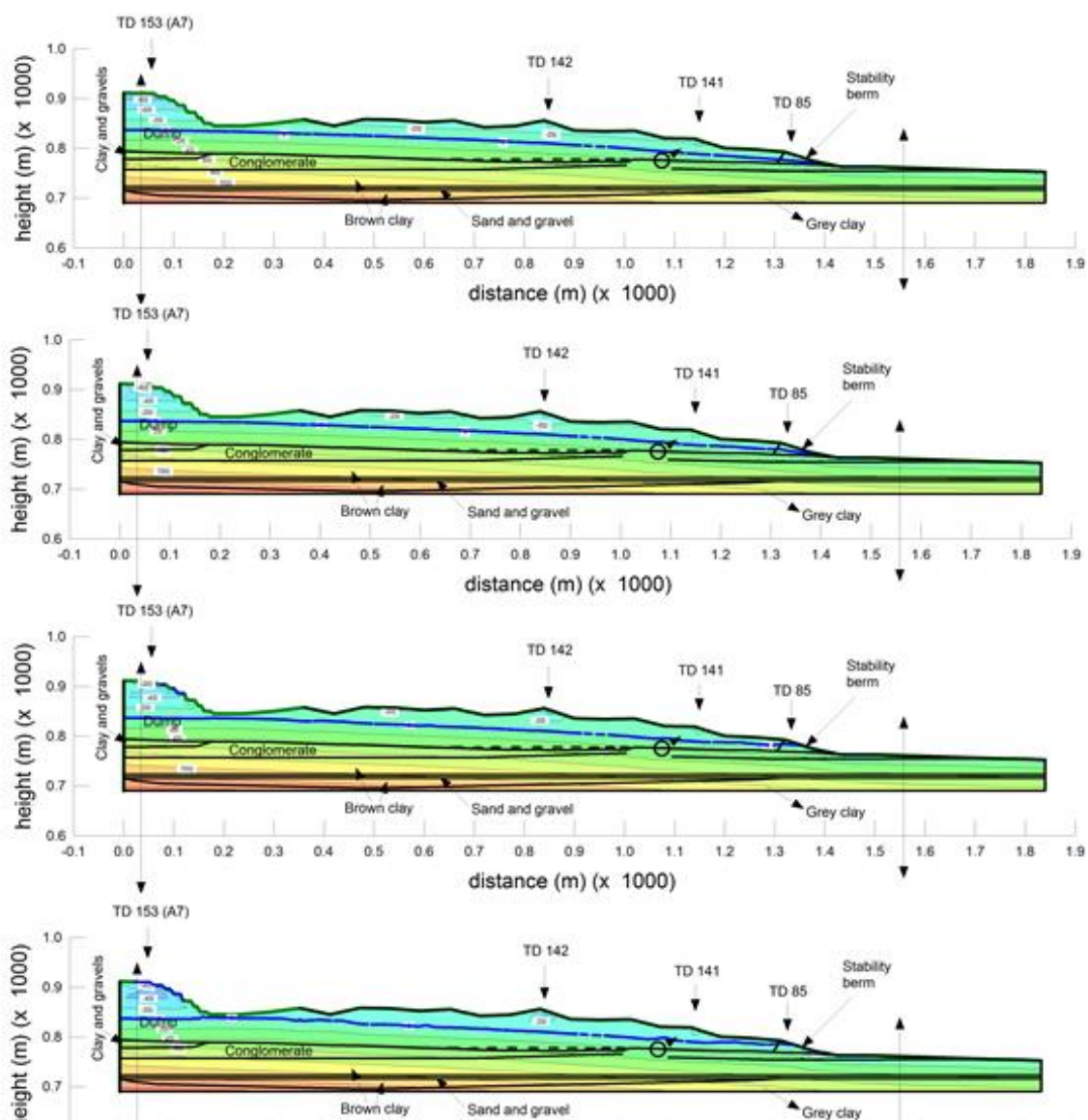
περίπτωση της αργίλου βρίσκεται σε μεγάλες τιμές μύζησης και το νερό εισέρχεται μεταβάλλοντας την υδραυλική αγωγιμότητα ενώ δεν έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές μεταβολές στη πίεση των πόρων. Και σε αυτή την περίπτωση λόγω του υποβάθρου, επιδεινώνεται η κατάσταση.

Όσον αφορά τις αποθέσεις στείων υλικών των λιγνιτωρυχείων, οι επισφαλείς μάζες που διαμορφώνονται έχουν μικρό πάχος και προσδιορίζονται υποεπιφανειακά, σε βάθος ανάλογο της μεταβολής της μύζησης. Για το σύνολο των διαφορετικών χαρακτηριστικών καμπυλών δεν προέκυψε αστοχία, για τις συγκεκριμένες κλίσεις και γεωτεχνικές παραμέτρους των υλικών, με αποτέλεσμα με το πέρας της βροχόπτωσης το πρανές να θεωρείται ασφαλές.



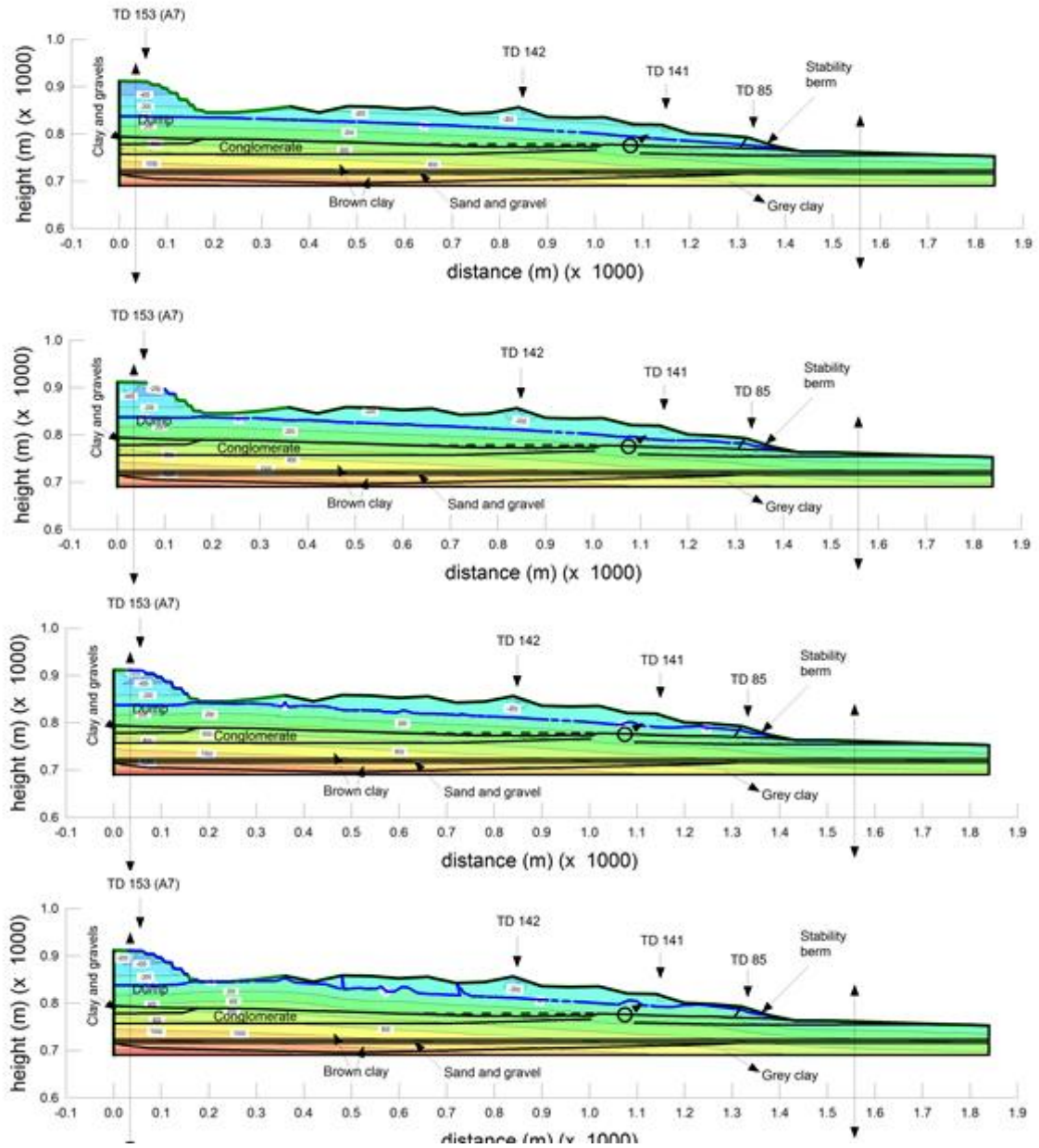
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ι) Οι πιέσεις των πόρων στο πρανές, σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη SEEP/W.



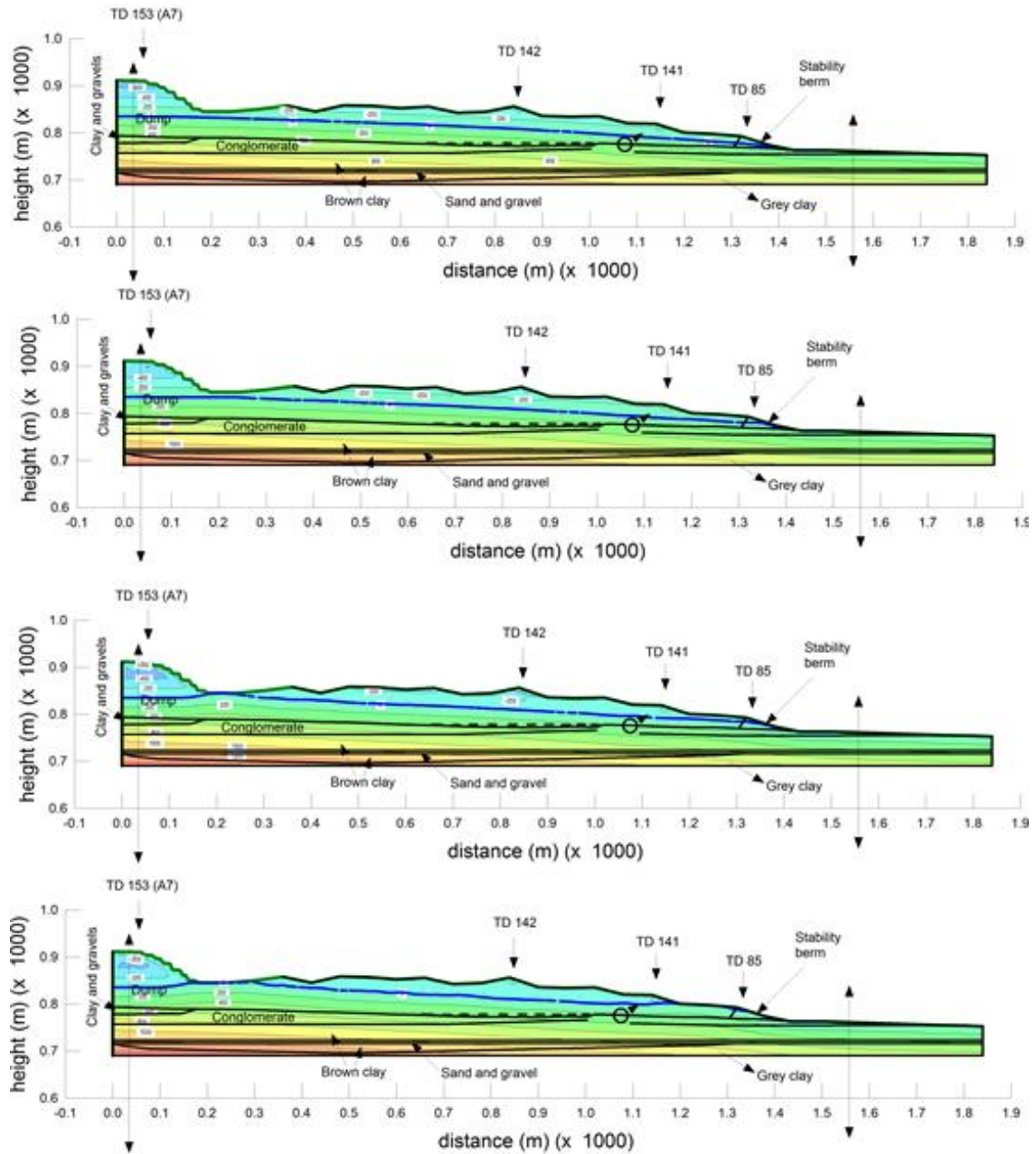
Σχήμα 44: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη SEEP/W, μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής.

II) Οι πιέσεις των πόρων στο πρανές, σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη Perera et al. (2003).



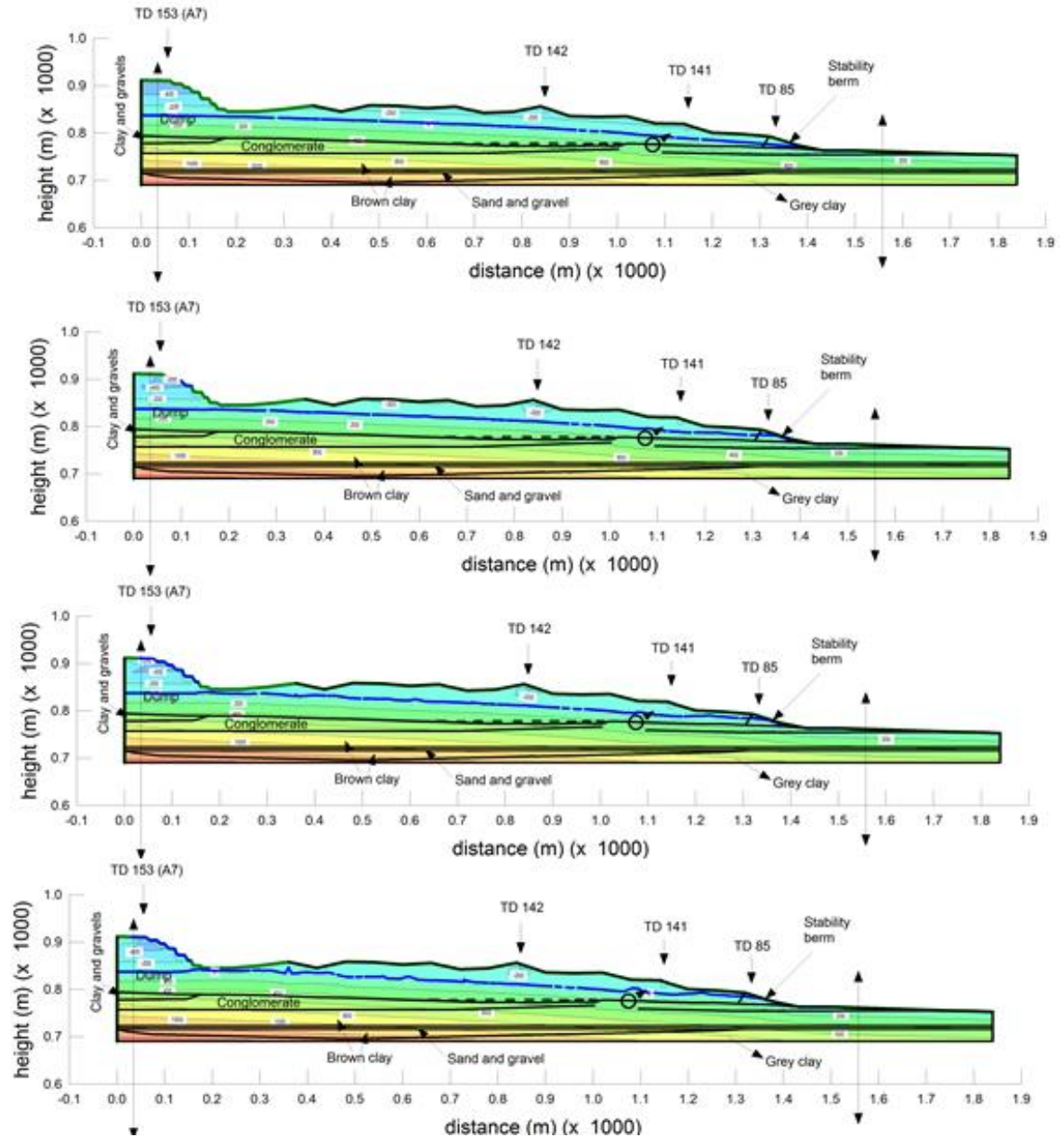
Σχήμα 45: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Perera et al. (2003), μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής.

III) Οι πιέσεις των πόρων στο πρανές, σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη Aubertin et al. (2003).



Σχήμα 46: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Aubertin et al. (2003), μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής.

IV) Οι πιέσεις των πόρων στο πρανές, σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη Zapata (2000).



Σχήμα 47: Μεταβολή της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη Zapata (2000, μετά από 0, 4, 12, 24 ώρες βροχής.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bishop, A.W. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes, *Gèotechnique*, Vol. 5, pp. 7 – 17.

Fredlund, D.G. and A. Xing (1994). Equations for the soil – water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (3), pp. 521 – 532.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Weley and Sons Inc., USA.

Fredlund, D.G. and Vanapalli S.K. (2002). Shear Strength of Unsaturated Soils, *Agronomy Soil Testing Manual*, Agronomy Society of America, pp. 329 – 361.

Fredlund, D.G., J. Krahn and D.E. Pufahl (1981). The Relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods. *International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*. Vol. 3, pp. 409 – 416, Stockholm, Sweden.

Fredlund, D.G., Klassen M.J. and Krahn J. (1989). The Effect of Soil Suction on Slope Stability at Notch Hill, *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, pp. 269-278

Fredlund, D.G., Pufahl D.E. and Clifton A.W. (1996). Model for prediction of Shear Strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 33, pp. 379 – 392.

Fredlund, D.G., S.K. Vanapalli, A. Xing and D.E. Pufahl (1995). Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve, *First International Conference on Unsaturated Soils*, Vol. 1, pp. 63 -70, September 6 – 8, Paris, France.

Fredlund, D.G., Xing A. and Huang S. (1994). Predicting the Permeability Functions for Unsaturated Soils Using the Soil – Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), pp. 553 -546.

Geo – Slope International Ltd. Seep/W for Finite Element Seepage Analysis, Geo – Slope International Ltd.: Calgary, AB, Canada, 2007.

Geo – Slope International Ltd. Slope/W for Slope Stability Analysis, Geo – Slope International Ltd.: Calgary, AB, Canada, 2007.

Hsin – Fu and Yi – Jin Tsai (2018). Effect of Variations in Long – Duration Rainfall Intensity on Unsaturated Slope Stability, Water 2018, [www.mdpi.com/Journal/Water](http://www.mdpi.com/Journal/Water).

Krahn, J. (2001). The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, pp. 643 – 660.

Lee, S.R., Y.K. Kim, H.S. Kwon and D. Hwang (2009). An alternative slope design methodology to prevent slope failure due to rainfall infiltration, 17<sup>th</sup> international Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Lucas, W. and Bryant R. (2017). SWCC Prediction: Seep/W Add – in functions, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.

Morgenstern, N.R. and V.E. Price (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces, *Géotechnique*, 15: 79 – 93.

Nurly, G. and Rahardjo H. (2017). Saturated and Unsaturated stability analysis of slope subjected to rainfall infiltration, SICEST 2016.

Spencer, E. (1967). A method of analyses of the stability of embankments assuming parallel inter – slice forces, *Géotechnique*, 17: 11-26.

Steiakakis E., Kavouridis K., Monopolis D. (2009). Large scale failure of the external waste dump at the "South Field" lignite mine, Northern Greece. *Engineering Geology* 104 (2009) pp. 269-279.

Van Ganuchten, M.T. (1980). Closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soils Sci. Soc. Am. J.* 44, pp. 892 -898.

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. In Schuster R.L., Krizek R.J. *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington DC., pp. 11 – 33.

Wyllie, D.C. and Mah C.W (2004). *Rock Slope Engineering*, Spon Press, New York, USA.