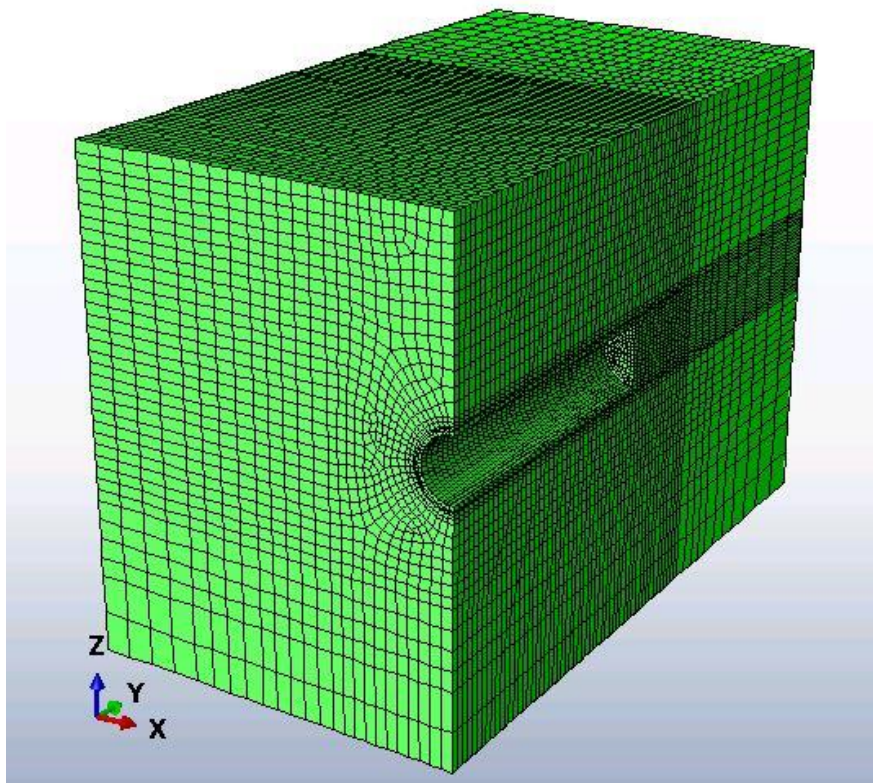




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αριθμητική Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου
Εκσκαφής Σήραγγας με Χρήση του Καταστατικού
Προσομοιώματος Modified Cam - Clay**



Καλλιβωκάς Γεράσιμος

Επιβλέπων: Καβαδάς Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου κ. Μιχαήλ Καββαδά για την καθοδήγησή του και την μετάδοση πολύτιμων γνώσεων κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Εν συνεχεία, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Σιταρένιο, για την πολύτιμη και καθοριστική βοήθεια του μέσα από τις ώρες που διέθεσε και τις γνώσεις που μου μετέδωσε για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους Δρ. Πολιτικούς Μηχανικούς Γεώργιο Προυντζόπουλο και Πέτρο Φορτσάκη για την βοήθειά τους σε διάφορα σημεία της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ευστάθειας και της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγας και της επίδρασης σε αυτές διαφόρων γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων του προβλήματος.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, κατά τις οποίες προσομοιώθηκε η διάνοιξη κυκλικής σήραγγας εντός γεωυλικού του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να προσομοιωθεί με το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam - Clay. Στις αναλύσεις αυτές εξετάστηκε η επίδραση αφενός των γεωτεχνικών παραμέτρων του περιβάλλοντος γεωυλικού, όπως η αντοχή του και η παραμορφωσιμότητά του, και αφετέρου γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως το ύψος των υπερκειμένων, στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου, με σκοπό την αποτίμηση της ευστάθειάς του σε όρους παραμορφωσιακούς. Ακολούθως, έγινε σύνδεση της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ με τον συντελεστή ευστάθειας Λ_F , για τον οποίο προτάθηκε νέος τρόπος έκφρασης και με βάση αυτόν προτάθηκε μια μεθοδολογία εκτίμησης του συντελεστή ασφαλείας FS.

Με βάση την ανωτέρω διερεύνηση προέκυψε ότι κατά την εκσκαφή η διαδρομή των κυρίων τάσεων αντιστοιχεί σε αποφόρτιση, καθώς η τελική έκθλιψή του εξαρτάται σε πολύ σημαντικό βαθμό από την παράμετρο κ , η οποία εκφράζει την κλίση της καμπύλης αποφόρτισης στο επίπεδο $\nu - \ln p'$. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε κανονικά στερεοποιημένο έδαφος, η πλαστικοποίηση του μετώπου είναι έντονη και η τελική του έκθλιψη εξαρτάται έντονα από την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης M , η οποία συνδέεται με τη γωνία τριβής ϕ , και μάλιστα, όπως αναμενόταν, όσο καλύτερες είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες, τόσο μικρότερη είναι η έκθλιψη. Σε ότι αφορά την επιρροή του ύψους των υπερκειμένων προέκυψε ότι για ίδιες παραμέτρους διατμητικής αντοχής η τελική τιμή της έκθλιψης του μετώπου αυξάνεται όσο μειώνεται το βάθος της σήραγγας.

Αντίθετα, σε έντονα υπερστερεοποιημένα εδάφη με μεγάλο δείκτη προφόρτισης OCR, το μέτωπο συμπεριφέρεται ελαστικά, με την έκθλιψη να επηρεάζεται κυρίως από την παραμορφωσιμότητα του εδάφους, όντας τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο το ύψος των υπερκειμένων. Όσον αφορά την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής παρατηρήθηκε ότι σε κανονικά στερεοποιημένα ή ελαφρώς υπερστερεοποιημένα εδάφη ($OCR < 2$) οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι μικρότερες της μονάδας, δηλαδή το μέτωπο εκσκαφής βρίσκεται στην ασταθή περιοχή. Αντίθετα, για έντονα υπερστερεοποιημένα εδάφη ($OCR > 2$) ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας, μιλάμε, δηλαδή, για ευσταθές μέτωπο εκσκαφής.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to investigate the stability conditions and deformational behavior of an unsupported tunnel face and to quantify the influence of various geotechnical and geometrical parameters of the problem.

In doing so, three-dimensional numerical analyses were conducted using the finite element code Abaqus. The excavation of a circular tunnel is simulated while the mechanical behavior of the surrounding geomaterial is given by the Modified Cam-Clay. Through these analyses the effect of the geotechnical parameters of the surrounding geomaterial, such as its strength and deformability, and also the effect of tunnel overburden, in the extrusion of the excavation face, was examined. The outcome of the aforementioned analyses was used in quantifying the stability of the tunnel face in terms of face extrusion. In that respect, the average normalized extrusion $\Omega_{F,Area}$ was related to the unsupported tunnel face stability factor Λ_F . Finally, a methodology of assessing the factor of safety FS of an unsupported tunnel face is proposed.

It can be concluded that during excavation the face area is unloaded with the final extrusion depending mainly on the value of parameter κ , the slope of the swelling curve on the v - $\ln p'$ plane. Additionally, it was observed that in normally consolidated soils, excessive plastic deformation are accumulated in the face area and thus the face extrusion depends mainly on the slope of the critical state line M . As expected, the better the geotechnical conditions are, the smaller the extrusion is, while, as far as the depth of overburden is concerned, it was observed that under the same shear strength conditions, the calculated extrusion increases with decreasing tunnel depth.

On the other hand, for heavily over-consolidated soils, the face area remains mainly within the elastic region, and thus its extrusion is primarily affected by the compressibility parameters and at the same time it increases with increasing tunnel depth. Regarding the stability of the excavation face, it was observed that in normally or slightly over-consolidated soils ($OCR < 2$) the calculated factor of safety is in most of the cases below unity, corresponding to an unstable tunnel face, while the opposite trend is observed for heavily over-consolidated soils ($OCR > 2$) that were found to mainly correspond to stable conditions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Σκοπός της Εργασίας	1
1.2 Δομή της Εργασίας	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ	3
2.1 Η σημασία της ευστάθειας του μετώπου	3
2.2 Η ευστάθεια του μετώπου	4
2.3 Βιβλιογραφική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου	7
2.3.1 Πειραματικές προσεγγίσεις	7
2.3.2 Αναλυτικές προσεγγίσεις	9
2.3.3 Αριθμητικές προσεγγίσεις	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ CAM-CLAY	13
3.1 Μαθηματική διατύπωση του τροποποιημένου καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam Clay	13
3.1.1 Επιφάνεια διαρροής	13
3.1.2 Ελαστική συμπεριφορά	15
3.1.3 Πλαστικές παραμορφώσεις - Νόμος Ροής	18
3.1.4 Νόμος κράτυνσης	19
3.1.5 Συνθήκη συμβατότητας - Πλαστικό μέτρο K_p και ελαστοπλαστικό μητρώο στιβαρότητας	20
3.2 Αντοχή του εδάφους	23
3.2.1 Συσχέτιση κριτηρίων αστοχίας Mohr-Coulomb και Cam-Clay	23
3.2.2 Περιβάλλουσα αστοχίας του μοντέλου Cam-Clay	26
3.3 Εισαγωγή του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam Clay στο ABAQUS	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΚΟΠΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	31
4.1	Σκοπός της αριθμητικής διερεύνησης.	31
4.1.1	Γενικά	31
4.1.2	Υπολογισμός μέσης έκθλιψης	31
4.1.3	Εκτίμηση της ευστάθειας μετώπου με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb (Προυτζόπουλος, 2011)	35
4.2	Περιγραφή του μοντέλου.....	38
4.3	Έλεγχος μοντέλου.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	49
5.1	Γενικά	49
5.2	Δεδομένα αναλύσεων	49
5.3	Διαδικασία προσομοίωσης	50
5.4	Αποτελέσματα των αναλύσεων	52
5.4.1	Γενικά	52
5.4.2	Διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων αντοχής M και OCR στην εξέλιξη της έκθλιψης	54
5.4.3	Διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων συμπίεστότητας κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης.....	60
5.4.4	Η επιρροή του βάθους	66
5.5	Εκτίμηση ευστάθειας μετώπου εκσκαφής σήραγγας	77
5.5.1	Υπολογισμός παραμέτρων Ω_F και Λ_F	77
5.5.2	Εκτίμηση Συντελεστή Ασφαλείας με βάση τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ευστάθειας και της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγας, η οποία διανοίγεται εντός γεωυλικού του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να προσομοιωθεί με το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam - Clay. Για τον σκοπό αυτό αρχικά πραγματοποιούνται τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, με βασικό στόχο τον υπολογισμό της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής και της επίδρασης διαφόρων γεωμετρικών και γεωτεχνικών παραμέτρων επί αυτής και στη συνέχεια επιχειρείται η σύνδεση της με τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου με βάση τη μεθοδολογία που έχει προταθεί από τον Προυντζόπουλος (2011).

1.2 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 6 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής και καταδεικνύεται η σημασία του στην ασφαλή διάνοιξη σηράγγων μέσω της πρόβλεψης πιθανής αστοχίας. Κατόπιν, γίνεται παρουσίαση των κυριότερων σημείων και συμπερασμάτων ενός σημαντικού αριθμού εργασιών και ερευνών πάνω στην ευστάθεια του μετώπου, οι οποίες αφορούν είτε σε πειραματικά αποτελέσματα, είτε σε αναλυτικές μεθοδολογίες, είτε σε προσέγγιση του προβλήματος μέσω αριθμητικών μεθόδων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται παρουσίαση των βασικών αρχών του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam-Clay, καθώς αυτό χρησιμοποιείται στις αναλύσεις του κεφαλαίου 5. Επίσης γίνεται μια περιγραφή της αντοχής των εδαφών όπως αυτή προσομοιώνεται με βάση το κριτήριο αστοχίας Modified Cam - Clay, παρουσιάζεται η περιβάλλουσα αστοχίας που προκύπτει, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτή μπορεί να αντιστοιχηθεί με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία σύνδεσης μεταξύ της μέσης έκθλιψης και της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, όπως αυτή προτάθηκε από τον Προυντζόπουλος (2011) και παρουσιάζονται και ελέγχονται τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στις παραμετρικές αναλύσεις του κεφαλαίου 5.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα δεδομένα και η διαδικασία των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και διατυπώνονται σχόλια και συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση αφενός των γεωτεχνικών παραμέτρων του περιβάλλοντος γεωολογικού, όπως η αντοχή του και η παραμορφωσιμότητά του, και αφετέρου γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως το ύψος των υπερκειμένων, στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου. Επιπρόσθετα, γίνεται σύνδεση της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ με τον συντελεστή ευστάθειας Λ_F , για τον οποίο προτείνεται νέος τρόπος έκφρασης και επιχειρείται η σύνδεση του με τον συντελεστή ασφαλείας FS.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 γίνεται σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ

2.1 Η σημασία της ευστάθειας του μετώπου

Οι σήραγγες, όπως και τα περισσότερα γεωτεχνικά έργα, ανέκαθεν αποτελούσαν ένα από τα πλέον δύσκολα και σύνθετα έργα πολιτικού μηχανικού λόγω της ανομοιογενούς και πολλές φορές απρόβλεπτης φύσης των γεωολικών εντός των οποίων κατασκευάζονται. Η ευστάθεια του μετώπου μίας σήραγγας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντοχή του εδάφους στην περιοχή προώθησης της εκσκαφής, την ικανότητα δηλαδή του εδάφους στο μέτωπο να αυτοϋποστηριχθεί έστω για ένα μικρό χρονικό διάστημα.

Διαχρονικά, με τη συνεχή εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων με έμφαση στην επίτευξη ενός βέλτιστου σε κάθε περίπτωση σχεδιασμού, ισορροπώντας μεταξύ ασφάλειας και οικονομίας. Παρ' όλα αυτά η πιθανότητα αστοχίας κατά τη φάση διάνοιξης μίας σήραγγας παραμένει σε ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα. Ειδικότερα σε αστικές περιοχές και μικρά βάθη η συχνή ύπαρξη εδάφους χαμηλής αντοχής σε συνδυασμό με την περιορισμένη δυνατότητα ανακατανομής των τάσεων, μπορούν να οδηγήσουν στη εκδήλωση αστάθειας με συνέπεια σημαντικές παραμορφώσεις σε υφιστάμενες κατασκευές και οδικά δίκτυα. Οι οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις από τις συνέπειες μίας τέτοιας αστοχίας είναι πολύ μεγάλες και για το λόγο αυτό ο αποτελεσματικός έλεγχος των παραμορφώσεων-μετακινήσεων είναι το βασικότερο κριτήριο σχεδιασμού σε έργα σηραγγοποιίας, ειδικά όταν αυτά αφορούν σε εκσκαφή σε μικρά βάθη υπερκειμένων σε αστικό περιβάλλον.

Πρωτεύοντα ρόλο στην ασφαλή διάνοιξη μιας σήραγγας παίζει η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και ο έλεγχος της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του όγκου του προς εκσκαφή γεωολικού μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής που από δω και στο εξής θα αναφέρεται ως πυρήνας προώθησης. Η εμπειρία από τη διάνοιξη δύσκολων υπογείων έργων έχει δείξει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών σε σήραγγες, ειδικά σε αβαθείς-αστικές, προκύπτει στο μέτωπο εκσκαφής ή πλησίον αυτού. Επιπρόσθετα, σημαντικό μέρος των καθιζήσεων (25-35% της συνολικής) οι οποίες εκδηλώνονται στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας συμβαίνουν σε θέσεις εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής (πρόδρομες καθιζήσεις), σε μία περιοχή η οποία μπορεί να εκτείνεται από 50 έως και 75% της διαμέτρου της σήραγγας εμπρός από το μέτωπο. Οι καθιζήσεις αυτές οφείλονται σε παραμορφώσεις του εδάφους εντός του

πυρήνα εκσκαφής και ο έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου είναι καθοριστικής σημασίας για τον περιορισμό τους.

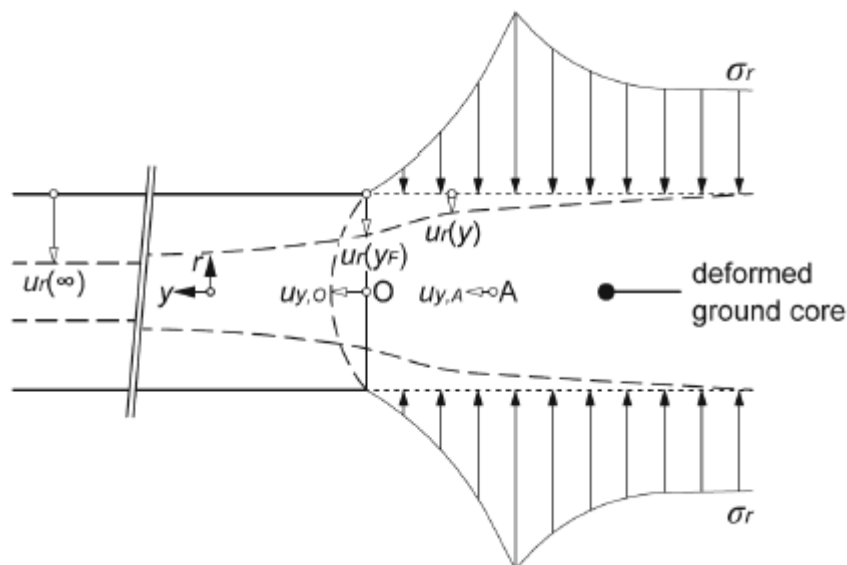


Εικόνα 2-1. Αστοχία μετώπου αβαθούς σήραγγας κατά την κατασκευή του Μετρό της Λωζάννης (Stallmann, 2005)

2.2 Η ευστάθεια του μετώπου

Κατά την προώθηση του μετώπου εκσκαφής μιας σήραγγας, το τμήμα του εδάφους μπροστά από το μέτωπο αποτονώνεται σταδιακά, περνώντας από την αρχική, γεωστατική κατάσταση σε μία τελική κατάσταση όπου η μία πλευρική τάση (κατά την φορά της εκσκαφής) μηδενίζεται (υποθέτοντας εκσκαφή ανυποστήρικτου

μετώπου). Η σταδιακή απομείωση της πλευρικής τάσης οδηγεί σε μείωση της ακτινικής αντίστασης του εδάφους μπροστά από το μέτωπο, με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφώνεται υπό την επίδραση της υφιστάμενης κατακόρυφης τάσης, τόσο ακτινικά (προσύγκλιση), όσο και προς το εσωτερικό της σήραγγας (εξώθηση). Ο μηχανισμός που οδηγεί στη δημιουργία της εξώθησης του μετώπου φαίνεται στο Σχ. 2-1. Η κατακόρυφη τάση σ_v που φορτίζει το τμήμα του προς εκσκαφή εδάφους μπροστά από το μέτωπο απομειώνεται κι αυτή συγκρινόμενη με την γεωστατική της τιμή.

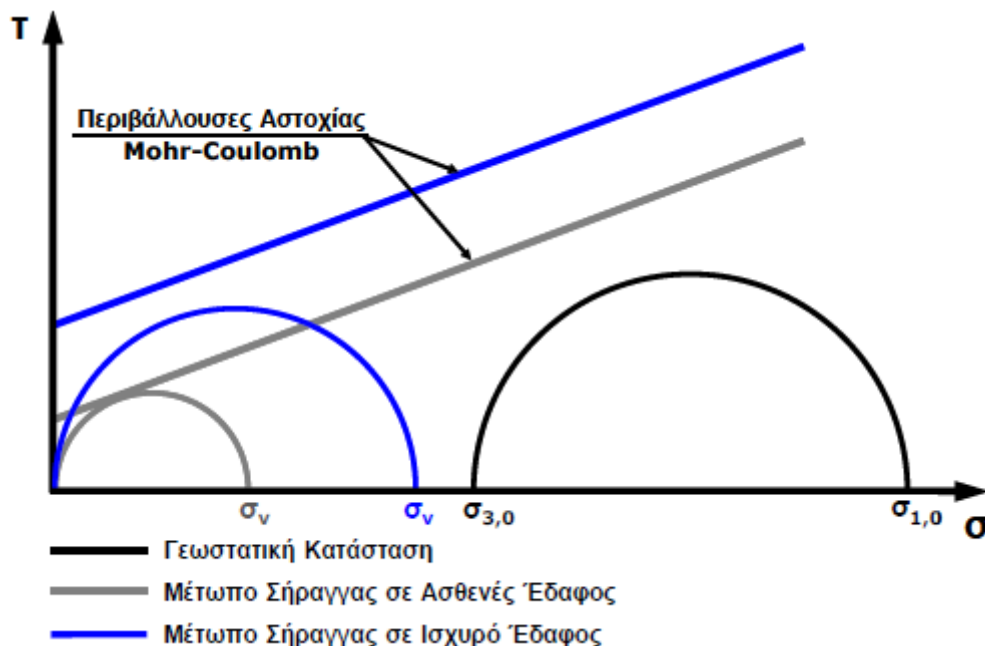


Σχ. 2-1. Σχηματικός μηχανισμός δημιουργίας εξώθησης μετώπου εκσκαφής (Cantieni et al., 2011)

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου ας υποθέσουμε ότι το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά απολύτως πλαστικά με την αστοχία να ορίζεται από ένα κριτήριο τριβής όπως το Mohr – Coulomb. Κατά την διαδικασία εκσκαφής, προοδευτικά, τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη τάση απομειώνονται, με την απομείωση της οριζόντιας τάσης να είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη όσο το έδαφος παραμένει στην ελαστική περιοχή. Απεικονίζοντας την εντατική κατάσταση αυτή με χρήση του κύκλου του Mohr βλέπουμε (Σχ. 2-2) ότι αντιστοιχεί σε μία κατάσταση κατά την οποία ο κύκλος του Mohr της τρέχουσας εντατικής κατάστασης κινείται προς τα αριστερά πλησιάζοντας την περιβάλλουσα αστοχίας. Όσο χαμηλότερη είναι η αντοχή του εδάφους τόσο πιο πιθανό είναι ο κύκλος της τρέχουσας τασικής κατάστασης να τμήσει την περιβάλλουσα αστοχίας και έτσι να προκληθεί αστοχία (πλαστικοποίηση) της περιοχής μπροστά από το μέτωπο.

Περαιτέρω αποτόνωση οδηγεί σε ανακατανομή της έντασης σε μεγαλύτερη περιοχή μπροστά από το μέτωπο, ραγδαία αποτόνωση της κατακόρυφης τάσης, και μπορεί τελικά να οδηγήσει και σε εκτεταμένη αστοχία – κατάρρευση του μετώπου

εκσκαφής. Είναι προφανές ότι ο ανωτέρω μηχανισμός είναι τόσο πιο έντονος, όσο χαμηλότερη είναι η αντοχή του εδάφους.



Σχ. 2-2. Κύκλοι Mohr της εντατικής κατάστασης του εδάφους μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής για ένα ασθενές έδαφος (ασταθές μέτωπο σήραγγας) και ένα ισχυρό έδαφος (ευσταθές μέτωπο σήραγγας).

Από την παραπάνω περιγραφή του φαινομένου γίνεται εμφανές ότι οι συνθήκες ευστάθειας του μετώπου γίνονται τόσο πιο δυσμενείς όσο: α) μειώνεται η αντοχή του περιβάλλοντος γεωλικού (μειωμένα c και ϕ), β) αυξάνεται το βάθος της σήραγγας (αύξηση σ_1), και γ) μεγαλώνει η διάμετρος εκσκαφής. Επίσης, τυχόν παρουσία νερού και η υδραυλική κλίση που συνοδεύει την ροή νερού που προκαλείται προς το μέτωπο εκσκαφής (ατμοσφαιρική πίεση) επιδεινώνει τις συνθήκες ευστάθειας.

Σε περιπτώσεις δυσμενών συνθηκών ευστάθειας του μετώπου, για να επιτευχθεί βελτίωση της ευστάθειας και της παραμορφωσιμότητας του μετώπου εκσκαφής έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες κατασκευαστικές μεθοδολογίες. Όπως είναι αναμενόμενο οι κατασκευαστικές αυτές τεχνικές αποσκοπούν στην απομείωση της δυσμενούς επιρροής ενός ή περισσοτέρων από τους παραπάνω παράγοντες. Μια πρώτη κατηγοριοποίηση τους είναι ο διαχωρισμός τους σε:

1. Μέτρα βελτίωσης του εδάφους, όπως ενεμάτωση με χαμηλή ή υψηλή πίεση και πάγωμα του εδάφους. Η βελτίωση του εδάφους σκοπό έχει την αύξηση της αντοχής του άρα και των παραμέτρων διατμητικής αντοχής.
2. Μέτρα ενίσχυσης του εδάφους στο μέτωπο, όπως αγκύρια μεταλλικά ή από υαλονήματα - fiberglass, τα οποία τοποθετούνται στο προς εκσκαφή έδαφος

- από το εσωτερικό της σήραγγας. Τα μέτρα αυτά σκοπό έχουν τον περιορισμό της απομείωσης της οριζόντιας τάσης (σ_3).
3. Μέτρα προστασίας του μετώπου, όπως ομπρέλα δοκών προπορείας ή αγκύρια, πάσσαλοι από την επιφάνεια του εδάφους. Τα μέτρα αυτά έχουν σκοπό την υποστήριξη του εδάφους πάνω από τον πυρήνα προώθησης και την μείωση της κατακόρυφης τάσης στο μέτωπο (σ_1).
 4. Αποστραγγιστικές οπές με σκοπό την μείωση της ροής και άρα των δυνάμεων ροής στο μέτωπο.

2.3 Βιβλιογραφική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου

Η σημασία της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου έχει γίνει αντικείμενο πολλών επιστημονικών εργασιών που αποσκοπούν στην ενδελεχή διερεύνηση και κατανόηση του φαινομένου. Οι δημοσιευμένες εργασίες αφορούν σε πειραματικές προσεγγίσεις, αναλυτικές επιλύσεις του προβλήματος και αριθμητικές αναλύσεις με διάφορες μεθόδους. Κυριότεροι στόχοι των ερευνητών είναι (1) η κατανόηση και περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας του μετώπου, (2) η εκτίμηση της οριακής πίεσης αντιστήριξης p_f πέρα από την οποία το μέτωπο είναι ασταθές και η εξάρτηση της από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος (αντοχή γεωυλικού, βάθος, διάμετρος σήραγγας), και (3) η ανάπτυξη μεθοδολογιών υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής. Εκτενής βιβλιογραφική διερεύνηση της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου μπορεί να βρεθεί στον Προυντζόπουλος (2011). Στην συνέχεια γίνεται μία σύντομη αναφορά στα κυριότερα συμπεράσματα των ερευνών αυτών.

2.3.1 Πειραματικές προσεγγίσεις

Μεγάλος αριθμός ερευνών έχει δημοσιευτεί με βάση αποτελέσματα πειραμάτων για την ευστάθεια ανυποστήρικτου μετώπου. Οι έρευνες αυτές κατηγοριοποιούνται με βάση διάφορες παραμέτρους των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα ποικίλουν ως προς:

1. Τον τύπο του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε μοντέλα πραγματικής κλίμακας, σε μοντέλα υπό κλίμακα και σε φυγοκεντρική, ενώ πρόσφατα εισήχθησαν τα μοντέλα τριών διαστάσεων στις έρευνες για την καλύτερη προσομοίωση του προβλήματος.
2. Τα χαρακτηριστικά της σήραγγας. Τα μοντέλα που προσομοιώθηκαν στις έρευνες διέφεραν ως προς τη διάμετρο της σήραγγας, το βάθος της (αβαθείς, βαθιές σήραγγες), καθώς και το λόγο της διαμέτρου της σήραγγας προς το υπερκείμενο εδαφικό υλικό.

3. Τον τύπο του εδάφους, στο οποίο έγινε η εκσκαφή της σήραγγας. Πολλοί ερευνητές δεν έμειναν στην γενική διάκριση των εδαφών (άμμοι, άργιλοι) και πραγματοποίησαν πειράματα σε πιο συγκεκριμένες ιδιότητες του εδάφους, εισάγοντας στην έρευνά τους στοιχεία όπως η ύπαρξη ή μη νερού, η συνοχή του εδάφους στις αργίλους και ο βαθμός κορεσμού του. Έτσι, ενδεικτικά έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα σε μαλακές αργίλους, ξηρές άμμους, αμμώδη εδάφη με κάλυμμα κλπ.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές διερευνήσεις της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου αφορούν στην έκταση και τη μορφή της προκαλούμενης αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα καταδεικνύεται:

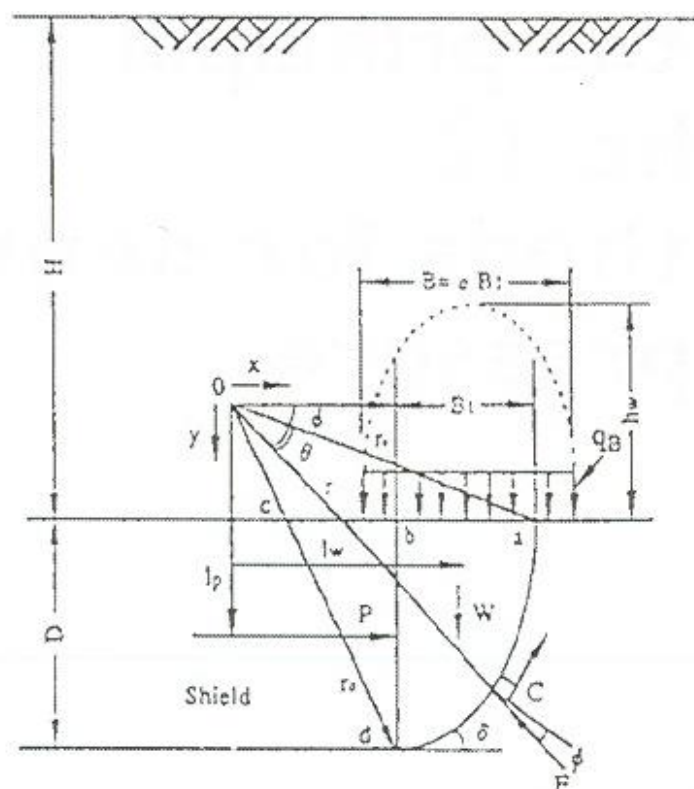
1. Η σημασία της υποστήριξης του διανοιχθέντος τμήματος της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Σε περιπτώσεις που η σήραγγα είναι υποστηριγμένη μέχρι το μέτωπο εκσκαφής ή μέχρι και οριακά μία διάμετρο πίσω από το μέτωπο εκσκαφής οι συνέπειες από την αστοχία του μετώπου συνήθως περιορίζονται εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής ενώ σε αντίθετη περίπτωση η αστοχία του μετώπου μπορεί να επεκταθεί με πρόκληση γενικευμένης κατάρρευσης όλου του ανυποστήρικτου τμήματος της σήραγγας.
2. Η ευεργετική επίδραση της συνοχής. Στην περίπτωση μη-συνεκτικού εδάφους η αστοχία του μετώπου σε αβαθείς σήραγγες (μέχρι τέσσερις διαμέτρους σήραγγας) ενδέχεται να επεκταθεί μέχρι την επιφάνεια του εδάφους με τον σχηματισμό αστοχίας μορφής καμινάδας. Με την αύξηση της συνοχής το φαινόμενο αυτό περιορίζεται και η αστοχία περιορίζεται σε ένα μικρό πρίσμα ολίσθησης εμπρός από το μέτωπο.
3. Η επίδραση του βάθους. Σε σήραγγες σε βάθος μεγαλύτερο από τέσσερις διαμέτρους σήραγγας η αστοχία, ακόμα και σε μη-συνεκτικά εδάφη, περιορίζεται εντός του γεωυλικού και δεν επεκτείνεται μέχρι την επιφάνεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν παρατηρούνται καν καθιζήσεις στην επιφάνεια.
4. Τέλος σε ότι αφορά την οριακή πίεση αντιστήριξης του μετώπου, οι περισσότερες έρευνες συγκλίνουν στο ότι αυτή προκύπτει ανεξάρτητη του βάθους ή και του λόγου βάθους προς διάμετρο σήραγγας και ότι εξαρτάται κυρίως από τη φύση του εκσκαπόμενου γεωυλικού και από τις παραμέτρους αντοχής του.

Η σημασία των πειραματικών προσεγγίσεων στην ευστάθεια ανυποστήρικτου μετώπου καταδεικνύεται από το γεγονός ότι οι έρευνες συνεχίζονται και εξελίσσονται μέχρι και σήμερα, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και η προσπάθεια σύγκρισης με αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις.

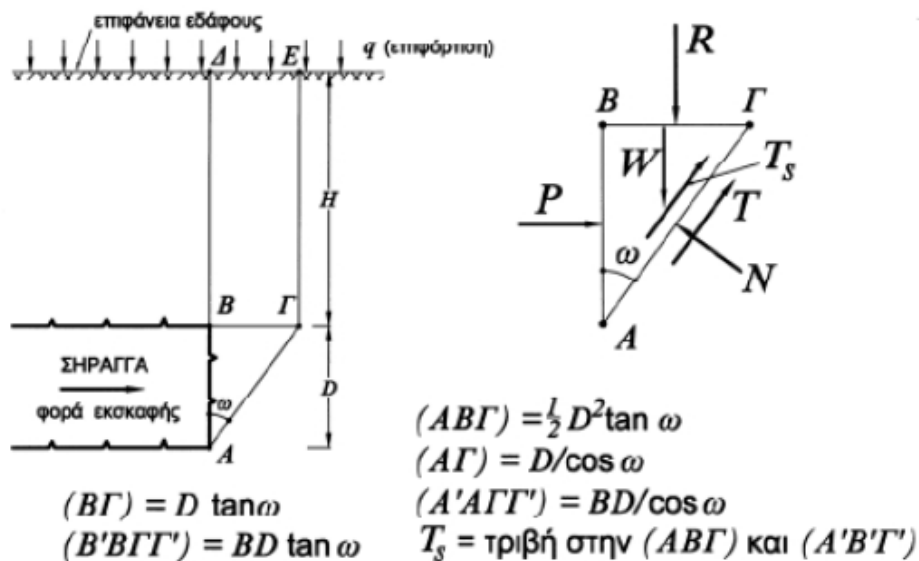
2.3.2 Αναλυτικές προσεγγίσεις

Οι εργασίες που έχουν προσεγγίσει το πρόβλημα της ευστάθειας του μετώπου με αναλυτικές μεθόδους έχουν ως στόχο την εκτίμηση της οριακής πίεσης αντιστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με επιλύσεις κάτω ορίου, θεωρώντας ένα αποδεκτό πεδίο τάσεων, είτε με επιλύσεις άνω ορίου, θεωρώντας έναν συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας. Οι μηχανισμοί αστοχίας μπορεί να είναι από αρκετά απλοί έως αρκετά πολύπλοκοι. Κάθε εργασία έχει θεωρήσει έναν συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας και εξετάζει την ευστάθεια του μετώπου μέσω κριτηρίων αστοχίας και συντελεστών που ορίζει και χρησιμοποιεί βασιζόμενος σε ήδη υπάρχουσες θεωρίες ο εκάστοτε συγγραφέας, μέσω των οποίων καταλήγει στην εκτίμηση της οριακής πίεσης αντιστήριξης.

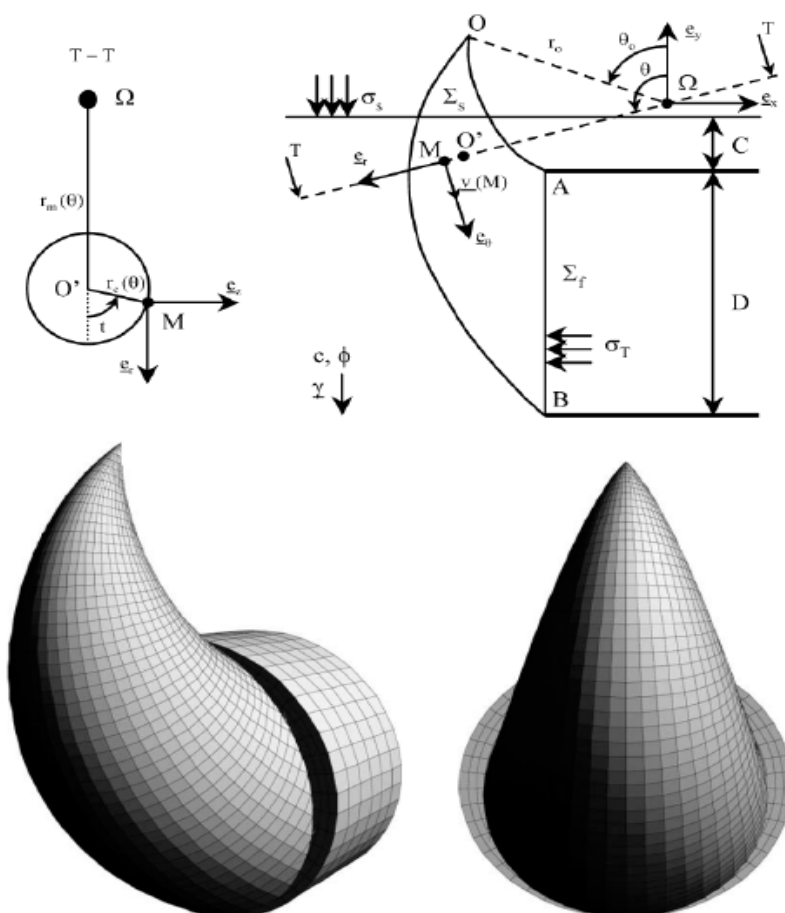
Παρατίθενται ενδεικτικά σχήματα μηχανισμών αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν σε αναλυτικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος:



Σχ. 2-3. Προσομοίωμα ευστάθειας μετώπου εκσκαφής (Murayama et al, 1966)

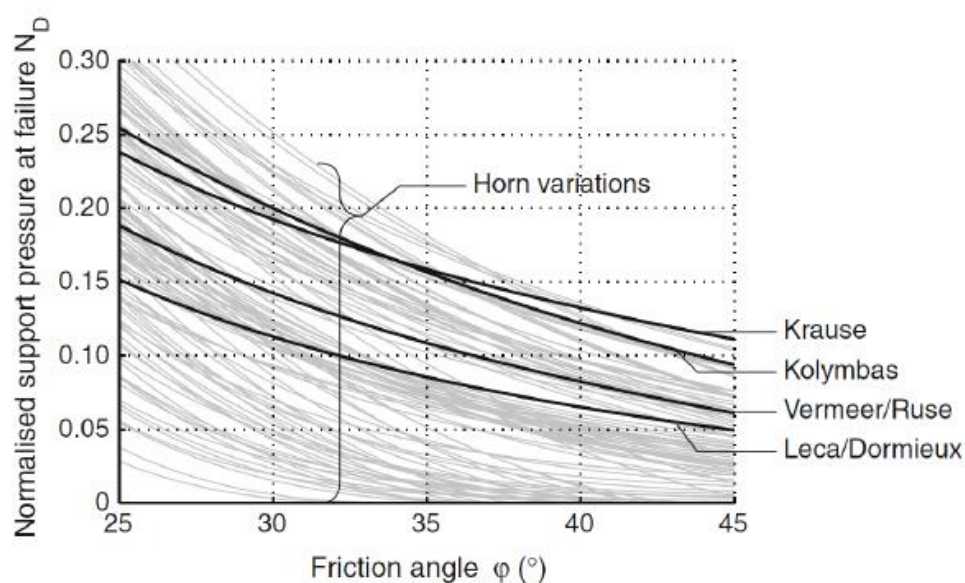


Σχ. 2-4. Δυνάμεις επί σφηνοειδούς αστοχίας μετώπου εκσκαφής (Kovari & Anagnostou, 1994)



Σχ. 2-5. Μηκομή (επάνω) και προοπτική (κάτω) απεικόνιση του προτεινόμενου μηχανισμού αστοχίας, βασισμένοι σε λογαριθμική σπείρα των Subrin & Wong (2002) για έδαφος με γωνία τριβής $\phi=20^\circ$

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος συχνά συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραματικών ή αριθμητικών προσεγγίσεων, ενώ έχουν δημοσιευτεί και εργασίες που επιχειρούν να συγκρίνουν τα αποτελέσματα διαφορετικών αναλυτικών προσεγγίσεων μεταξύ τους. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι Kirsch & Kolymbas (2005) και Kirsch (2009), οι οποίοι συνέκριναν διάφορες μεθοδολογίες προσδιορισμού της οριακής πίεσης μετώπου p_f για σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$ με υπερκείμενο $C=10\text{m}$ σε αμμώδη σχηματισμό ($c=0$) με $\gamma=18\text{kN/m}^3$, μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή $N_D = p_f/(\gamma D)$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταδεικνύουν μια σημαντική διασπορά στις προβλέψεις των μεθοδολογιών που συγκρίθηκαν, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 2-6):



Σχ. 2-6. Συσχέτιση του συντελεστή N_D και της γωνίας τριβής ϕ από διάφορες μεθοδολογίες (Kirsch, 2009)

2.3.3 Αριθμητικές προσεγγίσεις

Οι εργασίες που προσεγγίζουν αριθμητικά το πρόβλημα της ευστάθειας και της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του μετώπου αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια και είναι περιορισμένες σε αριθμό. Η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται μέσω των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων, διακριτών στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Χαρακτηριστικό του συνόλου των εργασιών που έχουν δημοσιευτεί είναι το γεγονός πως το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιείται είναι το Mohr-Coulomb, μέσω του οποίου για διάφορες τιμές των παραμέτρων του και των χαρακτηριστικών του εδάφους εκτιμάται η οριακή πίεση αντιστήριξης για κάθε περίπτωση, εξεταζόμενη από τους συγγραφείς.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου αφορούν την εξέλιξη της αστοχίας και το ρόλο της στη συνολική αξιοπιστία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα:

1. Από αναλύσεις αξιοπιστίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι η συνολική αξιοπιστία του συστήματος προκύπτει κυρίως από την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, ενώ η επίδραση της οριακής κατάστασης αστοχίας δεν είναι τόσο σημαντική. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει τη σημασία της εκτίμησης και αξιολόγησης του πεδίου των παραμορφώσεων μπροστά και πάνω από τη σήραγγα, ειδικά σε μικρά βάθη, ενώ παράλληλα το αναδεικνύει σε κρίσιμο παράγοντα για το σχεδιασμό.
2. Όσον αφορά την εξέλιξη της αστοχίας, παρατηρήθηκε ότι γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά η πίεση στο μέτωπο μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης του μετώπου και φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή (οριακή πίεση αντιστήριξης). Στη συνέχεια, η πίεση αυξάνει βαθμιαία με τη συνέχιση της μετακίνησης και τείνει προς μια σταθερή τιμή, η οποία ορίζεται ως παραμένουσα πίεση αντιστήριξης.
3. Οι τιμές της οριακής πίεσης αντιστήριξης αυξάνουν ελαφρώς με το βάθος, τείνοντας όμως σε μια σταθερή τιμή καθώς το βάθος αυξάνει.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως ακόμα δεν έχει διαδοθεί η χρήση των λεγόμενων «εξελιγμένων» (advanced) καταστατικών προσομοιωμάτων όπως το μοντέλο Cam-Clay, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία και αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται σε επόμενη παράγραφο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ CAM-CLAY

3.1 Μαθηματική διατύπωση του τροποποιημένου καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam Clay

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το καταστατικό μοντέλο Cam-Clay. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Cambridge (Roscoe and Schofield, 1963) και θεμελιώθηκε πάνω σε δεδομένα από συμβατικές δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, σε ισότροπα στερεοποιημένες αργίλους με βάση τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφεται το τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay (Modified Cam-Clay) (Roscoe and Burland, 1968), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ευστάθειας ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγας, που θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια.

Επιλέχθηκε, η παρουσίαση του Modified Cam Clay, να ακολουθήσει την συνήθη λογική της κατάστρωσης των εξισώσεων με βάση τη Γενικευμένη Θεωρία Πλαστικότητας. Βασικές εξισώσεις παρουσιάζονται τόσο στον χώρο μέσης ορθής τάσης (p) - διεκτροπικής τάσης (q) για λόγους καλύτερης κατανόησης των θεμελιωδών εννοιών του μοντέλου όσο και στον γενικευμένο χώρο των τάσεων (σ , s), όπου $\sigma=p$ η μέση ορθή τάση και s ο αποκλίνων ή διεκτροπικός τανυστής των τάσεων. Ταυτόχρονα με την κατάστρωση των εξισώσεων και όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο γίνεται αναφορά στην θεωρία κρίσιμης κατάστασης για να καταδειχθεί η σύνδεση του μοντέλου με την μηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

3.1.1 Επιφάνεια διαρροής

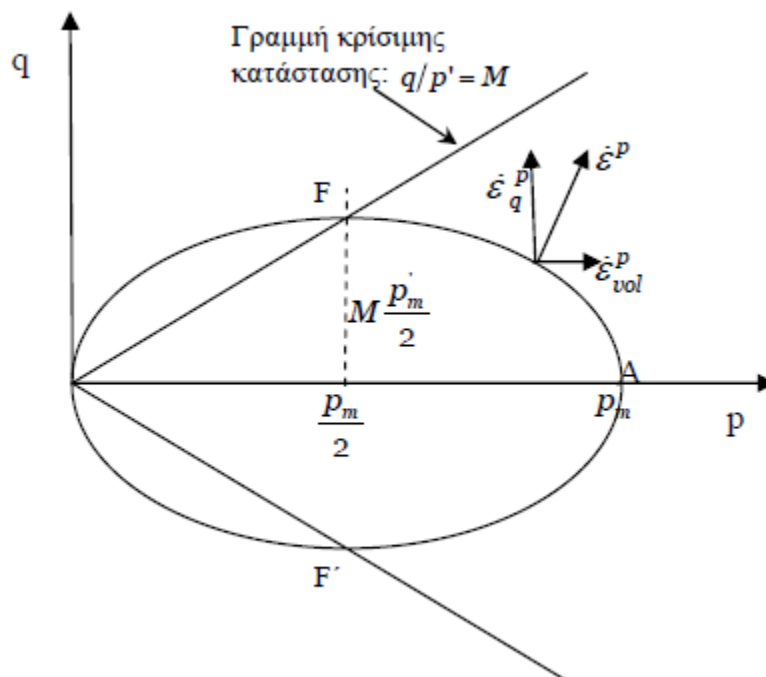
Η επιφάνεια διαρροής με βάση τη Γενικευμένη Θεωρία της Πλαστικότητας αποτελεί το όριο μεταξύ των εφικτών και των μη εφικτών καταστάσεων. Εντός της επιφάνειας διαρροής είναι οι ελαστικές καταστάσεις και επί της επιφάνειας οι πλαστικές. Καταστάσεις εκτός της επιφάνειας διαρροής δεν νοούνται καθώς κάθε επαύξηση των τάσεων η οποία οδηγεί εκτός της επιφάνειας διαρροής, συμπαρασύρει και την επιφάνεια διαρροής έτσι όπως περιγράφεται από το νόμο κράτυνσης του εκάστοτε μοντέλου.

Σύμφωνα με το Modified Cam - Clay η επιφάνεια διαρροής είναι μία έλλειψη στο επίπεδο p' - q της οποίας ο μεγάλος άξονας βρίσκεται επί του άξονα της μέσης ενεργού τάσης (Σχ. 3-1) και δίνεται από την εξίσωση:

$$f(p', q, v) \equiv q^2 + M^2 p'(p' - p'_m) = 0 \quad 3-1$$

Η εξίσωση 3-1 περιγράφει μια έλλειψη η οποία τέμνει τον άξονα p' στα σημεία 0 και p'_m . Επίσης, για $p' = p'_m/2$ από την εξίσωση της επιφάνειας διαρροής λαμβάνουμε $q = Mp'$, και αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο η έλλειψη τέμνει την γραμμή με κλίση M , δηλαδή τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης, σύμφωνα με τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης αποτελεί τον γεωμετρικό τόπο των εντατικών καταστάσεων που αντιστοιχούν σε μεγάλες παραμορφώσεις των εδαφικών υλικών υπό τριαξονική φόρτιση, ανεξαρτήτως του βαθμού στερεοποίησης αλλά και της φύσης της δοκιμής (στραγγισμένη ή αστράγγιστη). Εδάφη, τα οποία βρίσκονται επί της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, παραμορφώνονται υπό σταθερό όγκο (συνθήκες ισόογκης παραμόρφωσης).

Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό της επιφάνειας διαρροής, το οποίο συνδέεται με τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης, είναι ότι ο λόγος του μεγάλου προς τον μικρό άξονα της έλλειψης παραμένει σταθερός κατά την πλαστική παραμόρφωση και εξαρτάται από τη σταθερά M του υλικού. Συνεπώς, το σχήμα της επιφάνειας διαρροής εξαρτάται από τη σταθερά M και το μέγεθος της από την παράμετρο p'_m , η οποία αποτελεί και παράμετρο κράτυνσης του μοντέλου.



Σχ. 3-1. Η Επιφάνεια διαρροής του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam-Clay στο χώρο p' - q (Wood D. M. , 1990)

Η έλλειψη, που περιγράφεται από την εξίσωση διαρροής του Modified Cam-Clay, έχει βασιστεί στην επιφάνεια Roscoe η οποία, σύμφωνα με τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης, αντιπροσωπεύει τις τασικές διαδρομές κανονικά στερεοποιημένων αργίλων τόσο υπό στραγγισμένες όσο και υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Η εξίσωση 3-1 μπορεί να γενικευτεί στον εξαεδρικό χώρο των τάσεων και λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$f(\sigma', \mathbf{s}, a) \equiv \frac{1}{c^2} (\mathbf{s} : \mathbf{s}) + \sigma(2a - \sigma) = 0 \tag{3-2}$$

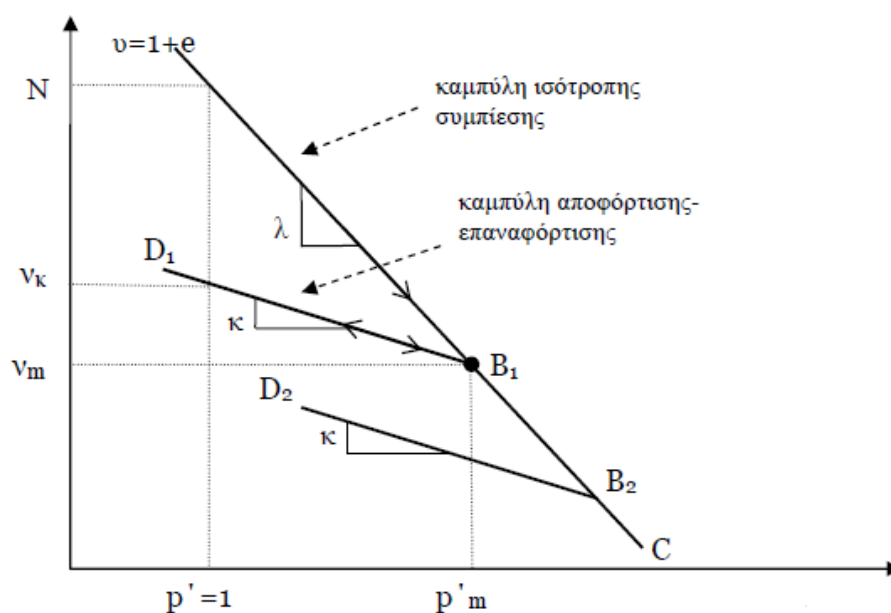
όπου a είναι η παράμετρος κράτυνσης και αντιστοιχεί στο κέντρο της έλλειψης $a = p'_m/2$ ενώ η σταθερά c αντιπροσωπεύει τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης στον γενικευμένο χώρο τάσεων και στην απλούστερη περίπτωση ισούται με $c = \sqrt{2/3}M$.

3.1.2 Ελαστική συμπεριφορά

Η ελαστική συμπεριφορά στο μοντέλο Cam-Clay περιγράφεται από τη θεωρία της ποροελαστικότητας. Η ελαστικότητα σε ένα καταστατικό προσομοίωμα περιγράφει την σχέση μεταξύ των ελαστικών παραμορφώσεων και τάσεων.

$$\Delta \sigma^e = \mathbf{C}^e : \Delta \varepsilon^e \tag{3-3}$$

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης, η συμπεριφορά ενός στοιχείου κατά την ισότροπη συμπίεση παρουσιάζεται σε διάγραμμα $v - \ln p'$, όπου v ο ειδικός όγκος του εδάφους ($v=1+e$), ενώ $\ln p'$ είναι ο φυσικός λογάριθμος της μέσης ενεργού τάσης (Σχ. 3-2):



Σχ. 3-2. Συμπεριφορά εδαφικού στοιχείου υπό ισότροπη συμπίεση στο επίπεδο $v - \ln p'$ (Atkinson J.H, Brandsby P.L. , 1977)

Η συμπεριφορά ενός εδαφικού στοιχείου κατά την κανονική ισότροπη συμπίεση περιγράφεται από την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης AC (normal consolidation line), ενώ η συμπεριφορά του κατά την αποφόρτιση - επαναφόρτιση περιγράφεται από μια

οικογένεια παράλληλων ευθειών $D_n B_n$ αριστερά της AC, οι οποίες ονομάζονται καμπύλες ισότροπης αποφόρτισης - επαναφόρτισης ή καμπύλες διόγκωσης.

Οι καταστάσεις δεξιά από την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης είναι μη εφικτές, συνεπώς η καμπύλη αυτή αποτελεί ένα όριο μεταξύ εφικτών και μη εφικτών καταστάσεων. Επιπλέον, ένα εδαφικό στοιχείο, του οποίου η κατάσταση περιγράφεται από ένα οποιοδήποτε σημείο της AC, θεωρείται ότι είναι κανονικά στερεοποιημένο και υπόκειται σε ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις εβρισκόμενο επί της επιφάνειας Roscoe και άρα επί της επιφάνειας διαρροής. Αντιθέτως, ένα εδαφικό στοιχείο, του οποίου η κατάσταση περιγράφεται από ένα οποιοδήποτε σημείο αριστερά της AC, θεωρείται υπερστερεοποιημένο και υπόκειται μόνο σε ελαστικές παραμορφώσεις. Τόσο η θέση, όσο και η κλίση των καμπύλων ισότροπης συμπίεσης και ισότροπης αποφόρτισης - επαναφόρτισης αποτελούν σταθερές του υλικού και προσδιορίζονται πειραματικά.

Η μαθηματική έκφραση της γραμμής ισότροπης συμπίεσης κανονικά στερεοποιημένων εδαφών είναι:

$$v = N - \lambda \ln p' \quad 3-4$$

όπου N η θέση (αντιστοιχεί στην τιμή του v υπό τάση $p'=1\text{kPa.}$), και λ η κλίση της γραμμής ισότροπης συμπίεσης.

Σε ότι αφορά τις καμπύλες ισότροπης αποφόρτισης - επαναφόρτισης, αυτές δεν ορίζονται με μοναδικό τρόπο, καθότι η θέση τους εξαρτάται από την μέγιστη τάση φόρτισης p_m' του εδαφικού στοιχείου. Για να ορίσουμε με έναν ενιαίο τρόπο την εξίσωση μίας οικογένειας καμπυλών αποφόρτισης ορίζουμε ως v_κ τον μοναδιαίο όγκο ενός υπερστερεοποιημένου εδαφικού στοιχείου για μέση ενεργό τάση $p'=1.0 \text{ kN/m}^2$. Επομένως οι καμπύλες ισότροπης αποφόρτισης - επαναφόρτισης μπορούν να περιγραφούν από την εξίσωση:

$$v = v_\kappa - \kappa \ln p' \quad 3-5$$

Από την εξίσωση 3-5 μπορούμε να προσδιορίσουμε μια σχέση για την εκάστοτε μέγιστη τάση φόρτισης p_m' του εδαφικού στοιχείου:

$$v = v_m - \kappa \ln \left(\frac{p'}{p_m'} \right) \quad 3-6$$

Το σημείο B_1 ταυτόχρονα ανήκει και στην καμπύλη ισότροπης συμπίεσης, συνεπώς συνδυάζοντας τις σχέσεις 3-4 και 3-6 έχουμε:

$$v = [N - (\lambda - \kappa) \ln p_m'] \Rightarrow p_m' = \exp \left(\frac{N - v - \kappa \ln p'}{\lambda - \kappa} \right) \quad 3-7$$

Συνεπώς, κατά την ελαστική συμπεριφορά, δηλαδή στο εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής, η μεταβολή του ειδικού όγκου μπορεί να προκύψει με παραγωγή της σχέσης 3-5:

$$\Delta v = \Delta v^e = -\kappa \frac{\Delta p'}{p'} \Rightarrow \Delta \varepsilon_{vol}^e = \frac{\kappa}{v} \frac{\Delta p'}{p'} = \frac{1}{K} \Delta p' \quad 3-8$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση 3-8, η μεταβολή της ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_{vol}^e$ είναι ευθέως ανάλογη της μεταβολής της μέσης ορθής τάσης $\Delta p'$ με το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K να προκύπτει:

$$K = \frac{v}{\kappa} p' \quad 3-9$$

Παρατηρούμε ότι το μέτρο ισότροπης συμπίεσης προκύπτει ανάλογο του ειδικού όγκου και αντιστρόφως ανάλογο της μέσης τάσης, που σημαίνει ότι ουσιαστικά εφαρμόζεται μη γραμμική ελαστικότητα.

Η μεταβολή της ελαστικής αποκλίνουσας παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_q^e$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \varepsilon_q^e = \frac{\Delta q'}{3G'} \quad 3-10$$

όπου G το μέτρο διατμήσεως. Επιλέγεται το μέτρο διάτμησης να εξαρτάται από το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K , θεωρώντας έναν σταθερό λόγο Poisson ν και με βάση τη γραμμική ισότροπη ελαστικότητα προκύπτει:

$$G = \frac{3(1-2\nu)K}{2(1+\nu)} \quad 3-11$$

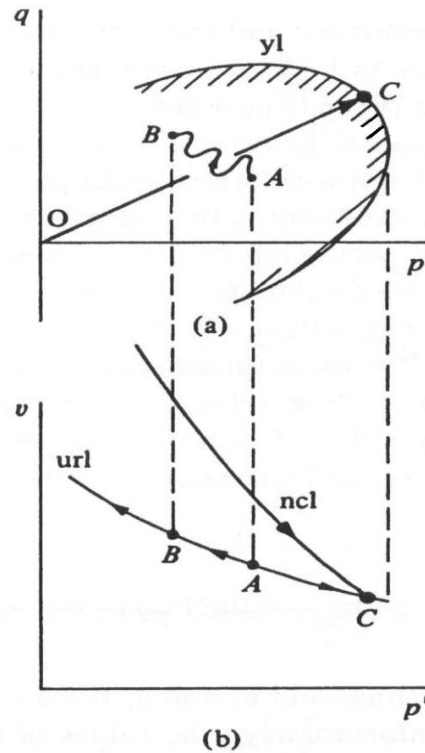
Έτσι το ελαστικό μητρώο λαμβάνει τη μορφή:

$$\mathbf{C}^e = \begin{Bmatrix} K \\ 3G \end{Bmatrix} \quad 3-12$$

στον χώρο $p' - q$ ενώ στον γενικευμένο χώρο των τάσεων είναι:

$$\mathbf{C}^e = \begin{Bmatrix} K \\ 2G \end{Bmatrix} \quad 3-13$$

Στο σχήμα 3-3 παρουσιάζεται μία ελαστική τασική διαδρομή (OC) στο χώρο $p'-q$ καθώς και η αντιστοιχία που υπάρχει με τον χώρο $v-p'$.



Σχ. 3-3. Καμπύλη ισότροπης συμπίεσης, επιφάνεια διαρροής σχετιζόμενα με την καμπύλη αποφόρτισης - επαναφόρτισης (Wood D. M. , 1990)

3.1.3 Πλαστικές παραμορφώσεις - Νόμος Ροής

Ο νόμος ροής καθορίζει τη διεύθυνση του συνισταμένου διανύσματος επαύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων, το οποίο συνθέτουν οι δύο συνιστώσες της παραμόρφωσης, η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση $\Delta \varepsilon_{vol}^P$ και η πλαστική διατμητική παραμόρφωση $\Delta \varepsilon_q^P$.

Το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam-Clay χρησιμοποιεί συσχετισμένο νόμο ροής, πράγμα που σημαίνει ότι το διάνυσμα επαύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων είναι κάθετο στην επιφάνεια διαρροής και δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta \varepsilon^P = \Lambda \mathbf{P} = \Lambda \left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right) \quad 3-14$$

όπου Λ ο δείκτης φόρτισης και \mathbf{P} ο τανυστής πλαστικού δυναμικού ο οποίος λόγω συσχετισμένου νόμου ροής συμπίπτει με τον τανυστή $\mathbf{Q} = \left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)$. Ο τανυστής \mathbf{P} φανερώνει την κατεύθυνση της επαύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων ενώ ο δείκτης φόρτισης Λ εκφράζει το μέτρο της μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων και δίνεται από τη σχέση:

$$\Lambda = \frac{1}{K_p} (\mathbf{Q} : \Delta \boldsymbol{\sigma}) \quad 3-15$$

όπου K_p το πλαστικό μέτρο, το οποίο θα προσδιορισθεί σε επόμενη παράγραφο με χρήση της συνθήκης συμβατότητας.

Η εξίσωση 3-14 η οποία δίνει την μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων, στον χώρο p' - q λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \varepsilon_{vol}^p = L \frac{\partial f}{\partial p'} = M^2 (2p' - p'_m) = \left(M^2 p' - \frac{q^2}{p'} \right) L \quad 3-16$$

$$\Delta \varepsilon_q^p = L \frac{\partial f}{\partial q} = 2qL \quad 3-17$$

Συνεπώς διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 3-16 και 3-17 προκύπτει ότι ο συσχετισμένος νόμος ροής του Modified Cam - Clay προβλέπει την ακόλουθη πλαστική διαστολικότητα:

$$\frac{1}{d_p} = \frac{\Delta \varepsilon_p^p}{\Delta \varepsilon_q^p} = \frac{1}{2} \left(M^2 \frac{p'}{q} - \frac{q}{p'} \right) \quad 3-18$$

3.1.4 Νόμος κράτνσης

Ο νόμος κράτνσης περιγράφει την μεταβολή της θέσης και του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Καθορίζει, δηλαδή, τον τρόπο μεταβολής των παραμέτρων κράτνσης \mathbf{q}_n του υλικού ενός εδαφικού στοιχείου όταν του επιβάλλουμε μια πλαστική μεταβολή έντασης $\boldsymbol{\sigma}$. Γενικά ο νόμος κράτνσης ενός καταστατικού προσομοιώματος δίνεται να περιέχει συνιστώσες κινηματικής κράτνσης (μεταβολή του σχήματος της επιφάνειας διαρροής) καθώς και συνιστώσες ιστροπικής κράτνσης (μεταβολή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής).

Το καταστατικό προσομοίωμα Cam - Clay δεν έχει κινηματική συνιστώσα κράτνσης, καθώς η έλλειψη παραμένει προσανατολισμένη πάντα στον ισότροπο άξονα, ενώ σε ότι αφορά την μεταβολή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής έχει ένα μόνο βαθμό ελευθερίας, καθώς ο λόγος του μικρού προς το μεγάλο άξονα της επιφάνειας διαρροής παραμένει σταθερός (M). Συνεπώς έχει μόνο μία παράμετρο ιστροπικής κράτνσης η οποία όπως έχει προαναφερθεί είναι η μέση τάση ισότροπης στερεοποίησης του εδαφικού στοιχείου p'_m στο χώρο p' - q (ή αντίστοιχα η παράμετρος a στο γενικευμένο χώρο των τάσεων).

Η τιμή της παραμέτρου κράτνσης p'_m στην αρχική κατάσταση του εδαφικού στοιχείου, πριν την έναρξη της διαρροής συμφωνά με την εξίσωση 3-7 είναι:

$$p'_m = \exp \left(\frac{N - v - \kappa \ln p'}{\lambda - \kappa} \right)$$

Από την εξίσωση της καμπύλης ισότροπης συμπίεσης υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του εδαφικού στοιχείου για μια ελαστοπλαστική τασική διαδρομή:

$$v = N - \lambda \ln p'_m \Rightarrow \Delta v = -\lambda \frac{\Delta p'_m}{p'_m} \quad 3-19$$

Ομοίως από την εξίσωση της καμπύλης αποφόρτισης - επαναφόρτισης και για την ίδια μεταβολή του μεγέθους της παραμέτρου κράτυνσης μπορούμε να υπολογίσουμε την ελαστική συνιστώσα της ογκομετρικής παραμόρφωσης:

$$v = v_\kappa - \kappa \ln p'_m \Rightarrow \Delta v^e = -\kappa \frac{\Delta p'_m}{p'_m} \quad 3-20$$

Επίσης ξέρουμε ότι: $\Delta v^p = -v \Delta \varepsilon_{vol}^p$ και ταυτόχρονα χωρίζοντας τις παραμορφώσεις σε ελαστικές και πλαστικές προκύπτει:

$$\begin{aligned} \Delta v &= \Delta v^e + \Delta v^p \Rightarrow -\lambda \frac{\Delta p'_m}{p'_m} = -\kappa \frac{\Delta p'_m}{p'_m} - v \Delta \varepsilon_{vol}^p \\ \Rightarrow \Delta p'_m &= \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} p'_m \right) \Delta \varepsilon_{vol}^p = \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} p'_m \right) \Lambda \frac{\partial f}{\partial p} \end{aligned} \quad 3-21$$

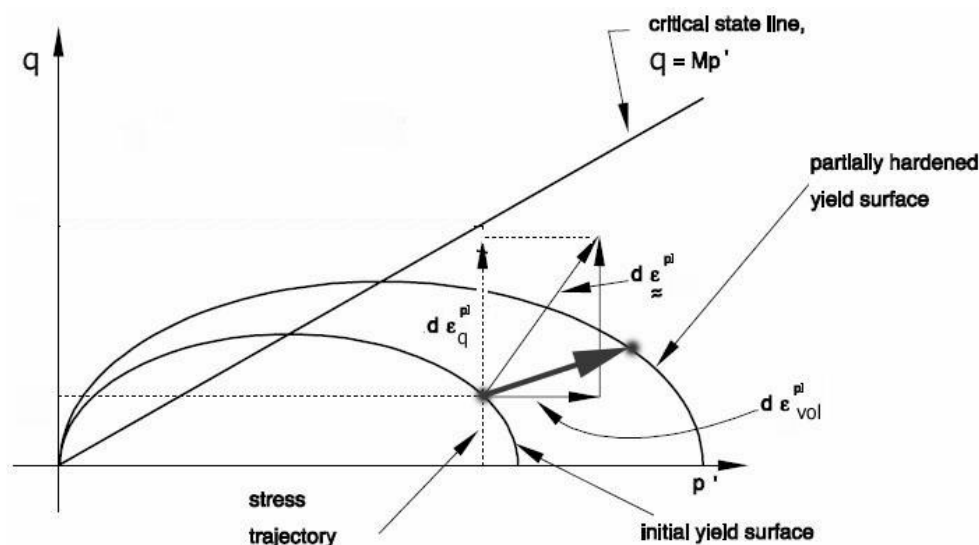
Η εξίσωση 3-21 αποτελεί την μαθηματική έκφραση του κανόνα ισότροπης συμπίεσης του μοντέλου Cam-Clay. Αντίστοιχα και στο γενικευμένο χώρο των τάσεων η παράμετρος κράτυνσης a περιγράφεται ως εξής:

$$\Delta a = \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} a \right) \Delta \varepsilon_{vol}^p = \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} a \right) \Lambda P \quad 3-22$$

3.1.5 Συνθήκη συμβατότητας - Πλαστικό μέτρο K_p και ελαστοπλαστικό μητρώο στιβαρότητας.

Για την ολοκληρωμένη μαθηματική περιγραφή του καταστατικού προσομοιώματος απομένει ο προσδιορισμός του πλαστικού μέτρου K_p , το οποίο συνδέεται με το μέγεθος της μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων του εδαφικού στοιχείου και προσδιορίζεται από την συνθήκη συμβατότητας.

Κατά την πλαστική παραμόρφωση ενός εδαφικού στοιχείου που βρίσκεται σε μια δεδομένη εντατική κατάσταση $f(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}_n) = 0$ πάνω στην επιφάνεια διαρροής, η όποια μεταβολή των τάσεων γίνεται επί της επιφάνειας διαρροής. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή των τάσεων $\Delta \boldsymbol{\sigma}'$ συνοδεύεται από μια αντίστοιχη μεταβολή των παραμέτρων κράτυνσης, με αποτέλεσμα η επιφάνεια διαρροής να μεταβάλλεται έτσι ώστε η νέα εντατική κατάσταση να βρίσκεται επί της νέας θέσης της επιφάνειας διαρροής.



Σχ. 3-4. Κράτνση επιφάνειας διαρροής μοντέλου Cam-Clay

Μαθηματικά η συνθήκη συμβατότητας μεταφράζεται ως εξής:

$$\Delta f = 0 \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \Delta \sigma' + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}_n} : \Delta \mathbf{q}_n = 0 \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \Delta \sigma' + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}_n} (\mathbf{R} : \Delta \epsilon^p) = 0 \quad 3-23$$

Όμως σύμφωνα με το νόμο ροής (σχέσεις 3-14 & 3-15):

$$\Delta \epsilon^p = \Lambda \mathbf{P} = \frac{1}{K_p} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \Delta \sigma' \right) \mathbf{P} \quad 3-24$$

Οπότε προκύπτει ότι το πλαστικό μέτρο κράτνσης είναι :

$$K_p = - \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}_n} (\mathbf{R} : \mathbf{P}) \quad 3-25$$

Από το νόμο κράτνσης όπως αυτός διατυπώθηκε στο χώρο p' - q (εξίσωση 3-21) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\Delta \mathbf{q}_n = \mathbf{R} : \Delta \epsilon^p$ προκύπτει ότι ο ταυιστής \mathbf{R} έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{R} = \left(-\frac{v}{\lambda - \kappa} p'_m, 0 \right) \quad 3-26$$

Επιπρόσθετα λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}_n} = \frac{\partial f}{\partial p'_m} = -M^2 p' \quad 3-27$$

και

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} = \left(\frac{\partial f}{\partial p'}, \frac{\partial f}{\partial q} \right) = \left(M^2 (2p - p_m), 2q \right) \quad 3-28$$

προκύπτει ότι το πλαστικό μέτρο K_p δίνεται από τη σχέση:

$$K_p = \frac{V}{\lambda - \kappa} M^4 p' p'_m (2p' - p'_m) \quad 3-29$$

Αντίστοιχα στον γενικευμένο χώρο των τάσεων προκύπτει ότι:

$$K_p = 4 \frac{V}{\lambda - \kappa} \sigma a (\sigma - a) \quad 3-30$$

Από τη σχέση 3-29 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' > p'_m/2$ το καταστατικό σημείο βρίσκεται κάτω από τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης και το ελαστοπλαστικό μέτρο κράτνσης είναι θετικό. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό υφίσταται πλαστική κράτνση, άρα η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται και αναπτύσσονται θετικές πλαστικές παραμορφώσεις (συμπίεση).
2. Για καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' < p'_m/2$ το καταστατικό σημείο βρίσκεται πάνω από τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης και το ελαστοπλαστικό μέτρο κράτνσης είναι αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό υφίσταται πλαστική χαλάρωση, άρα η επιφάνεια διαρροής συστέλλεται και αναπτύσσονται αρνητικές πλαστικές παραμορφώσεις (διόγκωση).
3. Για καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' = p'_m/2$ το καταστατικό σημείο βρίσκεται επί της γραμμής κρίσιμης κατάστασης και το ελαστοπλαστικό μέτρο κράτνσης είναι μηδέν. Οι καταστάσεις αυτές αντιστοιχούν σε καταστάσεις αστοχίας και είναι σημεία της κορυφής της έλλειψης.

Τέλος απαραίτητη για την εφαρμογή ενός καταστατικού προσομοιώματος σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι αφενός ο υπολογισμός μιας μορφής του δείκτη φόρτισης Λ η οποία να εξαρτάται από την μεταβολή των παραμορφώσεων αντί των τάσεων, καθώς αυτές είναι γνωστές στην αρχή κάθε βήματος επίλυσης των καταστατικών εξισώσεων, και αφετέρου ο υπολογισμός ενός ελαστοπλαστικού μητρώου (Jacobian) το οποίο χρησιμοποιείται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων στην μόνωση του συνολικού μητρώου στιβαρότητας της κατασκευής.

Έχουμε ότι:

$$\mathbf{Q} : \Delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad 3-31$$

Με χρήση των σχέσεων 3-14 & 3-15 μπορούμε να γράψουμε:

$$\Lambda : K_p = \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Lambda \mathbf{P}) \quad 3-32$$

και τελικώς λύνοντας ως προς Λ προκύπτει:

$$\Lambda = \frac{\mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}}{\mathbf{K}_p + \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \mathbf{P}} \quad 3-33$$

όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση λόγω του συσχετισμένου νόμου ροής που υιοθετείται στο Modified Cam - Clay μπορεί να γραφεί και ως:

$$\Lambda = \frac{\mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}}{\mathbf{K}_p + \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \mathbf{Q}} \quad 3-34$$

Τέλος, το ελαστοπλαστικό μητρώο δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{C}^{ep} = \left(\mathbf{C}^e - \frac{1}{\Omega} (\mathbf{C}^e : \mathbf{P}) \otimes (\mathbf{Q} : \mathbf{C}^e) \right) \quad 3-35$$

όπου:

$$\Omega = \mathbf{K}_p + \mathbf{Q} : \mathbf{C}^e : \mathbf{P} \quad 3-36$$

3.2 Αντοχή του εδάφους

Η έννοια της αντοχής του εδάφους είναι συνήθως συνδεδεμένη με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Συνεπώς μια συσχέτιση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με το τροποποιημένο μοντέλο Cam-Clay μπορεί να μας προσφέρει μια σύγκριση των προβλέψεων των δύο κριτηρίων αστοχίας, ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση της διερεύνησης της ευστάθειας ανυποστήρικτου μετώπου όπου οι περισσότερες εργασίες βασίζονται στον κριτήριο Mohr-Coulomb.

3.2.1 Συσχέτιση κριτηρίων αστοχίας Mohr-Coulomb και Cam-Clay

Το κριτήριο αστοχίας του Mohr-Coulomb δίνεται από τη σχέση:

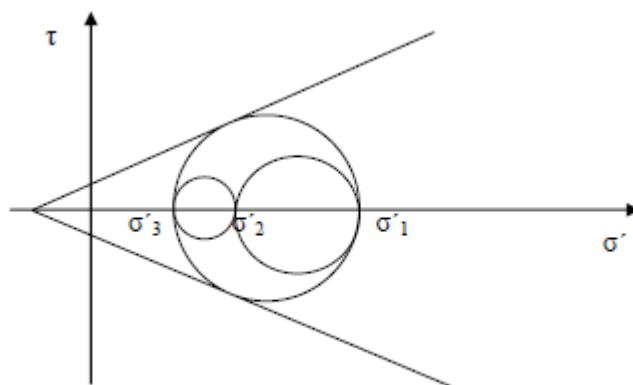
$$\tau = \pm (c + \sigma' \tan \phi) \quad 3-37$$

όπου ϕ είναι η γωνία τριβής του εδάφους και c η συνοχή του.

Σε όρους κυρίων τάσεων το κριτήριο Mohr-Coulomb μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\frac{\sigma'_1 + c' \cot \phi}{\sigma'_3 + c' \cot \phi} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad 3-38$$

όπου σ'_1 και σ'_3 η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα.



Σχ. 3-5. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο σ' - τ (Wood D. M. , 1990)

Η εξίσωση 3-38 μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της μέσης ενεργού τάσης p' και της αποκλίνουσας τάσης q .

Εάν θεωρήσουμε συνθήκες τριαξονικής θλίψης, δηλαδή $\sigma'_2 = \sigma'_3$ τότε για τη μέση ενεργό τάση p' και την αποκλίνουσα τάση q ισχύει:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad 3-39$$

και

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad 3-40$$

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση 3-38 γίνεται:

$$\frac{q}{p' + c' \cot \phi} = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad 3-41$$

Αντίστοιχα εάν θεωρήσουμε συνθήκες τριαξονικού εφελκυσμού, δηλαδή $\sigma'_2 = \sigma'_1$ τότε για τη μέση ενεργό τάση p' και την αποκλίνουσα τάση q ισχύει:

$$p' = \frac{2\sigma'_1 + \sigma'_3}{3} \quad \text{και} \quad q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad 3-42$$

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση 3-38 γίνεται:

$$\frac{q}{p' + c' \cot \phi} = \frac{-6 \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad 3-43$$

Όπως προαναφέρθηκε, η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης που ορίζει τις κρίσιμες καταστάσεις στο μοντέλο Cam-Clay περιγράφεται στον χώρο p' - q από την εξίσωση:

$$\frac{q}{p'} = M \quad 3-44$$

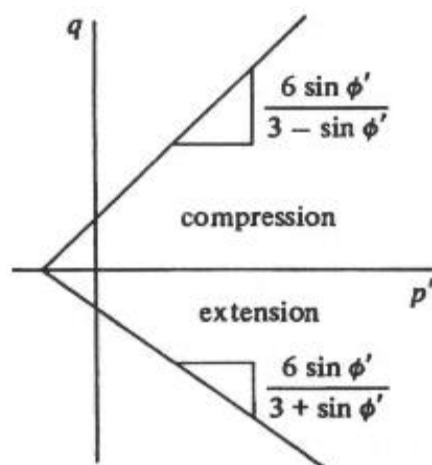
Συνδυάζοντας για την περίπτωση της τριαξονικής θλίψης τις σχέσεις 3-41 και 3-44 παρατηρούμε ότι συμφωνά με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης το έδαφος αστοχεί για μηδενική συνοχή ($c'=0$). Άρα θέτοντας στην σχέση 3-41 $c'=0$ παίρνουμε μία

σχέση μεταξύ της κλίσης της γραμμής της κρίσιμης κατάστασης M και της γωνίας τριβής του υλικού ϕ :

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad \text{ή} \quad \sin \phi = \frac{3M}{6 + M} \quad 3-45$$

Αντίστοιχα, για την περίπτωση του τριαξονικού εφελκυσμού η σχέση μεταξύ της παραμέτρου M και της γωνίας τριβής ϕ γίνεται:

$$M^* = \frac{6 \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad \text{ή} \quad \sin \phi = \frac{3M^*}{6 - M^*} \quad 3-46$$



Σχ. 3-6. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο p' - q (Wood D. M. , 1990)

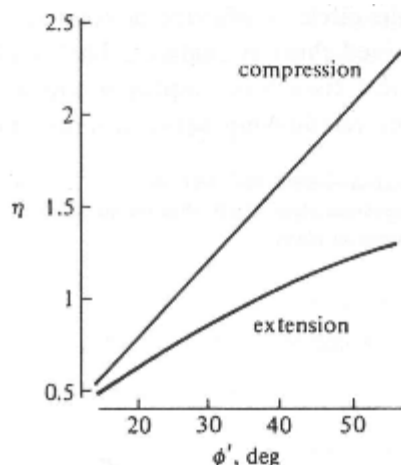
Από τις σχέσεις 3-45 & 3-46 παρατηρούμε ότι οι σχέσεις που συνδέουν τη γωνία τριβής ϕ με την παράμετρο M δεν ταυτίζονται για τις περιπτώσεις τριαξονικής θλίψης και τριαξονικού εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία εκ των δύο σταθερών μεταβάλλεται στις δύο παραπάνω περιπτώσεις. Πειραματικά δεδομένα (Gens, 1982) έδειξαν ότι η γωνία τριβής παραμένει σταθερή τόσο κατά τον εφελκυσμό, όσο και κατά την θλίψη. Συνεπώς θεωρούμε ότι η τιμή του M είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις.

Προσεγγιστικά, απλοποιώντας τις ανωτέρω σχέσεις μπορούμε να θεωρήσουμε και ότι στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης το M δίνεται από τη σχέση:

$$M \approx \frac{\phi}{25} \quad 3-47$$

ενώ, στην περίπτωση του τριαξονικού εφελκυσμού, από τη σχέση:

$$M^* \approx \frac{\phi}{35} \quad 3-48$$

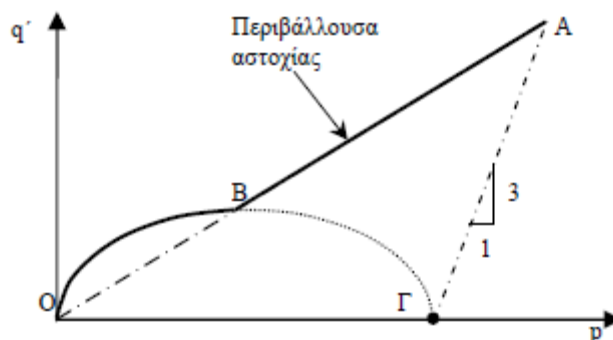


Σχ. 3-7. Σχέση μεταξύ του λόγου των τάσεων $\eta=q/p'$ και της γωνίας τριβής ϕ κατά την τριαξονική συμπίεση και εφέλκυσμό (Wood D. M. , 1990)

3.2.2 Περιβάλλουσα αστοχίας του μοντέλου Cam-Clay

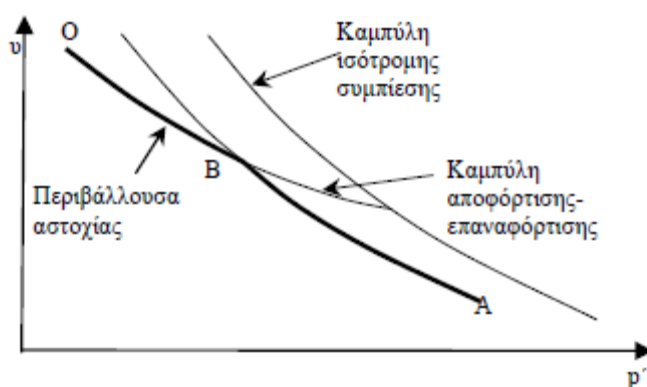
Με βάση τις προβλέψεις του καταστατικού προσομοιώματος modified Cam-Clay και σύμφωνα με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης όλες οι δοκιμές υπό συνεχή αυξανόμενη φόρτιση καταλήγουν στη γραμμή της κρίσιμης κατάστασης αστοχίας, όπου έχουμε ανάπτυξη άπειρων διατμητικών παραμορφώσεων υπό σταθερό όγκο και ενεργές τάσεις. Ωστόσο, στην περίπτωση της στραγγισμένης δοκιμής των έντονα υπερστερεοποιημένων αργίλων, στην διαδρομή των τάσεων παρατηρείται μια μέγιστη τιμή, η οποία βρίσκεται πάνω από τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης και κατόπιν χαλάρωση του υλικού μέχρι την γραμμή κρίσιμης κατάστασης.

Για τον προσδιορισμό της περιβάλλουσας αστοχίας του μοντέλου Cam-Clay διεξάγονται μια σειρά δοκιμών σε εδαφικά δοκίμια διαφορετικού δείκτη υπερστερεοποίησης (OCR) αλλά ίδιας μέσης τάσης ισότροπης στερεοποίησης p'_m . Η επιφάνεια αστοχίας, στην περίπτωση αυτή, θα αποτελείται από δύο τμήματα στο επίπεδο p' - q . Το πρώτο τμήμα ταυτίζεται με τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης (Σχ. 3-8, περιοχή AB) και αντιπροσωπεύει τον γεωμετρικό τόπο των σημείων αστοχίας των κανονικά στερεοποιημένων και των ελαφρώς υπερστερεοποιημένων αργίλων ($OCR < 2$), όπου σύμφωνα και με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης η συνοχή του εδάφους θεωρείται μηδενική ($c'=0$). Το δεύτερο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας (Σχ. 3-8, περιοχή OB) αντιπροσωπεύει το γεωμετρικό τόπο των έντονα υπερστερεοποιημένων αργίλων ($OCR > 2$).



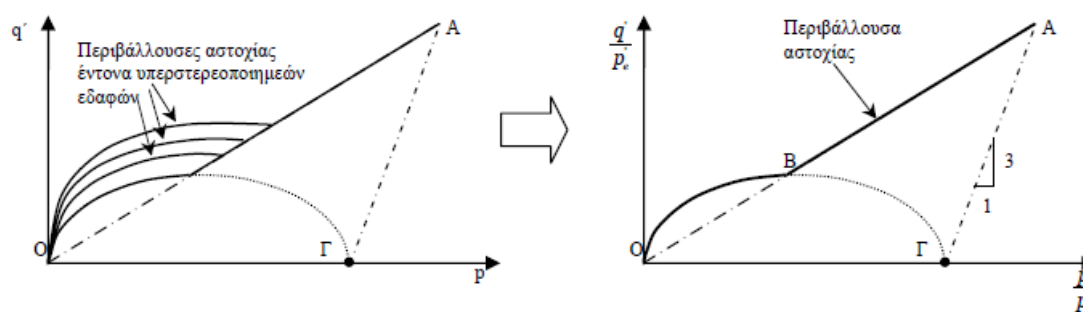
Σχ. 3-8. Περιβάλλουσα αστοχίας μοντέλου Cam-Clay στο επίπεδο p' - q (Wood D. M. , 1990)

Αντίστοιχα, στο επίπεδο p' - v ο γεωμετρικός τύπος αστοχίας των κανονικά στερεοποιημένων και ελαφρώς υπερστερεοποιημένων αργίλων είναι η γραμμή κρίσιμης κατάστασης (Σχ. 3-9, περιοχή AB), ενώ η επιφάνεια αστοχίας των έντονα υπερστερεοποιημένων αργίλων ταυτίζεται με την καμπύλη αποφόρτισης-επαναφόρτισης (Σχ. 3-9, περιοχή OB).



Σχ. 3-9. περιβάλλουσα αστοχίας μοντέλου Cam-Clay στο επίπεδο p' - v (Wood D. M. , 1990)

Η περιβάλλουσα αστοχίας που των σχημάτων Σχ. 3-8 και Σχ. 3-9 προέκυψε για μια συγκεκριμένη τιμή της μέσης τάσης ισότροπης στερεοποίησης p'_m . Αντίστοιχες δοκιμές με διαφορετικό p'_m θα μας δώσουν μια οικογένεια περιβαλλουσών αστοχίας, στην οποία η περιοχή αστοχίας των κανονικά στερεοποιημένων αργίλων είναι προφανώς κοινή, αφού ταυτίζεται με την γραμμή κρίσιμης κατάστασης που είναι σταθερή για συγκεκριμένο εδαφικό υλικό. Η περιοχή αστοχίας των έντονα υπερστερεοποιημένων αργίλων όμως μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της μέσης τάσης ισότροπης στερεοποίησης p'_m (Σχ. 3-10, 1^ο διάγραμμα). Για να προκύψει μία ενιαία περιβάλλουσα αστοχίας, ανεξάρτητα από την τιμή του p'_m μπορούμε να αδιαστατοποιήσουμε τη μέση ενεργό τάση p' και την αποκλίνουσα τάση q διαιρώντας και τις δύο με την ισοδύναμη μέση συμπίεση p'_e , απ' όπου προκύπτει μία μοναδική περιβάλλουσα αστοχίας (Σχ. 3-10, 2^ο διάγραμμα).



Σχ. 3-10. Κανονικοποίηση περιβάλλουσας αστοχίας μοντέλου Cam-Clay (Wood D. M. , 1990)

3.3 Εισαγωγή του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam Clay στο ABAQUS

Το τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam - Clay εισήχθη στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus με σκοπό την εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων για την διερεύνηση της ευστάθειας ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγας. Για την εισαγωγή του καταστατικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα UMAT η οποία παρέχεται από το Abaqus για τον σκοπό αυτό.

Η υπορουτίνα UMAT στην ουσία χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή παραμέτρων και δεδομένων μεταξύ του κυρίως προγράμματος και ενός αλγορίθμου επίλυσης των καταστατικών εξισώσεων, η σύνταξη του οποίου, είναι ευθύνη του χρήστη. Τόσο η υπορουτίνα UMAT όσο και ο αλγόριθμος επίλυσης των καταστατικών εξισώσεων συντάσσεται σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Απλοποιητικά, η διαδικασία επίλυσης η οποία ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

1. Μέσω της υπορουτίνας UMAT δίνονται από το Abaqus σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης: α) η τρέχουσα τασική κατάσταση, β) οι τρέχουσες τιμές των παραμέτρων κράτυνσης καθώς και γ) μια επαύξηση (μεταβολή) των παραμορφώσεων.
2. Ο αλγόριθμος επίλυσης των καταστατικών εξισώσεων χωρίζει την μεταβολή των παραμορφώσεων σε ένα αρκούντως μικρό μέγεθος το οποίο να μπορεί να θεωρηθεί απειροστό.
3. Ξεκινάει μία βηματική, επαυξητική διαδικασία επίλυσης των καταστατικών εξισώσεων βασισμένη σε έναν αλγόριθμο εμπρόσθιας ολοκλήρωσης (explicit integration), η οποία χωρίζει το βήμα επαύξησης των παραμορφώσεων σε ελαστική και πλαστική συνιστώσα και υπολογίζει: α) τις νέες τιμές των τάσεων, β) των παραμέτρων κράτυνσης καθώς και γ) το ελαστοπλαστικό μητρώο (Jacobian).

4. Τα παραπάνω υπολογιζόμενα μεγέθη επιστρέφονται μέσω της UMAT στον κυρίως κώδικα ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία επίλυσης μέχρι την επίτευξη σύγκλισης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαδικασία γίνεται σε όλα τα σημεία ολοκλήρωσης των τάσεων για κάθε βήμα και υποβήμα υπολογισμού που εκτελεί το Abaqus.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΚΟΠΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Σκοπός της αριθμητικής διερεύνησης.

4.1.1 Γενικά

Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιούνται στην παρούσα διπλωματική είναι η διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ του βαθμού ευστάθειας ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής σήραγγας με την έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής. Η έκθλιψη, η οριζόντια δηλαδή μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής, η οποία οφείλεται στην αποτόνωση των οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ως αποτέλεσμα της διάνοιξης της σήραγγας, ξεκινά σε κάποια θέση μπροστά από το μέτωπο, σε απόσταση ίση με την απόσταση επιρροής της εκσκαφής, αυξάνεται καθώς η διάνοιξη της σήραγγας εξελίσσεται και φτάνει στην μέγιστη και τελική της τιμή όταν το μέτωπο φτάσει σε αυτή τη θέση. Στόχος, λοιπόν, της αριθμητικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι ο υπολογισμός της έκθλιψης ανυποστήρικτου μετώπου σήραγγας για διάφορους συνδυασμούς γεωτεχνικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών εκσκαφής με σκοπό να αποτιμηθεί η ευστάθειά του σε όρους παραμορφωσιακούς όπως έχει προταθεί από τον Προυντζόπουλος (2011).

4.1.2 Υπολογισμός μέσης έκθλιψης

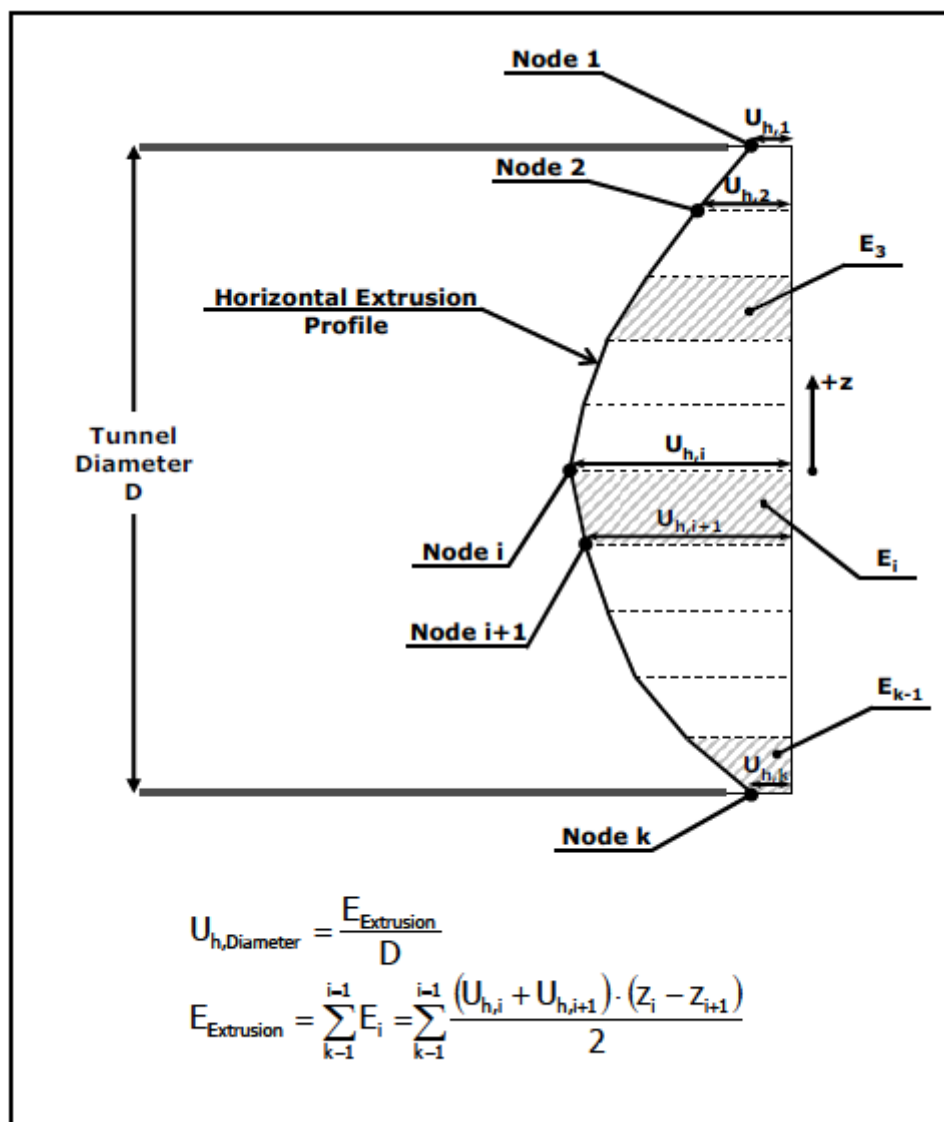
Για την εκτίμηση της ευστάθειας του μετώπου σε όρους μετακινήσεων είναι προφανές ότι απαιτείται ένας αξιόπιστος τρόπος περιγραφής και αποτίμησης της συνολικής έκθλιψης του μετώπου. Ο Προυντζόπουλος (2011) πρότεινε τις ακόλουθες τρεις μεθοδολογίες έκφρασης της έκθλιψης του μετώπου:

- Ως η οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής ($U_{h, \text{Centre}}$), η οποία αποτελεί την απλούστερη έκφραση της έκθλιψης και λαμβάνεται μέσω αριθμητικών αναλύσεων ως η οριζόντια μετακίνηση του κόμβου που βρίσκεται στο κέντρο του μετώπου εκσκαφής.
- Ως η μέση οριζόντια μετακίνηση καθ' ύψος της κατακόρυφης διαμέτρου της σήραγγας ($U_{h, \text{Diameter}}$), η οποία αποτελεί ένα ενδεικτικό μέγεθος του προφίλ της έκθλιψης του μετώπου. Η τιμή της, προκύπτει διαιρώντας το εμβαδόν του προφίλ της έκθλιψης του μετώπου με τη διάμετρο της

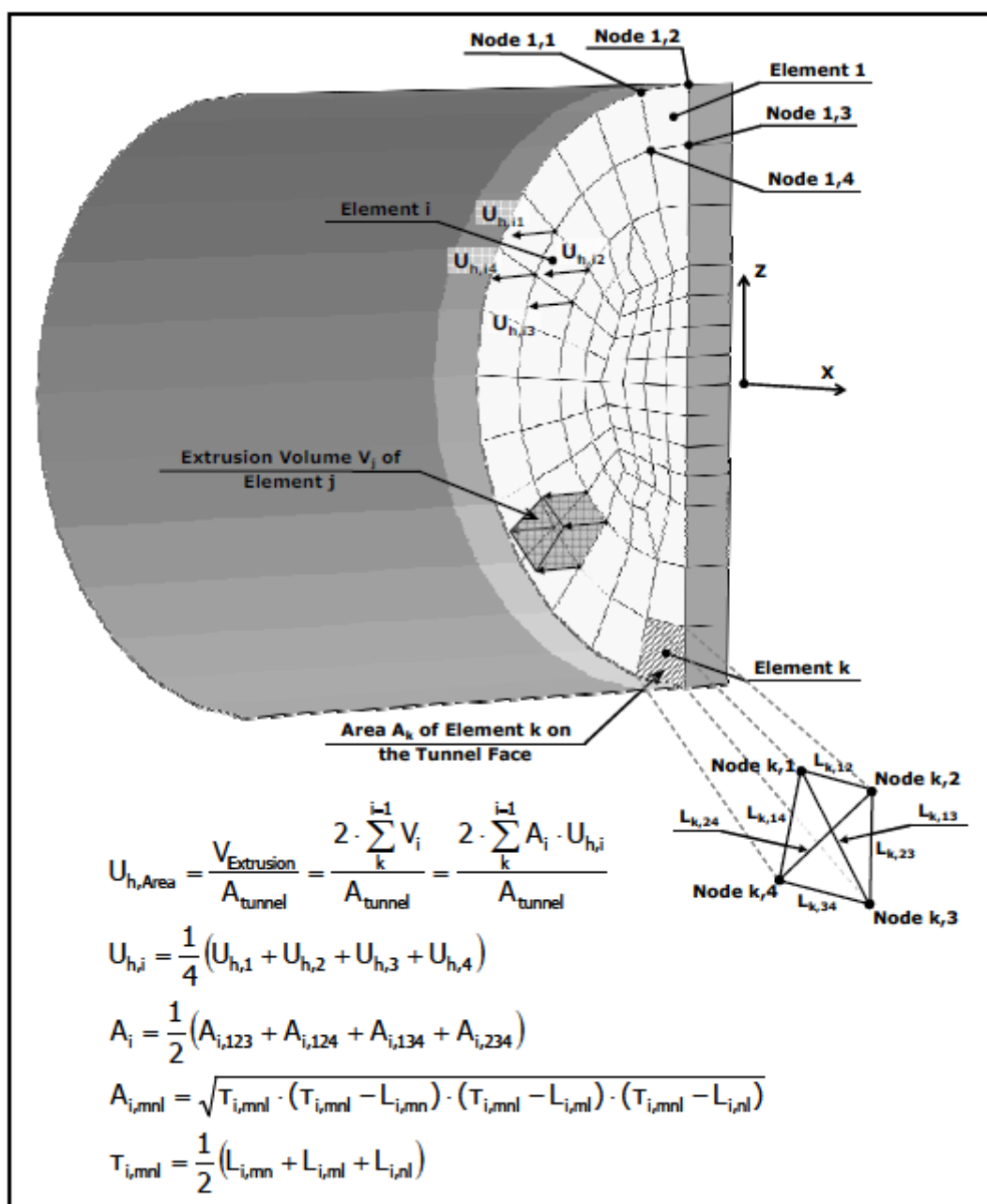
σήραγγας. Συνοπτική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της $U_{h,Diameter}$ δίνεται στο Σχ. 4-1.

- Ως η μέση οριζόντια μετακίνηση σε όλη τη διατομή του μετώπου της σήραγγας ($U_{h,Area}$). Προκύπτει υπολογίζοντας το συνολικό όγκο $V_{extrusion}$ της έκθλιψης και διαιρώντας τον με το εμβαδόν της επιφάνειας του μετώπου. Ο όγκος της έκθλιψης υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους όγκων V_i κάθε στοιχείου του μετώπου. Κάθε επιμέρους όγκος V_i υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια του στοιχείου A_i με το μέσο όρο $U_{h,i}$ των οριζόντιων μετακινήσεων στους 4 κόμβους του στοιχείου επί του μετώπου. Η επιφάνεια A_i του στοιχείου υπολογίζεται ως το ημιάθροισμα των εμβαδών των 4 τριγώνων που ορίζονται από τους 4 κόμβους του στοιχείου. Για κάθε επιμέρους τρίγωνο ο υπολογισμός του εμβαδού γίνεται χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των κόμβων του (για να υπολογιστεί το μήκος των πλευρών του) και εφαρμόζοντας τον τύπο του Ήρωνα. Συνοπτική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της $U_{h,Area}$ παρουσιάζεται στο Σχ. 4-2.

Στην παρούσα διπλωματική, τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν εκφράστηκαν και με τις τρεις παραπάνω μεθοδολογίες απεικόνισης της έκθλιψης του μετώπου, ωστόσο παρουσιάζονται μόνο αυτά που αφορούν στην μέση οριζόντια μετακίνηση όλου του μετώπου $U_{h,Area}$, καθώς θεωρούνται τα πλέον αντιπροσωπευτικά της συνολικής παραμορφωσιακής κατάστασης στο μέτωπο εκσκαφής και κατ' επέκταση τα πλέον αντιπροσωπευτικά για την εκτίμηση της ευστάθειας.



Σχ. 4-1. Υπολογισμός μέσης έκθλιψης $U_{h,Diameter}$ καθ' ύψος της κατακόρυφης διαμέτρου της σήραγγας (Προυντζόπουλος, 2011)



Σχ. 4-2. Υπολογισμός μέσης έκθλιψης $U_{h,Area}$ στο σύνολο της επιφάνειας του μετώπου της σήραγγας (Προυντζόπουλος, 2011)

Ακολουθως η υπολογιζόμενη μέση έκθλιψη του μετώπου κανονικοποιείται με χρήση της ακόλουθης αδιάστατης παραμέτρου Ω_F :

$$\Omega_F = \frac{U_h E_{soil}}{DP_0} \quad 4-1$$

όπου E_{soil} είναι το μέτρο παραμορφωσιμότητας του εδάφους και P_0 η μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας, ίση με:

$$P_0 = \left(\frac{1+K}{2} \right) \gamma H \quad 4-2$$

Η έκφραση αυτή της έκθλιψης του μετώπου κανονικοποιεί την επιρροή παραγόντων όπως η παραμορφωσιμότητα του εδάφους, ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K που επηρεάζουν μεν το μέγεθος της έκθλιψης του μετώπου, αλλά όχι την ευστάθεια - αντοχή του. Κατ' αντιστοιχία με τις τρεις μεθοδολογίες έκφρασης της μέσης έκθλιψης, μπορούν να υπολογιστούν τρεις διαφορετικές τιμές της αδιάστατης παραμέτρου Ω_F . Στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιαστεί μόνο η κανονικοποιημένη μορφή της μέσης οριζόντιας μετακίνησης σε όλη τη διατομή του μετώπου ($U_{h,Area}$) και θα αναφέρεται ως $\Omega_{F,Area}$.

4.1.3 Εκτίμηση της ευστάθειας μετώπου με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb (Προυντζόπουλος, 2011)

Για την εκτίμηση της ευστάθειας ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής σήραγγας ο Προυντζόπουλος (2011) πραγματοποίησε αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων κυκλικής, υποστηριγμένης σήραγγας για διάφορους λόγους H/D , ενώ για το έδαφος θεωρήθηκε ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb. Η έκθλιψη του μετώπου διερευνήθηκε για διάφορες τιμές των γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων του εδάφους, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (4-1):

Πίνακας 4-1. Εύρος παραμέτρων ανάλυσης

Παράμετρος	Εύρος	Πλήθος τιμών
Διάμετρος D (m)	7-10	2
Βάθος/Διάμετρο H/D	1-10	7
Συντελεστής οριζόντιων τάσεων K	0.5-1	2
Γωνία τριβής φ (°)	20-35	4
Γωνία διαστολικότητας δ (°)	3-6 ($\varphi/6$)	4
Συνοχή c (kPa)	10-90	Αναλόγως των H & φ

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων και από τα συμπεράσματα που εξήχθησαν ο Προυντζόπουλος (2011) πρότεινε έναν συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F που εκφράζεται ως:

$$\Lambda_F = \frac{5.25c(N_\varphi)^\alpha}{\gamma H^{1-b} D^b}$$

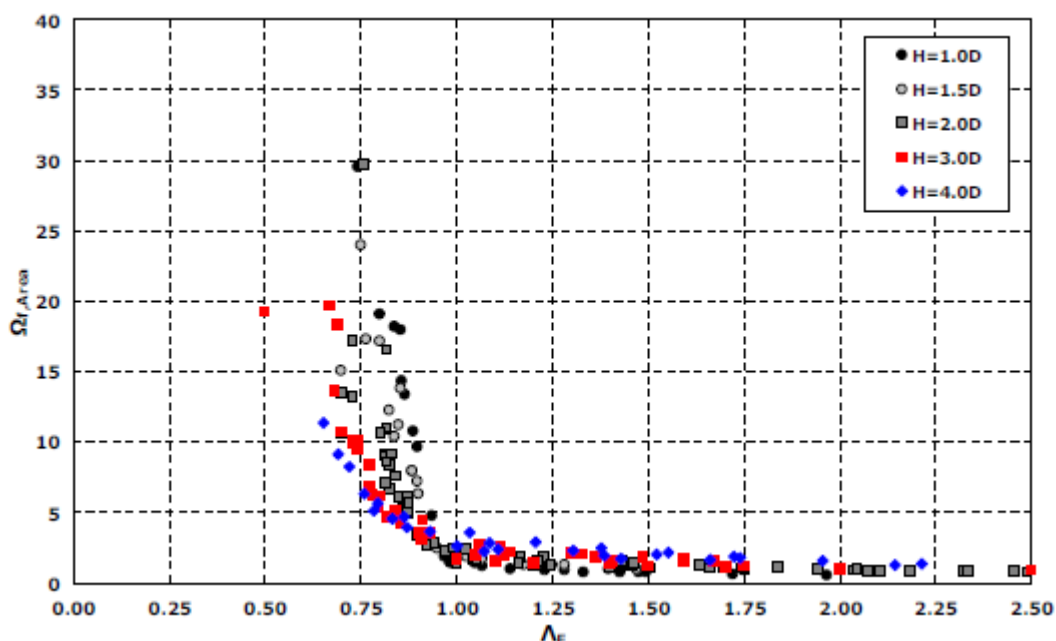
$$\alpha = 0.16 \frac{H}{D} + 0.59$$

4-3

$$b = \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.37}$$

$$N\varphi = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

Στο διάγραμμα 4-1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές της κανονικοποιημένης έκθλιψης $\Omega_{F,Area}$ για βάθη $H/D \leq 4$ συναρτήσεως του συντελεστή ευστάθειας Λ_F :



Διάγραμμα 4-1. Αποτελέσματα μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ συναρτήσεως του Λ_F για $H/D \leq 4$ (Προυντζόπουλος, 2011)

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4-1, η εξίσωση 4-3 έχει επιλεγεί κατάλληλα ώστε η μοναδιαία τιμή του συντελεστή Λ_F να αντιστοιχεί στο όριο μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, όπως αυτή εκτιμάται μέσω της απότομης αύξησης των τιμών της κανονικοποιημένης έκθλιψης Ω_F . Επιπρόσθετα συσχέτισε τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F με την κανονικοποιημένη έκθλιψη μετώπου $\Omega_{F,Area}$ μέσω της εξίσωσης 4-4:

$$\Omega_{F,Area} = \frac{40D}{H(\Lambda_f + B)^C} + 0.6\left(\frac{H}{D}\right)^{0.4}$$

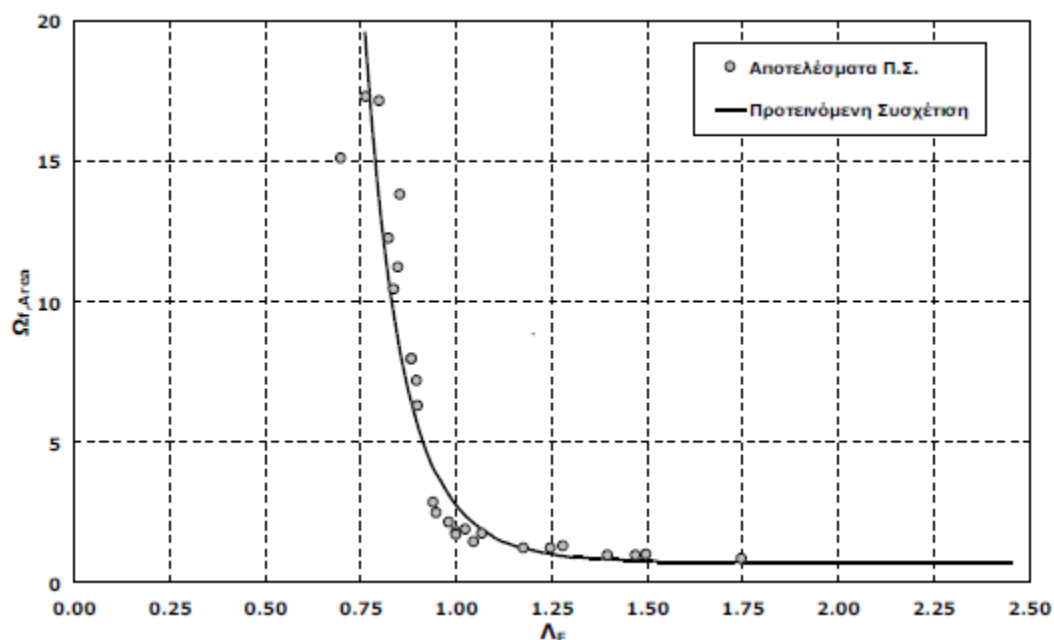
$$B = 0.23\left(\frac{H}{D}\right)^{0.425}$$

$$C = \frac{16D}{H}$$

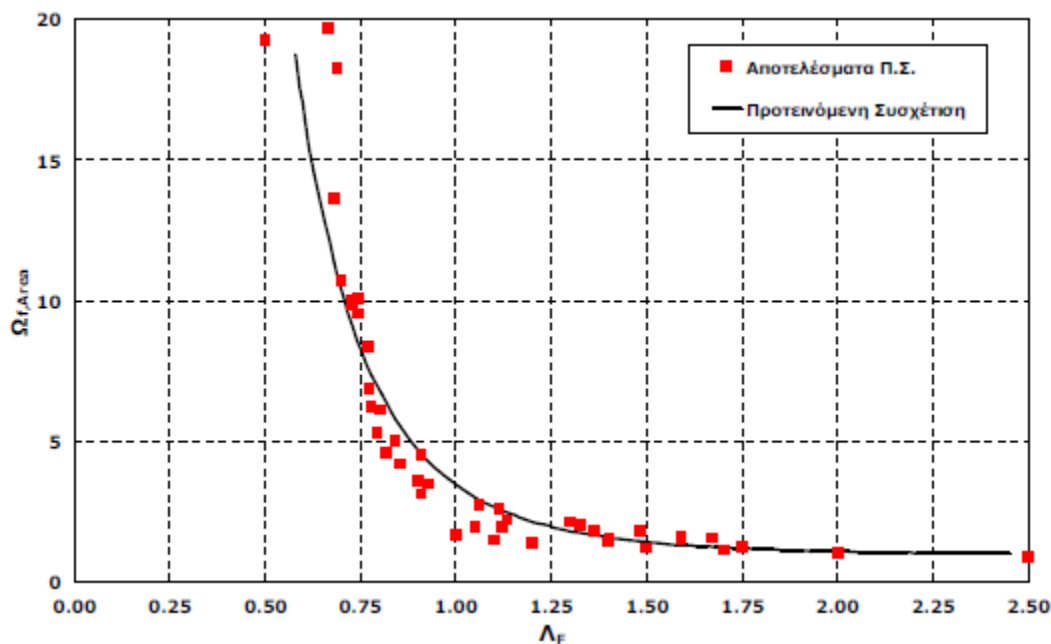
4-4

όπου ο όρος $0.6(H/D)^{0.4}$ εκφράζει την κανονικοποιημένη τιμή της εξώθησης για πολύ καλές γεωτεχνικές συνθήκες ($\Lambda_f \geq 3$), σταθερή για κάθε βάθος και B, C συντελεστές.

Η προσαρμογή της εξίσωσης στα αποτελέσματα φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (4-2 & 4-3), ενδεικτικά για βάθος σήραγγας $H/D=1.5$ και $H/D=3.0$ αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4-2. Προσαρμογή της προτεινόμενης συσχέτισης της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ συναρτήσει του συντελεστή Λ_F στα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων για $H/D=1.5$ (Προυντζόπουλος, 2011)



Διάγραμμα 4-3. Προσαρμογή της προτεινόμενης συσχέτισης της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ συναρτήσει του συντελεστή Λ_F στα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων για $H/D=3$ (Προυντζόπουλος, 2011)

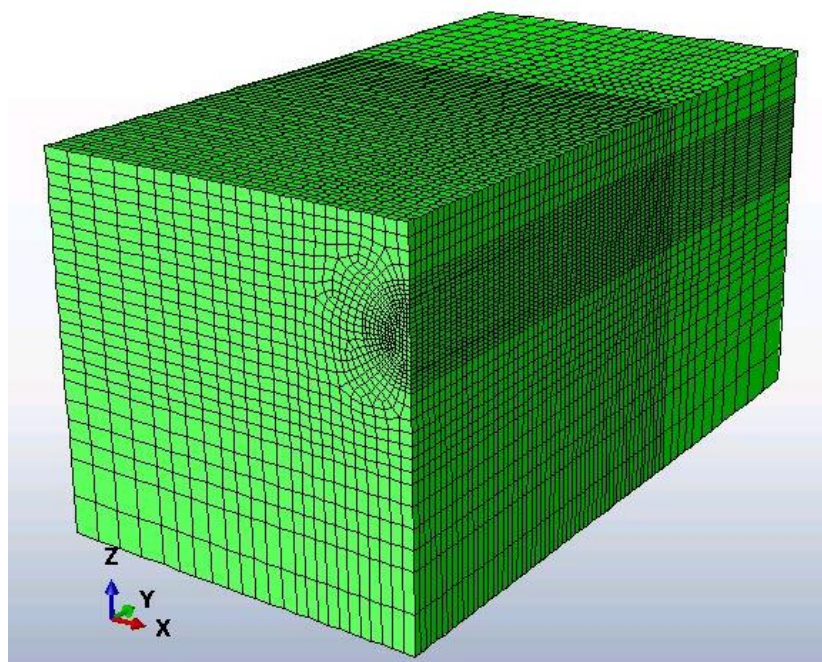
4.2 Περιγραφή του μοντέλου

Για τις ανάγκες της αριθμητικής διερεύνησης του προβλήματος δημιουργήθηκαν δύο προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων (ένα "ρηχό" και ένα "βαθύ") για σήραγγα κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=8m$, η οποία διανοίγεται σε ελαστοπλαστικό έδαφος, και σε βάθη (μετρούμενα από το κέντρο της) ίσα με $1.5D$ και $3.5D$.

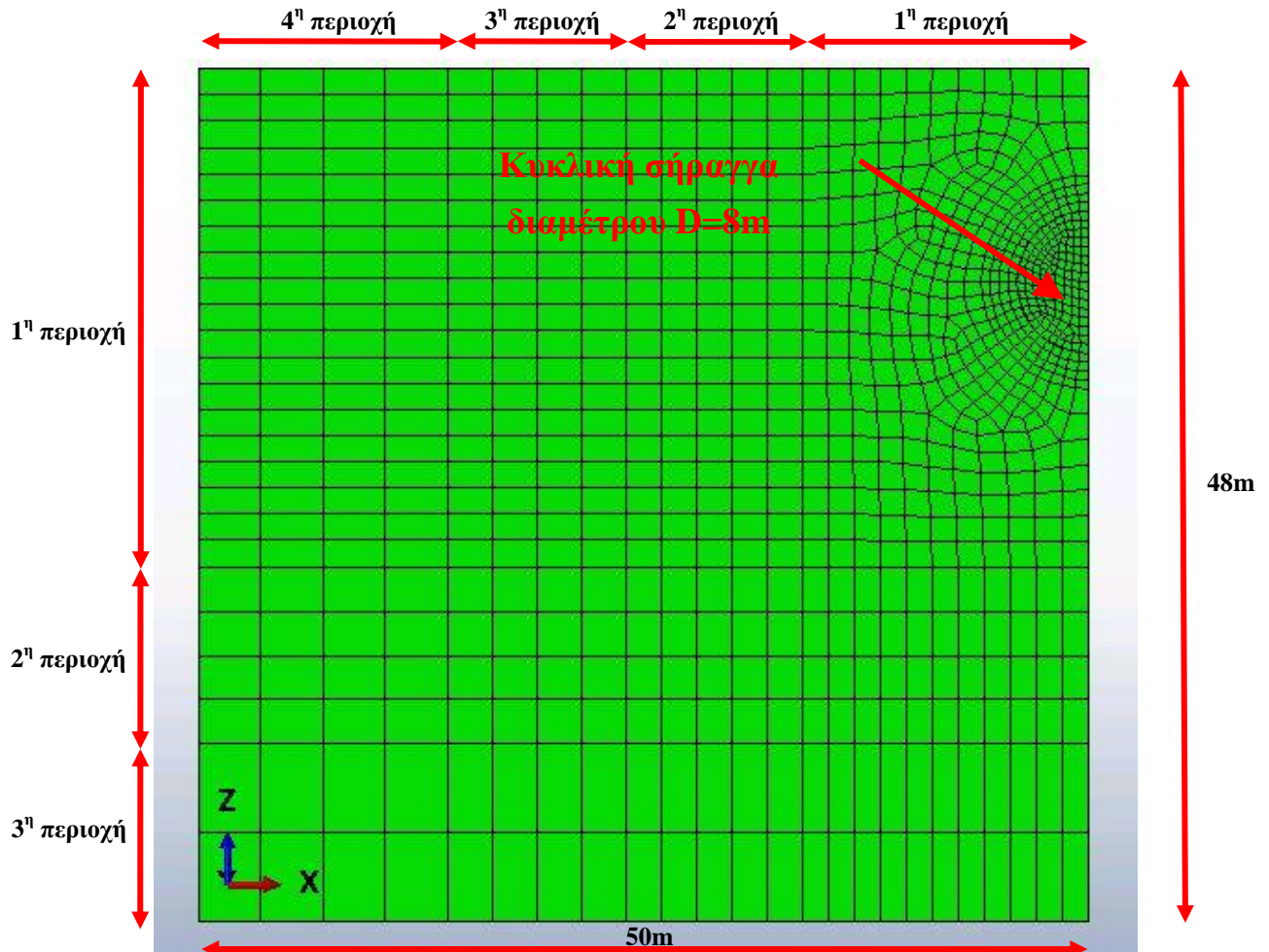
Το εξεταζόμενο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας. Για το λόγο αυτό, και με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού κόστους των αναλύσεων, προσομοιώθηκε η μισή γεωμετρία του πραγματικού προβλήματος. Η διακριτοποίηση του προβλήματος (δημιουργία καννάβου) πραγματοποιήθηκε μέσω του προ-επεξεργαστή Ansys. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διακριτοποίηση του εδάφους ήταν στοιχεία μάζας (solid elements), εξαπλευρικά, οκτακομβικά, τύπου C3D8 με τρεις μετακινησιακούς βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Η υποστήριξη του εκσκαφθέντος τμήματος της σήραγγας προσομοιώθηκε μέσω πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, τύπου S4.

- Το πρώτο μοντέλο αφορά στη ρηχή σήραγγα ($H=1.5D$). Έχει ύψος (διάσταση z) $48m$, μήκος (διάσταση y) $90m$ και πλάτος (διάσταση x) $50m$. Στο μοντέλο προσομοιώθηκε εκσκαφή μήκους $50m$. Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε σε συνολικά 63717 στοιχεία. Ο κάνναβος στην περιοχή του μετώπου είναι

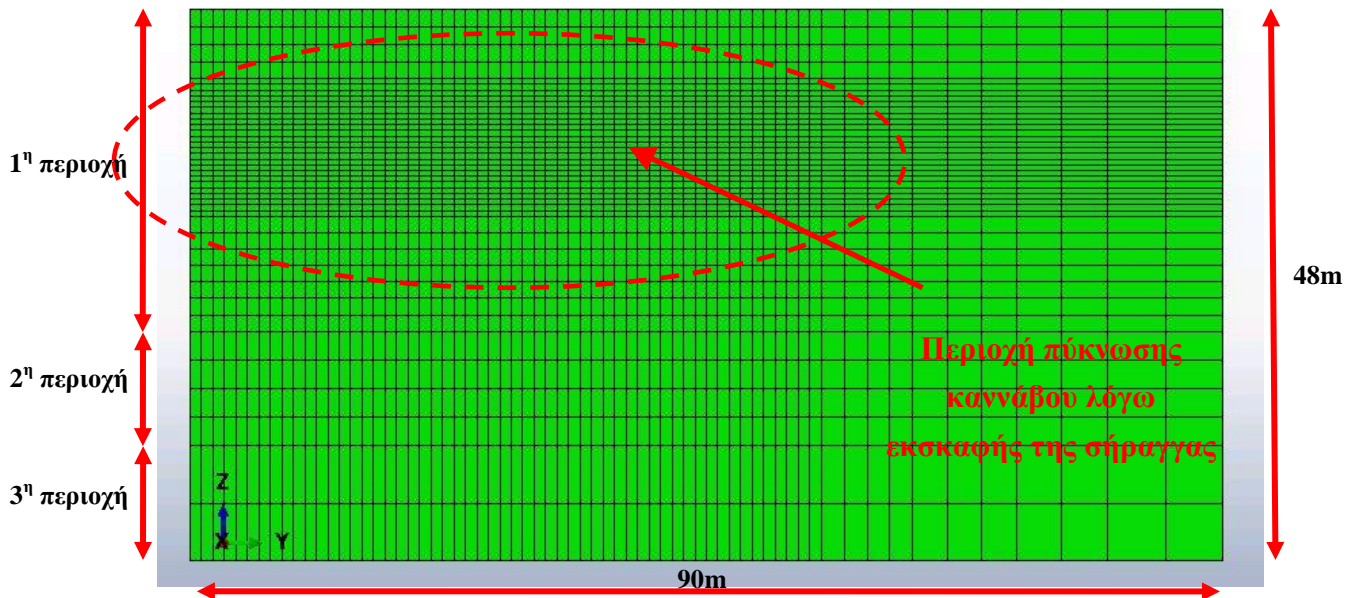
ιδιαίτερος πυκνός, με τη διακριτοποίηση να γίνεται ανά 0.5m (138 soil elements). Ίδιας πυκνότητας κάνναβος επιλέχθηκε και σε μια περιοχή πλάτους 2m περιμετρικά του μετώπου, λόγω της σημαντικής συγκέντρωσης τάσεων που αναμένεται. Η διακριτοποίηση κατά μήκος της σήραγγας (διάσταση y) χωρίστηκε σε 6 περιοχές. Στην 1^η περιοχή, που αφορά στην προσομοίωση της εκσκαφής (0-50m) έγινε διακριτοποίηση ανά 1m. Στην 2^η περιοχή (50-55m) έγινε διακριτοποίηση ανά 1m. Στην 3^η περιοχή (55-63m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2m. Στην 4^η περιοχή (63-72m) έγινε διακριτοποίηση ανά 3m. Στην 5^η περιοχή (72-80m) έγινε διακριτοποίηση ανά 4m. Στην 6^η περιοχή (80-90m) έγινε διακριτοποίηση ανά 5m. Κατά τη διάσταση x η διακριτοποίηση χωρίστηκε σε 4 περιοχές. Η 1^η περιοχή εκτεινόταν από το κέντρο της σήραγγας (0m) έως τα -16m και έγινε διακριτοποίηση ανά 1.5m. Στην 2^η περιοχή (-16 ÷ -26m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2m. Στην 3^η περιοχή (-26 ÷ -36m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2.5m. Στην 4^η περιοχή (-36 ÷ -50m) έγινε διακριτοποίηση ανά 3.5m. Όσον αφορά το βάθος (διάσταση z) η διακριτοποίηση χωρίστηκε σε 3 περιοχές. Στην 1^η περιοχή (+12 ÷ -16m) έγινε διακριτοποίηση ανά 1.5m. Στην 2^η περιοχή (-16 ÷ -26m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2.5m και στην 3^η περιοχή (-26 ÷ -36m) ανά 5m. Στις εικόνες 4-1 έως 4-3 δίνονται χαρακτηριστικές απεικονίσεις του δημιουργηθέντος καννάβου για το ρηχό μοντέλο.



Εικόνα 4-1. Προοπτικό του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το μοντέλο βάθους H=1.5D

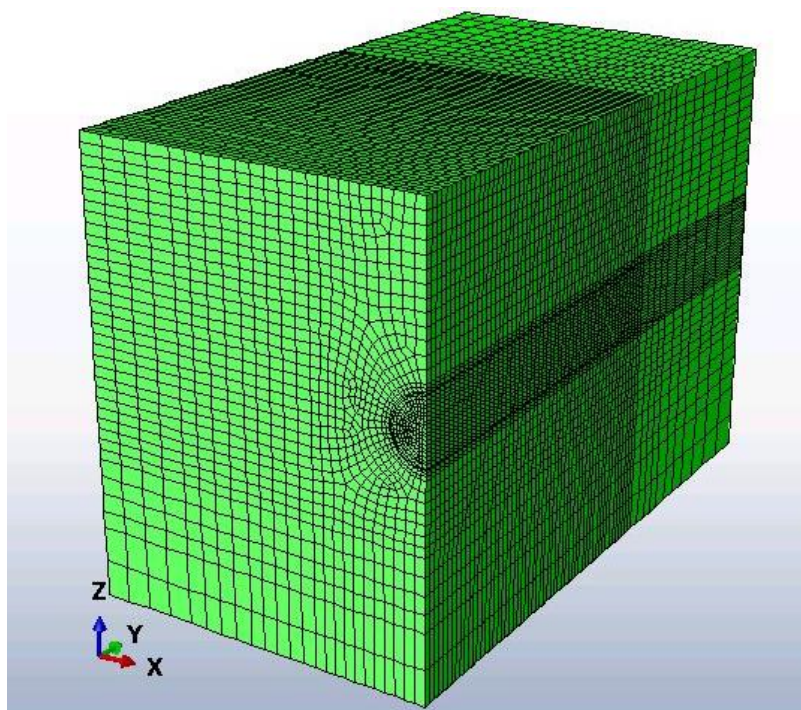


Εικόνα 4-2. Πρόσωση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το μοντέλο με βάθος $H=1.5D$

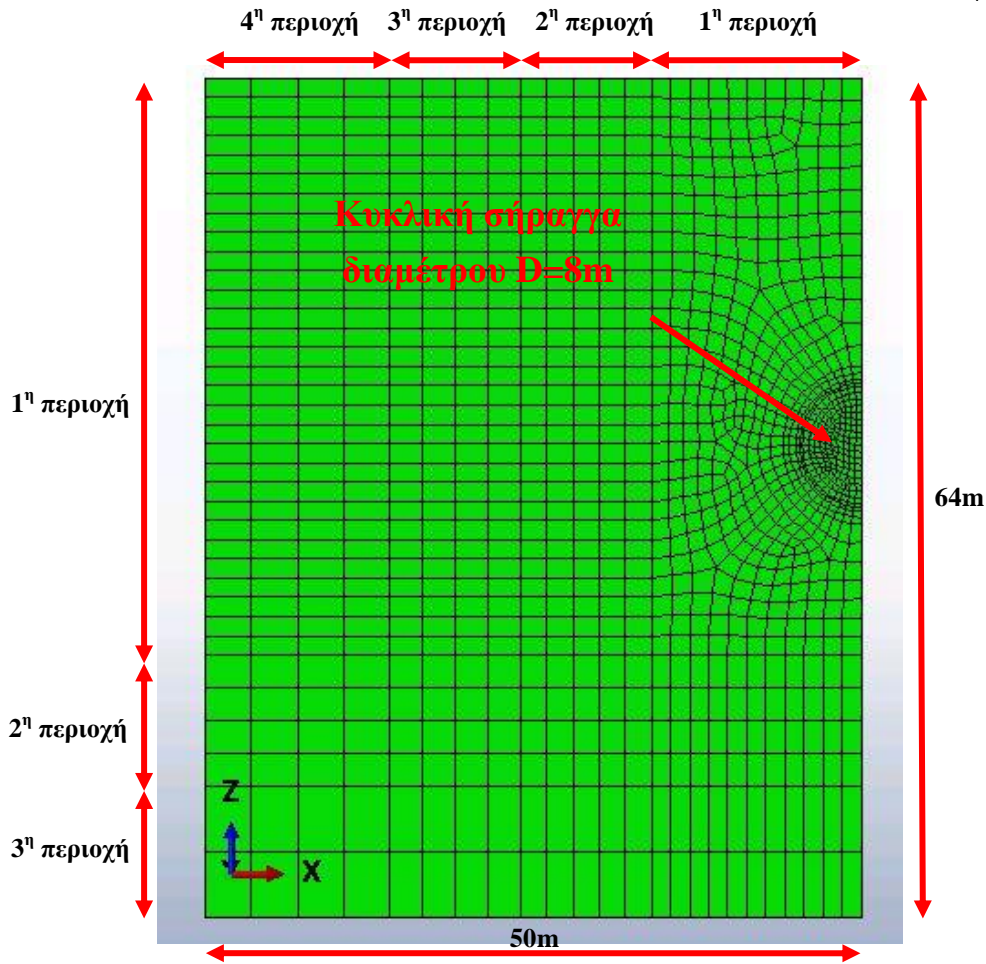


Εικόνα 4-3. Απεικόνιση του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της σήραγγας για το μοντέλο βάθους $H=1.5D$

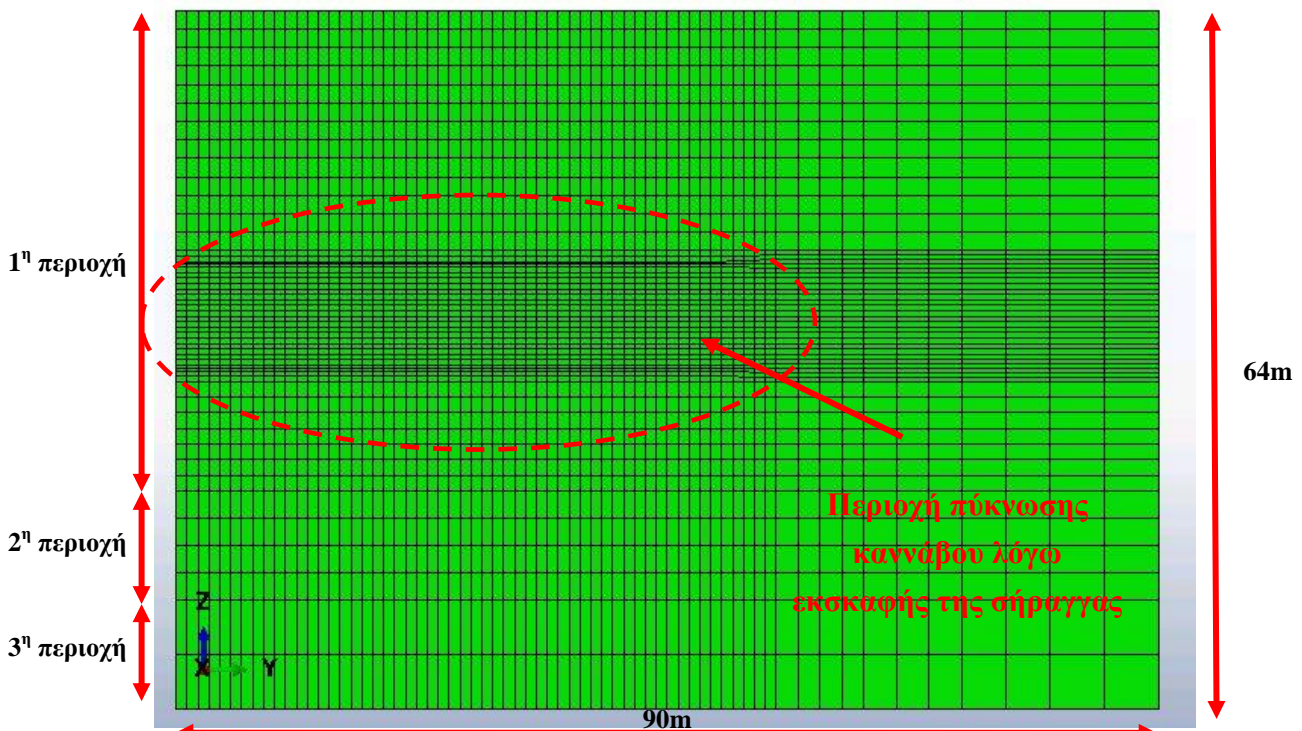
- Το δεύτερο μοντέλο, (Εικόνα 4-4 έως Εικόνα 4-6), αφορά σε βάθος σήραγγας $H=3.5D$ και έχει συνολικό ύψος (διάσταση z) 64m, μήκος (διάσταση y) 90m και πλάτος (διάσταση x) 50m. Στο μοντέλο προσομοιώθηκε εκσκαφή μήκους 50m. Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε συνολικά σε 82544 στοιχεία. Ο κάρναβος στην περιοχή του μετώπου είναι ιδιαίτερος πυκνός, με τη διακριτοποίηση να γίνεται ανά 0.5m (138 soil elements). Ίδιας πυκνότητας κάρναβο έχουμε και σε μια περιοχή πλάτους 2m περιμετρικά του μετώπου. Η διακριτοποίηση κατά μήκος της σήραγγας (διάσταση y) χωρίστηκε σε 6 περιοχές. Στην 1^η περιοχή προσομοιώθηκε η εκσκαφή (0-50m) και έγινε διακριτοποίηση ανά 1m. Στην 2^η περιοχή (50-55m) έγινε διακριτοποίηση ανά 1m. Στην 3^η περιοχή (55-63m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2m. Στην 4^η περιοχή (63-72m) έγινε διακριτοποίηση ανά 3m. Στην 5^η περιοχή (72-80m) έγινε διακριτοποίηση ανά 4m. Στην 6^η περιοχή (80-90m) έγινε διακριτοποίηση ανά 5m. Κατά τη διάσταση x η διακριτοποίηση χωρίστηκε σε 4 περιοχές. Η 1^η περιοχή εκτεινόταν από το κέντρο της σήραγγας (0m) έως τα -16m και έγινε διακριτοποίηση ανά 1.5m. Στην 2^η περιοχή (-16 ÷ -26m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2m. Στην 3^η περιοχή (-26 ÷ -36m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2.5m. Στην 4^η περιοχή (-36 ÷ -50m) έγινε διακριτοποίηση ανά 3.5m. Όσον αφορά το βάθος (διάσταση z) η διακριτοποίηση χωρίστηκε σε 3 περιοχές. Στην 1^η περιοχή (+28 ÷ -16m) έγινε διακριτοποίηση ανά 1.5m. Στην 2^η περιοχή (-16 ÷ -26m) έγινε διακριτοποίηση ανά 2.5m και στην 3^η περιοχή (-26 ÷ -36m) ανά 5m.



Εικόνα 4-4. Προοπτικό του κάρναβου πεπερασμένων στοιχείων για το μοντέλο βάθους $H=3.5D$



Εικόνα 4-5. Πρόσωση του χρησιμοποιούμενου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το μοντέλο με βάθος $H=3.5D$



Εικόνα 4-6. Απεικόνιση του χρησιμοποιούμενου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της σήραγγας για το μοντέλο βάθους $H=3.5D$

Εν συνεχεία περιγράφηκαν οι συνοριακές συνθήκες μέσω κατάλληλων δεσμεύσεων των μετακινήσεων στους κόμβους περιμετρικά του μοντέλου. Αρχικά δεσμεύτηκε κάθε δυνατή μετακίνηση των κόμβων που βρίσκονται στην βάση του κάθε μοντέλου, δηλαδή περιγράφηκαν συνοριακές συνθήκες τύπου άρθρωσης, ενώ στην συνέχεια στις τέσσερις κατακόρυφες παρειές του μοντέλου δεσμεύτηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις, δηλαδή συνοριακές συνθήκες τύπου κύλισης.

Ακολούθως ορίστηκαν οι ιδιότητες των υλικών που αφορούν σε κάθε ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Ορίστηκαν συνολικά δύο υλικά, ένα για το έδαφος και ένα για την αντιστήριξη που τοποθετείται περιμετρικά στην άντυγα της σήραγγας στο ήδη διανοιχθέν τμήμα. Επειδή η έμφαση της διπλωματικής εργασίας είναι στην ευστάθεια και την παραμόρφωση γύρω από την περιοχή του μετώπου εκσκαφής, ως αντιστήριξη θεωρήθηκε απλοποιητικά ένα γραμμικώς ελαστικό κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με μέτρο ελαστικότητας $E_{shotcrete}=30GPa$ και πάχος 30cm.

Σε ότι αφορά το περιβάλλον τη σήραγγα γεωυλικό, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ένα αργιλικό εδαφικό υλικό, με σταθερό βαθμό υπερστερεοποίησης με το βάθος, το οποίο σημαίνει ότι οι παράμετροι του εδάφους μεταβάλλονται με το βάθος. Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam-Clay. Για την προσομοίωση της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων με το βάθος, το εδαφικό υλικό χωρίστηκε σε οριζόντιες στρώσεις, μεταβαλλόμενου πάχους, ανάλογα με τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Το πάχος των στρώσεων σε κάθε τμήμα των μοντέλων φαίνεται στους πίνακες (4-2 & 4-3) που ακολουθούν.

Πίνακας 4-2. Πάχος στρώσεων για το μοντέλο βάθους H=1.5D

Βάθος (m)		Πάχος στρώσης (m)
Από	Έως	
+12	-16	1.5
-16	-26	2.5
-26	-36	5

Πίνακας 4-3. Πάχος στρώσεων για το μοντέλο βάθους H=3.5D

Βάθος (m)		Πάχος στρώσης (m)
Από	Έως	
+28	-16	1.5
-16	-26	2.5
-26	-36	5

Η διακριτοποίηση σε στρώσης αφορούσε τόσο σε στοιχεία (elements → elayer) όσο σε κόμβους (nodes → nlayer) καθώς κάποιες παράμετροι όπως ο λόγος κενών αποτελούν επικόμβιο μέγεθος, ενώ άλλες, όπως οι παράμετροι κράτυνσης του καταστατικού προσομοιώματος (πίεση προστερεοποίησης) δίνονται σε επίπεδο πεπερασμένου στοιχείου και αφορούν στα σημεία ολοκλήρωσης.

Για τον υπολογισμό των απαραίτητων μεγεθών σε κάθε στρώση ακολουθήθηκε μία επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού με τα εξής βήματα υπολογισμού:

Αρχικά θεωρήθηκε ένας δοκιμαστικός δείκτης πόρων (e) ίσος με 0.70 για κάθε στρώση, από τον οποίον προκύπτει και ο αντίστοιχος ειδικός όγκος (v) μέσω της σχέσης:

$$v = 1 + e \quad 4-5$$

Η πυκνότητα των στερεών κόκκων (ρ_s) θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 2.65 Mg/m^3 , από την οποία προέκυψε η πυκνότητα του εδαφικού υλικού (ρ_d), η οποία είναι και η τελική πυκνότητα (ρ') του εδαφικού υλικού στο συγκεκριμένο βάθος, αφού $Sr=0$, λόγω του γεγονότος ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία νερού.:

$$\rho_d = \rho_s \frac{1}{1 + e} \quad 4-6$$

Ακολουθώντας, με βάση το ειδικό βάρος του εδάφους ($\gamma = \rho'g$, όπου $g=10 \text{ m/sec}^2$) υπολογίστηκε η πρόσθετη ενεργή κατακόρυφη τάση για κάθε βάθος από τη σχέση:

$$\Delta \sigma'_v = \rho' g \Delta z \quad 4-7$$

Προσθέτοντας σε κάθε στρώση την $\Delta \sigma'_v$ στις προηγούμενες ενεργές τάσεις προκύπτουν οι ενεργές κατακόρυφες τάσεις για το συγκεκριμένο βάθος.

Για τον υπολογισμό των οριζόντιων ενεργών τάσεων σ'_h θεωρήθηκε συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0 ίσος με 0.5.

Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του καταστατικού μοντέλου Cam-Clay υπολογίστηκε η μέση ενεργός τάση p' και η αποκλίνουσα τάση q σε κάθε στρώση του υπεδάφους με βάση τις σχέσεις:

$$p' = \frac{(1 + 2K_0)\sigma'_v}{3} \quad 4-8$$

και

$$q = (1 - K_0)\sigma'_v \quad 4-9$$

Στην περίπτωση προσομοίωσης υπερστερεοποιημένου εδάφους οι μέγιστες τάσεις προφόρτισης του υλικού υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας τις σχέσεις 4-8 και 4-9 με τον αντίστοιχο δείκτη υπερστερεοποίησης OCR.

$$p'_{\max} = OCR \cdot p' \quad 4-10$$

και

$$q_{\max} = OCR \cdot q \quad 4-11$$

Εν συνεχεία υπολογίστηκε η παράμετρος κράτυνσης του μοντέλου Cam-Clay p'_m με βάση την εξίσωση της επιφάνειας διαρροής και με βάση τις παραπάνω τάσεις προστερεοποίησης του υλικού:

$$\begin{aligned} f(p'_{\max}, q_{\max}, v) &\equiv q_{\max}^2 - M^2 p'_{\max} (p'_m - p'_{\max}) = 0 \\ \Rightarrow p'_m &= \exp\left(\frac{N - v - \kappa \ln p'_{\max}}{\lambda - \kappa}\right) \end{aligned} \quad 4-12$$

Στο καταστατικό μοντέλο MCC το οποίο εισήχθη στο Abaqus μέσω της υπορουτίνας UMAT ως παράμετρος κράτυνσης θεωρείται το μέσο του μεγάλου άξονα της επιφάνειας διαρροής (a) που δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{p'_m}{2} \quad 4-13$$

Τέλος, υπολογίστηκε ο ειδικός όγκος που αντιστοιχεί στις παραπάνω συνθήκες με βάση την θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης από τη σχέση:

$$v = N - \kappa \ln p'_{\max} - (\lambda - \kappa) \ln p'_m \quad 4-14$$

και ο αντίστοιχος δείκτης πόρων από τη σχέση 4-5. Καθίσταται, λοιπόν, διακριτό ότι η παραπάνω διαδικασία ξεκινάει με την υπόθεση ενός δείκτη κενών και καταλήγει στην πρόβλεψη μιας διαφορετικής τιμής για το μέγεθος αυτό και ως εκ τούτου απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία σε όλα τα βάρη για την επίτευξη σύγκλισης στις τελικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων.

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν σε τρία σημεία κάθε στρώσης, στην κορυφή, στο μέσο και στον πυθμένα. Τα υπολογισθέντα μεγέθη τα οποία αποτελούν και τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος εισήχθησαν ως εξής:

Στους κόμβους κάθε στρώσης ορίζεται ο δείκτης πόρων (e), στο μέσο των στοιχείων κάθε στρώσης η παράμετρος κράτυνσης (a) και ο ειδικός όγκος (v), ενώ οι

αρχικές γεωστατικές τάσεις ορίζονται στην κορυφή και στον πυθμένα των στοιχείων κάθε στρώσης και ενδιάμεσα θεωρείται γραμμική μεταβολή.

4.3 Έλεγχος μοντέλου

Όπως έχει προαναφερθεί, οι αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία βασίζονται στο καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam-Clay. Προτού όμως πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις υπάρχει η ανάγκη να εξεταστούν τα 2 προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν ως προς την αξιοπιστία τους, και ειδικότερα σε ότι αφορά τον υπολογισμό της έκθλιψης. Γι' αυτόν τον λόγο πραγματοποιήθηκαν 4 αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, 2 για το κάθε μοντέλο, με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους με τις σχέσεις που προτείνει ο Προυντζόπουλος (2011) για τον συντελεστή ευστάθειας του μετώπου. Για το έδαφος εκτιμήθηκε ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb, ενώ η έκθλιψη του μετώπου υπολογίστηκε για τις παρακάτω τιμές γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραγόντων (Πίνακας 4-4):

Πίνακας 4-4. Παράμετροι αναλύσεων

Παράμετρος	Ανάλυση 1	Ανάλυση 2	Ανάλυση 3	Ανάλυση 4
Διάμετρος D(m)	8	8	8	8
Βάθος/Διάμετρο H/D	1.5	1.5	3.5	3.5
Συντελεστής οριζοντίων τάσεων K	0.5	0.5	0.5	0.5
Γωνία τριβής ϕ (°)	25	25	24	24
Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	20	20	20	20
Συνοχή c (kPa)	15	20	18	25
Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)	30000	30000	30000	30000

Η προσομοίωση της διάνοιξης για κάθε ανάλυση περιλάμβανε 52 βήματα:

- Βήμα 1. Υπολογισμός γεωστατικών τάσεων
- Βήμα 2. Εκσκαφή του πρώτου 1m της σήραγγας με αφαίρεση των αντίστοιχων πεπερασμένων στοιχείων του εδάφους.
- Βήμα 3. Εκσκαφή του επόμενου βήματος μήκους 1m και ενεργοποίηση του κελύφους υποστήριξης στο πρώτο 1m, αφήνοντας το 2^ο μέτρο ανυποστήρικτο.
- Βήμα 4 έως 51. Εκσκαφή 1m σήραγγας και υποστήριξη του τμήματος που εκσκάφτηκε στο προηγούμενο βήμα προσομοίωσης.
- Βήμα 52. Υποστήριξη του τελευταίου (50^{ου}) μέτρου εκσκαφής.

Οι τιμές της τελικής έκθλιψης του μετώπου για κάθε ανάλυση για κάθε έναν από τους τρεις τρόπους έκφρασής της, καθώς και της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ και του συντελεστή ευστάθειας Λ_F παρουσιάζονται στον πίνακα 4-5:

Πίνακας 4-5. Τιμές τελικής έκθλιψης μετώπου και $\Omega_{F,Area}$, Λ_F .

	Ανάλυση 1	Ανάλυση 2	Ανάλυση 3	Ανάλυση 4
$U_{h,Centre}$ (m)	0.128	0.091	0.487	0.351
$U_{h,Diameter}$ (m)	0.090	0.062	0.356	0.249
$U_{h,Area}$ (m)	0.074	0.052	0.295	0.207
$\Omega_{F,Area}$	1.548014	1.101052	2.641928	1.848555
Λ_F	0.983214	1.310952	1.001630	1.391153

Για να γίνει η σύγκριση των τιμών της τελικής έκθλιψης του μετώπου που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν με τις αναλυτικές σχέσεις που προτάθηκαν από τον Προυντζόπουλος (2011) ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Υπολογίστηκε η μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας (P_0) από την σχέση 4-2.
- Ακολουθώντας, από τη σχέση 4-3 υπολογίστηκε ο συντελεστής ευστάθειας μετώπου Λ_F
- Στη συνέχεια, από τη σχέση 4-4 που συνδέει την κανονικοποιημένη έκθλιψη μετώπου $\Omega_{F,Area}$ με το συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F υπολογίστηκε η $\Omega_{F,Area}$.

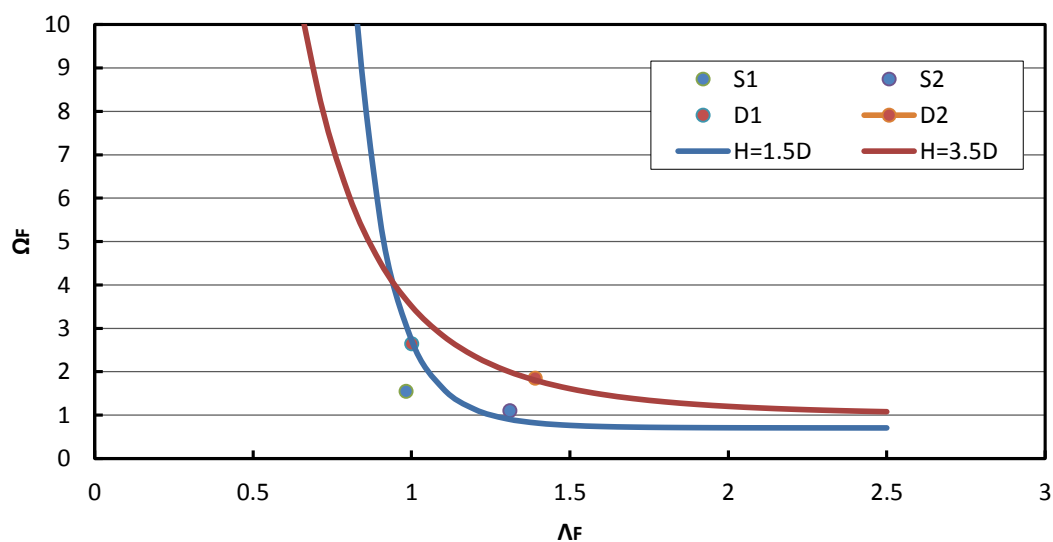
- Τέλος, η σχέση 4-1 επιλύθηκε ως προς $U_{h,Area}$ δίνοντας έτσι για κάθε παραμετρική ανάλυση την τιμή της τελικής έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας για κάθε ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 4-6:

Πίνακας 4-6. Τιμές μέσης έκθλιψης μετώπου αναλυτικών σχέσεων (Προυντζόπουλος, 2011)

	Ανάλυση 1	Ανάλυση 2	Ανάλυση 3	Ανάλυση 4
P_0 (kPa)	180	180	420	420
Λ_F	0.983214	1.310952	1.001630	1.391153
$\Omega_{F,Area}$	3.040999	0.902728	3.499062	1.803217
$U_{h,Area}$ (m)	0.145	0.043	0.391	0.201

Τέλος, παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα (4-4) των αποτελεσμάτων της μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, με τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων που προτάθηκαν από τον Προυντζόπουλος (2011) συναρτήσεως του συντελεστή ευστάθειας Λ_F : Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία.



Διάγραμμα 4-4. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων και αναλυτικών σχέσεων μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου $\Omega_{F,Area}$ συναρτήσεως του συντελεστή ευστάθειας Λ_F

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση, μέσω αυτών των αναλύσεων, της επίδρασης διαφόρων γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραγόντων στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώθηκε με χρήση του καταστατικού μοντέλου Modified Cam-Clay. Διευκρινίζεται ότι στις αναλύσεις που παρουσιάζονται δεν ελήφθη υπόψη η παρουσία νερού εντός του εδάφους.

5.2 Δεδομένα αναλύσεων

Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε πλήθος παραμετρικών αναλύσεων για κάθε μοντέλο (ρηχό και βαθύ). Οι παράμετροι, των οποίων οι τιμές διερευνηθήκαν κατά τις αριθμητικές αναλύσεις, είναι οι εξής:

- **OCR:** Λόγος προστερεοποίησης του εδάφους. Διερευνήθηκαν πέντε τιμές, $OCR=1$ το οποίο αντιστοιχεί σε κανονικά στερεοποιημένο έδαφος, καθώς και $OCR= 1.5, 1.75, 2.5, 4$ για την διερεύνηση της επιρροής της προστερεοποίησης και της συνεπαγόμενης αύξησης της αντοχής στην ευστάθεια του μετώπου.
- **λ :** κλίση της καμπύλης συμπίεστικότητας του κανονικά στερεοποιημένου εδάφους. Οι τιμές που διερευνήθηκαν είναι $\lambda= 0.10, 0.15, 0.20$ για την αποτίμηση της επιρροής της συμπίεστικότητας του γεωυλικού στη έκθλιψη του μετώπου.
- **κ/λ :** λόγος της κλίσης της γραμμής αποφόρτισης - επαναφόρτισης προς την κλίση της καμπύλης παρθενικής συμπίεσης. Επιλέχθηκαν οι τιμές $\kappa/\lambda = 0.10, 0.13, 0.20$ και προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές του κ .
- **M :** κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο χώρο p' - q , η οποία αντιπροσωπεύει την παραμένουσα γωνία τριβής και σχετίζεται με την αντοχή του γεωυλικού.

Επιλέχθηκαν 36 συνδυασμοί των παραπάνω τιμών με βάση τους οποίους προέκυψαν οι αναλύσεις του πίνακα 5-1. Είναι προφανές ότι δεν έγιναν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί αλλά αυτοί οι οποίοι θεωρούνται επαρκείς για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την επιρροή των γεωτεχνικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προβλήματος στην ευστάθεια του μετώπου.

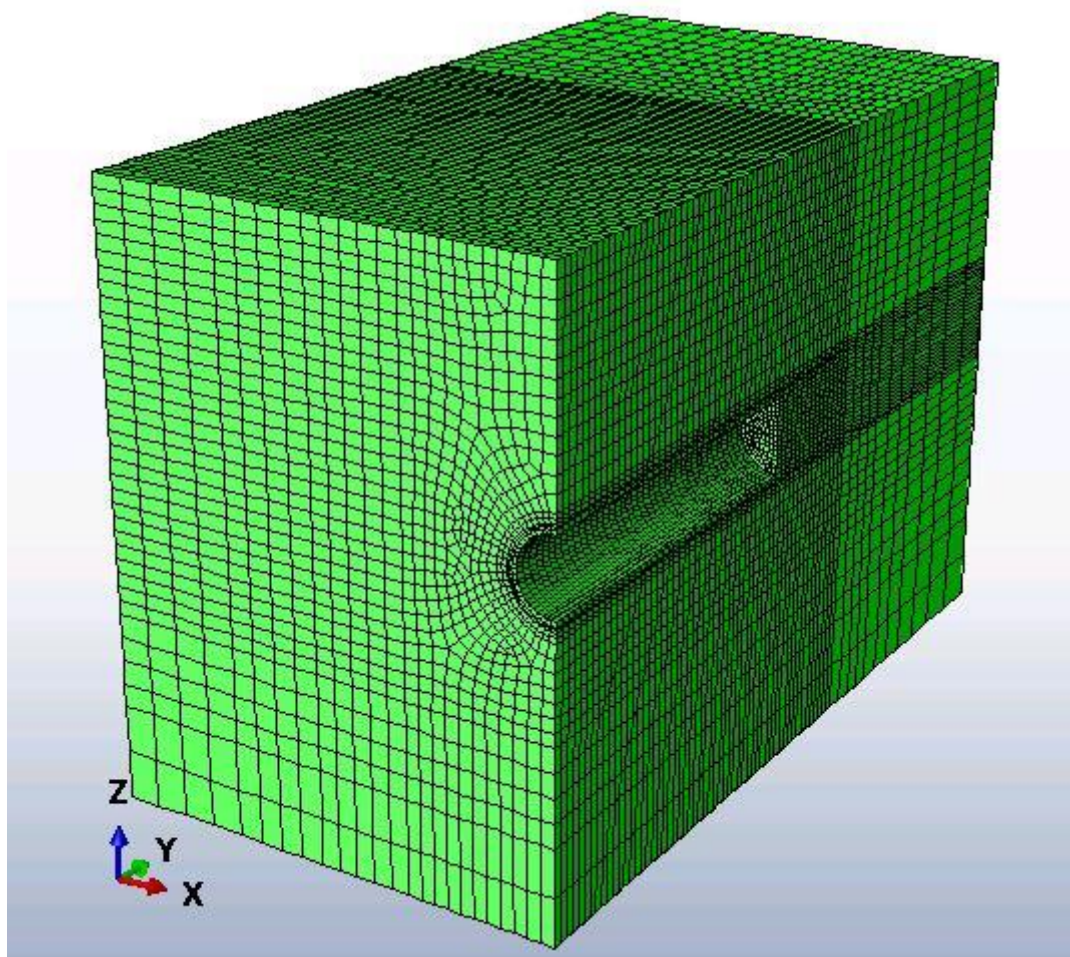
Πίνακας 5-1. Δεδομένα παραμετρικών αναλύσεων.

Nr.	OCR	κ/λ	λ	κ	M
1	1.00	0.20	0.10	0.020	0.8
2	1.00	0.20	0.10	0.020	0.9
3	1.00	0.20	0.10	0.020	1,0
4	1.00	0.20	0.10	0.020	1.2
5	1.00	0.20	0.15	0.030	0.8
6	1.00	0.20	0.15	0.030	0.9
7	1.00	0.20	0.15	0.030	1.0
8	1.00	0.20	0.15	0.030	1.2
9	1.00	0.20	0.20	0.040	0.8
10	1.00	0.20	0.20	0.040	0.9
11	1.00	0.20	0.20	0.040	1.0
12	1.00	0.20	0.20	0.040	1.2
13	1.50	0.20	0.15	0.030	0.8
14	1.50	0.20	0.15	0.030	0.9
15	1.50	0.20	0.15	0.030	1.0
16	1.50	0.20	0.15	0.030	1.2
17	4.00	0.20	0.15	0.030	0.8
18	4.00	0.20	0.15	0.030	0.9
19	4.00	0.20	0.15	0.030	1.0
20	4.00	0.20	0.15	0.030	1.2
21	1.00	0.10	0.15	0.015	0.9
22	1.00	0.10	0.15	0.015	1.0
23	1.50	0.10	0.15	0.015	0.9
24	1.50	0.10	0.15	0.015	1.0
25	4.00	0.10	0.15	0.015	0.9
26	4.00	0.10	0.15	0.015	1.0
27	4.00	0.10	0.10	0.010	0.9
28	1.00	0.10	0.20	0.020	0.9
29	1.00	0.13	0.15	0.020	0.9
30	1.00	0.13	0.15	0.020	1.0
31	1.00	0.10	0.20	0.020	1.0
32	4.00	0.10	0.10	0.010	1.0
33	1.75	0.20	0.15	0.030	0.9
34	1.75	0.20	0.15	0.030	1.0
35	2.50	0.20	0.15	0.030	0.9
36	2.50	0.20	0.15	0.030	1.0

5.3 Διαδικασία προσομοίωσης

Η εκσκαφή σήραγγας η οποία προσομοιώθηκε αφορά σε μηχανοποιημένη όρυξη με χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) με ασπίδα. Λόγω, αφενός της

άμεσης τοποθέτησης των προκατασκευασμένων δακτυλίων της μόνιμης επένδυσης αλλά και αφετέρου της ύπαρξης της ασπίδας η σήραγγα θεωρήθηκε απλουστευτικά κατά τις αναλύσεις ότι είναι πλήρως υποστηριγμένη μέχρι και το μέτωπο εκσκαφής. Η εκσκαφή που προσομοιώθηκε είχε συνολικό μήκος 40m. Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού κόστους η εκσκαφή όλης της σήραγγας προσομοιώθηκε σε ένα υπολογιστικό βήμα κατά το οποίο το μέτωπο της εκσκαφής θεωρήθηκε πλήρως αντιστηριγμένο, δηλαδή ασκήθηκε πίεση στο μέτωπο ίση και αντίθετη από την οριζόντια γεωστατική τάση. Ο τρόπος αυτός της προσομοίωσης έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να εκτιμηθεί σωστά το προφίλ των καθιζήσεων το οποίο προκύπτει από την εκσκαφή καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την βηματική προσομοίωση της εκσκαφής, παρόλα αυτά δεν επηρεάζει την ζητούμενη εκτίμηση της έκθλιψης στο μέτωπο.



Εικόνα 5-1. Προοπτικό του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων για το βαθύ μοντέλο ($H=3.5D$) κατά το βήμα προσομοίωσης της εκσκαφής των πρώτων 40m της σήραγγας.

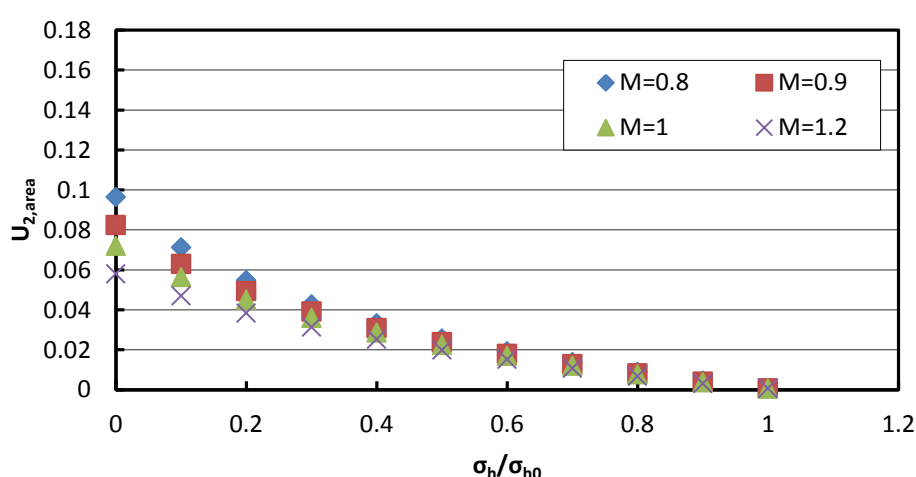
Η πίεση αντιστήριξης στην εκσκαφή εκτιμήθηκε μέσω της αρχικής επίλυσης μόνο του γεωστατικού βήματος, από το οποίο προέκυψαν οι οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στη διατομή ενδιαφέροντος ($Y=+40m$ στη διατομή της σήραγγας). Στην συνέχεια η

ανάλυση επαναλαμβάνεται, όπου στο δεύτερο υπολογιστικό βήμα προσομοιώνεται πλέον η εκσκαφή ασκώντας όμως, όπως προαναφέρθηκε, ίσες και αντίθετες οριζόντιες πιέσεις στα στοιχεία του μετώπου, έτσι ώστε να μην αναπτυχθούν οριζόντιες μετακινήσεις. Επιπρόσθετα, στο βήμα της εκσκαφής προσομοιώνεται και η υποστήριξη περιμετρικά στην άντυγα της σήραγγας. Τέλος, και για τον υπολογισμό της ζητούμενης έκθλιψης του μετώπου στο τρίτο και τελευταίο βήμα της ανάλυσης, απομειώνεται σταδιακά η πίεση στο μέτωπο κατά 10% σε δέκα υπολογιστικά υποβήματα, μέχρι πλήρους μηδενισμού της πίεσης αντιστήριξης που αντιστοιχεί σε συνθήκες ανυποστήρικτου μετώπου.

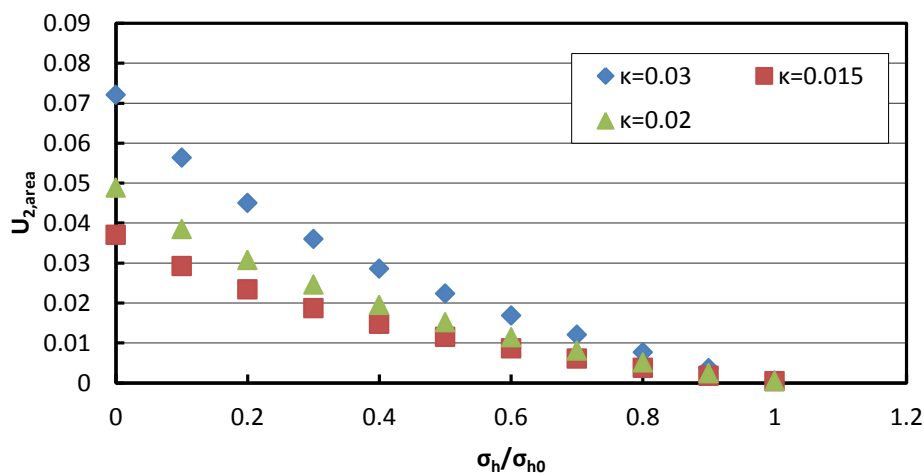
5.4 Αποτελέσματα των αναλύσεων

5.4.1 Γενικά

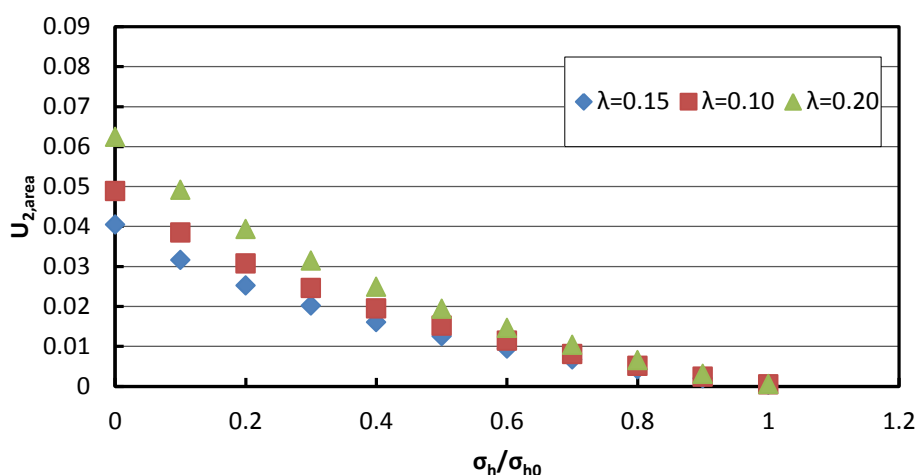
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων της μέσης έκθλιψης του μετώπου, εκφρασμένης μέσω της $U_{2,area}$, όπως αυτή ορίστηκε στο 4^ο κεφάλαιο, με τον λόγο σ_h/σ_{h0} , όπου σ_h η απομειωμένη πίεση που ασκείται την δεδομένη στιγμή και σ_{h0} η αρχική πίεση που ασκήθηκε στο μέτωπο. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται η εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου ως αποτέλεσμα της απομείωσης της πίεσης αντιστήριξης, ενώ σε κάθε ένα από τα διαγράμματα που δίνεται παρουσιάζεται η επίδραση συγκεκριμένης γεωτεχνικής ή γεωμετρικής παραμέτρου του μετώπου στην εξέλιξη της έκθλιψης. Παρατίθενται ενδεικτικά συγκριτικά διαγράμματα για το μοντέλο με βάθος $H=3.5D$. Το σύνολο των διαγραμμάτων που δείχνουν την εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου για τα μοντέλα με βάθος $H=1.5D$ και $H=3.5D$ παρατίθενται στα Παραρτήματα Α και Β αντίστοιχα.



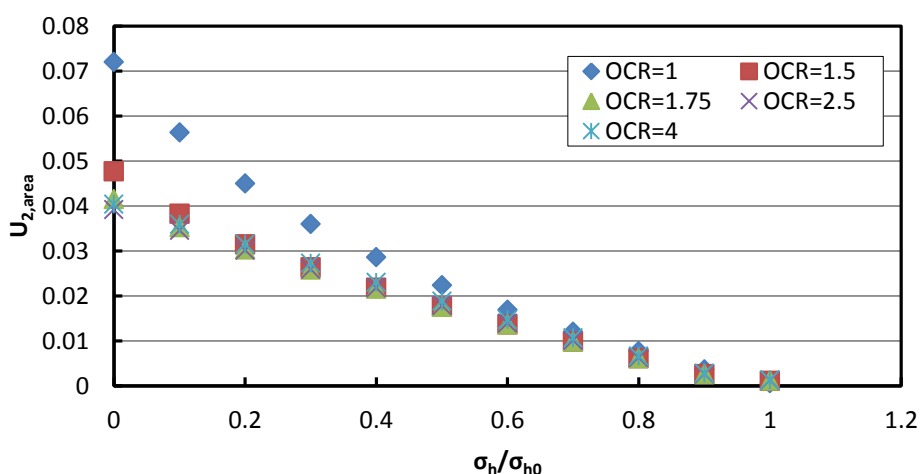
Διάγραμμα 5-1. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1$



Διάγραμμα 5-2. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1$



Διάγραμμα 5-3. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1$

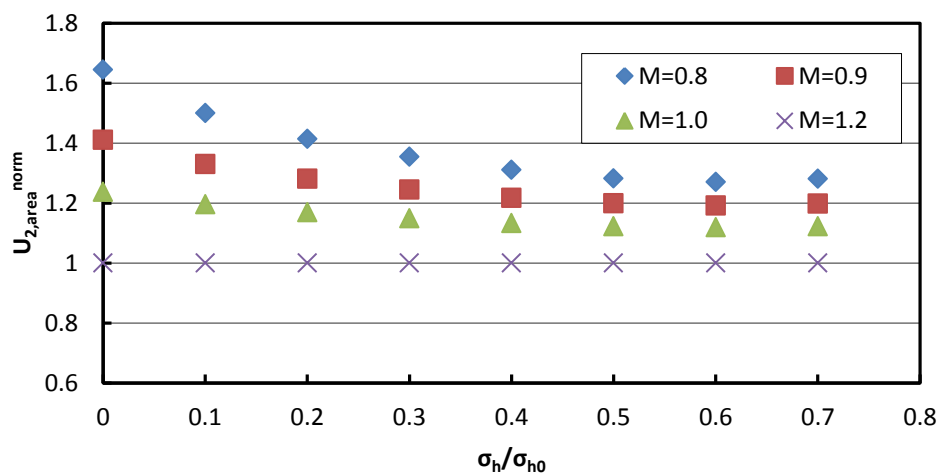


Διάγραμμα 5-4. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$

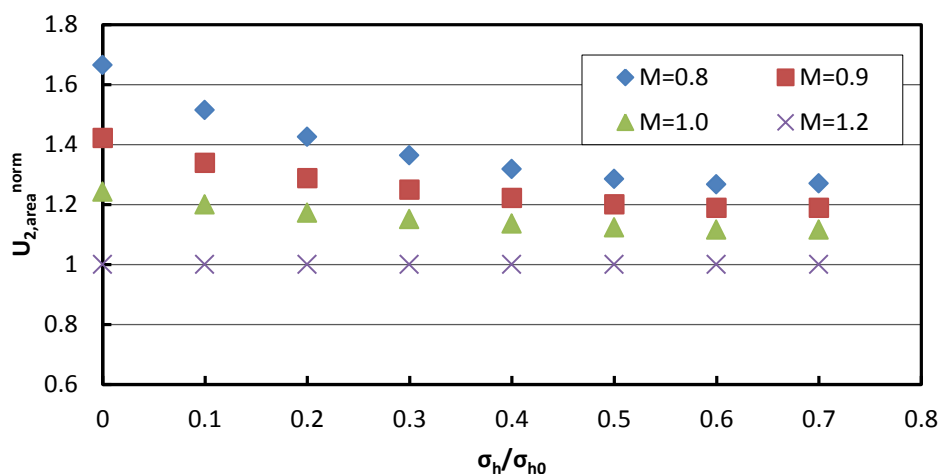
Από τα παραπάνω διαγράμματα (5-1 έως 5-4) γίνεται αντιληπτό ότι η καμπύλη της εξέλιξης της έκθλιψης του μετώπου έχει μια συγκεκριμένη μορφή, η οποία όπως αναμενόταν αντιστοιχεί σε αύξηση της έκθλιψης με την απομείωση της πίεσης υποστήριξης. Η γενική μορφή της καμπύλης αυτής δεν φαίνεται να επηρεάζεται ποιοτικά από την εκάστοτε εξεταζόμενη παράμετρο. Θεωρήθηκε λοιπόν σκόπιμο να εξεταστεί η επιρροή κάθε παραμέτρου μέσω κανονικοποιημένων διαγραμμάτων. Για τον σκοπό αυτό η μέση έκθλιψη του μετώπου $U_{2,area}$ όπως προέκυψε για κάθε ανάλυση αδιαστατοποιείται διαιρούμενη με τα αποτελέσματα της ανάλυσης εκείνης, όπου η $U_{2,area}$ παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές. Η αδιαστατοποιημένη μορφή της $U_{2,area}$ θα ονομάζεται $U_{2,area}^{norm}$. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες αφορούν το μοντέλο με βάθος $H=3.5D$. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το «ρηχό» μοντέλο παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

5.4.2 Διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων αντοχής M και OCR στην εξέλιξη της έκθλιψης

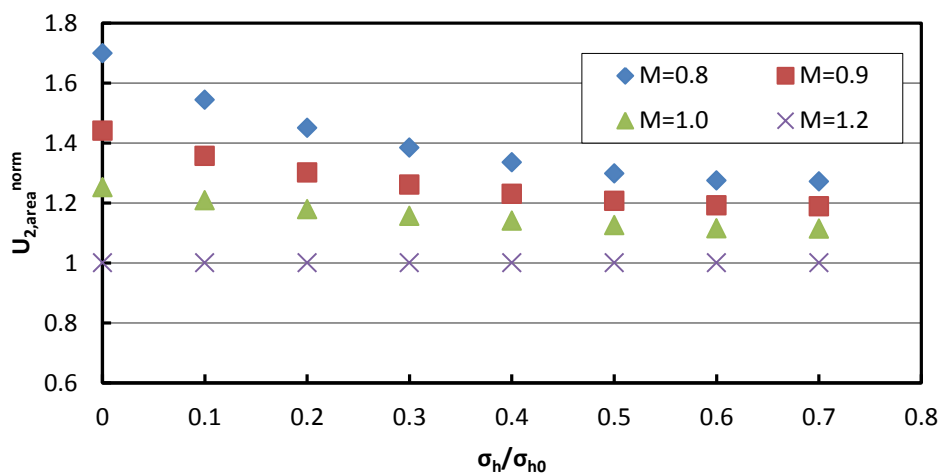
Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η επιρροή των παραμέτρων αντοχής του προσομοιούμενου γεωυλικού. Οι παράμετροι αντοχής ενός εδάφους το οποίο προσομοιώνεται με το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam -Clay είναι η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης M, η οποία σχετίζεται με την παραμένουσα γωνία τριβής του εδάφους φ , και ο δείκτης προφόρτισης OCR. Παρατίθενται συγκριτικά αδιαστατοποιημένα διαγράμματα (5-5 έως 5-13) που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για το μοντέλο με βάθος $H=3.5D$. Σημειώνεται ότι για την αδιαστατοποίηση της $U_{2,area}$ διαιρέθηκε η τιμή που προέκυψε από κάθε ανάλυση με την τιμή που προέκυψε από την ανάλυση με τη μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου M καθώς αυτή αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή τελικής έκθλιψης. Αντίστοιχα, αδιαστατοποιήθηκαν και οι τιμές της $U_{2,area}$ που στα διαγράμματα που φανερώνουν την επιρροή του δείκτη προφόρτισης OCR.



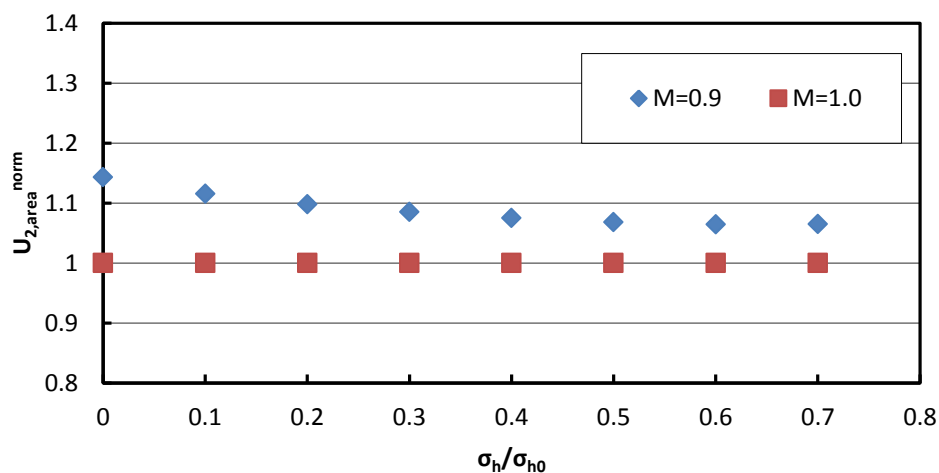
Διάγραμμα 5-5. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1.0$



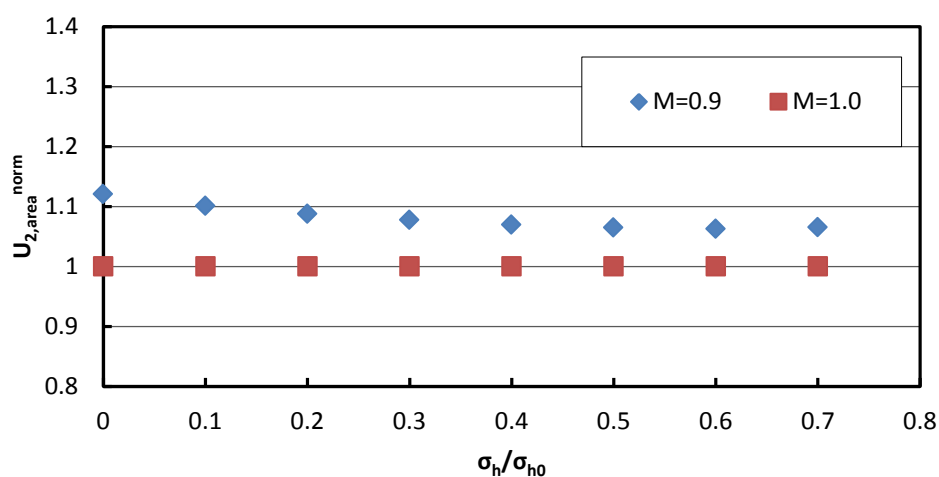
Διάγραμμα 5-6. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



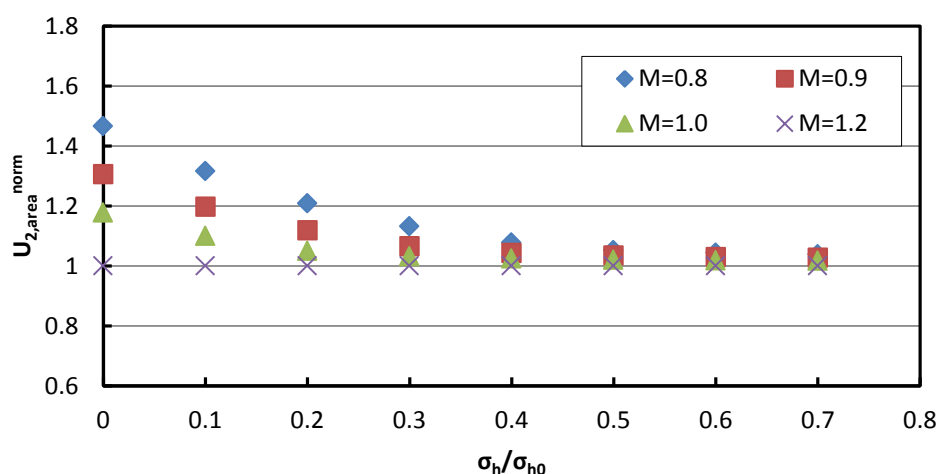
Διάγραμμα 5-7. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.04$, $\lambda=0.20$, $OCR=1.0$



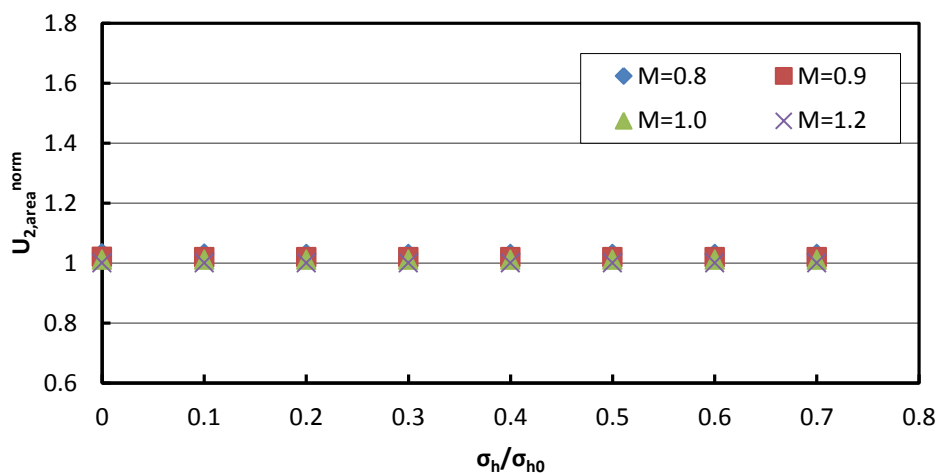
Διάγραμμα 5-8. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



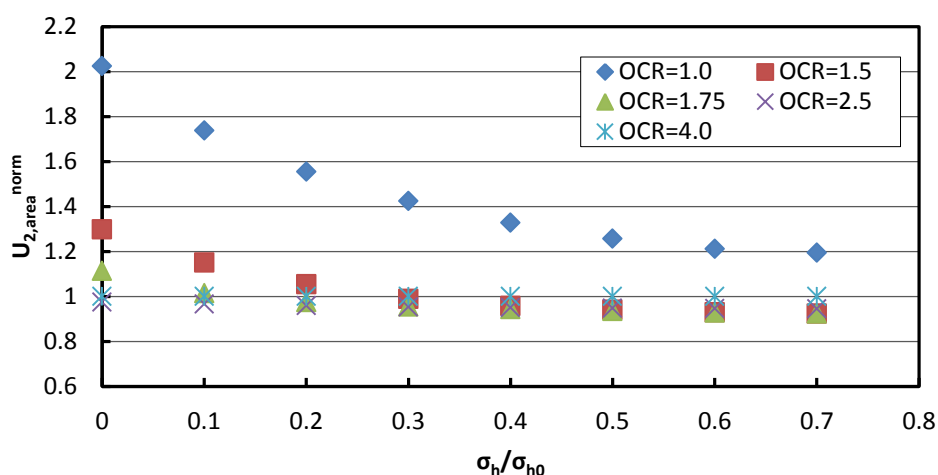
Διάγραμμα 5-9. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



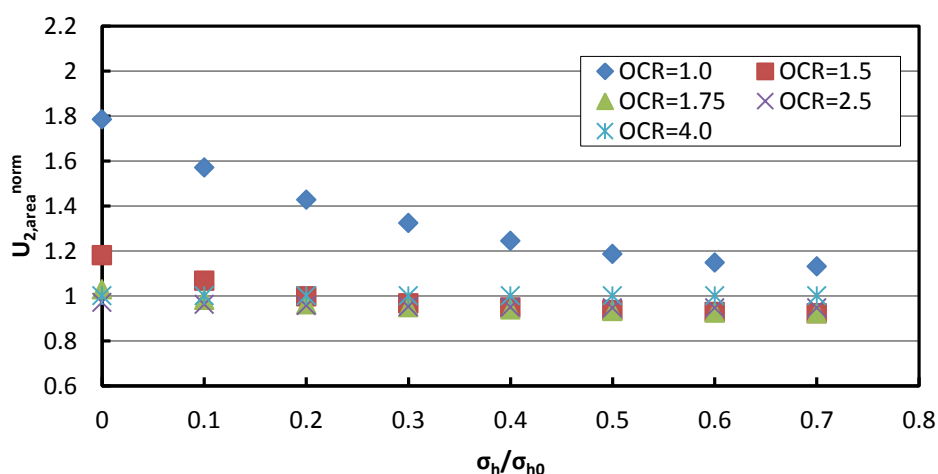
Διάγραμμα 5-10. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



Διάγραμμα 5-11. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=4.0$



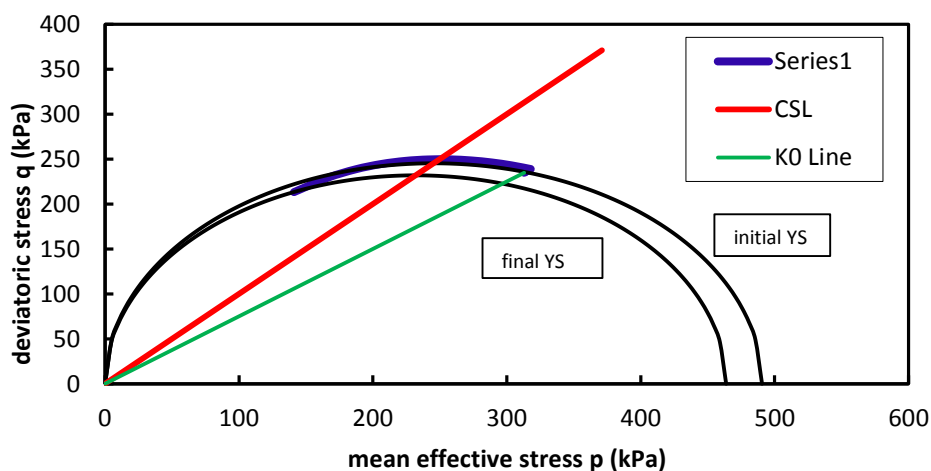
Διάγραμμα 5-12. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$



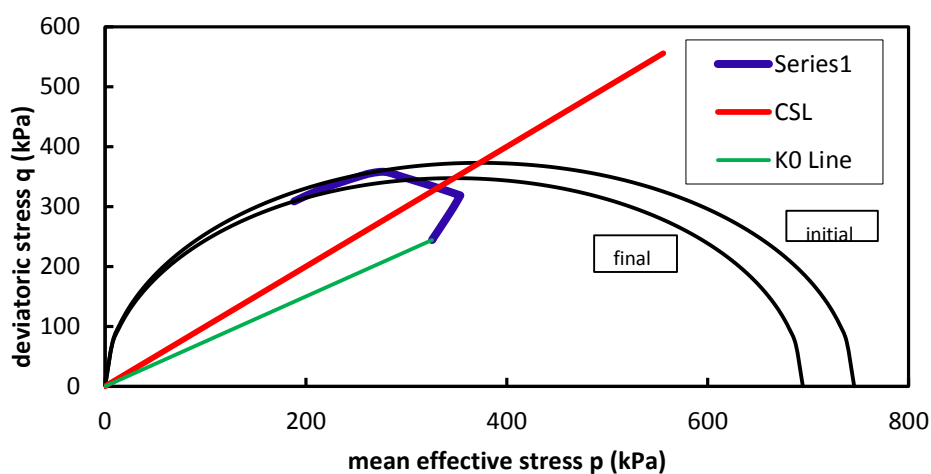
Διάγραμμα 5-13. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων (5-5 έως 5-13) προκύπτουν τα ακόλουθα σχόλια - συμπεράσματα:

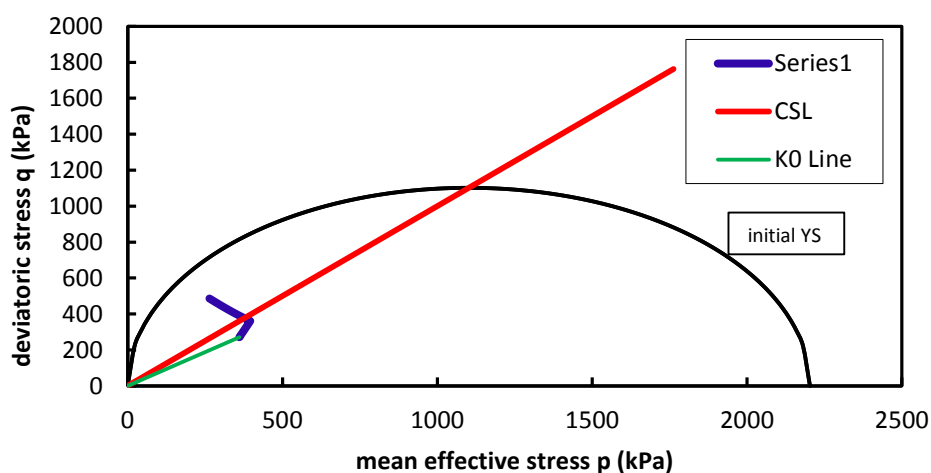
- Η τιμή της μέσης έκθλιψης στο μέτωπο εκσκαφής εξαρτάται από την παράμετρο M . Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η τιμή της M , τόσο μεγαλύτερη είναι και η έκθλιψη στο μέτωπο. Αυτό οφείλεται στο ότι η παράμετρος M σχετίζεται άμεσα με τη γωνία τριβής του εδάφους ϕ , επομένως είναι λογικό και αναμενόμενο όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία τριβής, τόσο μικρότερη να είναι η έκθλιψη του μετώπου στη σήραγγα.
- Διακρίνεται η σημαντική επίδραση του δείκτη προφόρτισης OCR στην προκαλούμενη πλαστικοποίηση του μετώπου και στην συνεπαγόμενη παραμορφωσιακή του συμπεριφορά. Οι τιμές της έκθλιψης οι οποίες προκύπτουν καθώς και η μορφή των διαγραμμάτων εξαρτάται άμεσα από το εάν η συμπεριφορά του μετώπου είναι ελαστική ή ελαστοπλαστική. Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα 5-11 το οποίο αντιστοιχεί σε έντονα υπερστερεοποιημένο έδαφος ($OCR=4.0$) παρατηρείται ότι η παράμετρος M δεν έχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα, καθώς ο πυρήνας εξώθησης παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής, και έτσι το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής, το οποίο ελέγχεται και μέσω της παραμέτρου M δεν έχει κάποια επιρροή. Το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται ακόμα καλύτερα αντιληπτό παρατηρώντας την διαδρομή που ακολουθούν οι τάσεις στον χώρο $p'-q$ σε σχέση με την επιφάνεια διαρροής του μοντέλου Modified Cam-Clay, όπως αυτές παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5-14, 5-15 και 5-16. Αντίθετα, σε αναλύσεις με μικρότερες τιμές του λόγου προφόρτισης το μέτωπο πλαστικοποιείται και η έκθλιψη πλέον επηρεάζεται έντονα από την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 5-6 το οποίο αντιστοιχεί σε κανονικά στερεοποιημένο έδαφος παρατηρούμε ότι η ανάλυση με $M=0.8$ δίνει σχεδόν 70% μεγαλύτερη τελική έκθλιψη σε σχέση με την αντίστοιχη με $M=1.2$.



Διάγραμμα 5-14. Τασική διαδρομή στο χώρο p-q για OCR=1.0



Διάγραμμα 5-15. Τασική διαδρομή στο χώρο p-q για OCR=1.5



Διάγραμμα 5-16. Τασική διαδρομή στο χώρο p-q για OCR=4.0

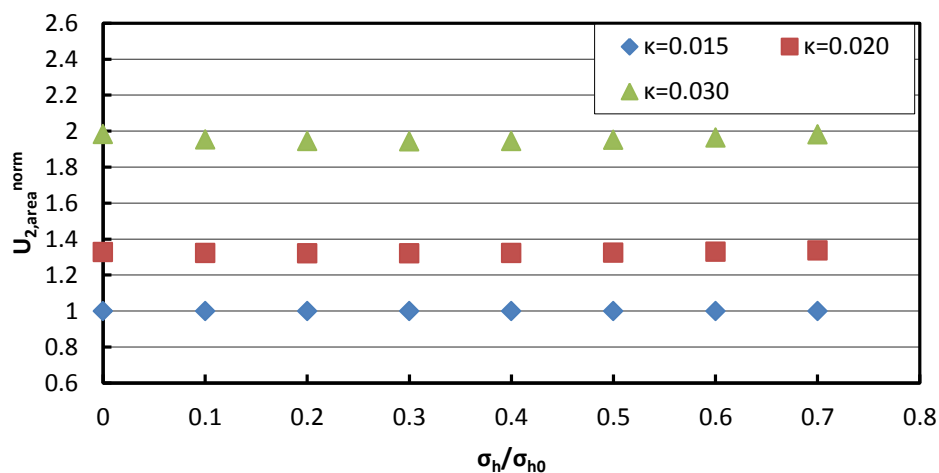
- Σε ότι αφορά την "οριακή πίεση" έναρξης της πλαστικοποίησης, όπως αναμενόταν, παρατηρείται ότι όσο χειρότερες είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες σε όρους αντοχής, δηλαδή μικρότερο OCR και M, τόσο

μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου αποτόνωσης της αντιστήριξης στο μέτωπο για την οποία παρατηρείται έναρξη της πλαστικοποίησης (αλλαγή στη κλίση της καμπύλης). Για παράδειγμα στο διάγραμμα 5-10 το οποίο αντιστοιχεί σε OCR=1.5 παρατηρείται ότι η πλαστικοποίηση του μετώπου γίνεται εμφανής για τιμές της πίεσης υποστήριξης του μετώπου μικρότερες από το 30% της γεωστατικής σε αντίθεση με τις αναλύσεις για OCR=1.0 που το υλικό πλαστικοποιείται σχεδόν από την αρχή της ανάλυσης, κάτι που αποδεικνύεται και από τις τασικές διαδρομές του εδαφικού στοιχείου στα διαγράμματα 5-14, 5-15, 5-16.

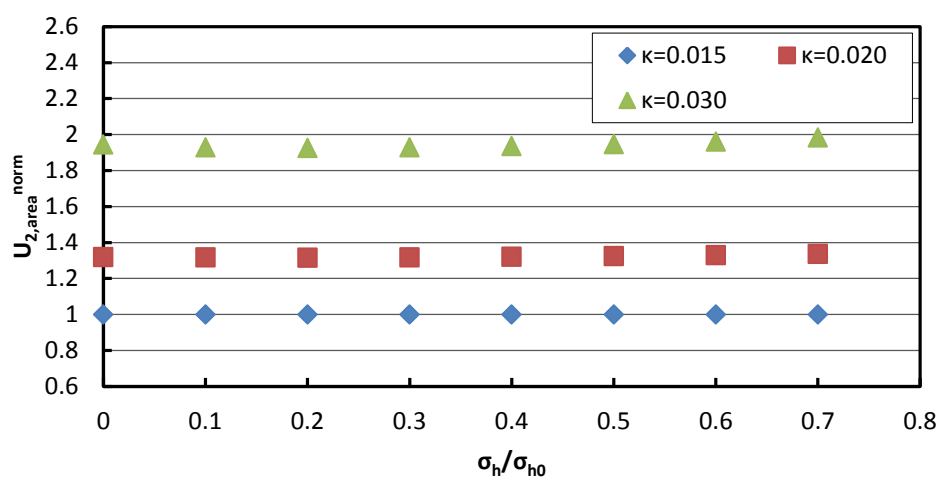
- Μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης η αύξηση της έκθλιψης με την απομείωση της πίεσης υποστήριξης είναι τόσο πιο ραγδαία όσο χαμηλότερες είναι οι παράμετροι διατμητικής αντοχής. Αυτό αποδίδεται στο ότι λόγω της χαμηλότερης αντοχής του εδάφους η ένταση εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής ανακατανέμεται σε όλο και μεγαλύτερη περιοχή του πυρήνα προώθησης, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η πλαστική περιοχή εμπρός από το μέτωπο.

5.4.3 Διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων συμπίεστικότητας κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης

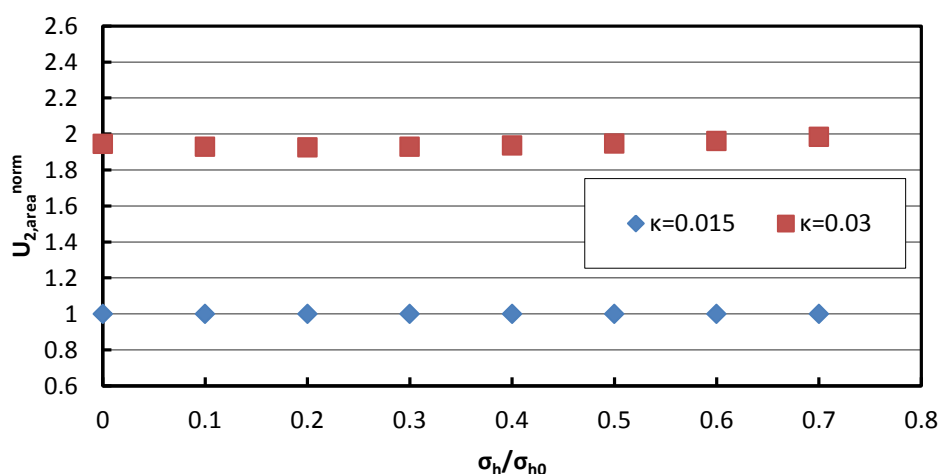
Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η επιρροή των παραμέτρων συμπίεστικότητας κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου. Η παράμετρος κ εκφράζει την κλίση της καμπύλης αποφόρτισης - επαναφόρτισης και η παράμετρος λ την κλίση της καμπύλης ισότροπης συμπίεσης στο διάγραμμα που δείχνει την συμπεριφορά ενός εδαφικού στοιχείου υπό ισότροπη συμπίεση στο επίπεδο v - $\ln p'$. Ακολουθώντας παρατίθενται συγκριτικά αδιαστατοποιημένα διαγράμματα (5-17 έως 5.23) που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για το μοντέλο με βάθος $H=3.5D$. Να σημειωθεί εδώ ότι η $U_{2,area}^{norm}$ προέκυψε από τη διαίρεση της $U_{2,area}$ για την εκάστοτε ανάλυση με την $U_{2,area}$ της ανάλυσης με την μικρότερη τιμή του της παραμέτρου κ , ενώ αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την παράμετρο λ .



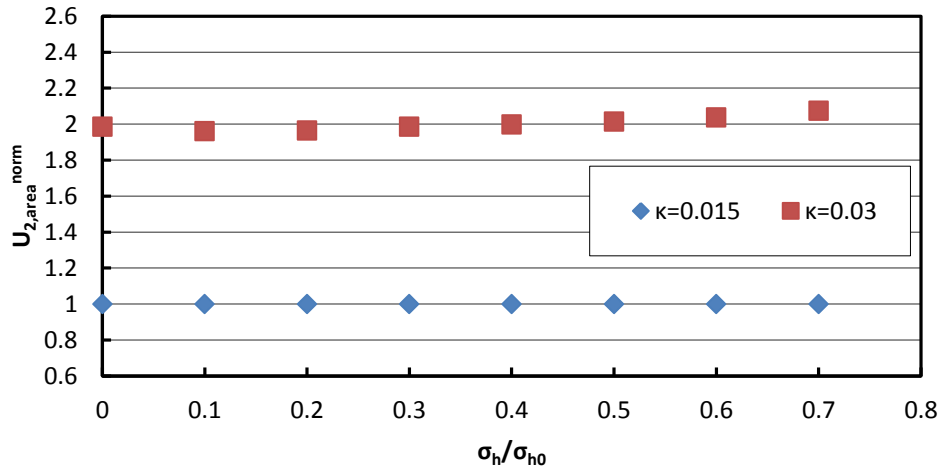
Διάγραμμα 5-17. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για λ=0.15, M=0,9, OCR=1.0



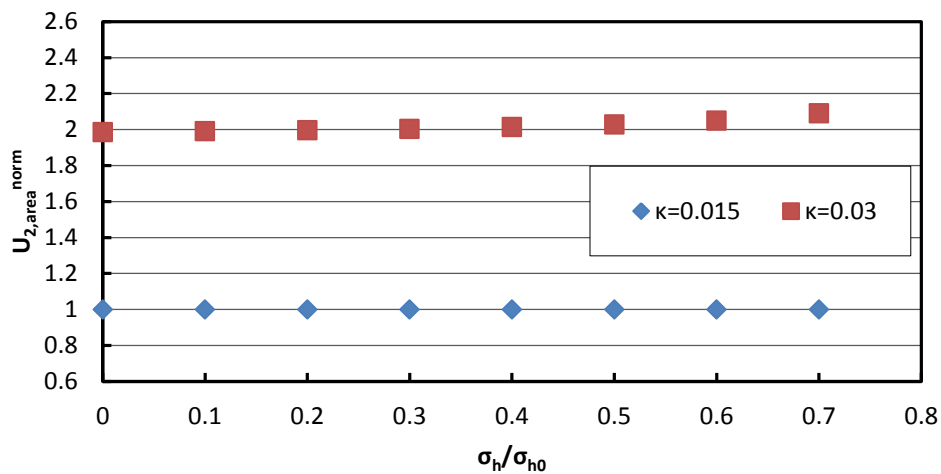
Διάγραμμα 5-18. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για λ=0.15, M=1.0, OCR=1.0



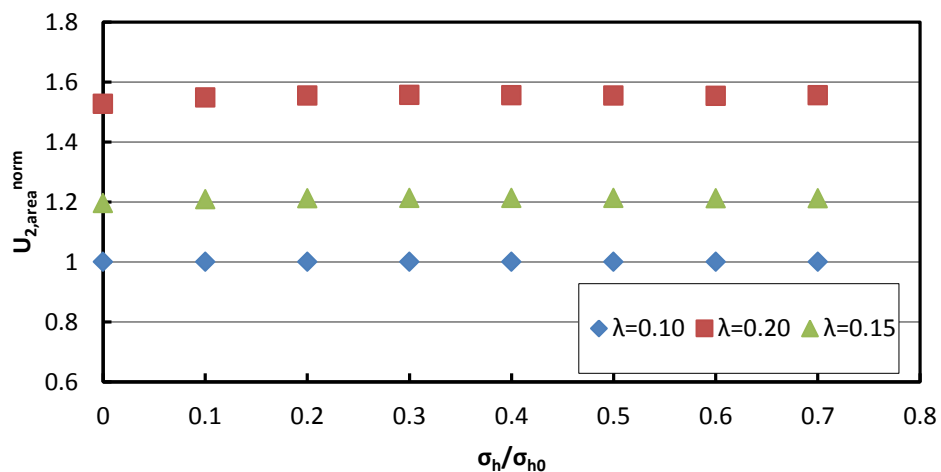
Διάγραμμα 5-19. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για λ=0.15, M=1.0, OCR=1.0



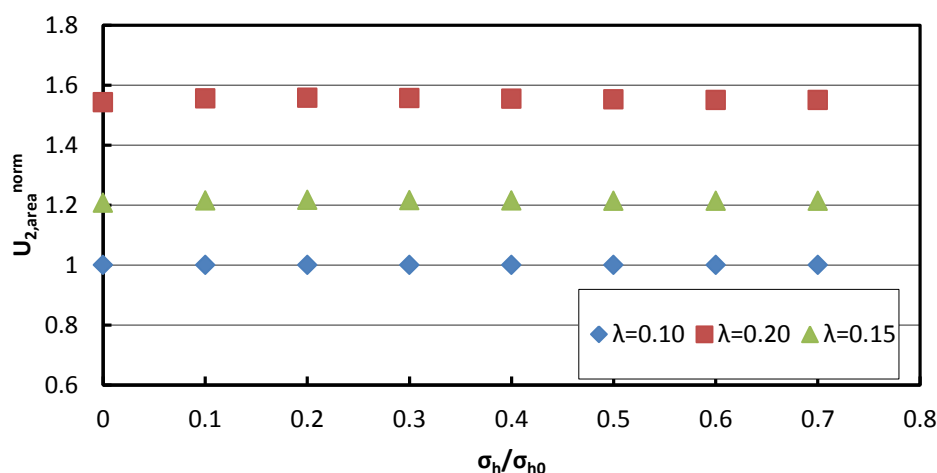
Διάγραμμα 5-20. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.5$



Διάγραμμα 5-21. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=4.0$



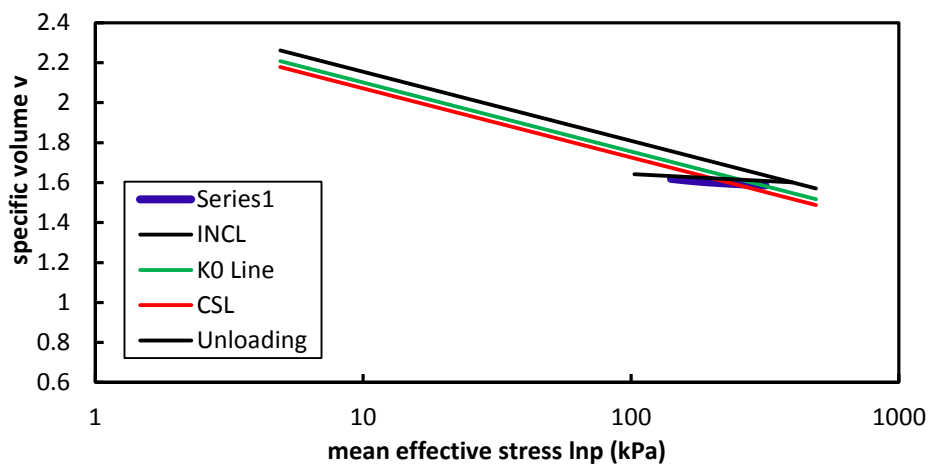
Διάγραμμα 5-22. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



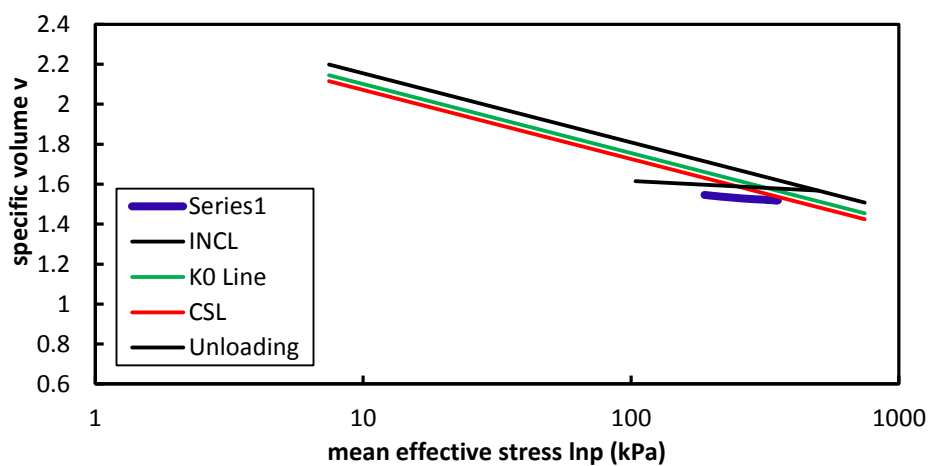
Διάγραμμα 5-23. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1.0$

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων (5-17 έως 5-23) προκύπτουν τα ακόλουθα σχόλια - συμπεράσματα:

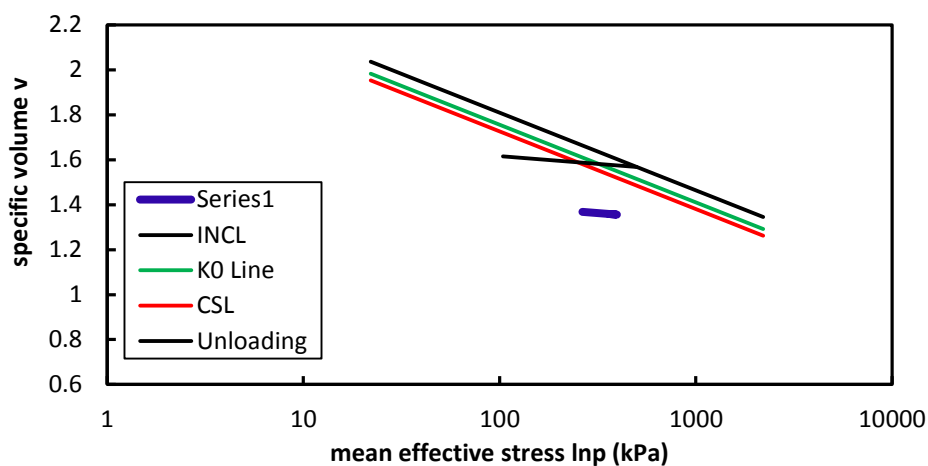
- Η μεταβολή της παραμέτρου κ είναι εμφανές ότι διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υπολογιζόμενη έκθλιψη του μετώπου. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι οποιαδήποτε ποσοστιαία μεταβολή του κ , διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους της ανάλυσης σταθερές επιφέρει αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή στην τιμή της $U_{2,area}^{norm}$. Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι σε όλες ανεξαιρέτως τις αναλύσεις, διπλασιασμός της τιμής της παραμέτρου κ επιφέρει διπλασιασμό της $U_{2,area}^{norm}$. Η σημαντική αυτή επιρροή της παραμέτρου κ στα αποτελέσματα φανερώνει ότι εν γένει η εντατική κατάσταση εμπρός από το μέτωπο αντιστοιχεί σε συνθήκες αποφόρτισης. Αυτό, επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα 5-24, 5-25 και 5-26 όπου παρατηρείται ότι η ακολουθούμενη τασική διαδρομή σε χαρακτηριστικά εδαφικά στοιχεία του πυρήνα προώθησης είναι σχεδόν παράλληλη με την καμπύλη αποφόρτισης - επαναφόρτισης.
- Σε ότι αφορά την παράμετρο λ , παρατηρείται ότι η τιμή της επηρεάζει μεν τα αποτελέσματα, η επιρροή της όμως είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη επιρροή της παραμέτρου κ .



Διάγραμμα 5-24. Τασική διαδρομή στο επίπεδο v - $\ln p$ για $OCR=1.0$



Διάγραμμα 5-25. Τασική διαδρομή στο επίπεδο v - $\ln p$ για $OCR=1.5$



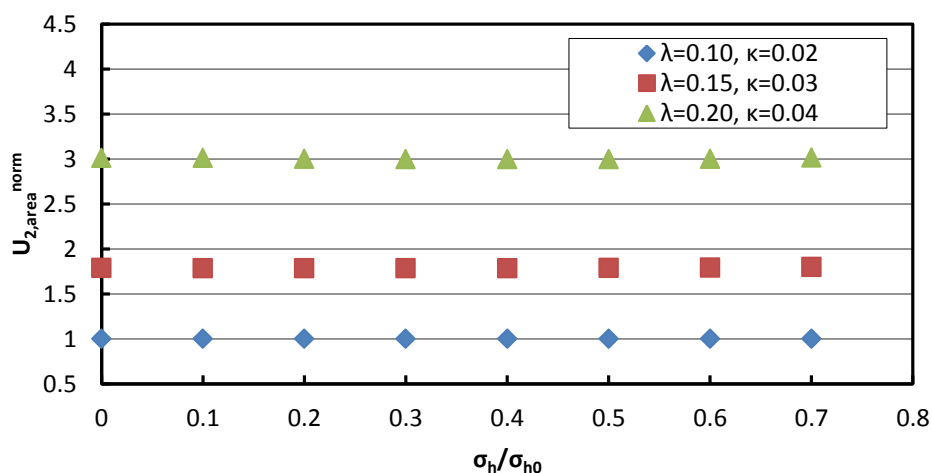
Διάγραμμα 5-26. Τασική διαδρομή στο επίπεδο v - $\ln p$ για $OCR=4.0$

- Η μορφή των κανονικοποιημένων διαγραμμάτων δεν εξαρτάται από το εάν η συμπεριφορά του μετώπου είναι ελαστική ή ελαστοπλαστική. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι το διάγραμμα 5-21 το οποίο αντιστοιχεί σε

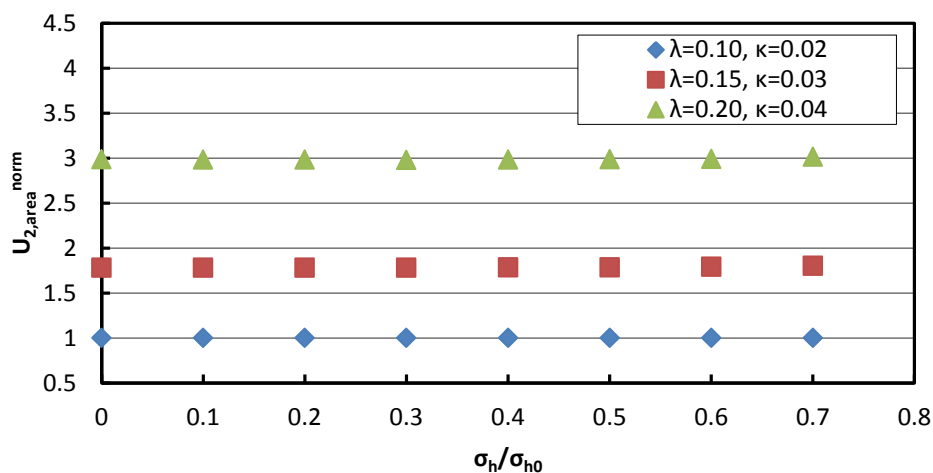
έντονα υπερστερεοποιημένο έδαφος με μεγάλο δείκτη προφόρτισης (OCR=4.0) παρουσιάζει την ίδια μορφή με το διάγραμμα 5-19, το οποίο αντιστοιχεί σε κανονικά στερεοποιημένο έδαφος (OCR=1.0). Αυτό ποιοτικά σημαίνει ότι εν γένει η επιρροή των παραμέτρων συμπίεστότητας είναι ανεξάρτητη της αντοχής του γεωλικού.

- Τέλος σε ότι αφορά την "οριακή πίεση" αντιστήριξης του μετώπου παρατηρούμε ότι αυτή προκύπτει ανεξάρτητη των παραμέτρων συμπίεστότητας του εδάφους. Αυτό φανερώνεται από τον ρυθμό εξέλιξης της έκθλιψης στο μέτωπο ο οποίος προκύπτει ανεξάρτητος της απομείωσης της πίεσης αντιστήριξης. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό στο βαθμό κατά τον οποίο η συμπίεστότητα του εδάφους, δεν επηρεάζει την ευστάθεια του μετώπου, παρα μόνο το μέγεθος των προκαλούμενων παραμορφώσεων.

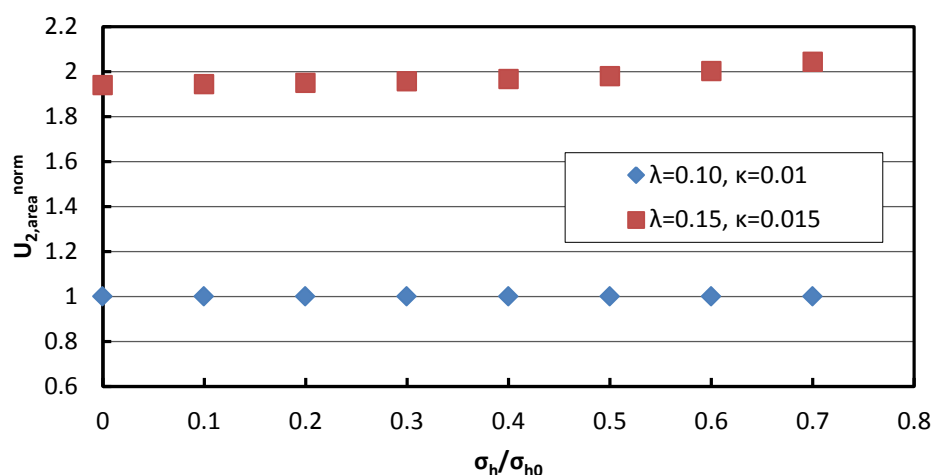
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα (5.27 έως 5-29) της συνδυασμένης επιρροής των παραμέτρων κ και λ. μέσω αποτελεσμάτων διαφόρων αναλύσεων για σταθερό λόγο κ/λ. Παρατηρούμε ότι ο λόγος κ/λ αυτός καθαυτός δεν διαφοροποιεί ποιοτικά τα αποτελέσματα στα οποία απλά αντικατοπτρίζεται η επιρροή της κάθε παραμέτρου συμπίεστότητας όπως αυτή αναλύθηκε παραπάνω.



Διάγραμμα 5-27. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για M=0.9, OCR=1.0



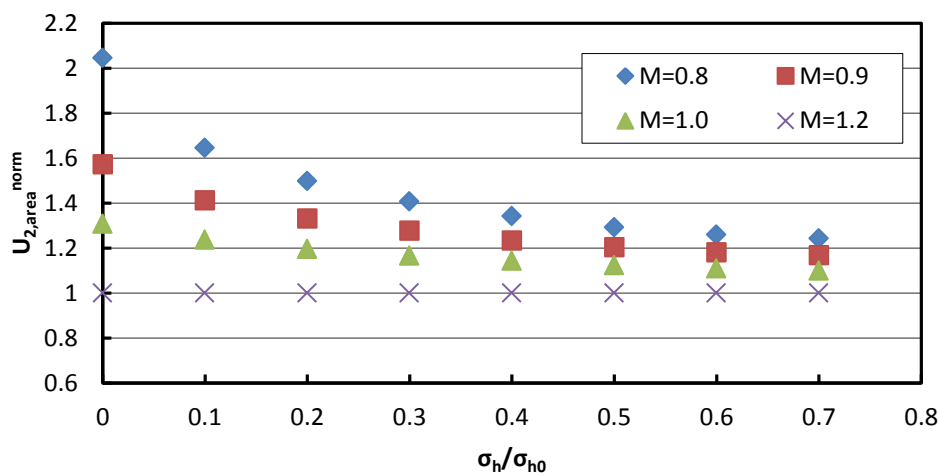
Διάγραμμα 5-28. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $M=1.0$, $OCR=1.0$



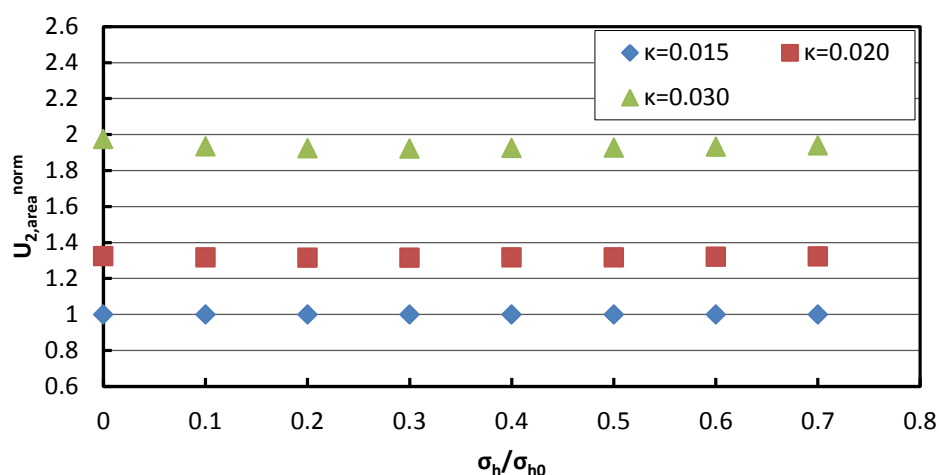
Διάγραμμα 5-29. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $M=1.0$, $OCR=4.0$

5.4.4 Η επιρροή του βάθους

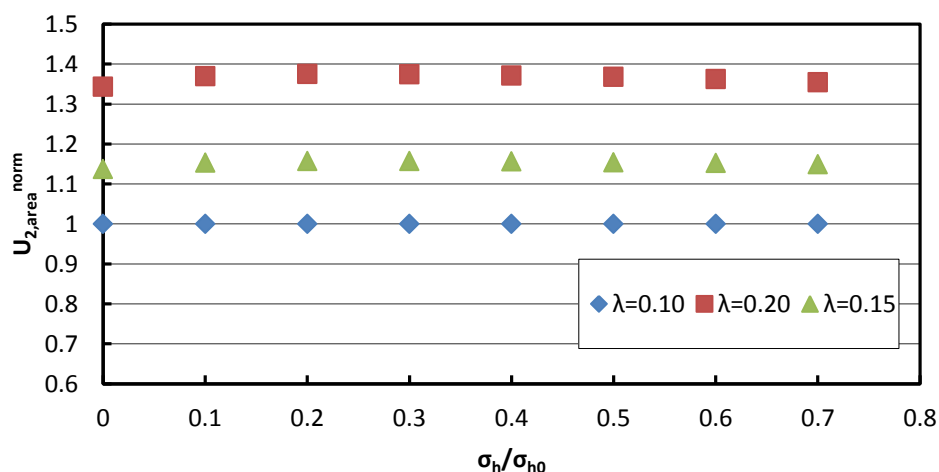
Οι αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το «βαθύ» μοντέλο ($H=3.5D$) παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αντίστοιχα αποτελέσματα με παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά προέκυψαν και για το «ρηχό» μοντέλο ($H=1.5D$). Παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα (5-30 έως 5-32) για το «ρηχό» μοντέλο που φανερώνουν την επιρροή μεμονωμένων παραμέτρων στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου. Το σύνολο των συγκριτικών διαγραμμάτων που παρουσιάζουν την επιρροή των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπιεστότητας στην αδιαστατοποιημένη έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής για το «ρηχό» μοντέλο παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.



Διάγραμμα 5-30. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



Διάγραμμα 5-31. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.0$

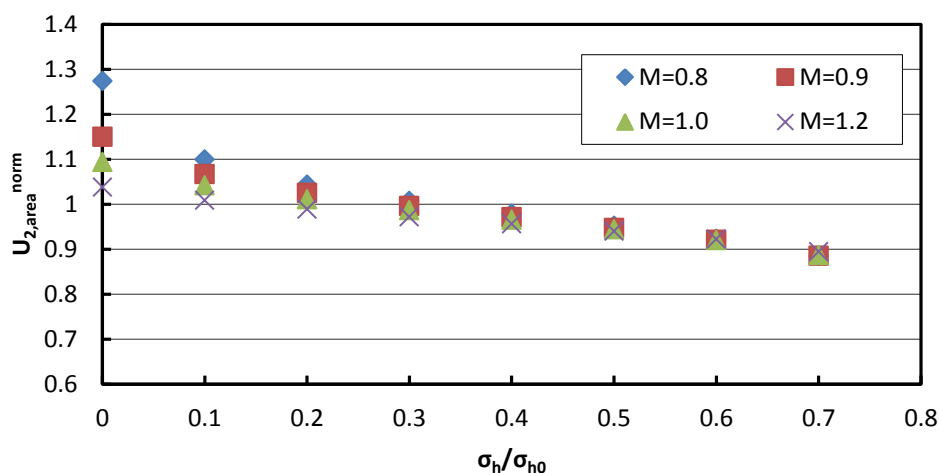


Διάγραμμα 5-32. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1$

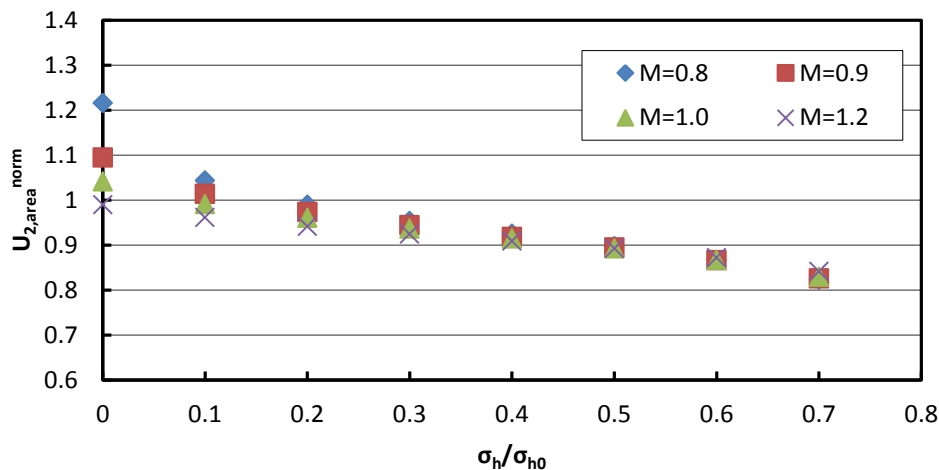
Παρατηρείται ότι όσον αφορά την μορφή τους υπάρχει σημαντική ομοιότητα των παραπάνω διαγραμμάτων με τα αντίστοιχα που παρουσιάστηκαν για το «βαθύ» μοντέλο.

- Διάγραμμα 5-30 → Διάγραμμα 5-6
- Διάγραμμα 5-31 → Διάγραμμα 5-18
- Διάγραμμα 5-32 → Διάγραμμα 5-23

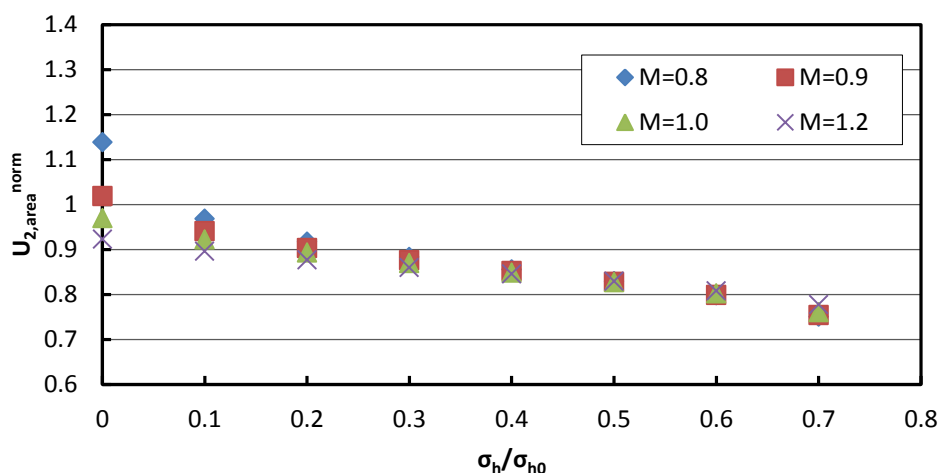
Άρα μένει να δειχθεί η επιρροή αποκλειστικά του βάθους στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου, πως διαφοροποιείται δηλαδή η μετακίνηση του εδαφικού υλικού στο μέτωπο με σταθερές όλες τις εδαφικές παραμέτρους και μόνη διαφοροποίηση το βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η εκσκαφή της σήραγγας. Τα αποτελέσματα της επιρροής του βάθους παρουσιάζονται στα παρακάτω συγκριτικά αδιαστατοποιημένα διαγράμματα (5-33 έως 5-48). Η αδιαστατοποιημένη μέση έκθλιψη $U_{2,area}^{norm}$ προέκυψε από διαίρεση των τιμών της $U_{2,area}$ των αναλύσεων που έγιναν στο «ρηχό» ($H=1.5D$) μοντέλο με τις αντίστοιχες στο «βαθύ» ($H=3.5D$).



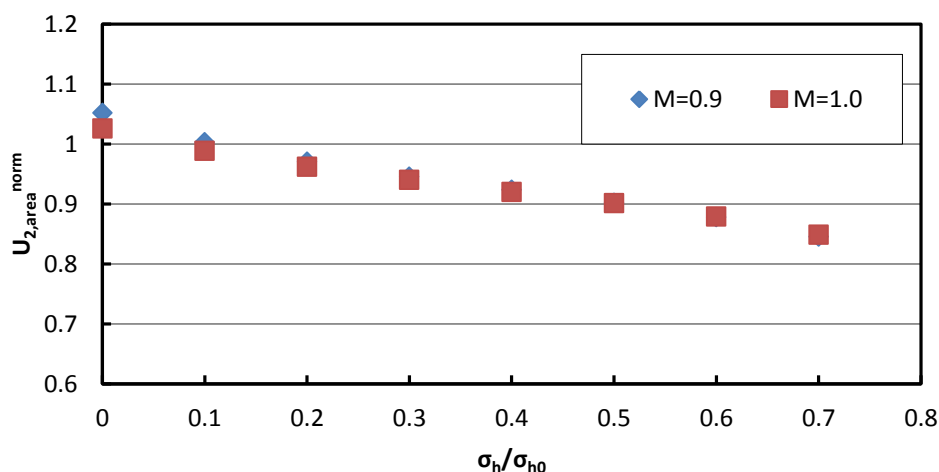
Διάγραμμα 5-33. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M .



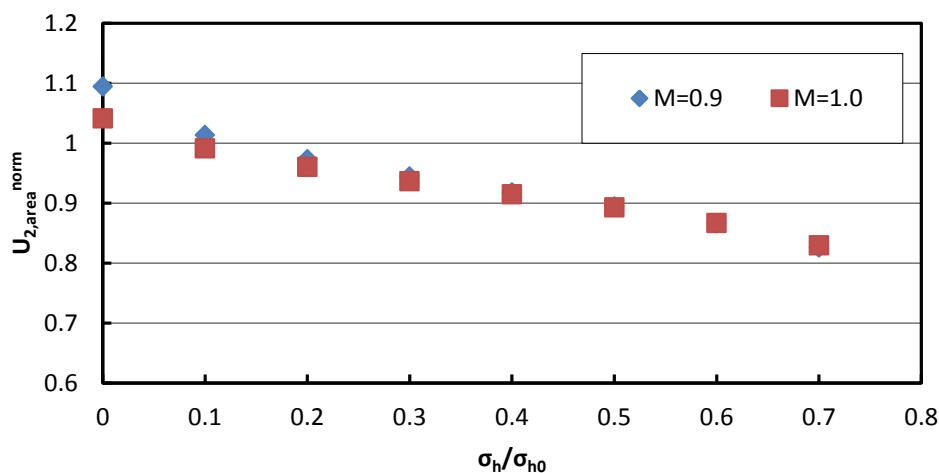
Διάγραμμα 5-34. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M



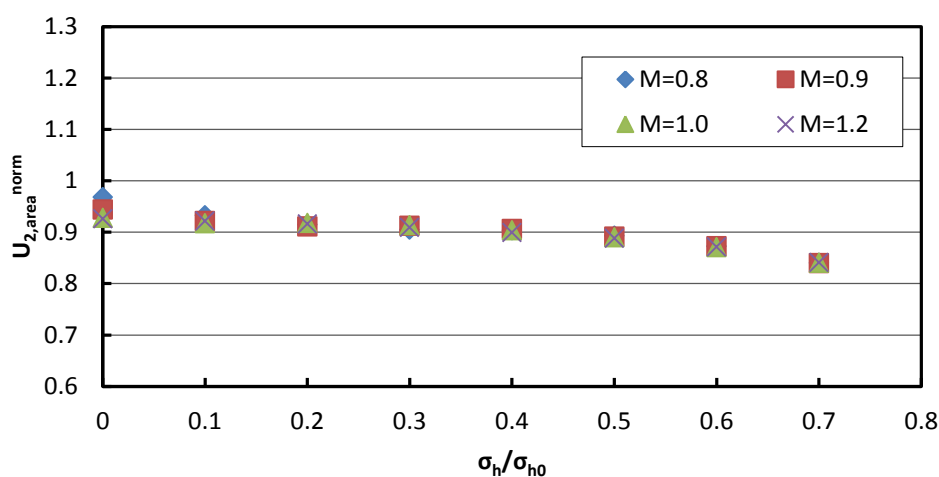
Διάγραμμα 5-35. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.04$, $\lambda=0.20$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M



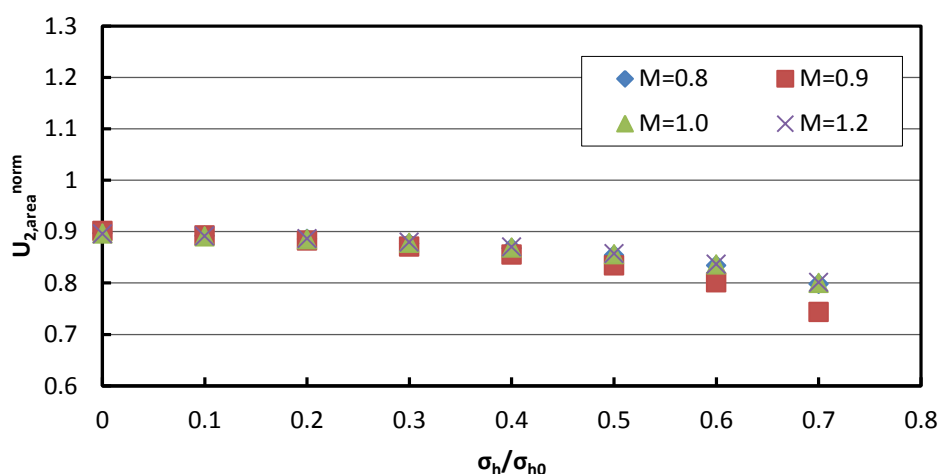
Διάγραμμα 5-36. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M



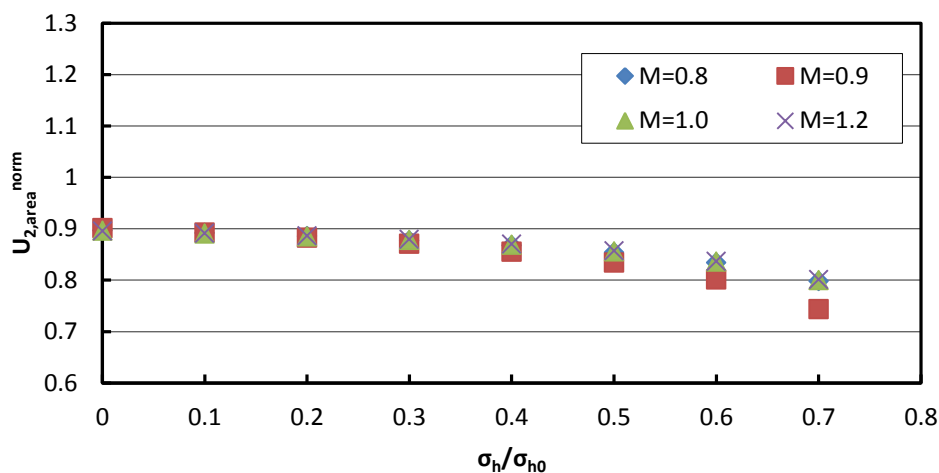
Διάγραμμα 5-37. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M



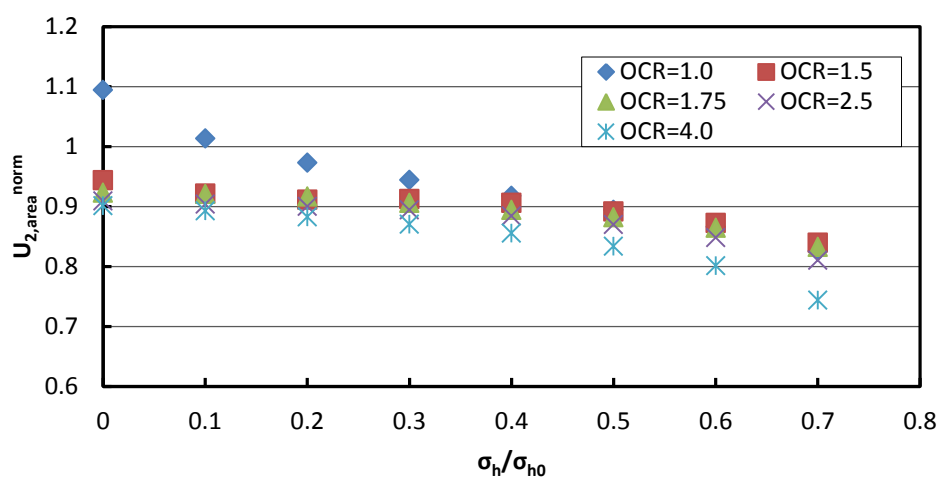
Διάγραμμα 5-38. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του M



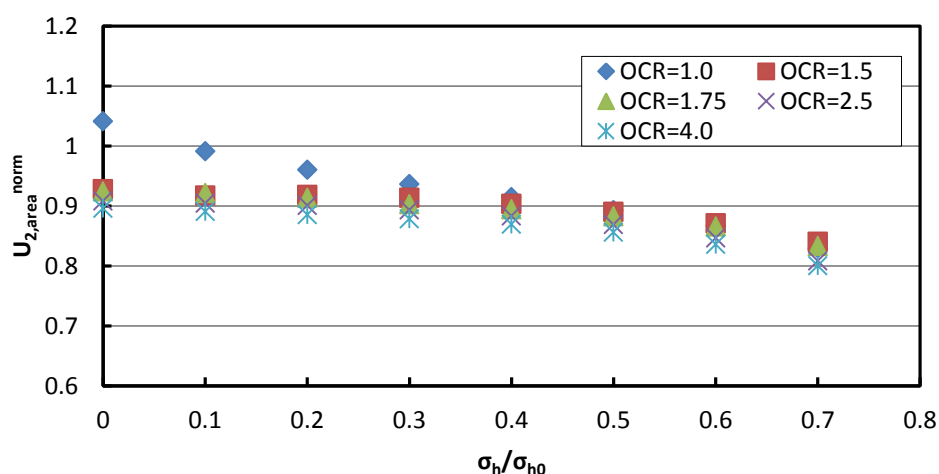
Διάγραμμα 5-39. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$ και διάφορες τιμές του M



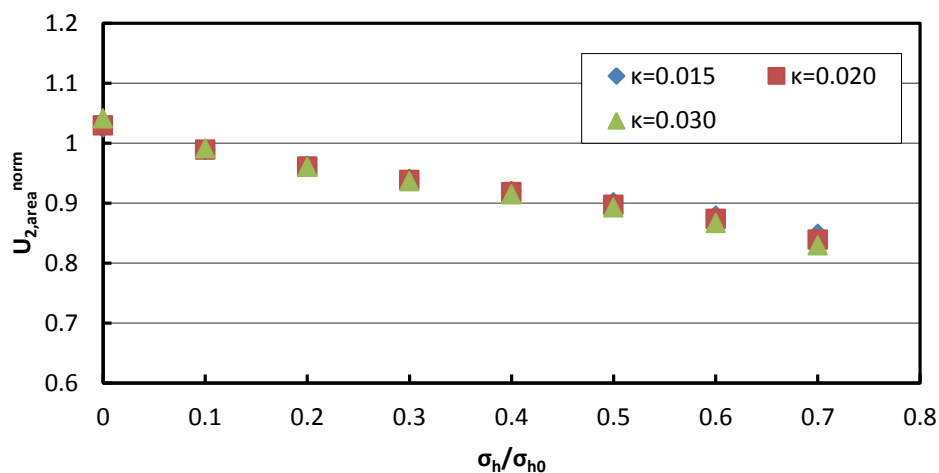
Διάγραμμα 5-40. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=4.0$ και διάφορες τιμές του M



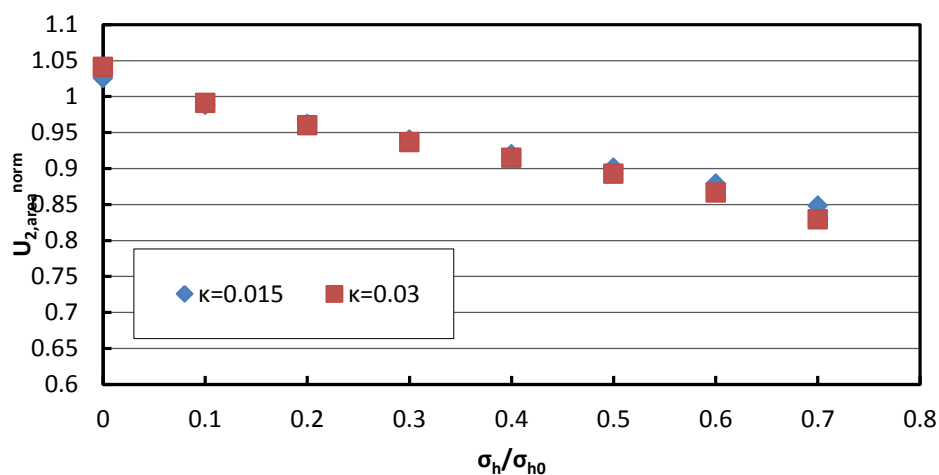
Διάγραμμα 5-41. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$ και διάφορες τιμές του OCR



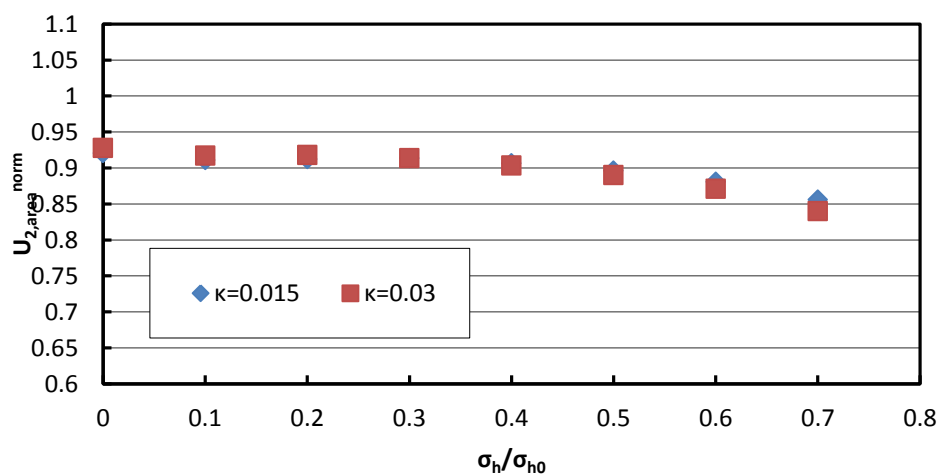
Διάγραμμα 5-42. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$ και διάφορες τιμές του OCR



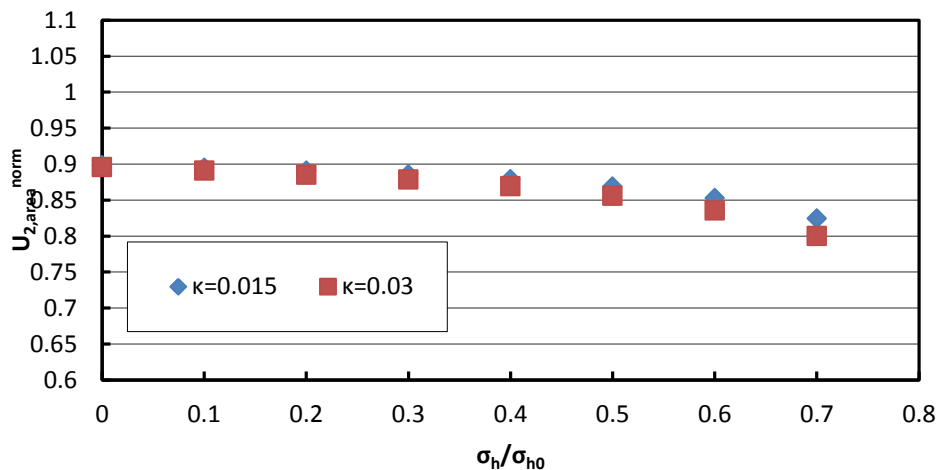
Διάγραμμα 5-43. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του κ



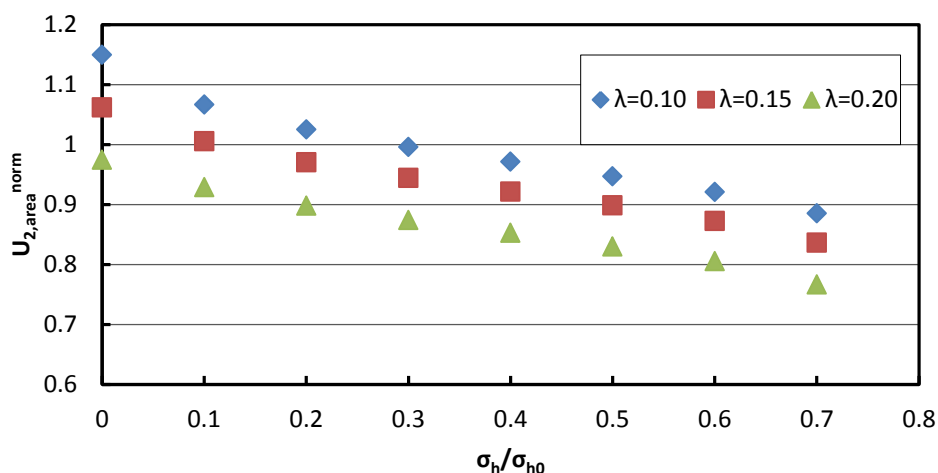
Διάγραμμα 5-44. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του κ



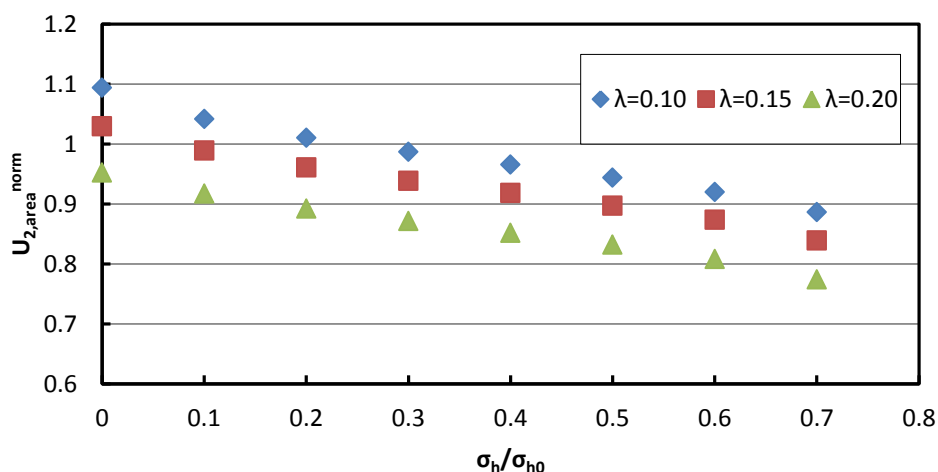
Διάγραμμα 5-45. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.5$ και διάφορες τιμές του κ



Διάγραμμα 5-46. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=4.0$ και διάφορες τιμές του κ



Διάγραμμα 5-47. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=0.9$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του λ



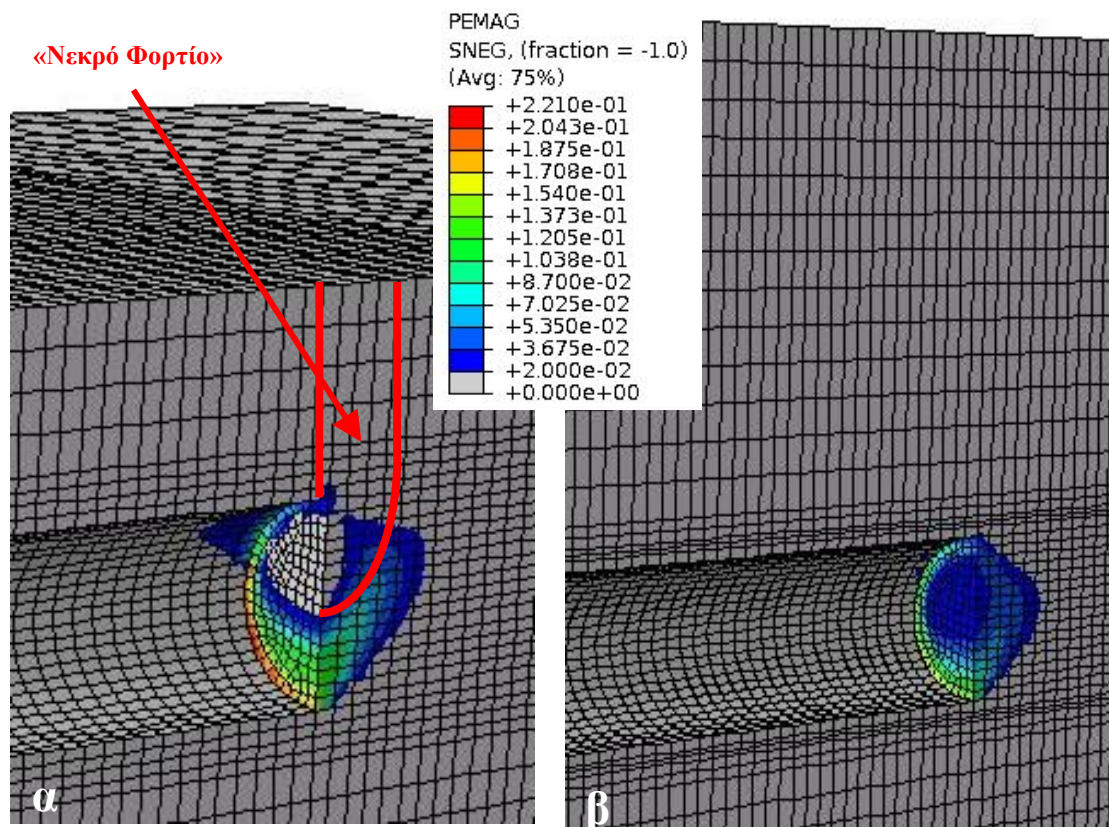
Διάγραμμα 5-48. Επίδραση του βάθους στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1.0$ και διάφορες τιμές του λ

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα σχόλια - συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή του βάθους:

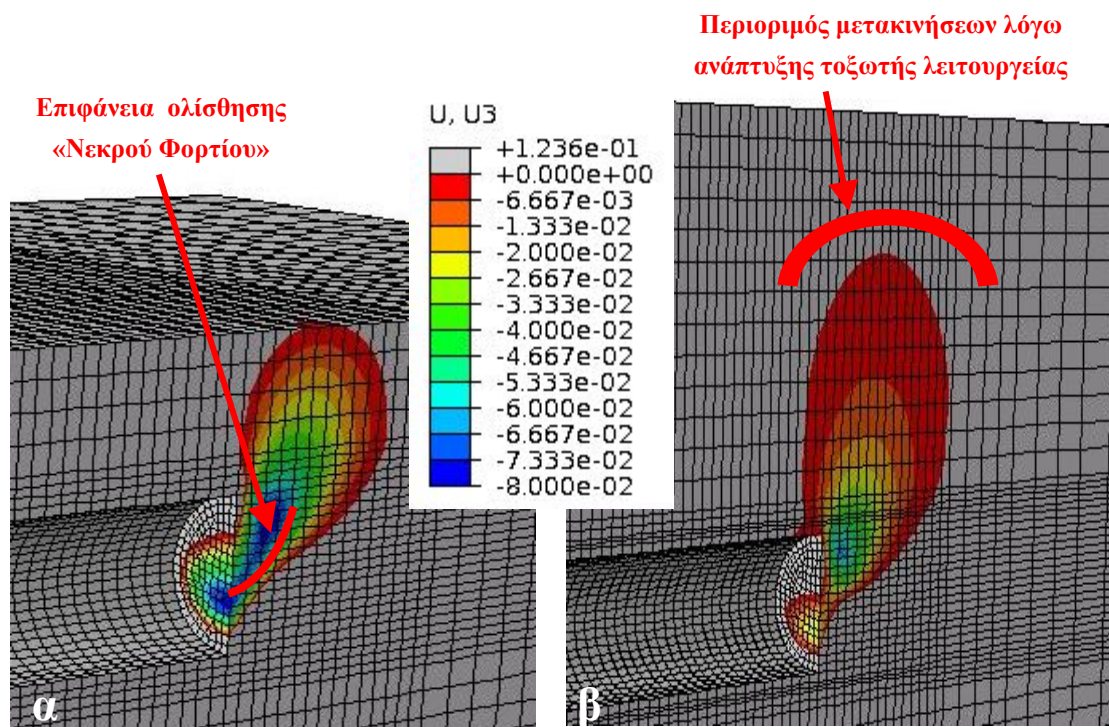
- Για κανονικά στερεοποιημένο έδαφος και για ίδια τιμή της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης (M), η τελική τιμή της έκθλιψης του μετώπου αυξάνεται, καθώς ο λόγος H/D μειώνεται, δηλαδή αυξάνεται όσο μειώνεται το βάθος της σήραγγας. Η παρατήρηση αυτή γίνεται φανερή εάν κανείς παρατηρήσει όλα τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε OCR=1 (5-40, 5-43, 5-44) όπου εν γένει φαίνεται η έκθλιψη του μετώπου στη ρηχή σήραγγα να καταλήγει σε υψηλότερες τιμές από την αντίστοιχη της βαθιάς.
- Αντίθετα, σε υπερστερεοποιημένα υλικά, όπου στο μέτωπο δεν παρατηρείται σημαντική πλαστικοποίηση, η τελική τιμή της έκθλιψης επηρεάζεται κυρίως από την ελαστική αποφόρτιση που οφείλεται στην αποτόνωση του οριζοντίου πεδίου των τάσεων, και για το λόγο αυτό είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο βαθύτερη είναι η σήραγγα. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα 5-40 και 5-46 τα οποία αντιστοιχούν σε έντονα υπερστερεοποιημένο έδαφος όπου παρατηρείται ότι η τιμή της έκθλιψης στο ρηχό μοντέλο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στο βαθύ.
- Η παραπάνω συμπεριφορά σχετίζεται με την διαφορά στον προκαλούμενο μηχανισμό αστοχίας μεταξύ αβαθών και βαθιών σηράγγων. Στις αβαθείς σήραγγες $H/D < 3.0$ η αστοχία του μετώπου είναι κυρίως αποτέλεσμα της ανεπαρκούς τοξωτής λειτουργίας του εδάφους καθώς η γειτνίαση του πυρήνα προώθησης με την επιφάνεια του εδάφους περιορίζει την δυνατότητα ανακατανομής των τάσεων κατά την πλαστικοποίηση. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό μίας κινητοποιούμενη μάζας πάνω από τον πυρήνα προώθησης, η οποία φορτίζει το μέτωπο σαν νεκρό φορτίο, και έχει ως τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της παρατηρούμενης έκθλιψης σε σχέση με μία αντίστοιχη περίπτωση βαθιάς σήραγγας, όπου υπάρχει ικανό ύψος υπερκειμένων για την ανάπτυξη δράσης θόλου πάνω από τον πλαστικοποιημένο πυρήνα προώθησης. Είναι προφανές ότι το παραπάνω φαινόμενο προϋποθέτει την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων για αυτό και περιορίζεται μόνο σε περιπτώσεις μικρού OCR. Ενδείξεις του περιγραφόμενου μηχανισμού αστοχίας διακρίνονται και στις εικόνες 5-2 και 5-3. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στην εικόνα 5-2α εντός του πυρήνα προώθησης εμφανίζεται μια μη έντονα πλαστικοποιημένη περιοχή, η οποία αντιστοιχεί στο έδαφος το οποίο μετακινείται ως στερεό σώμα και αντιστοιχεί στο αποκαλούμενο «νεκρό φορτίο». Η ζώνη ολίσθησης αυτού του πρίσματος διακρίνεται και στην εικόνα 5-3α. Αντίθετα στις εικόνες 5-2β και 5-3β οι οποίες αντιστοιχούν

στο βαθύ προσομοίωμα αφενός η προκαλούμενη πλαστικοποίηση είναι πιο περιορισμένη, αφετέρου οι σημαντικές μετακινήσεις του μετώπου περιορίζονται σε ένα βάθος περίπου μιάμισης διαμέτρου πάνω από τη σήραγγα και δεν επηρεάζουν την επιφάνεια του εδάφους.

- Η επίδραση του παραπάνω μηχανισμού περιορισμένης ανακατανομής της έντασης παρατηρείται και στο διάγραμμα 5-34, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων 5-6 και 5-30. Παρατηρείται ότι για την αβαθή σήραγγα, η έκθλιψη πριν την εκδήλωση της πλαστικοποίησης λαμβάνει τιμές χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του βαθύτερου μοντέλου, τάση η οποία αντιστρέφεται με την έναρξη της πλαστικοποίησης, καθώς ο ρυθμός αύξησης της έκθλιψης με την μείωση της πίεσης υποστήριξης μεγαλώνει σημαντικά. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική καθώς σε πρακτικούς όρους σημαίνει ότι η μετάβαση από μία κατάσταση ευσταθούς μετώπου σε μία κατάσταση μη ευσταθούς μετώπου δύναται να είναι αρκετά απότομη, κάτι το οποίο εγκυμονεί τον κίνδυνο απροειδοποίητης κατάρρευσης του μετώπου, και καταδεικνύει την ιδιαίτερα αυξημένη σημασία πρόβλεψης του βαθμού ευστάθειας μετώπου σε αβαθείς σήραγγες.



Εικόνα 5-2. Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων για το ρηχό (α) και το βαθό (β) προσομοίωμα σε ανάλυση με παραμέτρους $\kappa=0.04$, $\lambda=0.2$, $M=0.8$, $OCR=1.0$



Εικόνα 5-3. Σύγκριση κατακόρυφης μετακίνησης για το ρηχό (α) και το βαθό (β) προσομοίωμα στην ανάλυση με παραμέτρους $\kappa=0.04$, $\lambda=0.2$, $M=0.8$, $OCR=1.0$

5.5 Εκτίμηση ευστάθειας μετώπου εκσκαφής σήραγγας

5.5.1 Υπολογισμός παραμέτρων Ω_F και Λ_F

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται να εκτιμηθεί η ευστάθεια ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής σε όρους αδιαστατοποιημένης έκθλιψης $\Omega_{F,Area}$ και συντελεστή ευστάθειας Λ_F όπως ορίστηκαν από τον Προυντζόπουλος (2011) και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Η βασική διαφοροποίηση έγκειται στην ανάγκη έκφρασης του κριτηρίου αστοχίας του εδάφους σε όρους του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam - Clay.

Η πρώτη βασική διαφοροποίηση έγκειται στην ανάγκη εύρεσης μίας ισοδύναμης τιμής του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους (E_{soil}), αντιπροσωπευτικής της κάθε ανάλυσης, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη σχέση 4-1 από την οποία προκύπτει το $\Omega_{F,Area}$. Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2, η ελαστική συμπεριφορά του εδάφους όταν αυτό προσομοιώνεται με το Modified Cam - Clay είναι μη γραμμική και εξαρτάται από την κλίση της καμπύλης αποφόρτισης - επαναφόρτισης (κ), από τον τρέχοντα λόγο κενών και το τρέχον πεδίο των τάσεων, πράγμα που σημαίνει ότι το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας δεν είναι σταθερό αλλά συνάρτηση του βάθους. Έτσι, για την εκτίμησή του ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Προσομοιώθηκε σε υλικό σημείο μία τριαξονική δοκιμή φόρτισης με χρήση του προσομοιώματος Modified Cam-Clay. Η δοκιμή αυτή έγινε από μία φορά για κάθε μία από τις παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας, προφανώς, τις αντίστοιχες παραμέτρους του προσομοιώματος (κ , λ , M , OCR). Η κάθε δοκιμή εκτελέστηκε με αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις τάσεις του κεντρικού πεπερασμένου στοιχείου στο μέτωπο της σήραγγας πριν την αποτόνωση των οριζοντίων τάσεων καθώς και στον ίδιο λόγο κενών. Η προσομοίωση της δοκιμής περιελάμβανε δύο στάδια, ένα φόρτισης μέχρι κατακόρυφης παραμόρφωσης 35% και στην συνέχεια αποφόρτιση μέχρι μηδενισμού της κατακόρυφης τάσης. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε από την κλίση της καμπύλης κατακόρυφης τάσης (σ_y) - κατακόρυφης παραμόρφωσης (ϵ_y) κατά την αποφόρτιση. Οι τιμές που υπολογίστηκαν δίνονται στους πίνακες 5-2 και 5-3 για το ρηχό και το βαθύ μοντέλο αντίστοιχα.

Η μέση γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας P_0 για κάθε ανάλυση προέκυψε από τη λύση της εξίσωσης 4-10 για βάθος ίσο με αυτό του κέντρου της σήραγγας, ενώ με βάση την τιμή αυτή από την εξίσωση 4-2 προέκυψε ένα ισοδύναμο ειδικό βάρος γ , για να χρησιμοποιηθεί στην έκφραση του Λ_F .

Συνεπώς, η κανονικοποιημένη μορφή της μέσης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου εκφράζεται με την ίδια ακριβώς συσχέτιση που χρησιμοποιήθηκε και από τον Προυντζόπουλος (2011):

$$\Omega_{F,Area} = \frac{U_{h,Area} \cdot E_{soil}}{DP_0} \quad 5-1$$

όπου οι τιμές των παραμέτρων E_{soil} και P_0 εκτιμώνται μέσω της διαδικασίας που προαναφέρθηκε. Στους πίνακες 5-2 και 5-3 δίνονται οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση 5-1 για κάθε μία από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν για το ρηχό και το βαθύ προσομοίωμα αντίστοιχα.

Οι υπολογισθείσες τιμές της κανονικοποιημένης μέσης έκθλιψης $\Omega_{F,Area}$ των πινάκων 5-2 και 5-3 μας οδηγούν στις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Για ίδιες παραμέτρους διατμητικής αντοχής η τιμή της $\Omega_{F,Area}$ προκύπτει να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τις παραμέτρους συμπιεστότητας (κ , λ). Αυτό φαίνεται, για παράδειγμα, από τις τιμές που λαμβάνει η κανονικοποιημένη μέση έκθλιψη στον κάθε πίνακα στις αναλύσεις 1, 4 και 9, όπου η διαφορά μεταξύ των τιμών της είναι ελάχιστη. Αυτό αποδίδεται στην αδιαστατοποίηση των παραμέτρων συμπιεστότητας μέσω του μέτρου ελαστικότητας E και αποτελεί μία σημαντική ένδειξη της αξιοπιστίας της μεθόδου που επιλέχθηκε να ακολουθηθεί για την εκτίμηση μίας ισοδύναμης τιμής του.
- Αντίθετα, παρατηρείται ότι για ίδιες παραμέτρους συμπιεστότητας (κ , λ), μικρή μεταβολή των παραμέτρων αντοχής του εδάφους (M , OCR) επιφέρει σημαντική μεταβολή της $\Omega_{F,Area}$. Συνεπώς κρίνεται ότι οι υπολογισθείσες τιμές $\Omega_{F,Area}$ αντικατοπτρίζουν επιτυχώς την σημασία της αλλαγής των παραμέτρων αντοχής και δύναται να χρησιμοποιηθούν ως ένα μέτρο για την εκτίμηση της ευστάθειας του μετώπου.

Πίνακας 5-2. Τιμές παραμέτρων για σήραγγα H/D=1.5

Nr	OCR	λ	κ	M	E (kPa)	P ₀ (kPa)	$\Omega_{F,Area}$
1	1.00	0.10	0.100	0.8	10364	100.26	0.884847
2	1.00	0.10	0.100	0.9	10648	99.84	0.706455
3	1.00	0.10	0.100	1.0	10874	99.51	0.604074
4	1.00	0.10	0.100	1.2	11445	99.05	0.489645
5	1.00	0.15	0.150	0.8	6751.1	112.62	0.878994
6	1.00	0.15	0.150	0.9	6856.2	111.80	0.690908
7	1.00	0.15	0.150	1.0	6973.9	111.17	0.588173
8	1.00	0.15	0.150	1.2	7276.2	110.28	0.472869
9	1.00	0.20	0.200	0.8	4849.9	129.74	0.871338
10	1.00	0.20	0.200	0.9	4892.3	128.24	0.674679
11	1.00	0.20	0.200	1.0	4948.6	127.08	0.56992
12	1.00	0.20	0.200	1.2	5102.6	125.46	0.452321
13	1.50	0.15	0.225	0.8	7010.3	116.80	0.430849
14	1.50	0.15	0.225	0.9	7092.4	115.92	0.381296
15	1.50	0.15	0.225	1.0	7218.6	115.24	0.346161
16	1.50	0.15	0.225	1.2	7530.5	114.28	0.308626
17	4.00	0.15	0.600	0.8	7673.9	128.41	0.275932
18	4.00	0.15	0.600	0.9	7772.4	127.34	0.279807
19	4.00	0.15	0.600	1.0	7906.1	126.51	0.282434
20	4.00	0.15	0.600	1.2	8242	125.34	0.293649
21	1.00	0.15	0.150	0.9	13527	112.32	0.657292
22	1.00	0.15	0.150	1.0	13791	111.61	0.586754
23	1.50	0.15	0.225	0.9	14032	116.48	0.369015
24	1.50	0.15	0.225	1.0	14352	115.71	0.342630
25	4.00	0.15	0.600	0.9	15409	128.02	0.277434
26	4.00	0.15	0.600	1.0	15673	127.08	0.281474
27	4.00	0.10	0.400	0.9	22823	107.65	0.264204
28	1.00	0.20	0.200	0.9	9684.6	129.19	0.642560
29	1.00	0.15	0.150	0.9	10270	112.15	0.669874
30	1.00	0.15	0.150	1.0	10412	111.46	0.587176
31	1.00	0.20	0.200	1.0	9797.7	127.87	0.568811
32	4.00	0.10	0.400	1.0	22759	107.22	0.262967
33	1.75	0.15	0.263	0.9	7192.3	117.57	0.320050
34	1.75	0.15	0.263	1.0	7318.1	116.87	0.300340
35	2.50	0.15	0.375	0.9	7433.5	121.59	0.275716
36	2.50	0.15	0.375	1.0	7566.6	120.84	0.278157

Πίνακας 5-3. Τιμές παραμέτρων για σήραγγα H/D=3.5

Nr	OCR	λ	κ	M	E (kPa)	P ₀ (kPa)	$\Omega_{F,Area}$
1	1.00	0.10	0.100	0.8	24461	246.50	0.666844
2	1.00	0.10	0.100	0.9	24999	245.43	0.5867807
3	1.00	0.10	0.100	1.0	25560	244.60	0.528215
4	1.00	0.10	0.100	1.2	26850	243.41	0.450493
5	1.00	0.15	0.150	0.8	15738	285.58	0.664703
6	1.00	0.15	0.150	0.9	15963	283.34	0.580086
7	1.00	0.15	0.150	1.0	16229	281.62	0.518926
8	1.00	0.15	0.150	1.2	16914	279.18	0.438835
9	1.00	0.20	0.200	0.8	11120	344.80	0.660308
10	1.00	0.20	0.200	0.9	11189	340.22	0.570782
11	1.00	0.20	0.200	1.0	11297	336.72	0.506377
12	1.00	0.20	0.200	1.2	11596	331.83	0.421058
13	1.50	0.15	0.225	0.8	16338	297.07	0.407881
14	1.50	0.15	0.225	0.9	16565	294.65	0.371280
15	1.50	0.15	0.225	1.0	16829	292.78	0.342365
16	1.50	0.15	0.225	1.2	17544	290.13	0.305805
17	4.00	0.15	0.600	0.8	18054	329.39	0.282199
18	4.00	0.15	0.600	0.9	18338	326.38	0.285825
19	4.00	0.15	0.600	1.0	18592	324.06	0.289400
20	4.00	0.15	0.600	1.2	19332	320.79	0.300578
21	1.00	0.15	0.150	0.9	31524	284.76	0.574440
22	1.00	0.15	0.150	1.0	32051	282.80	0.524688
23	1.50	0.15	0.225	0.9	32774	296.19	0.364415
24	1.50	0.15	0.225	1.0	33401	294.07	0.340862
25	4.00	0.15	0.600	0.9	36392	328.29	0.284320
26	4.00	0.15	0.600	1.0	36993	325.65	0.288548
27	4.00	0.10	0.400	0.9	53167	265.52	0.263499
28	1.00	0.20	0.200	0.9	22168	343.12	0.568135
29	1.00	0.15	0.150	0.9	23750	284.29	0.575412
30	1.00	0.15	0.150	1.0	24243	282.41	0.524146
31	1.00	0.20	0.200	1.0	22402	339.12	0.515116
32	4.00	0.10	0.400	1.0	53548	264.42	0.265197
33	1.75	0.15	0.263	0.9	16809	299.20	0.318393
34	1.75	0.15	0.263	1.0	17113	297.27	0.298767
35	2.50	0.15	0.375	0.9	17444	310.32	0.278915
36	2.50	0.15	0.375	1.0	17717	308.24	0.281240

Στην συνέχεια και για τον υπολογισμό του συντελεστή ευστάθειας Λ_F απαιτείται η εκτίμηση ισοδύναμων τιμών για την συνοχή και για την γωνία τριβής.

Σε ότι αφορά τη γωνία τριβής ϕ , αυτή μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα και αξιόπιστα μέσω της σχέσης 3-29 που έχει αναφερθεί στο 3^ο κεφάλαιο και συνδέει τη γωνία τριβής του υλικού με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης M. Χρησιμοποιήθηκε η σχέση που αντιστοιχεί στην περίπτωση τριαξονικής θλίψης.

Η μεγαλύτερη δυσκολία βρίσκεται στην ανάγκη εύρεσης μίας ισοδύναμης τιμής για την συνοχή. Σε αδρές γραμμές μπορεί να πει κανείς ότι η επίδραση της συνοχής στην αντοχή του εδάφους είναι παρόμοια με την επίδραση που έχει στην αντοχή ο

δείκτης προφόρτισης OCR, όταν αυτή εκφράζεται σε όρους Modified Cam - Clay. Παρ' όλα αυτά επειδή δεν υπάρχει κάποια αξιόπιστη διαδικασία συσχέτισης μεταξύ της συνοχής και του δείκτη προφόρτισης, αποφασίστηκε στην νέα προτεινόμενη μορφή του συντελεστή ευστάθειας Λ_F να αντικατασταθεί συνολικά ο όρος της συνοχής από τον δείκτη προφόρτισης OCR και να γίνει νέα κατάλληλη βαθμονόμηση της προτεινόμενης σχέσης με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων. Προτείνεται η παρακάτω έκφραση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F :

$$\Lambda_F = \frac{33OCR(N_\varphi)^\alpha}{\gamma H^{1-b} D^b}$$

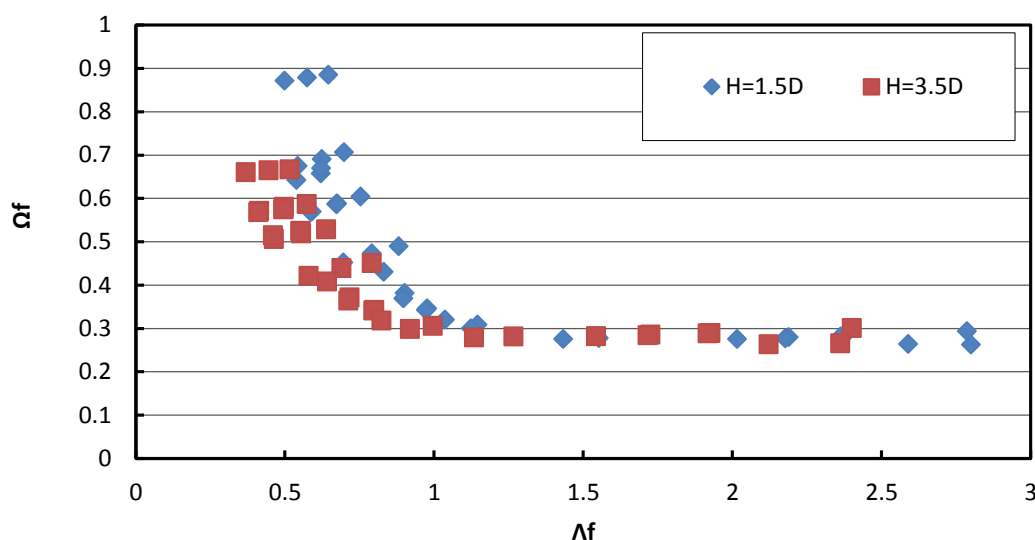
$$\alpha = 0.16 \frac{H}{D} + 0.59$$

$$b = \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.37}$$

$$N\varphi = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

5-2

Οι τιμές των παραμέτρων $\Omega_{F,Area}$ και Λ_F που προέκυψαν από τις εξισώσεις 5-1 και 5-2 για όλες τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5-49:



Διάγραμμα 5-49. Αποτελέσματα μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου συναρτήσει του Λ_F

Η έκφραση του συντελεστή ευστάθειας Λ_F που προτείνεται στην εξίσωση 4-2 βασίζεται στην αντίστοιχη πρόταση του Προυντζόπουλος (2011) όπως αυτή παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Θεωρήθηκε λοιπόν ότι η διάκριση μεταξύ ευσταθούς και ασταθούς μετώπου εκσκαφής γίνεται στο σημείο όπου αλλάζει απότομα η κλίση της καμπύλης. Ταυτόχρονα στο σημείο αυτό θα πρέπει να αντιστοιχεί τιμή του συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F=1$, με βάση το σκεπτικό ότι τιμές $\Lambda_F < 1$ αντιστοιχούν σε ασταθείς καταστάσεις ενώ τιμές $\Lambda_F > 1$ σε ευσταθείς.

Ακολουθώντας λοιπόν αυτό το σκεπτικό και με δεδομένη την αντικατάσταση της συνοχής c από τον δείκτη προφόρτισης OCR, επαναυπολογίστηκε η τιμή της σταθερής ποσότητας που πολλαπλασιάζει το OCR και βρέθηκε ίση με 33. Στο διάγραμμα 5-49 φαίνεται ότι η νέα μορφή του συντελεστή ευστάθειας Λ_F περιγράφει επιτυχώς τα αποτελέσματα και την ζητούμενη διάκριση ευσταθών και ασταθών καταστάσεων.

Οι παράμετροι a και b που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του Λ_F από τις ίδιες ακριβώς εκφράσεις που προτάθηκαν από τον Προυντζόπουλος (2011) καθώς όπως προκύπτει και από το διάγραμμα 5-49 η προκύπτουσα κανονικοποίηση ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος (H , D) είναι επιτυχής. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (4-1) της πρότασης του Προυντζόπουλος (2011), στην ευσταθή περιοχή ($\Lambda_F > 1$) οι τιμές της $\Omega_{F,Area}$ για τα δύο βάθη που εξετάστηκαν συμπίπτουν, ενώ αντίθετα στην ασταθή περιοχή ($\Lambda_F < 1$) παρατηρείται μια μικρή μείωση της τιμής του Λ_F όσο μικραίνει το βάθος της σήραγγας, δηλαδή τα σημεία που αντιπροσωπεύουν το ρηχό προσομοίωμα βρίσκονται ελαφρά αριστερότερα των αντίστοιχων του βαθιού.

5.5.2 Εκτίμηση Συντελεστή Ασφαλείας με βάση τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F

Η λογική του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F , όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, προσφέρεται για την δημιουργία μιας απλουστευτικής μεθόδου εκτίμησης του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής. Όπως αναφέρεται και στον Προυντζόπουλος (2011), στην περίπτωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, αν θεωρηθεί μια σήραγγα με γεωτεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να ισούται με FS και ο συντελεστής ευστάθειας μετώπου με Λ_F , τότε διαιρώντας με την τιμή αυτή του συντελεστή ασφαλείας τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους (σε όρους Modified Cam-Clay) OCR και M , θα προκύψει ένα νέο ζεύγος παραμέτρων OCR_c και M_c , οι οποίες θα αποτελούν τις κρίσιμες παραμέτρους αντοχής του μετώπου. Το μέτωπο, δηλαδή, θα είναι οριακά ευσταθές, με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1 ή με την τιμή του συντελεστή ευστάθειας μετώπου ίση με την κρίσιμη ($\Lambda_{F,c}=1$).

Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης του Modified Cam-Clay έχει συσχετιστεί με την γωνία τριβής του εδάφους ϕ , όποτε θα αναφέρεται πλέον αυτή στη θέση της (ϕ , ϕ_c). Όσον αφορά τον δείκτη προφόρτισης OCR, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.2.2 η επιφάνεια αστοχίας χωρίζεται σε δύο τμήματα: Το πρώτο τμήμα ταυτίζεται με τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης και αντιπροσωπεύει τον γεωμετρικό τόπο των σημείων αστοχίας των κανονικά στερεοποιημένων και των ελαφρώς υπερστερεοποιημένων αργίλων ($OCR < 2$), όπου σύμφωνα και με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης η

ισοδύναμη συνοχή του εδάφους προκύπτει μηδενική ($c'=0$) και η συνολική αντοχή του εδάφους εξαρτάται σχεδόν εξολοκλήρου από την παράμετρο M , με την επιρροή του OCR να είναι ασήμαντη. Το δεύτερο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας αντιπροσωπεύει το γεωμετρικό τόπο των έντονα υπερστερεοποιημένων αργίλων ($OCR>2$), όπου η επιρροή του OCR στην συνολική αντοχή του εδάφους είναι σημαντική. Ως εκ τούτου η σύνδεση του συντελεστή ασφαλείας FS με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F επιλέγεται να εκφραστεί διαφορετικά σε κάθε περίπτωση, καθώς στα κανονικά στερεοποιημένα και στα ελαφρώς υπερστερεοποιημένα εδάφη υπάρχει πιθανότητα η τιμή του κρίσιμου δείκτη προφόρτισης OCR_c που θα προκύψει από την διαίρεση του δείκτη προφόρτισης OCR με τον συντελεστή ασφαλείας FS να είναι μικρότερη της μονάδας, κάτι το οποίο δεν έχει φυσικό νόημα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις κατά περίπτωση:

Περίπτωση 1^η ($OCR<2$)

$$\Lambda_F = \frac{33OCR(\tan(45^\circ + \varphi/2))^{2a}}{\gamma H^{1-b} D^b} \quad 5-3$$

$$\Lambda_{F,c} = \frac{33OCR(\tan(45^\circ + \varphi_c/2))^{2a}}{\gamma H^{1-b} D^b} \quad 5-4$$

$$\varphi_c = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{FS}\right) \quad 5-5$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις 5-3 και 5-4 προκύπτει:

$$\frac{1}{\Lambda_F} = \frac{33 \cdot OCR \left(\tan \left(45^\circ + \frac{\arctan\left(\frac{\tan \varphi}{FS}\right)}{2} \right) \right)^{2a}}{\gamma \cdot H^{1-b} \cdot D^b} \quad 5-6$$

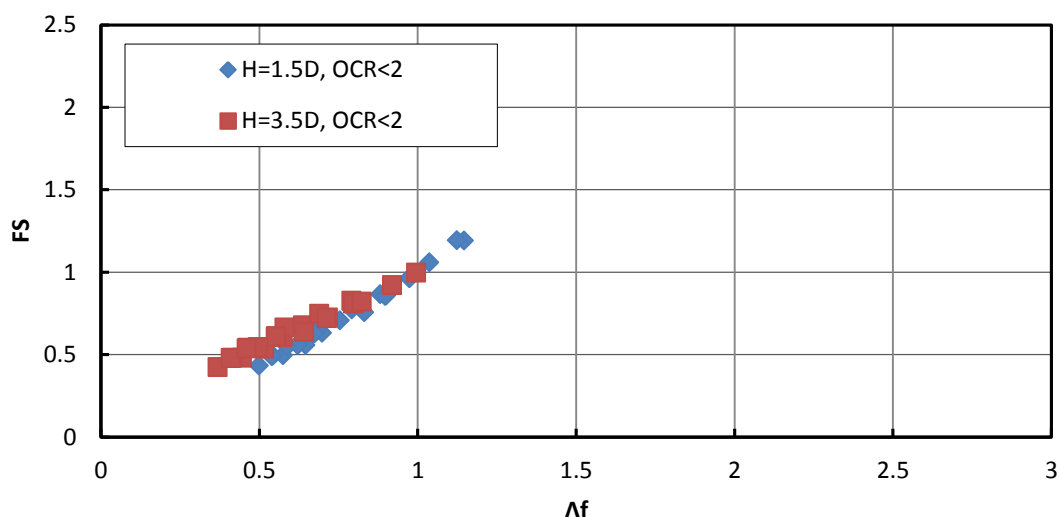
Με διαδοχικές απλοποιήσεις οδηγούμαστε στη σχέση:

$$1 = \Lambda_F \cdot \left(\frac{\tan\left(45^\circ + \frac{\arctan(\tan \varphi / FS)}{2}\right)}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right)^{2a} \quad 5-7$$

απ' όπου τελικά ο συντελεστής ασφαλείας FS εκφράζεται ως:

$$FS = \frac{\tan \varphi}{\tan \left(2 \left(\arctan \left(\frac{\tan(45^\circ + \varphi / 2)}{\Lambda_F^{1/(2a)}} \right) - 45^\circ \right) \right)} \quad 5-8$$

Στο διάγραμμα 5-50 παρουσιάζεται η τιμή του εκτιμώμενου συντελεστή ασφαλείας όπως προκύπτει από τη σχέση 5-8 συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που διενεργήθηκαν και αφορούν σε $OCR < 2$:



Διάγραμμα 5-50. Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F για $OCR < 2$ και $H/D = 1.5$ & 3.5

Περίπτωση 2^η ($OCR > 2$)

$$\Lambda_F = \frac{33OCR(\tan(45^\circ + \varphi / 2))^{2a}}{\gamma H^{1-b} D^b} \quad 5-9$$

$$\Lambda_{F,c} = \frac{33OCR_c(\tan(45^\circ + \varphi_c / 2))^{2a}}{\gamma H^{1-b} D^b} \quad 5-10$$

$$OCR_c = \frac{OCR}{FS} \quad 5-11$$

$$\varphi_c = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{FS} \right) \quad 5-12$$

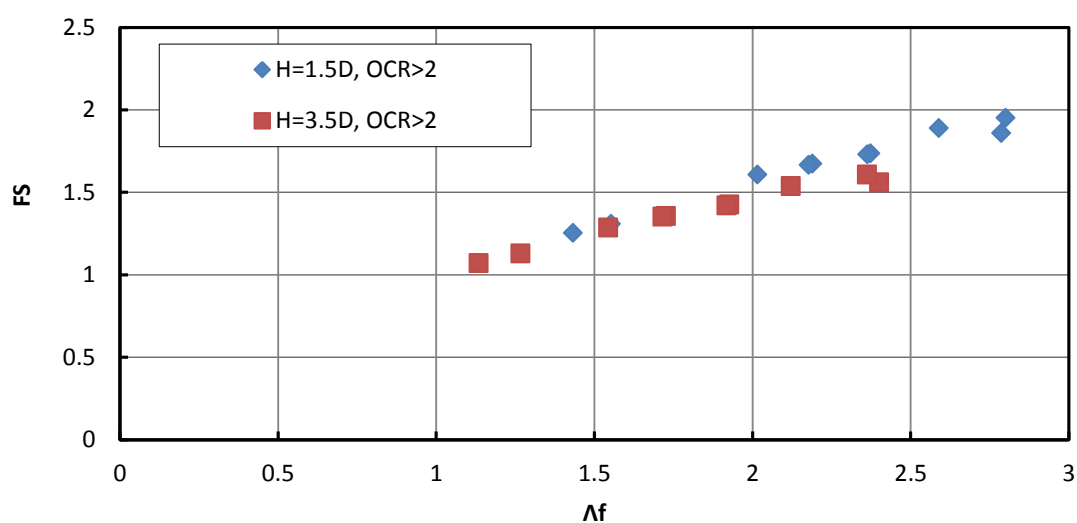
Διαιρώντας τις σχέσεις 5-9 και 5-10 προκύπτει:

$$\frac{1}{\Lambda_F} = \frac{33 \cdot \frac{OCR}{FS} \left(\tan \left(45^\circ + \frac{\arctan \left(\frac{\tan \varphi}{FS} \right)}{2} \right) \right)^{2a}}{\gamma \cdot H^{1-b} \cdot D^b} = \frac{33 \cdot OCR \cdot (\tan(45^\circ + \varphi/2))^{2a}}{\gamma \cdot H^{1-b} \cdot D^b} \quad 5-13$$

Με διαδοχικές απλοποιήσεις οδηγούμαστε στη σχέση:

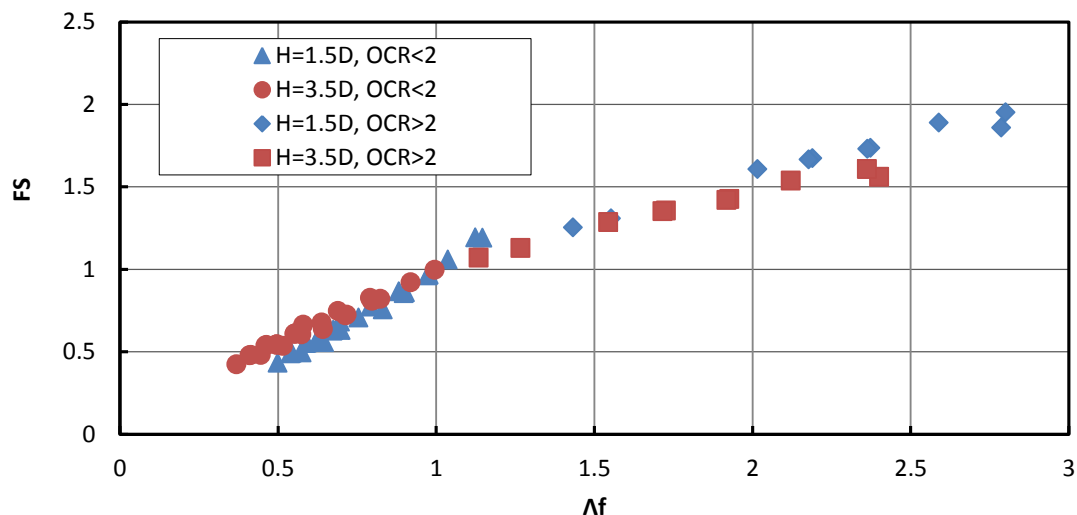
$$FS = \Lambda_F \cdot \left(\frac{\tan \left(45^\circ + \frac{\arctan(\tan \varphi / FS)}{2} \right)}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \right)^{2a} \quad 5-14$$

Από την παραπάνω σχέση με εφαρμογή απλής επαναληπτικής διαδικασίας μπορεί να εξαχθεί η τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Στο διάγραμμα 5-51 που ακολουθεί παρουσιάζεται η τιμή του εκτιμώμενου συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F , όπως αυτός προέκυψε από την σχέση 5-14 για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που διενεργήθηκαν και αφορούν σε $OCR > 2$:



Διάγραμμα 5-51. Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F για $OCR > 2$ και $H/D = 1.5$ & 3.5

Οι τιμές των δύο διαγραμμάτων (5-50 και 5-51) παρουσιάζονται μαζί στο παρακάτω διάγραμμα (5-52):



Διάγραμμα 5-52. Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F για $H/D=1.5, 3.5$

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

1. Η συντριπτική πλειοψηφία των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κανονικά στερεοποιημένα ή ελαφρώς στερεοποιημένα αργιλικά εδάφη ($OCR < 2$) δίνουν τιμές συντελεστή ασφαλείας μικρότερες της μονάδας (Διάγραμμα 5-50), δηλαδή το μέτωπο εκσκαφής βρίσκεται στην ασταθή περιοχή. Αντίθετα, για έντονα υπερστερεοποιημένα εδάφη ($OCR > 2$) ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας (Διάγραμμα 5-51), μιλάμε, δηλαδή, για ευσταθές μέτωπο εκσκαφής. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής σήραγγας με μηδενική ισοδύναμη συνοχή πρακτικά αστοχεί.
2. Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F αποκτά μεγαλύτερη κλίση όσο μειώνεται το βάθος της σήραγγας. Η διαφοροποίηση αυτή καταδεικνύει τη διαφορά στη μετάβαση από ένα ευσταθές σε ένα ασταθές μέτωπο καθώς η αντοχή μειώνεται και το βάθος μεταβάλλεται, καθώς σε μια βαθιά σήραγγα είναι πιο προοδευτική ενώ όσο το βάθος μειώνεται γίνεται ραγδαία. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την μεγαλύτερη αβεβαιότητα κατά την κατασκευή που κυριαρχεί στις αβαθείς σήραγγες και την απαίτηση για μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής σε σχέση με τις βαθιές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν 72 παραμετρικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus σε τρεις διαστάσεις, κατά τις οποίες προσομοιώθηκε η διάνοιξη κυκλικής υποστηριγμένης σήραγγας εντός γεωυλικού του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να προσομοιωθεί με το καταστατικό προσομοίωμα Modified Cam - Clay διατηρώντας ανυποστήρικτο το μέτωπο εκσκαφής. Ο στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων γεωτεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής και η σύνδεσή της με τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου με βάση τη μεθοδολογία που έχει προταθεί από τον Προυντζόπουλος (2011).

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική είναι τα ακόλουθα:

- Όσον αφορά τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής παρατηρείται ότι για κανονικά στερεοποιημένα εδάφη το μέτωπο πλαστικοποιείται και η τελική έκθλιψή του εξαρτάται από την παράμετρο M , η οποία συνδέεται με τη γωνία τριβής ϕ , με τέτοιο τρόπο ώστε όσο καλύτερες είναι οι γεωτεχνικές συνθήκες, τόσο μικρότερη είναι η έκθλιψη. Σε έντονα υπερστερεοποιημένα εδάφη με μεγάλο δείκτη προφόρτισης OCR, όπου το μέτωπο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή παρατηρείται ότι η έκθλιψη του μετώπου επηρεάζεται μόνο από την παραμορφωσιμότητα του εδάφους.
- Όσον αφορά τις παραμέτρους συμπιεστότητας, παρατηρείται ότι η τελική έκθλιψη του μετώπου επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την παράμετρο κ , και σε πολύ λιγότερο από την παράμετρο λ , κάτι που καταδεικνύει ότι η εντατική κατάσταση εμπρός από το μέτωπο αντιστοιχεί σε συνθήκες αποφόρτισης. Επίσης, η μορφή των κανονικοποιημένων διαγραμμάτων δεν εξαρτάται από το εάν η συμπεριφορά του μετώπου είναι ελαστική ή ελαστοπλαστική, κάτι που ποιοτικά σημαίνει ότι εν γένει η επιρροή των παραμέτρων συμπιεστότητας είναι ανεξάρτητη της αντοχής του γεωυλικού.
- Όσον αφορά την επιρροή του βάθους παρατηρείται ότι για κανονικά στερεοποιημένο έδαφος και για ίδιες παραμέτρους διατμητικής αντοχής η τελική τιμή της έκθλιψης του μετώπου αυξάνεται όσο μειώνεται το βάθος της σήραγγας. Αντίθετα, σε υπερστερεοποιημένα υλικά, όπου στο μέτωπο δεν παρατηρείται σημαντική πλαστικοποίηση, η τελική τιμή της έκθλιψης είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο βαθύτερη είναι η σήραγγα. Η παραπάνω συμπεριφορά σχετίζεται με την διαφορά στον προκαλούμενο μηχανισμό

αστοχίας μεταξύ αβαθών και βαθιών σηράγγων, όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 5.

- Η σύνδεση της έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής με την ευστάθειά του έγινε μέσω του συντελεστή ευστάθειας Λ_F , ο οποίος εκφράστηκε από την παρακάτω σχέση:

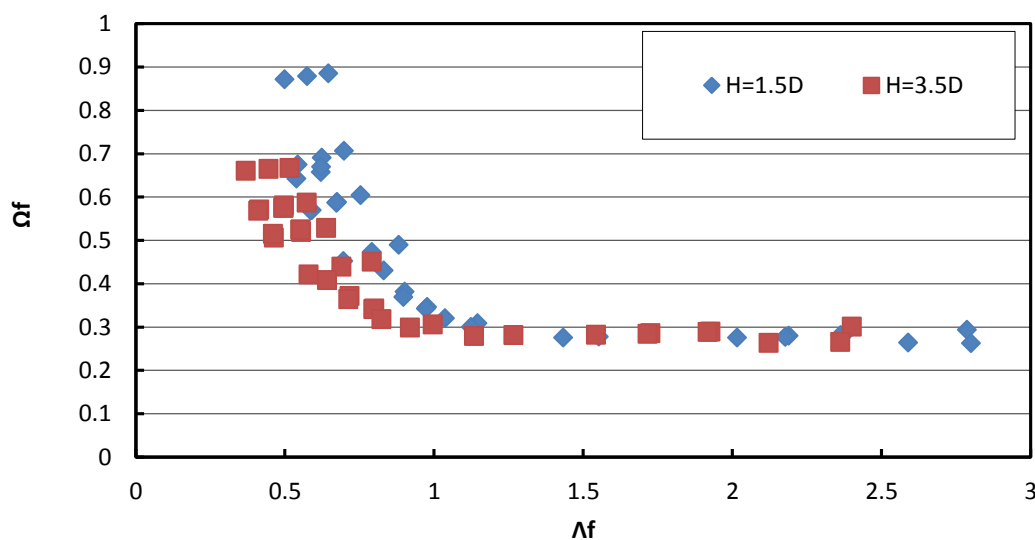
$$\Lambda_F = \frac{33OCR(N_\varphi)^\alpha}{\gamma H^{1-b} D^b}$$

$$\alpha = 0.16 \frac{H}{D} + 0.59$$

$$b = \left(\frac{H}{D} \right)^{-0.37}$$

$$N_\varphi = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$
6-1

Η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών για τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (6-1):



Διάγραμμα 6-1. Αποτελέσματα μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου συναρτήσει του Λ_F

όπου Ω_F , η κανονικοποιημένη μορφή της μέσης έκθλιψης σε όλη την επιφάνεια του μετώπου ($\Omega_{F,Area}$), υπολογιζόμενη από την παρακάτω σχέση:

$$\Omega_{F,Area} = \frac{U_{h,Area} E_{soil}}{DP_0}$$
6-2

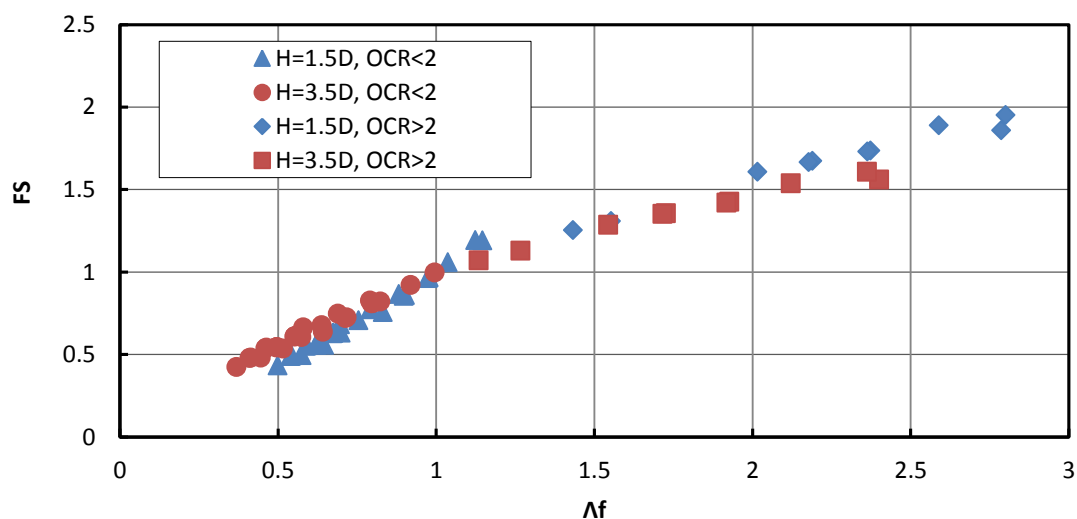
- Προτάθηκε μια μεθοδολογία εκτίμησης του συντελεστή ασφαλείας FS με βάση τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F , βασιζόμενη στη θεώρηση ότι η τιμή του συντελεστή $\Lambda_F=1$ αντιστοιχεί σε τιμή του συντελεστή

ασφαλείας $FS=1$. Οι σχέσεις για τον συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν είναι οι παρακάτω:

$$FS = \frac{\tan \varphi}{\tan \left(2 \left(\arctan \left(\frac{\tan(45^\circ + \varphi / 2)}{\Lambda_F^{1/(2a)}} \right) - 45^\circ \right) \right)}, \text{OCR} < 2 \quad 6-3$$

$$FS = \Lambda_F \cdot \left(\frac{\tan \left(45^\circ + \frac{\arctan(\tan \varphi / FS)}{2} \right)}{\tan(45^\circ + \varphi / 2)} \right)^{2a}, \text{OCR} > 2 \quad 6-4$$

Η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (6-2):



Διάγραμμα 6-2. Συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του συντελεστή ευστάθειας μετώπου Λ_F για $H/D=1.5, 3.5$

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία πρώτη απόπειρα προσέγγισης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σήραγγας μέσω αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων στις οποίες γίνεται χρήση σύνθετων καταστατικών προσομοιωμάτων όπως το Modified Cam - Clay. Στα πλαίσια επόμενων εργασιών προτείνεται η διερεύνηση της επιπρόσθετης επιρροής από την παρουσία νερού κατά την εκσκαφή, μέσω συζευγμένων αναλύσεων, καθώς και της εξέλιξης των καθιζήσεων με την πρόοδο της εκσκαφής. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην διερεύνηση της δυνατότητας περιορισμού των μη ρεαλιστικών ανιζήσεων, οι οποίες παρατηρούνται σε αναλύσεις με απλά καταστατικά προσομοιώματα όπως το Mohr - Coulomb και στο πως και εάν αυτές περιορίζονται από τη χρήση ενός σύνθετου καταστατικού προσομοιώματος όπως το Modified Cam - Clay.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ANAGNOSTOU, G. & KOVÁRI, K. 1994. The face stability of slurry-shield-driven tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9, 165-174.

ATKINSON, J. & BRANSBY, P. 1977. *The Mechanics of Soils, An Introduction to Critical State Soil Mechanics*.

CANTIENI, L., ANAGNOSTOU, G. & HUG, R. 2011. Interpretation of Core Extrusion Measurements When Tunnelling Through Squeezing Ground. *Rock mechanics and rock engineering*, 44, 641-670.

GENS, A. 1982. *Stress-strain and strength of a low plasticity clay*. London: Imperial College, London University.

KIRSCH, A. 2009. *On the face stability of shallow tunnels in sand*, Logos Verlag Berlin GmbH.

KIRSCH, A. & KOLYMBAS, D. 2005. Theoretische Untersuchung zur Ortsbruststabilität. *Bautechnik*, 82, 449-456.

MURAYAMA, S., ENDO, M., HASHIBA, T., YAMAMOTO, K. AND SASAKI, H. (ed.) 1966. *Geotechnical Aspects for the Excavating Performance of the Shield Mashines*.

ROSCOE, K. & SCHOFIELD, A. Year. Mechanical behaviour of an idealized 'wet' clay. In: *Proc. 3rd Eur. Conf. Soil Mech. Wiesbaden, 1963, 1963*. 47-54.

ROSCOE, K., SCHOFIELD, A. & THURAIRAJAH, A. 1963. Yielding of clays in states wetter than critical. *Geotechnique*, 13, 211-240.

ROSCOE, K. H. & BURLAND, J. 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay.

STALLMANN, M. 2005. *Verbrüche im Tunnelbau – Ursachen und Sanierung*. Diploma Thesis, University of Applied Sciences, Stuttgart.

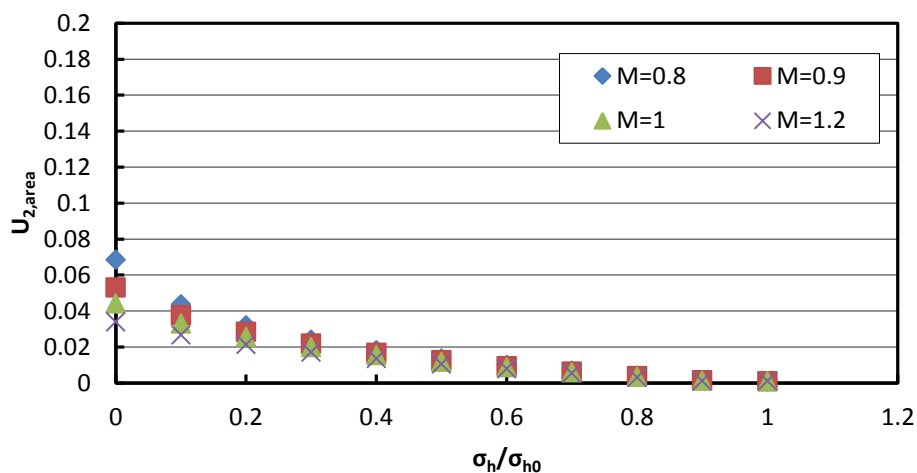
SUBRIN, D. & WONG, H. 2002. Stabilité du front d'un tunnel en milieu frottant: un nouveau mécanisme de rupture 3D. *Comptes Rendus Mécanique*, 330, 513-519.

WOOD, D. M. 1990. *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge university press.

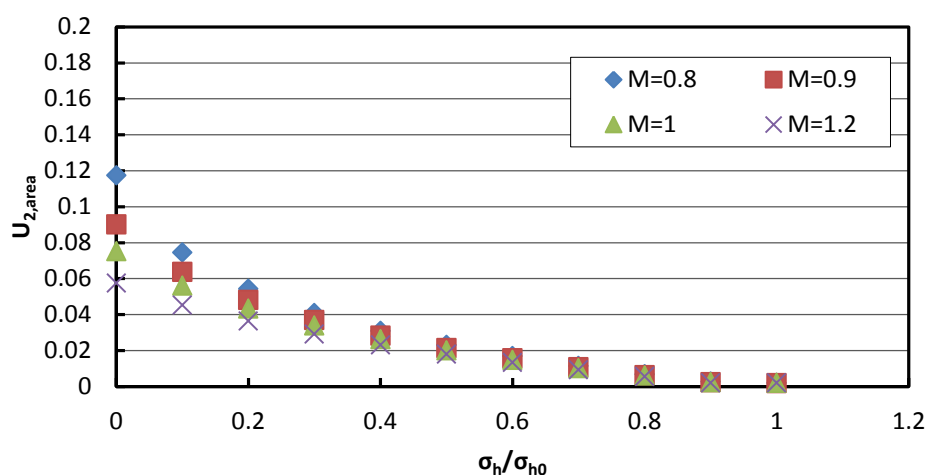
ΠΡΟΥΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. 2011. *Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων*. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

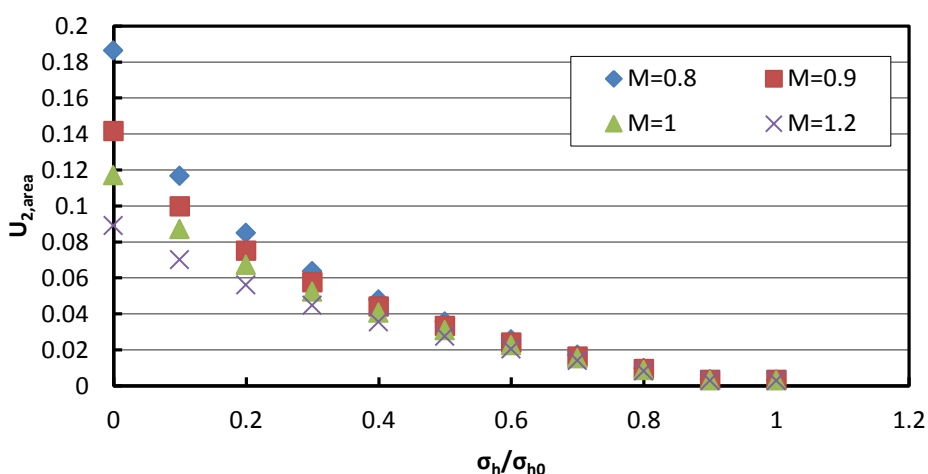
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται μέσω αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων η επίδραση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπίεστότητας στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής σήραγγας για το μοντέλο με βάθος $H/D=1.5$.



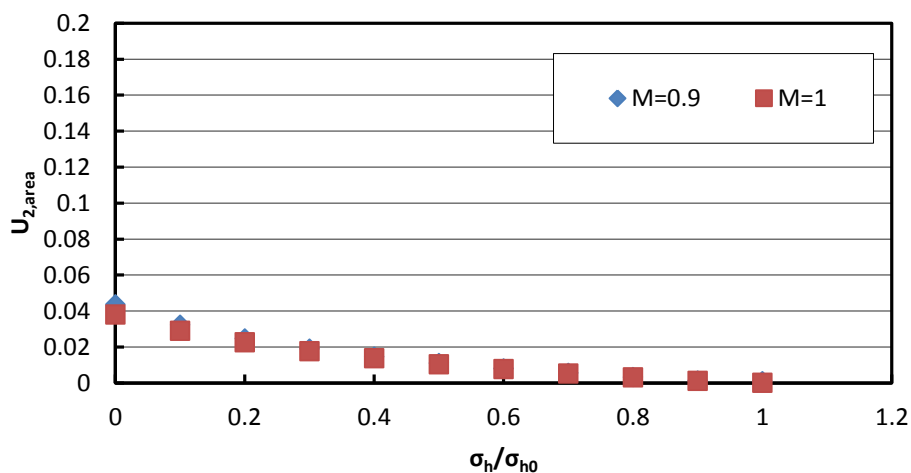
Διάγραμμα A-1. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1.0$



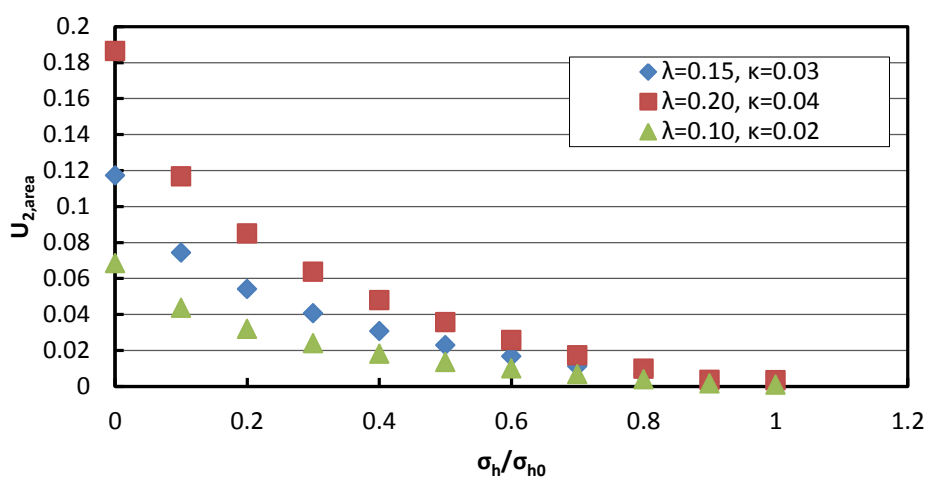
Διάγραμμα A-2. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



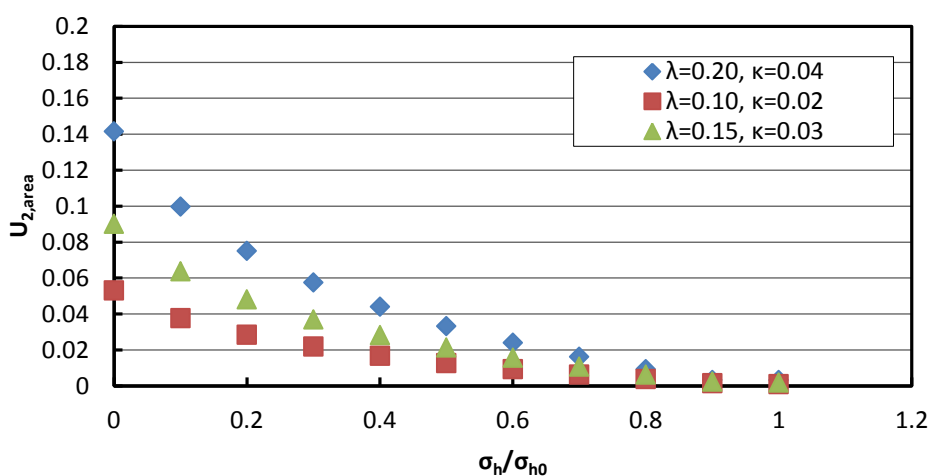
Διάγραμμα A-3. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.04$, $\lambda=0.20$, $OCR=1.0$



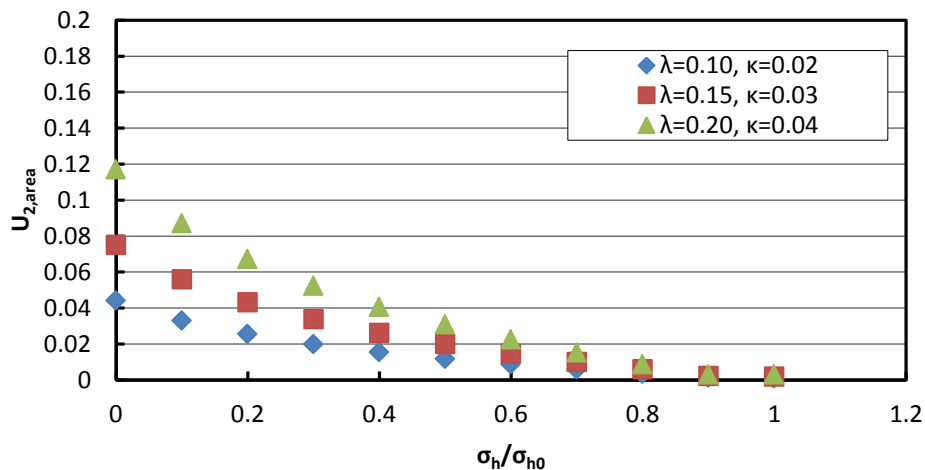
Διάγραμμα Α-4. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



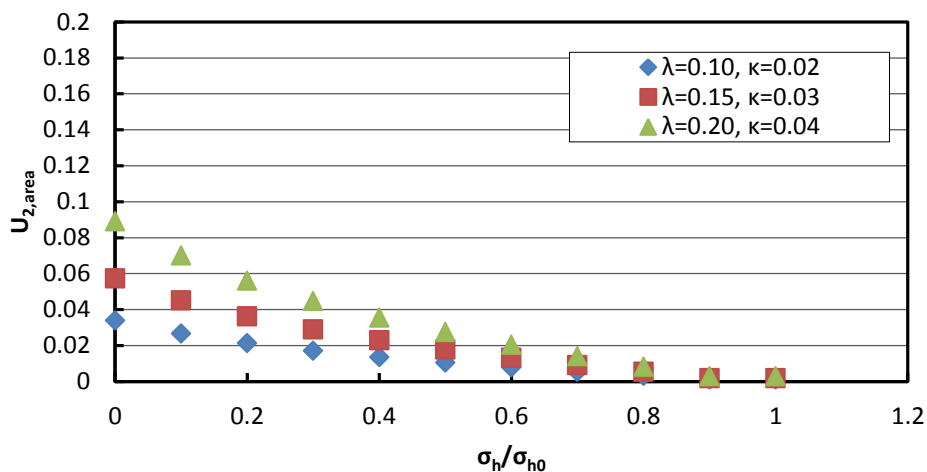
Διάγραμμα Α-5. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=0.8$, $OCR=1.0$



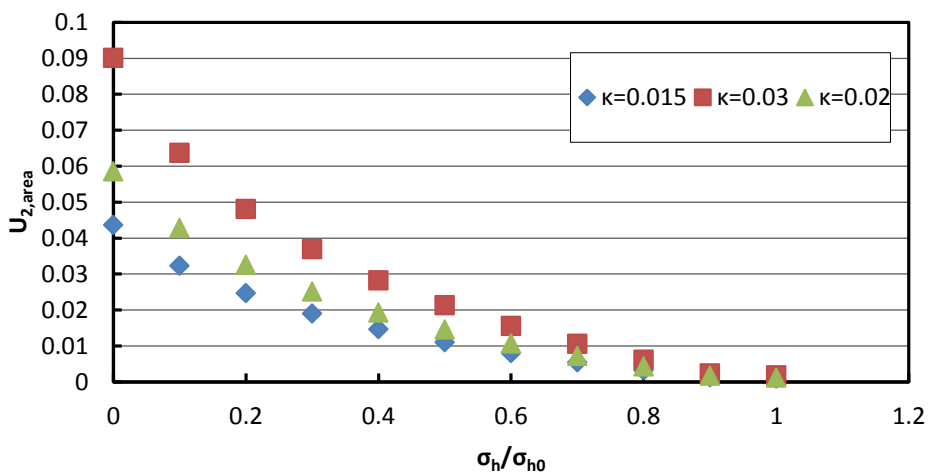
Διάγραμμα Α-6. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



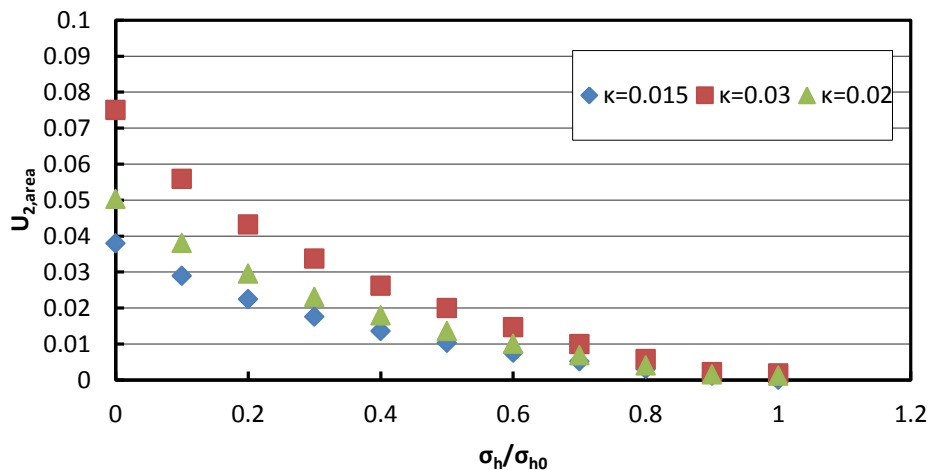
Διάγραμμα Α-7. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=1.0$, $OCR=1.0$



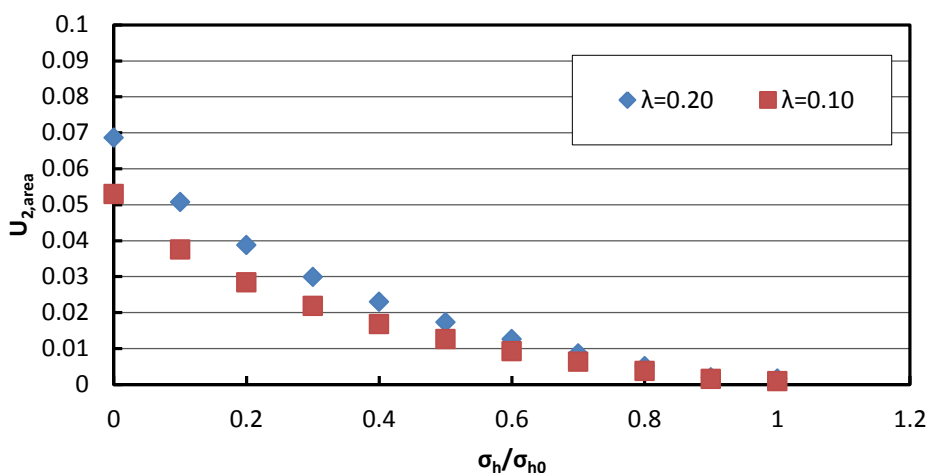
Διάγραμμα Α-8. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=1.2$, $OCR=1.0$



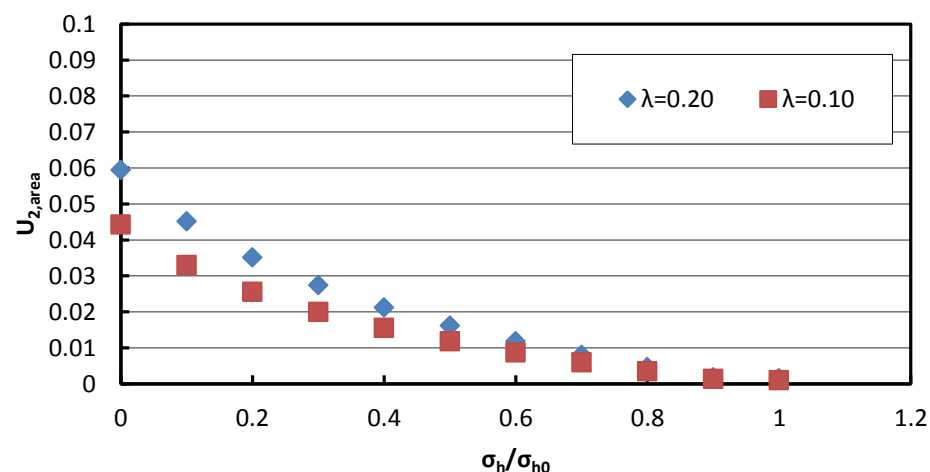
Διάγραμμα Α-9. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



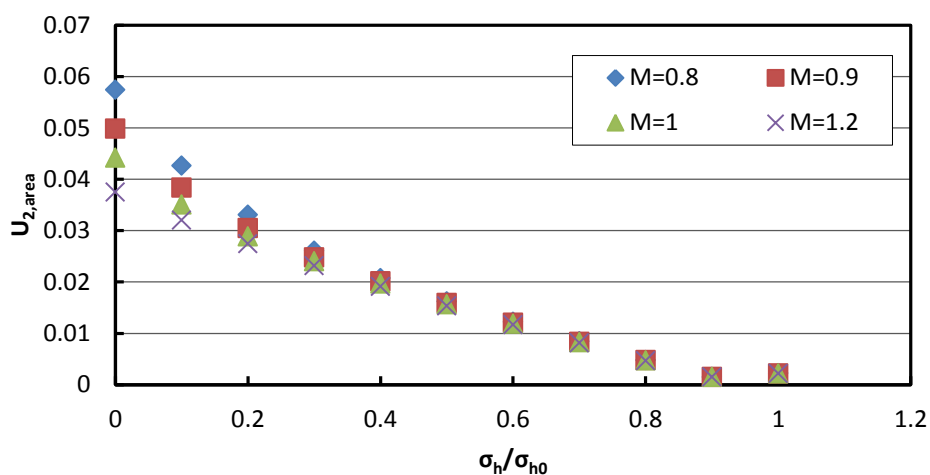
Διάγραμμα Α-10. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.0$



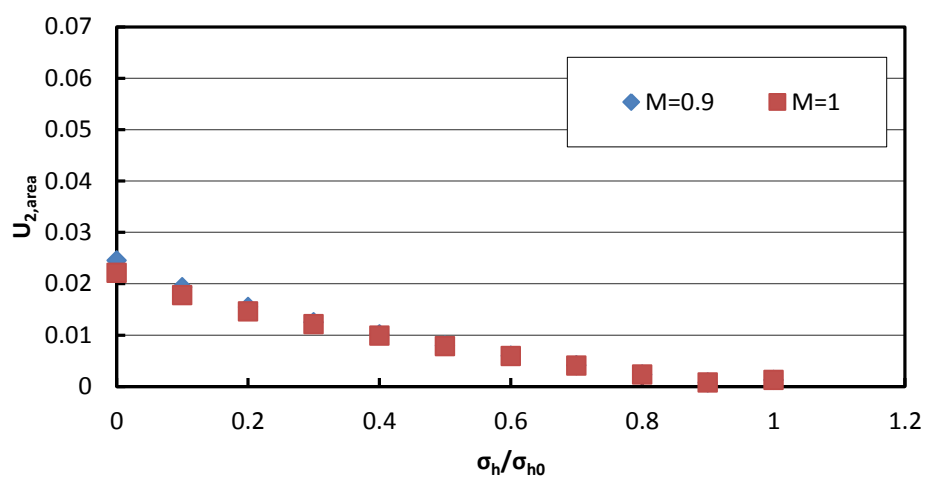
Διάγραμμα Α-11. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.02$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



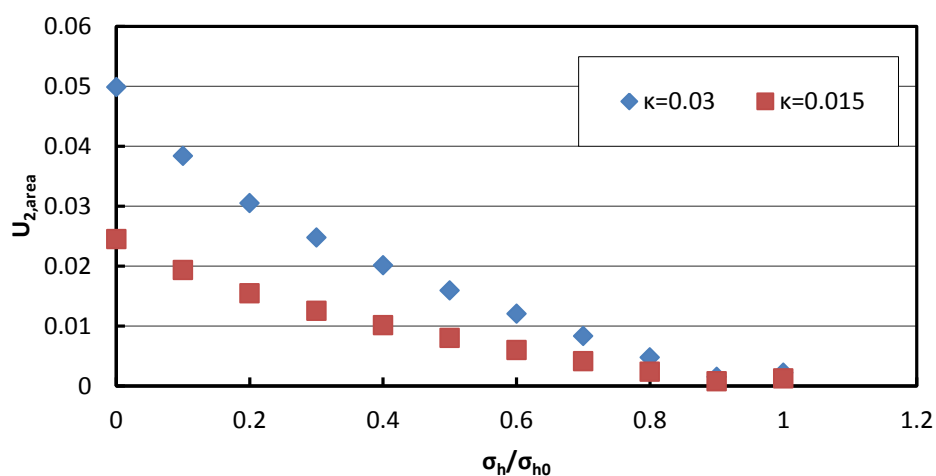
Διάγραμμα Α-12. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1.0$



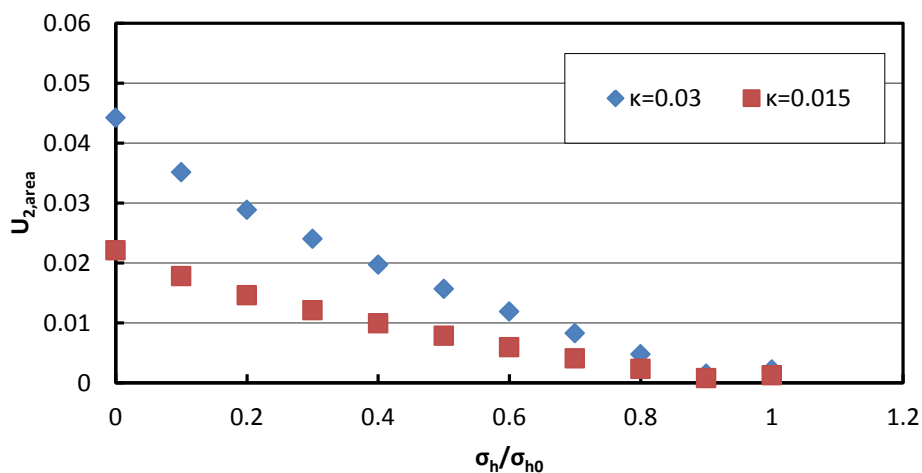
Διάγραμμα A-13. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



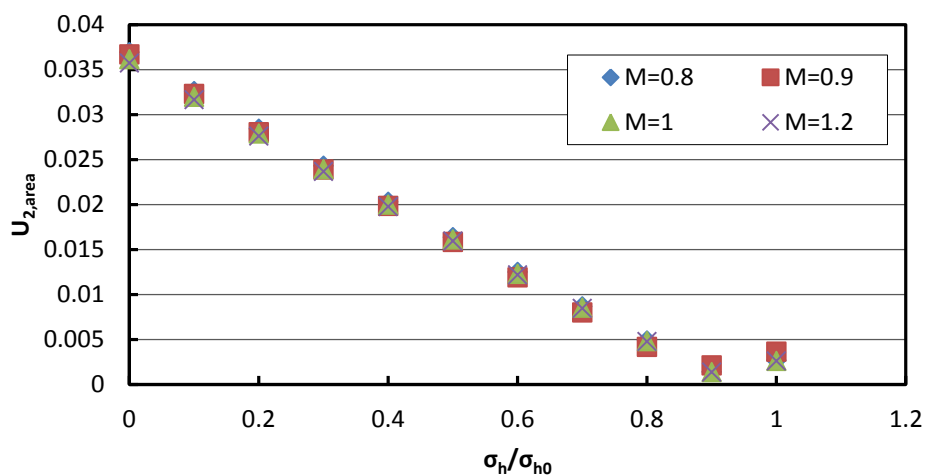
Διάγραμμα A-14. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



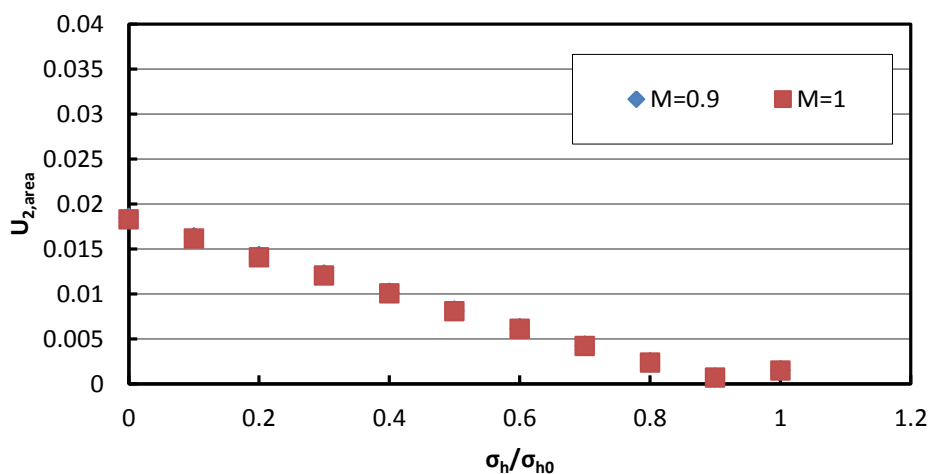
Διάγραμμα A-15. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=1.5$



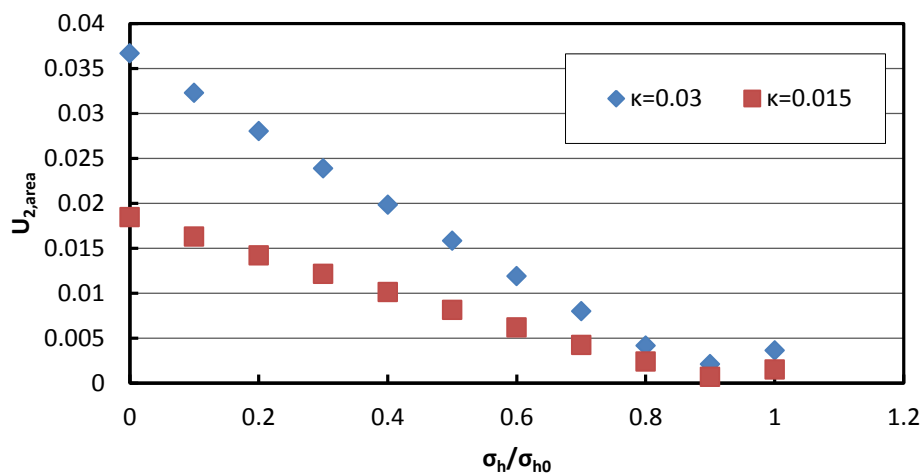
Διάγραμμα Α-16. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.5$



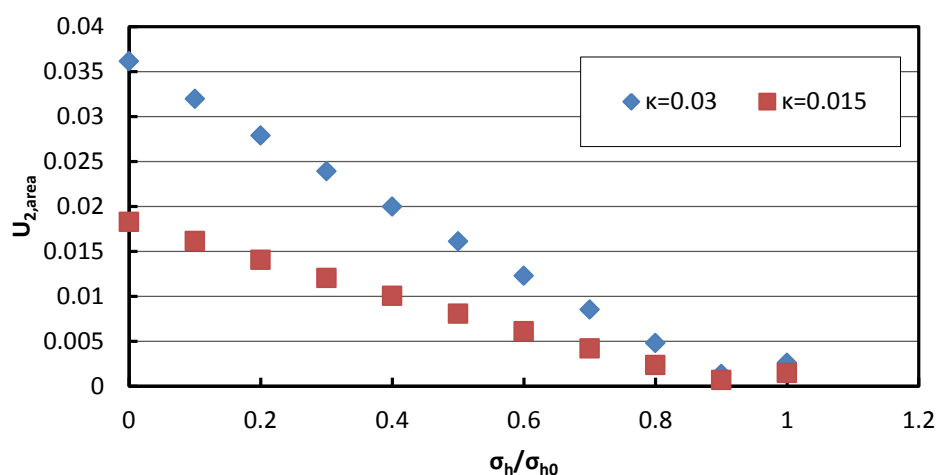
Διάγραμμα Α-17. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $\kappa=0.03$, $OCR=4.0$



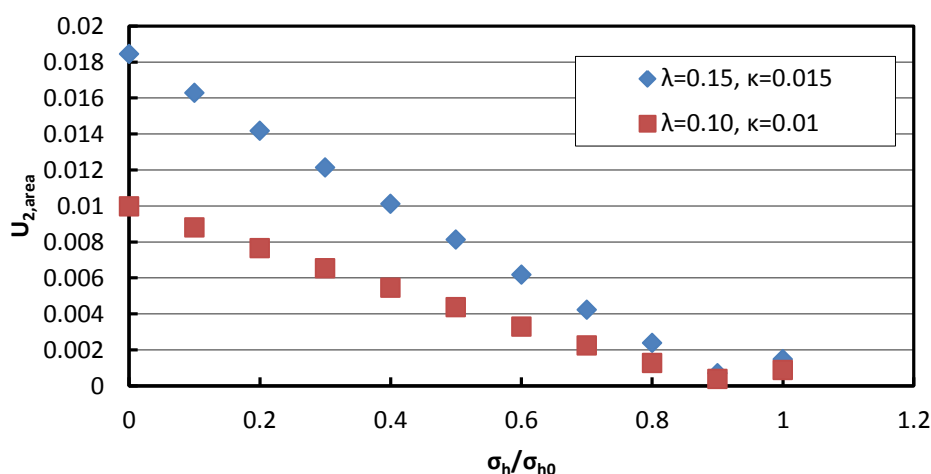
Διάγραμμα Α-18. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $\kappa=0.015$, $OCR=4.0$



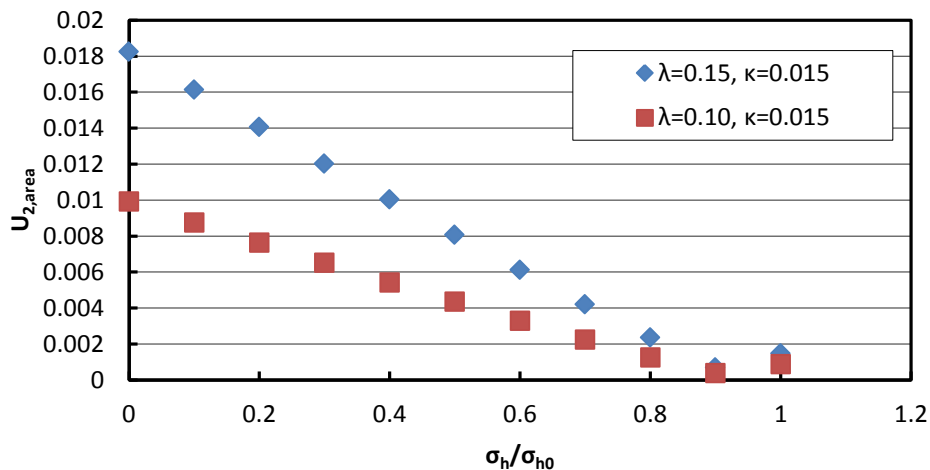
Διάγραμμα A-19. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=4.0$



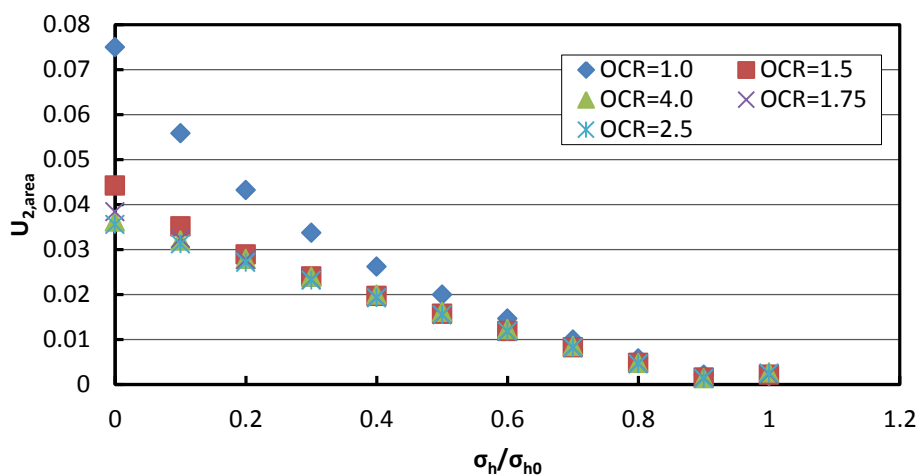
Διάγραμμα A-20. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=4.0$



Διάγραμμα A-21. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.10$, $M=0.9$, $OCR=4.0$



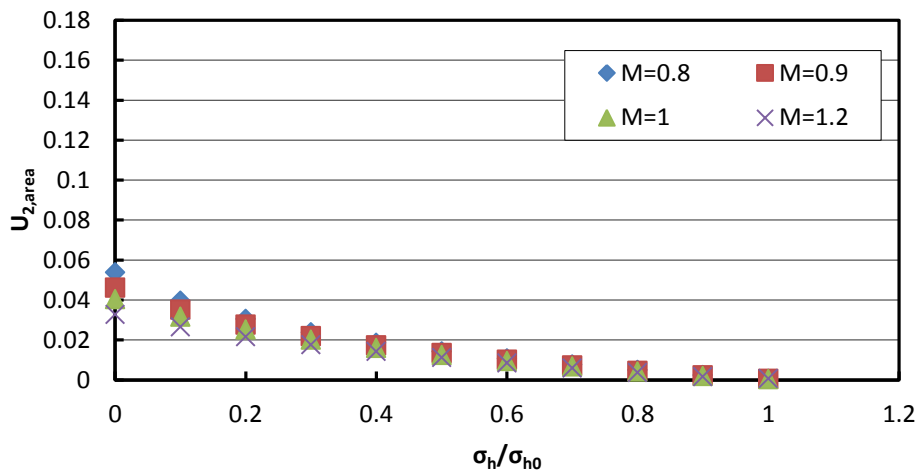
Διάγραμμα A-22. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa/\lambda=0.10$, $M=1.0$, $OCR=4.0$



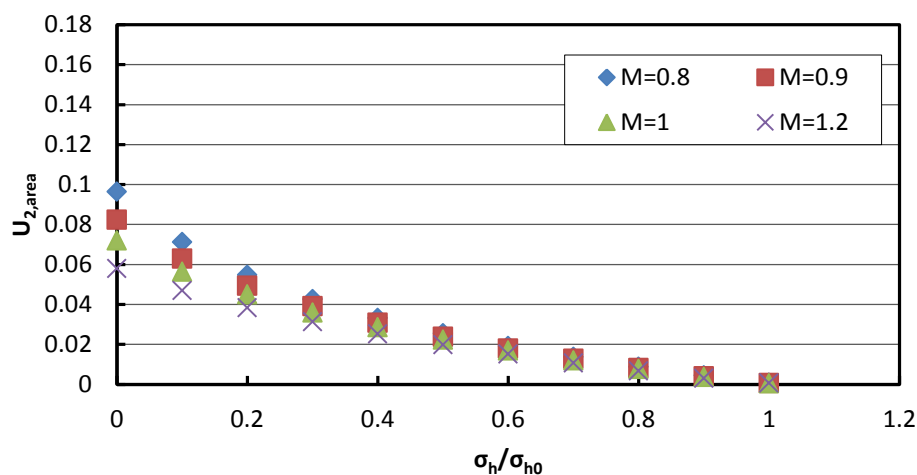
Διάγραμμα A-23. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=1.5$, $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

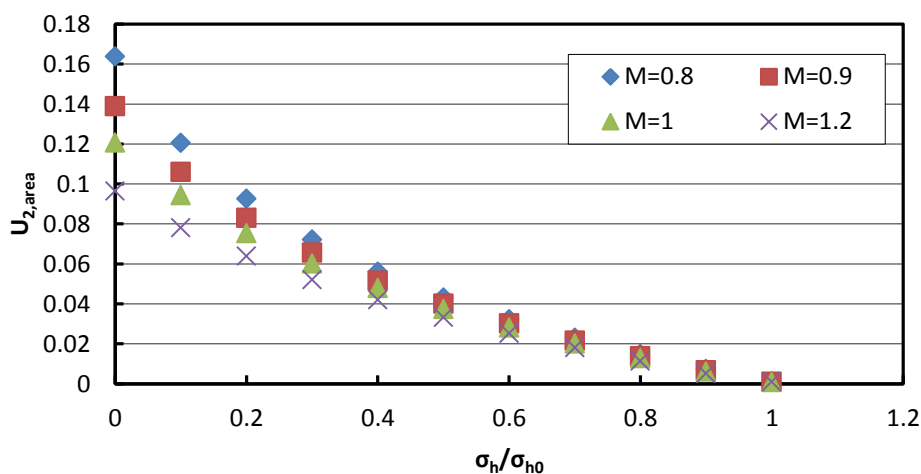
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων η επίδραση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπιεστότητας στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής σήραγγας για το μοντέλο με βάθος $H/D=3.5$.



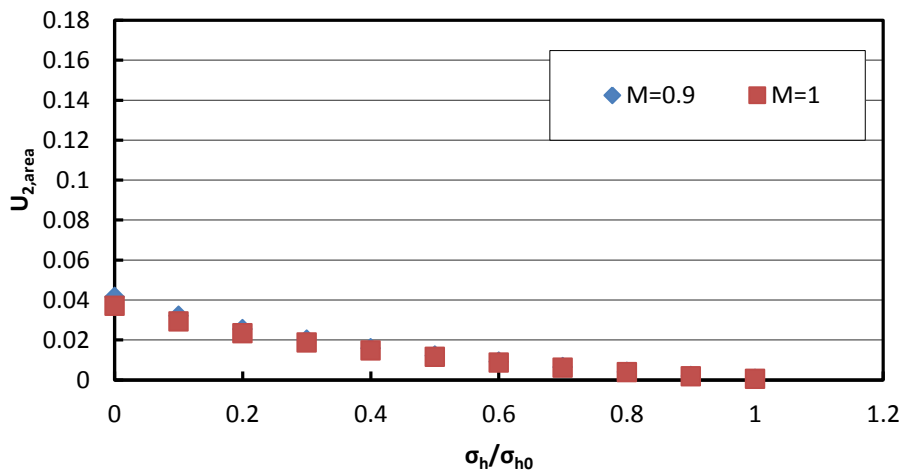
Διάγραμμα B-1. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1.0$



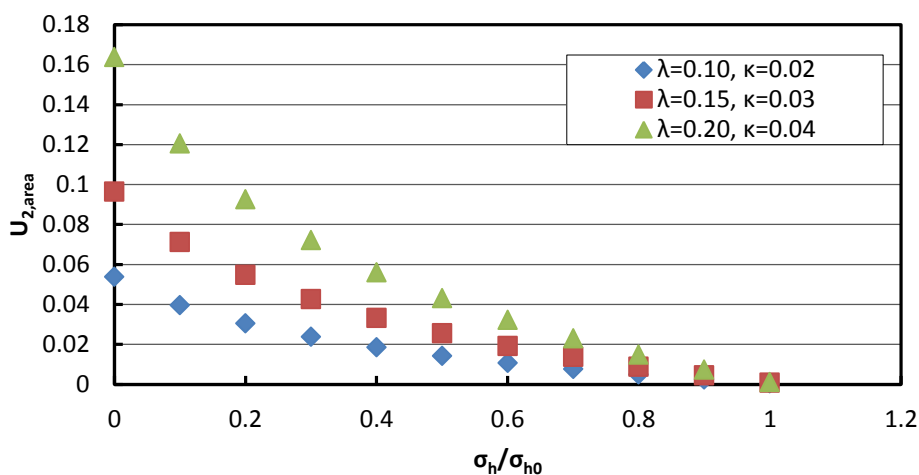
Διάγραμμα B-2. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



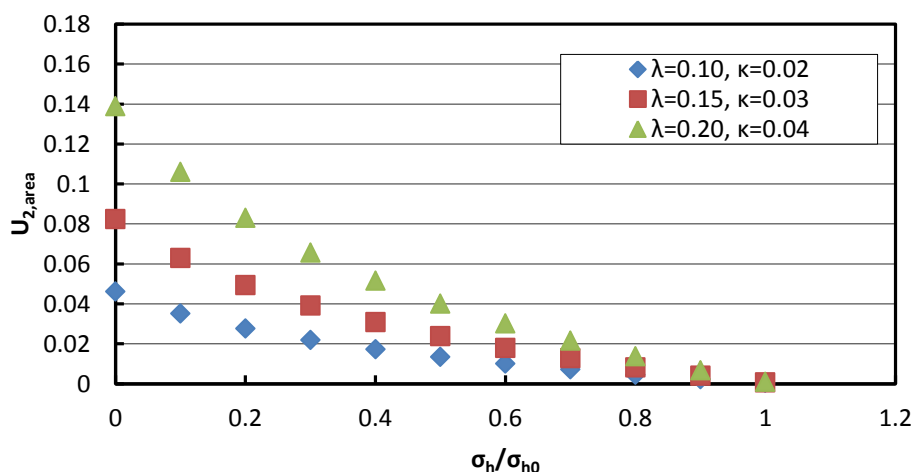
Διάγραμμα B-3. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.04$, $\lambda=0.20$, $OCR=1.0$



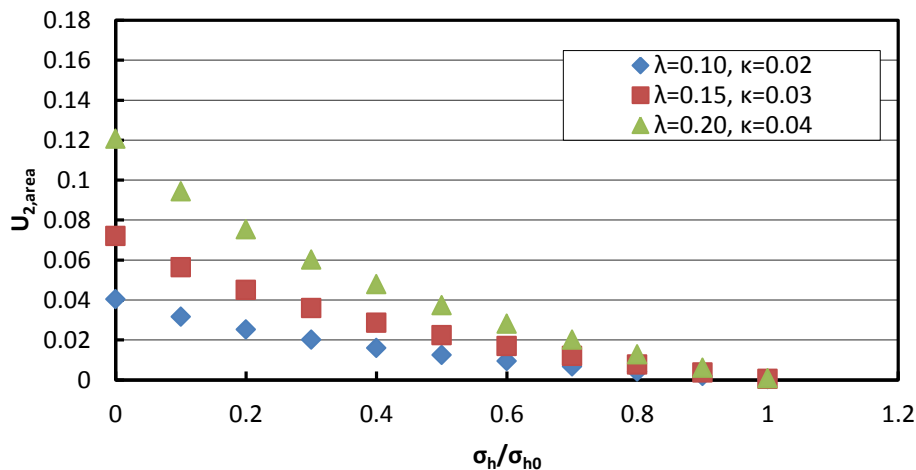
Διάγραμμα Β-4. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.0$



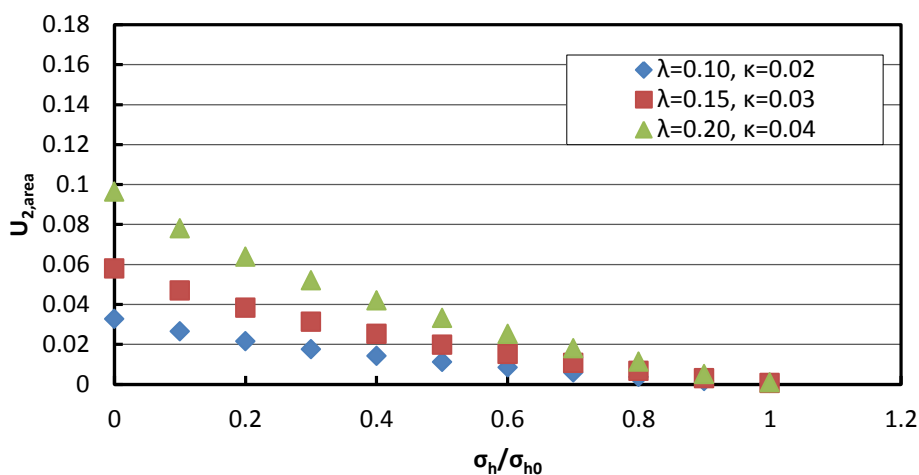
Διάγραμμα Β-5. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=0.8$, $OCR=1.0$



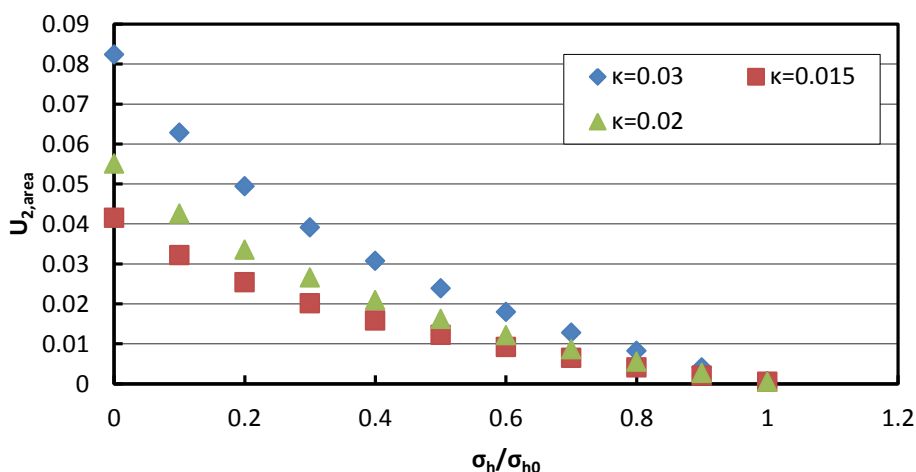
Διάγραμμα Β-6. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



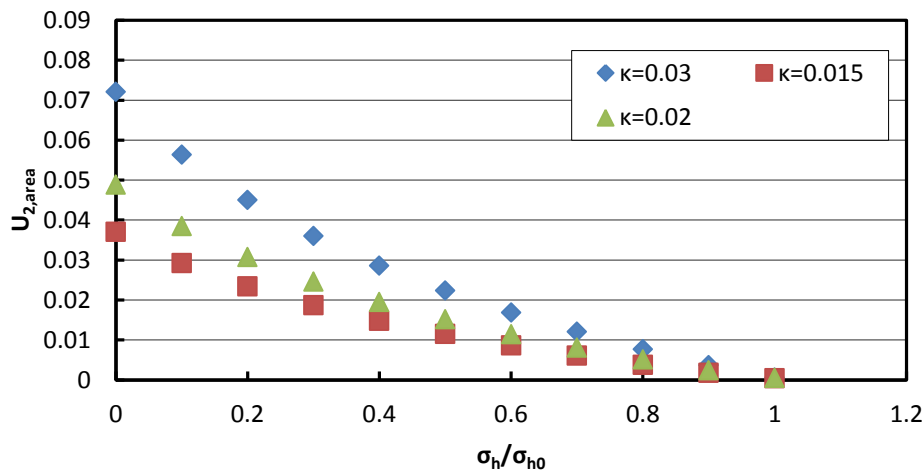
Διάγραμμα B-7. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=1.0$, $OCR=1.0$



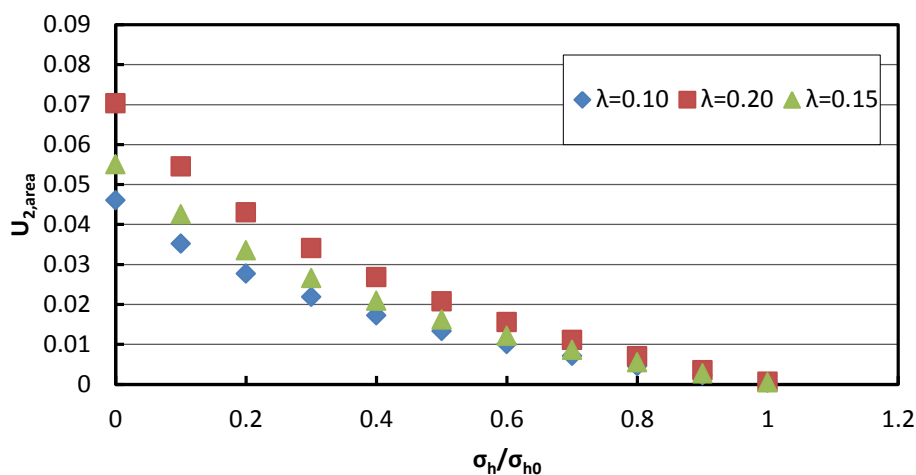
Διάγραμμα B-8. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa/\lambda=0.20$, $M=1.2$, $OCR=1.0$



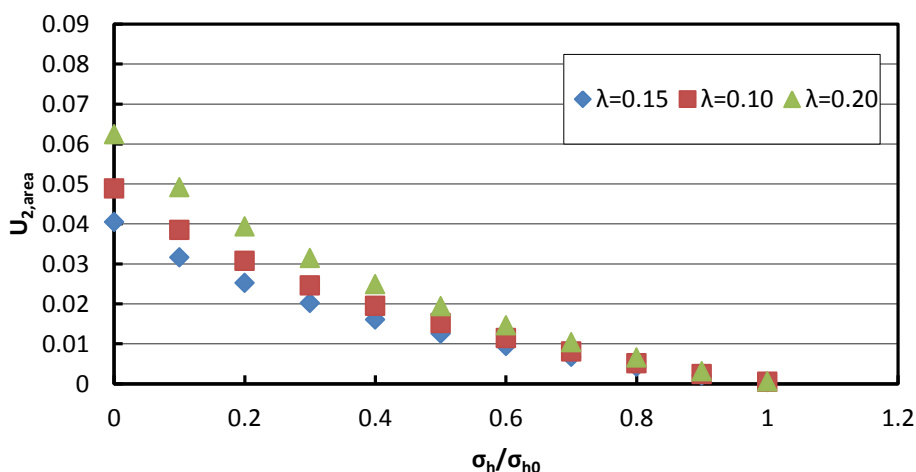
Διάγραμμα B-9. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=1.0$



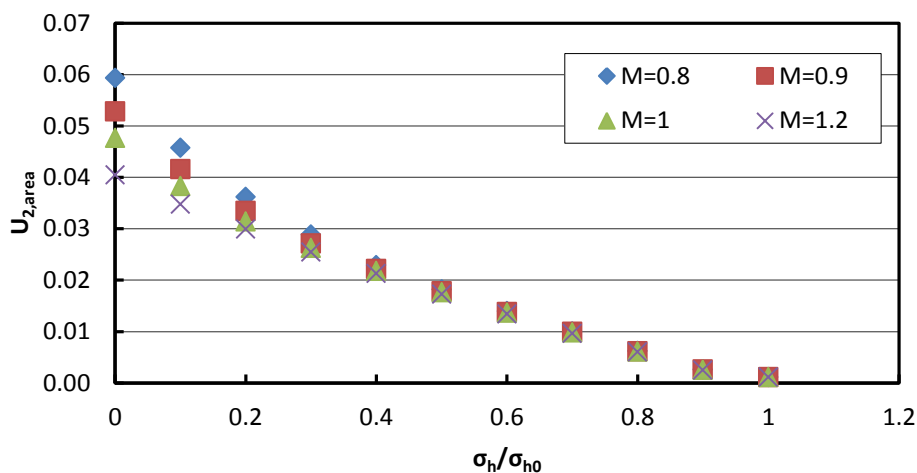
Διάγραμμα B-10. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για H/D=3.5, λ=0.15, M=1.0, OCR=1.0



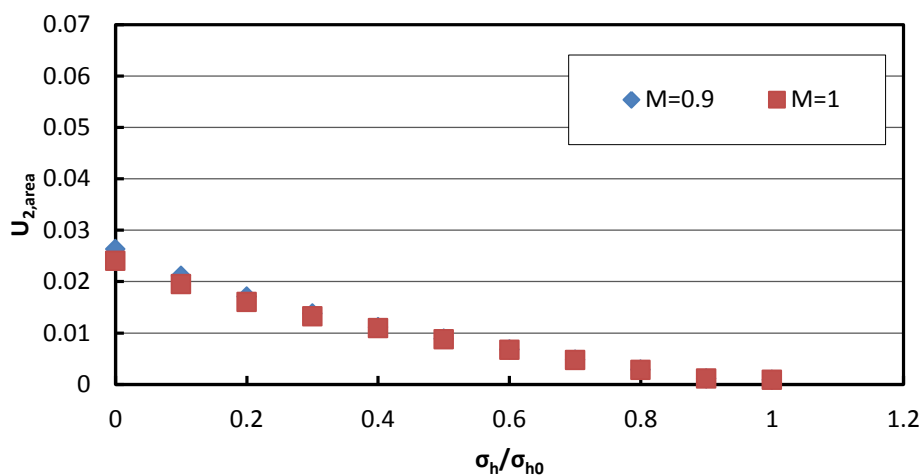
Διάγραμμα B-11. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για H/D=3.5, κ=0.02, M=0.9, OCR=1.0



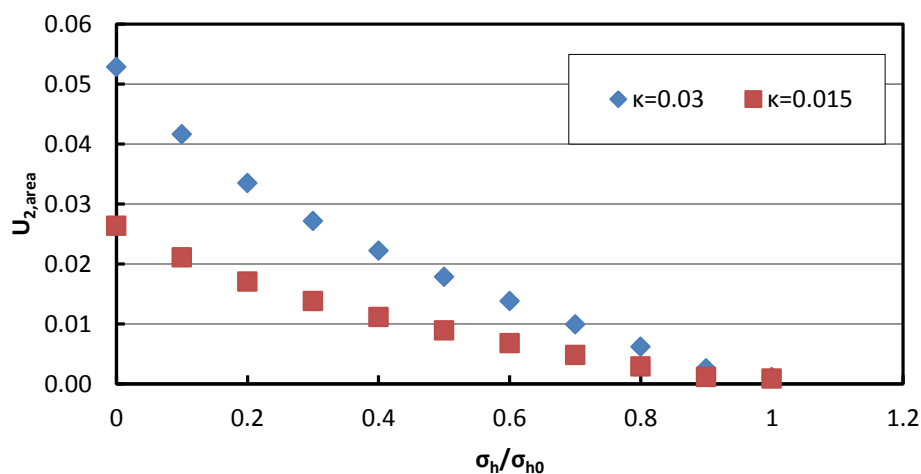
Διάγραμμα B-12. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για H/D=3.5, κ=0.02, M=1.0, OCR=1.0



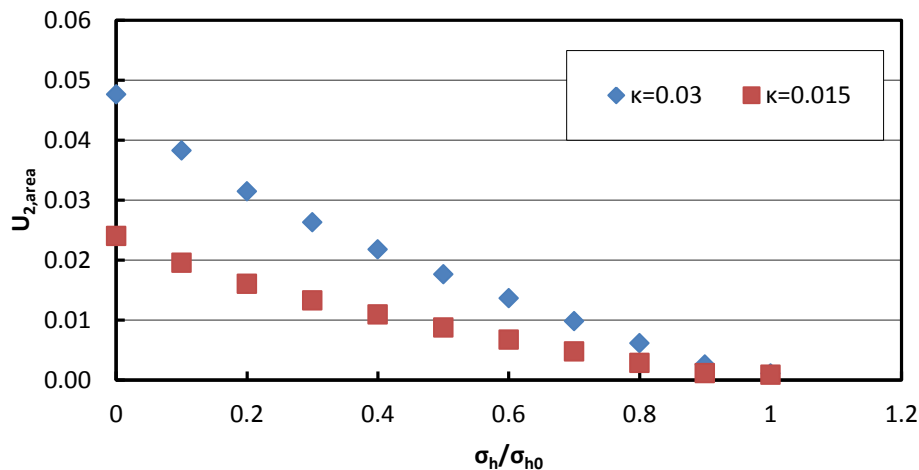
Διάγραμμα B-13. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



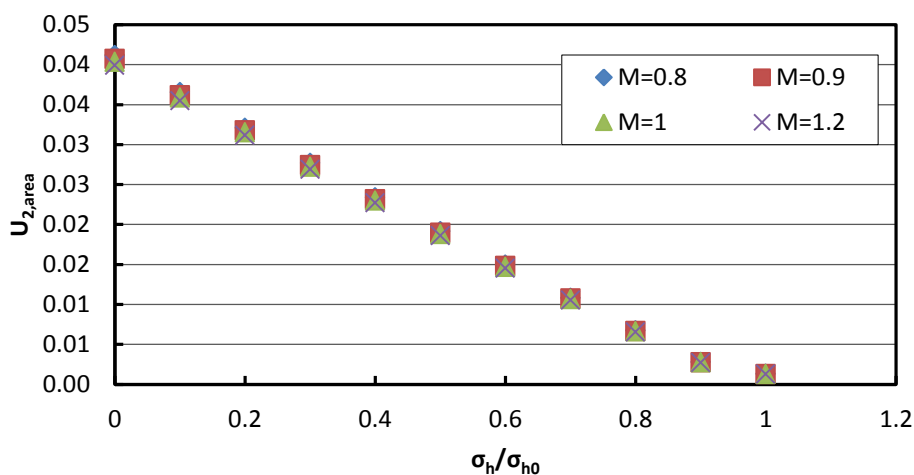
Διάγραμμα B-14. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



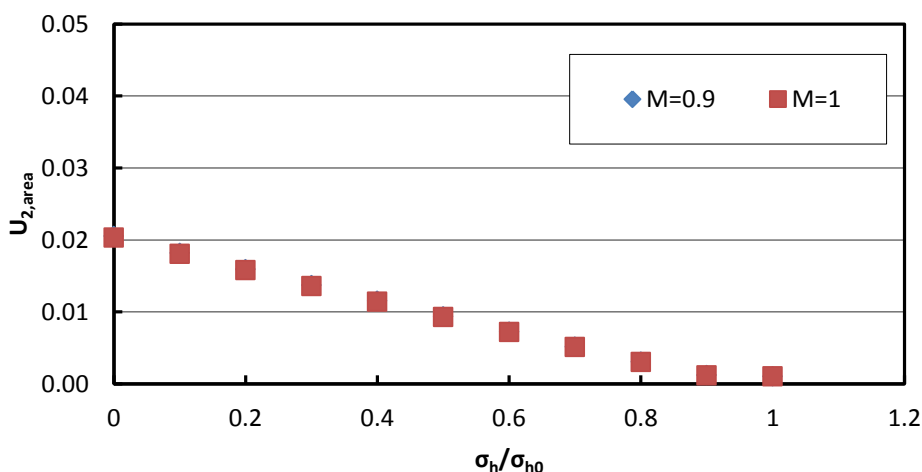
Διάγραμμα B-15. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=1.5$



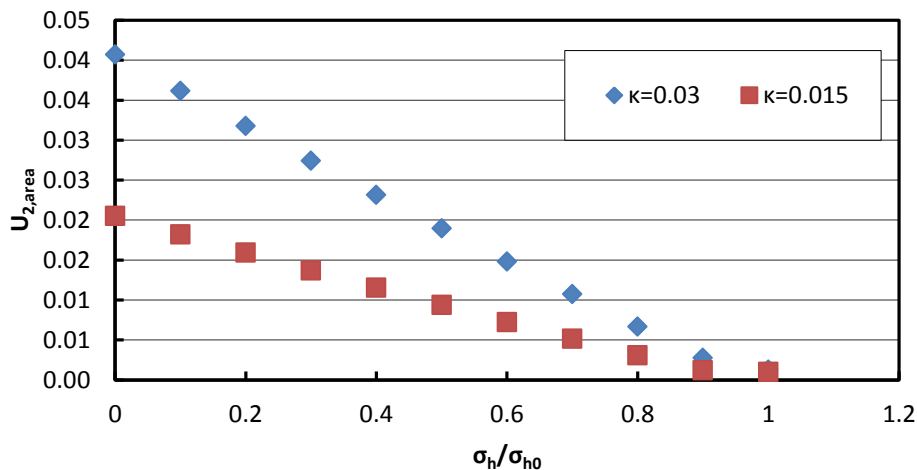
Διάγραμμα Β-16. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.5$



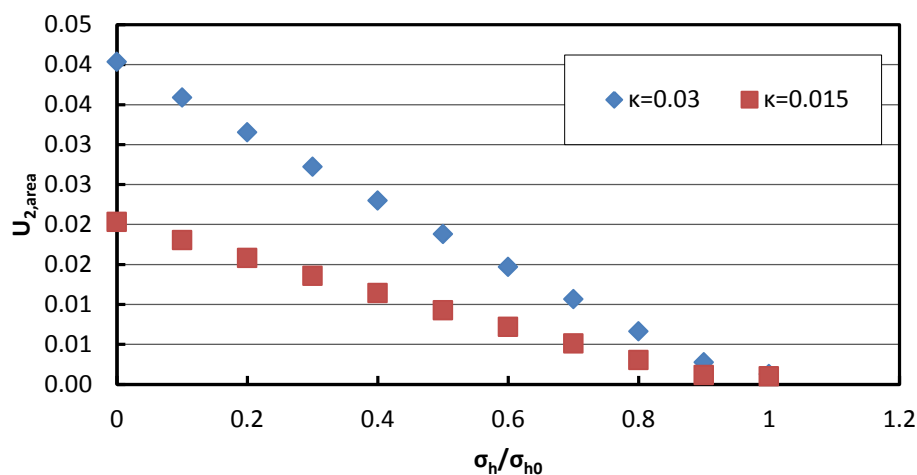
Διάγραμμα Β-17. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $\kappa=0.03$, $OCR=4.0$



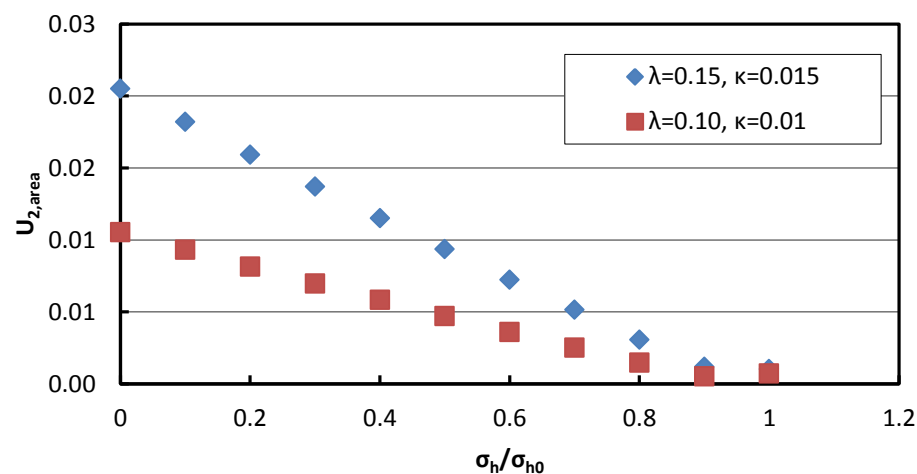
Διάγραμμα Β-18. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $\kappa=0.015$, $OCR=4.0$



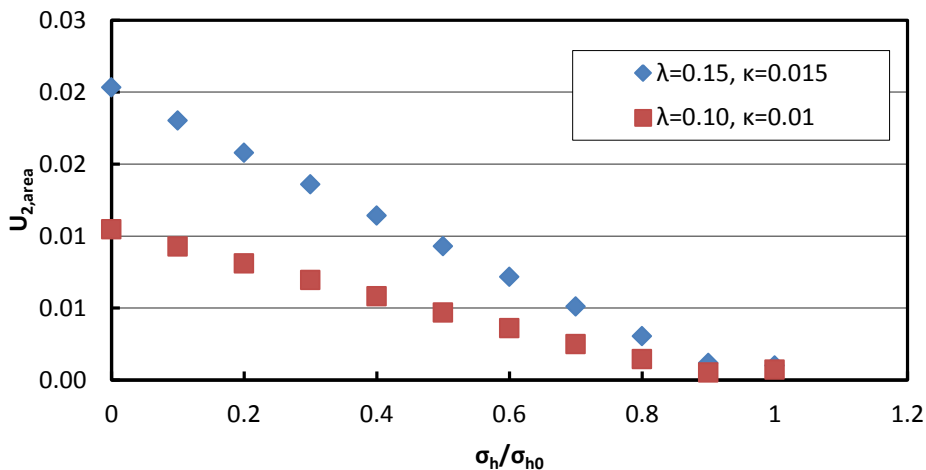
Διάγραμμα B-19. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=4.0$



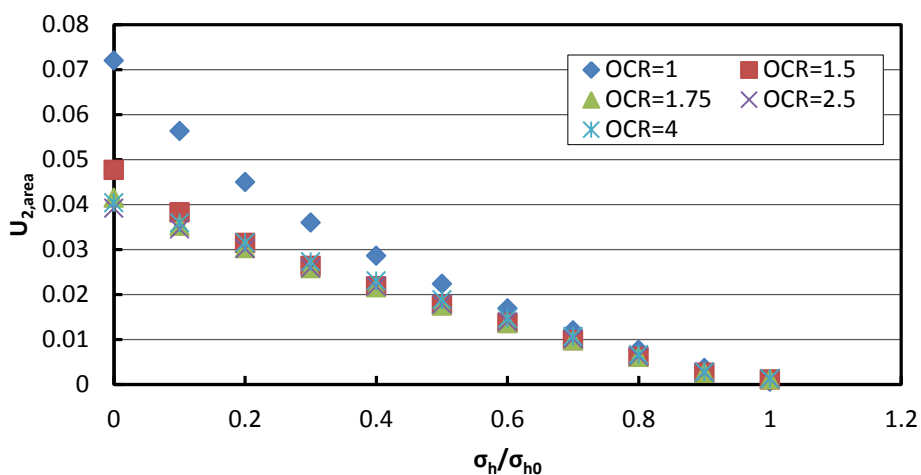
Διάγραμμα B-20. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=4.0$



Διάγραμμα B-21. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $H/D=3.5$, $\kappa/\lambda=0.10$, $M=0.9$, $OCR=4.0$



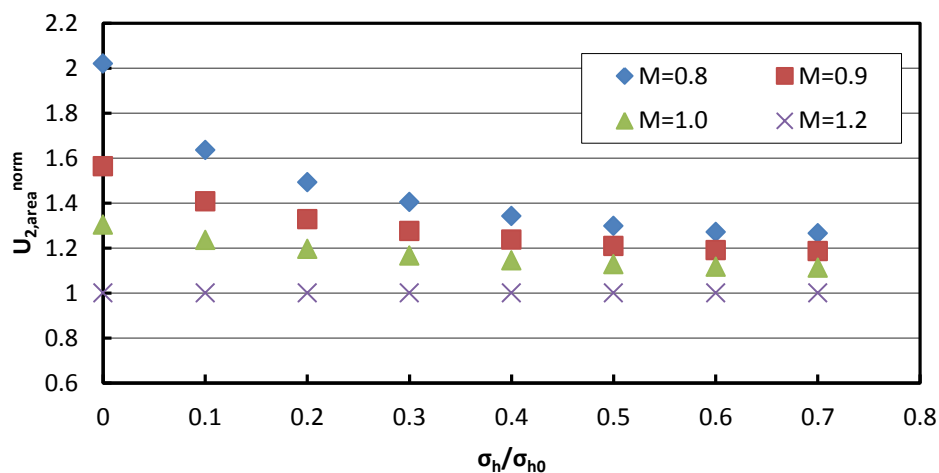
Διάγραμμα Β-22. Επίδραση των παραμέτρων κ και λ στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για H/D=3.5, κ/λ=0.10, M=1.0, OCR=4.0



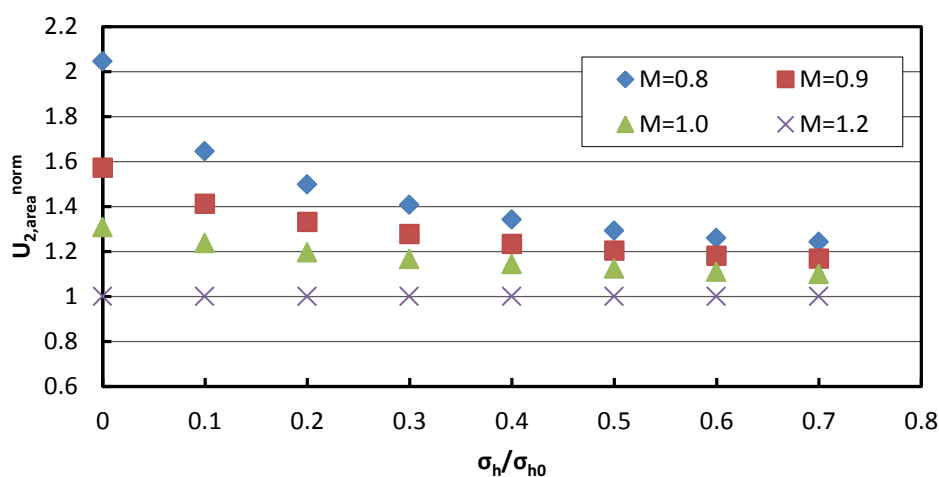
Διάγραμμα Β-23. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για H/D=3.5, κ=0.03, λ=0.15, M=1.0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

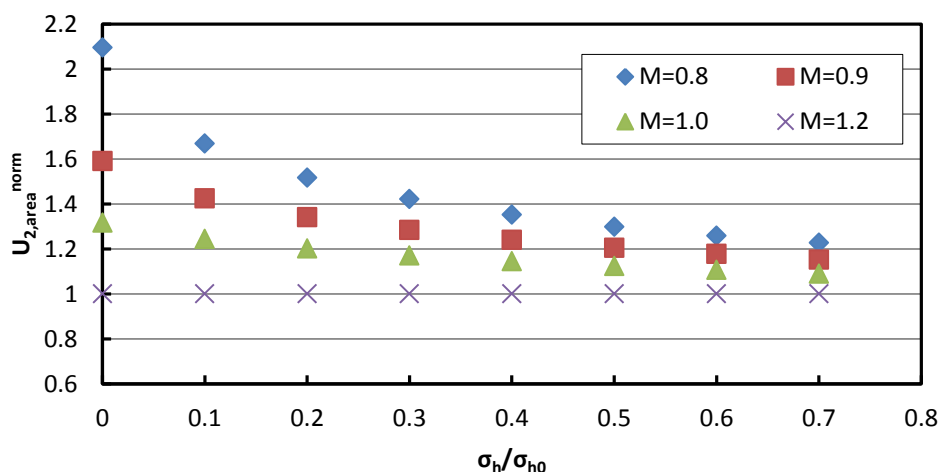
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται μέσω συγκριτικών αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων η επίδραση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπίεστότητας στην έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής σήραγγας για το μοντέλο με βάθος $H/D=1.5$.



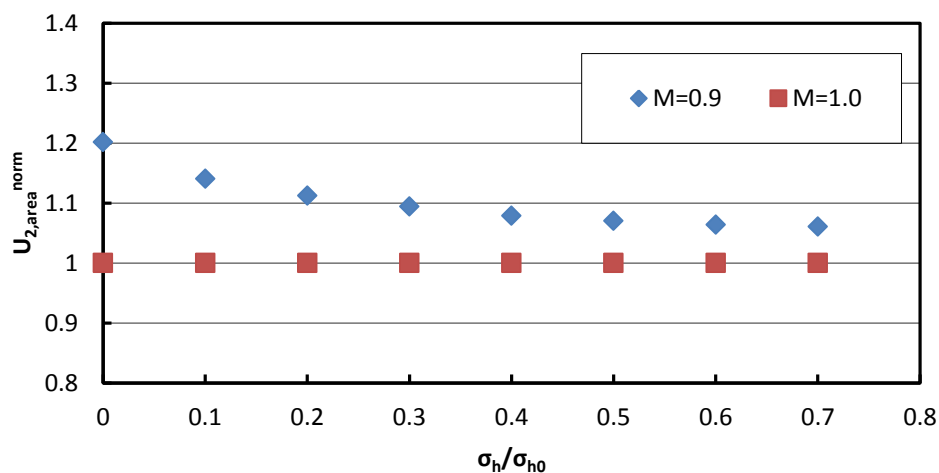
Διάγραμμα Γ-1. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $\lambda=0.10$, $OCR=1$



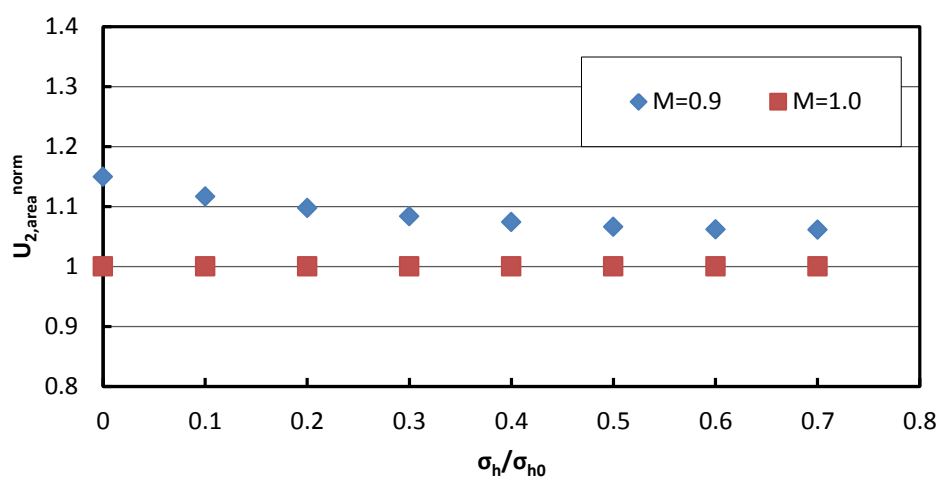
Διάγραμμα Γ-2. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1$



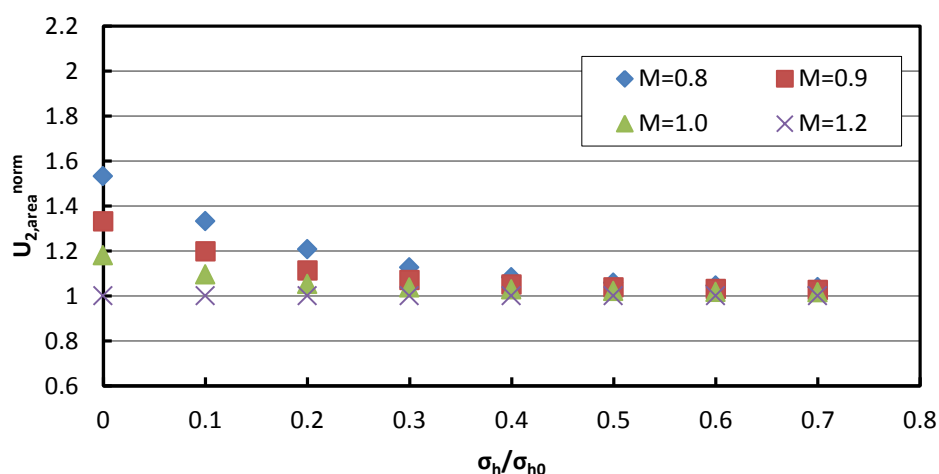
Διάγραμμα Γ-3. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.04$, $\lambda=0.20$, $OCR=1$



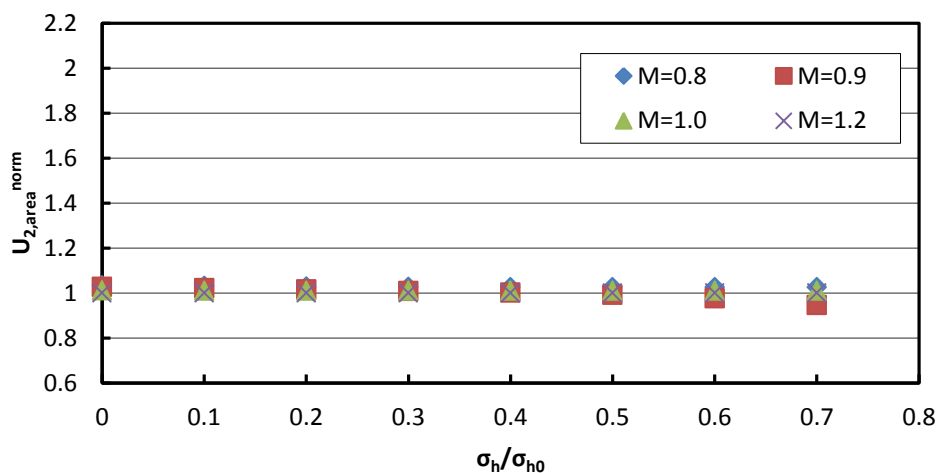
Διάγραμμα Γ-4. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1$



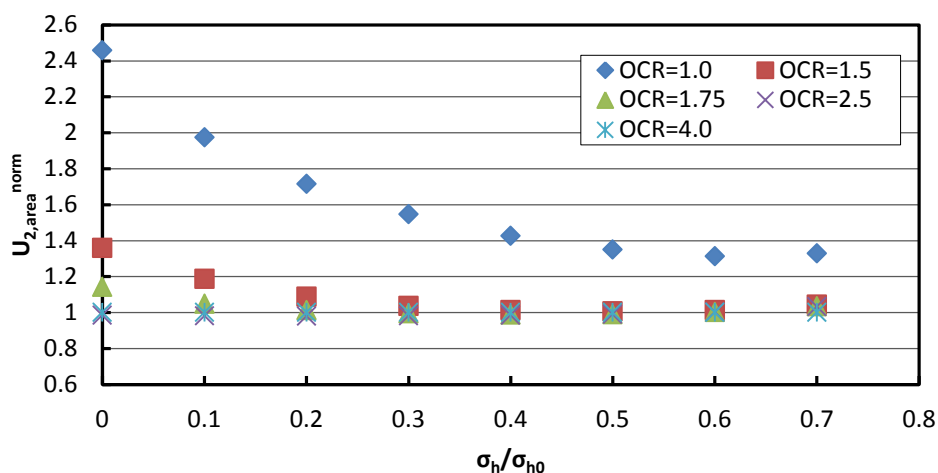
Διάγραμμα Γ-5. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.015$, $\lambda=0.15$, $OCR=1$



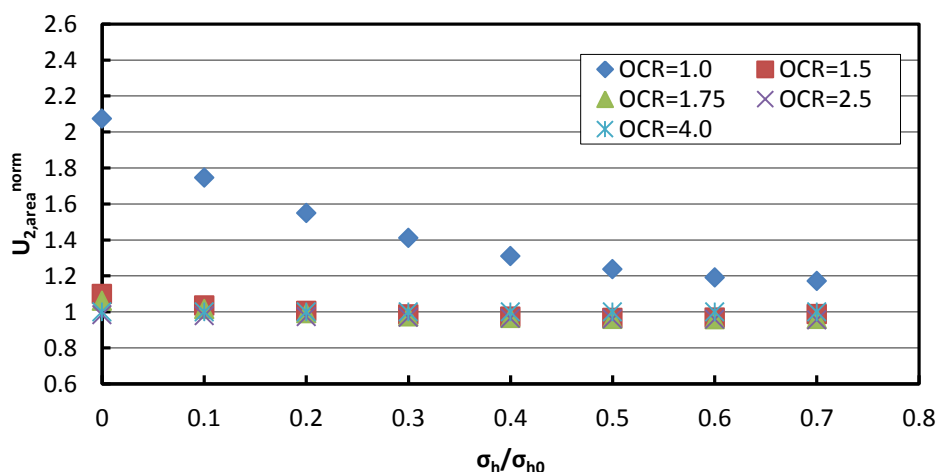
Διάγραμμα Γ-6. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=1.5$



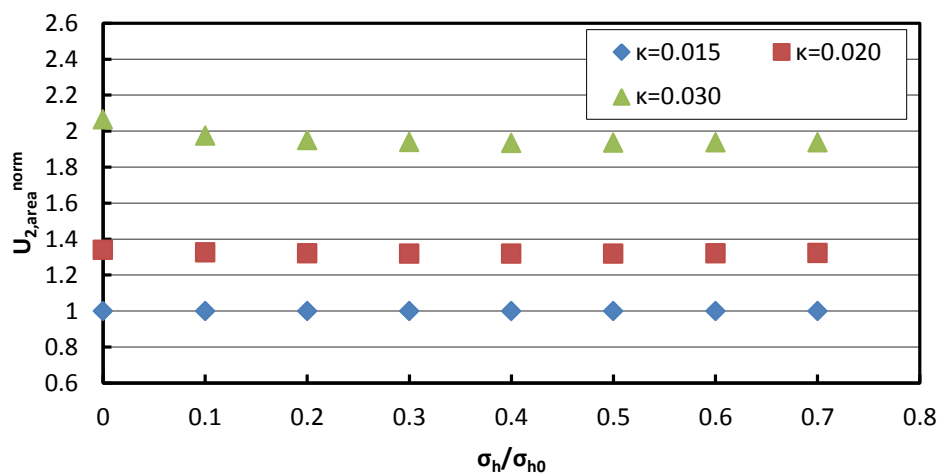
Διάγραμμα Γ-7. Επίδραση της παραμέτρου M στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $OCR=4$



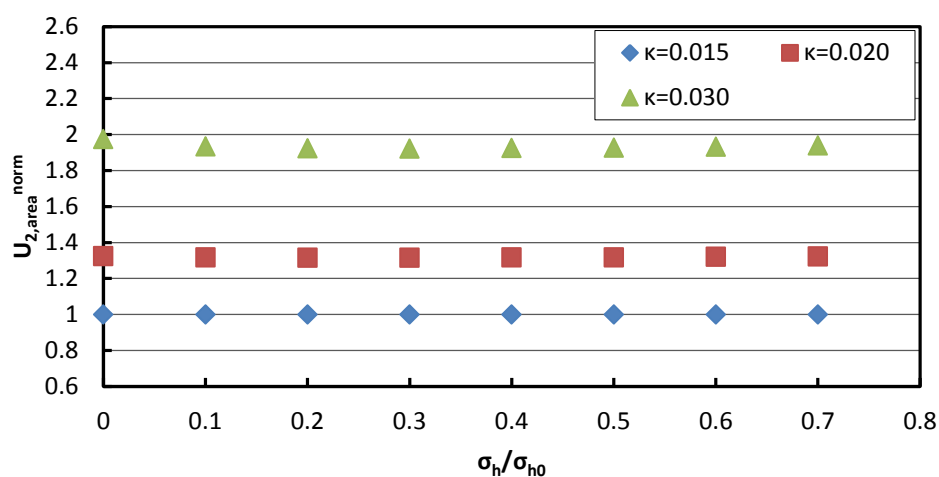
Διάγραμμα Γ-8. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=0.9$



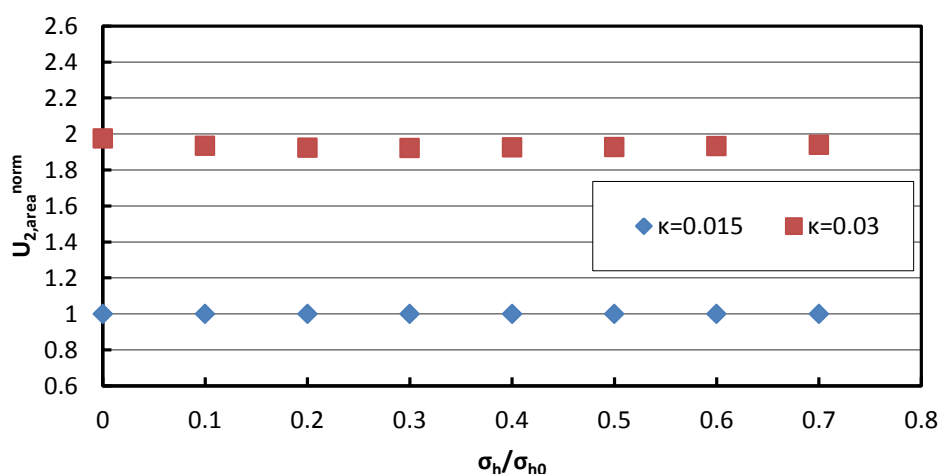
Διάγραμμα Γ-9. Επίδραση της παραμέτρου OCR στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.03$, $\lambda=0.15$, $M=1.0$



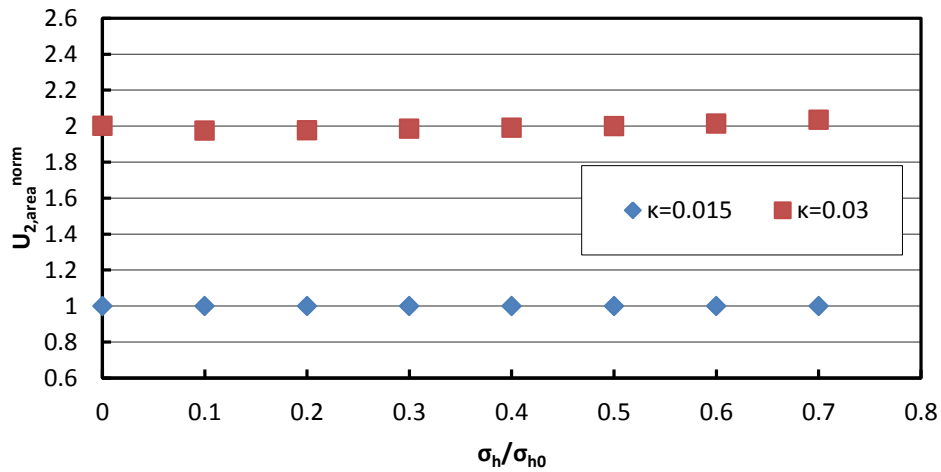
Διάγραμμα Γ-10. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=0.9$, $OCR=1$



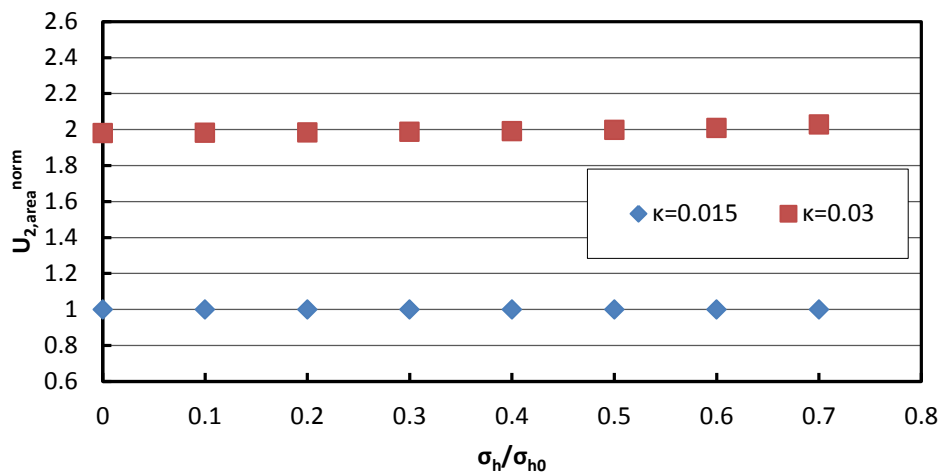
Διάγραμμα Γ-11. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1$



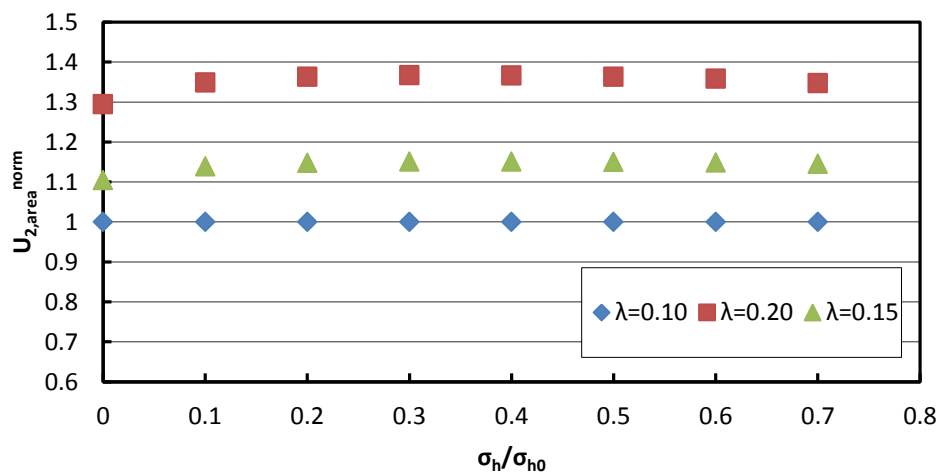
Διάγραμμα Γ-12. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1$



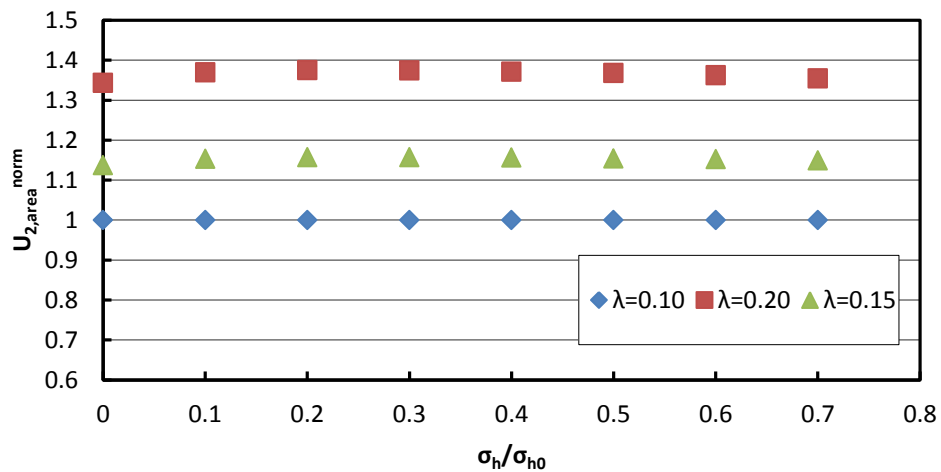
Διάγραμμα Γ-13. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=1.5$



Διάγραμμα Γ-14. Επίδραση της παραμέτρου κ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\lambda=0.15$, $M=1.0$, $OCR=4$



Διάγραμμα Γ-15. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=0.9$, $OCR=1$



Διάγραμμα Γ-16. Επίδραση της παραμέτρου λ στην εξέλιξη της αδιαστατοποιημένης έκθλιψης του μετώπου με την απομείωση της πίεσης για $\kappa=0.02$, $M=1.0$, $OCR=1$