

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΜΜΟΥ

Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.

του

Παναγιώτη Κ. Τριαντάφυλλου

ΕΚΤΕΝΗΣ ΣΥΝΟΨΗ

Αντικείμενο και στόχοι διδακτορικής διατριβής

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά άμμου υπό συνθήκες τριαξονικής και γενικευμένης φόρτισης. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου M31 σε συνθήκες μονότονης ρευστοποίησης (flow deformation) καθώς και στην κρίσιμη κατάσταση (critical state). Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου και σε δύο συσκευές τριαξονικής φόρτισης του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο πρώτος στόχος που τέθηκε ήταν η μελέτη της Κρίσιμης Κατάστασης (CS) της άμμου και ο προσδιορισμός των αντίστοιχων μηχανικών παραμέτρων της υπό συνθήκες τριαξονικής φόρτισης. Ο δεύτερος στόχος αφορούσε την εξέταση της επίδρασης της εγγενούς ανισοτροπίας (inherent anisotropy) (Casagrande and Carrillo 1944) και της ιστορίας φόρτισης (loading history) στα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου υπό συνθήκες μονότονης ρευστοποίησης (flow deformation) (Ishihara 1993) και γενικευμένης αστοχίας. Κατά τη μονότονη ρευστοποίηση το εδαφικό δοκίμιο υπόκειται σε μη-συγκεντρωμένη (διάχυτη??) παραμόρφωση (diffuse deformation) ενώ η συμπεριφορά του συστήματος δοκίμιο – συσκευή φόρτισης είναι οιονεί ασταθής (Daouadji et al. 2011). Τα πειραματικά αποτελέσματα κρίθηκαν κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση ή διάψευση των προβλέψεων ορισμένων προσομοιωμάτων, καταστρωμένων στα πλαίσια της Θεωρίας Διακλάδωσης (Bifurcation Theory), σχετικά με την ασταθή συμπεριφορά των γεωϋλικών (Darve and Laouafa 2000, Darve et al. 2004, Prunier et al. 2009). Τέλος, τέθηκε ως στόχος να εκτελεστεί σε φυσικές συνθήκες το «πείραμα σκέψης» που επινοήθηκε από τον καθηγητή Δαφαλιά (Dafalias 2016) και αφορά την επιβολή στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως στην ΚΚ, διατηρώντας σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως. Αυτό το πείραμα, το οποίο είχε προσομοιωθεί προγενέστερα από τους Theocharis et al. (2017,

2019) με χρήση της Μεθόδου Διακριτών Στοιχείων (Discrete Element Method), έχει ως σκοπό να αναδείξει την επίδραση της εσωτερικής δομής (fabric) (Brewer 1964, Oda 1972) στη μηχανική συμπεριφορά άμμου στην ΚΚ και να αποδείξει την αναγκαιότητα αναθεώρησης της κλασσικής Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης (ΘΚΚ) (Roscoe et al. 1958, Schofield and Wroth 1968), όπως προτάθηκε από τους Li and Dafalias (2012) οι οποίοι εισήγαγαν τη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (ΘΑΚΚ).

Η ΘΚΚ διατυπώνει ότι τα κοκκώδη υλικά που υποβάλλονται σε φόρτιση φτάνουν στην κρίσιμη και σταθερή κατάσταση (critical and steady state) ύστερα από εκτεταμένη παραμόρφωση. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί στο παρατηρούμενο φαινόμενο διαρκούς διατμητικής παραμόρφωσης του κοκκώδους υλικού υπό σταθερό όγκο και σταθερές τάσεις (αποκλίνουσα και ισοτροπική). Η αξία της ΘΚΚ έγκειται στο γεγονός ότι η αναφορά στην τελική κατάσταση (ultimate state) μέσω κάποιας καταστατικής παραμέτρου αποτελεί την πεμπτούσια της αποτελεσματικής περιγραφής και προσομοίωσης της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών (Wroth and Basset 1965, Been and Jefferies 1985, Triantafyllos et al. 2020). Στα πλαίσια της ΘΚΚ διατυπώνονται δύο ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την επίτευξη και διατήρηση της κρίσιμης κατάστασης σύμφωνα με τις οποίες ο αποκλίνων λόγος τάσεων (deviatoric stress ratio, $\eta_c = (q/p')_c = M$) είναι μία σταθερά του υλικού και ο δείκτης πόρων (void ratio, e_c) είναι μία μοναδική συνάρτηση της ισοτροπικής τάσης (isotropic stress, p')· σημειώνεται ότι q είναι η αποκλίνουσα τάση και ότι ο κάτω δείκτης c σημαίνει «στην κρίσιμη κατάσταση».

Μία από τις υποθέσεις της ΘΚΚ είναι ότι το εδαφικό υλικό στερείται ανισότροπης εσωτερικής δομής λόγω της έντονης αναμόχλευσης που υπόκειται για να φτάσει στην ΚΚ (Schofield and Wroth 1968). Διατυπώνεται, επίσης, ότι το εδαφικό υλικό φτάνει στην ΚΚ και παραμορφώνεται διαρκώς υπό σταθερό όγκο όταν και μόνο όταν τηρούνται οι εξής συνθήκες: $q = Mp'$ και $v = \Gamma - \lambda \ln p'$ (Schofield and Wroth 1968); όπου v είναι ο ειδικός όγκος του εδαφικού υλικού και M , Γ και λ είναι σταθερές του εδαφικού υλικού. Είναι προφανές ότι η εσωτερική δομή στην ΚΚ θεωρείται πρακτικά ισότροπη και για αυτόν τον λόγο οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την επίτευξη και διατήρηση της ΚΚ περιλαμβάνουν μόνο βαθμωτά μεγέθη (scalar quantities). Αντιθέτως, σύγχρονες μελέτες έχουν δείξει ότι η εσωτερική δομή στην ΚΚ είναι εντόνως ανισότροπη και προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση της φόρτισης στην οποία υποβλήθηκε το κοκκώδες υλικό μέχρι να φτάσει στην ΚΚ (Thornton 2000, Masson and Martinez 2001, Zhang and Thornton 2007, Li and Li 2009, Fu and Dafalias 2011, Wiebicke et al. 2017, Theocharis et al. 2017, 2019). Επομένως, η ανισότροπη εσωτερική δομή επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών σε κάθε κατάσταση συμπεριλαμβανομένης και της κρίσιμης κατάστασης.

Το «πείραμα σκέψης» που περιγράφηκε προηγουμένως (Dafalias 2016) στοχεύει στο να διερευνηθεί εάν το εδαφικό υλικό που βρίσκεται στην ΚΚ, όταν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι δύο διατυπωμένες ικανές και αναγκαίες συνθήκες, παραμένει στην ΚΚ καθώς εκκινείται η στροφή των κύριων αξόνων τάσεως, διατηρώντας σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως. Στην περίπτωση που ο δείκτης πόρων του εδαφικού

υλικού μεταβληθεί, όπως έχει προγενέστερα δειχθεί στην αριθμητική προσομοίωση του πειράματος από τους Theocharis et al. (2017, 2019), τότε αυτό εγκαταλείπει την ΚΚ και οι δύο διατυπωμένες συνθήκες είναι αναγκαίες αλλά όχι ικανές για τη διατήρηση της ΚΚ. Οι Li and Dafalias (2012) πρότειναν την αναθεώρηση της ΘΚΚ με την προσθήκη μίας τρίτης συνθήκης η οποία απαιτεί μία νέα παράμετρος ανισότροπης δομής (fabric anisotropy variable) να λάβει την κρίσιμη τιμή της ταυτόχρονα με τον αποκλίνοντα λόγο τάσεων και τον δείκτη πόρων ώστε να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η ΚΚ. Η νέα παράμετρος λαμβάνει την κρίσιμη τιμή της όταν ο τανυστής δομής (Satake 1978, Oda et al. 1985) προσανατολιστεί με την κατεύθυνση φόρτισης και ταυτόχρονα αποκτήσει την κρίσιμη, κατά μέγεθος (norm), τιμή του. Επομένως, η χρήση της νέας παραμέτρου εξηγεί γιατί το εδαφικό υλικό εγκαταλείπει την ΚΚ όταν εκκινείται η στροφή των κύριων αξόνων τάσεως παρόλο που δεν παραβιάζονται αρχικώς οι δύο συνθήκες της κλασικής ΘΚΚ, ενώ η προσθήκη της τρίτης συνθήκης καθιστά τη θεωρία πλήρη στην αναθεωρημένη της μορφή (ΘΑΚΚ).

Αναβάθμιση και τροποποίηση των συσκευών φόρτισης

Για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή εκτελέστηκαν, αρχικώς, εργασίες που αφορούσαν την τροποποίηση και αναβάθμιση των συσκευών τριαξονικής φόρτισης και στρεπτικής διάτμησης. Κινητά μέρη σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και προσαρτήθηκαν στις συσκευές φόρτισης με σκοπό την επιβολή συνοριακών συνθηκών που αποτρέπουν την εκδήλωση ανεπιθύμητων διακλαδισμένων μορφών παραμόρφωσης (bifurcated deformation modes; Vardoulakis and Sulem 1995). Η συσκευή υψηλών πιέσεων τροποποιήθηκε ώστε να εκτελεστούν δοκιμές σε αρχική μέση ενεργό τάση έως και 6 MPa με σκοπό την καθυστέρηση της ανάπτυξης των ζωνών συγκεντρωμένης παραμόρφωσης (strain-localisation zones) στα πυκνότερα δοκίμια άμμου (Desrues and Hammad 1989). Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης αναβαθμίστηκε ώστε να καταστεί δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος των πιέσεων περισφιγξης μέσα και έξω από το κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο (Hight et al. 1983). Επίσης, ο έλεγχος τύπου «κλειστού βρόχου» (closed-loop control) όλων των συνοριακών φορτίων που δρουν στο κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο επετεύχθη με χρήση ενός νέου λογισμικού σε προγραμματιστικό περιβάλλον LabVIEW το οποίο αλληλεπιδρά με τα συστήματα σέρβο-ελέγχου της συσκευής στρεπτικής διάτμησης. Η αναβάθμιση αυτή επέτρεψε την εκτέλεση τασικών οδεύσεων γενικευμένης φόρτισης, κατάλληλων για τη διερεύνηση της επίδρασης της εγγενούς ανισοτροπίας και της ιστορίας φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου.

Πειραματικά αποτελέσματα, μέρος I: Κρίσιμη Κατάσταση άμμου

Για τη μελέτη της κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31, με τα φυσικά χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον Πίνακα 3, παρασκευάστηκαν δοκίμια με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα (άμμος IC) σε μέση ενεργό τάση, p'_{in} , κυμαινόμενη από 100 έως 6000 kPa· σημειώνεται ότι ο δείκτης in σημαίνει «στην αρχική κατάσταση». Έπειτα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική τριαξονική θλίψη υπό στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες· οι δοκιμές αυτές ανήκουν στην

κατηγορία A (A-series tests). Τα **Σχήματα 1a και b** δείχνουν τις ενεργές τασικές οδεύσεις (effective stress paths) στο $q - p'$ επίπεδο και τις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης - παραμόρφωσης ($q - \varepsilon_q$), αντιστοίχως, από τις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης, ενώ τα **Σχήματα 1c και d** δείχνουν τα ίδια διαγράμματα από τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την ύπαρξη μίας μοναδικής γραμμής στον $p' - e - q$ χώρο στην οποία καταλήγουν οι οδεύσεις φόρτισης (loading paths) όταν ο ρυθμός των τάσεων και των πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων της άμμου μηδενίζεται πρακτικώς ύστερα από εκτεταμένη παραμόρφωση (Roscoe et al. 1958, Been et al. 1991, Verdugo and Ishihara 1996, Triantafyllos et al. 2020). Η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (ΓΚΚ) προσδιορίστηκε ανεξαρτήτως της αρχικής τιμής του δείκτη πόρων και της μέσης ενεργού τάσης και ανεξαρτήτως του τύπου της όδευσης φόρτισης (στραγγιζόμενη ή αστράγγιστη τριαξονική θλίψη), όπως φαίνεται στα **Σχήματα 2a και b** τα οποία απεικονίζουν την προβολή της ΓΚΚ στα $q - p'$ και $e - p'$ επίπεδα. Ο **Πίνακας 4** δίνει τις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31 σύμφωνα με την εξίσωση που πρότειναν οι Li and Wang (1998).

Η προβολή της ΓΚΚ στο $e - p'$ καταστατικό επίπεδο χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η καταστατική παράμετρος, $\psi = e - e_c(p')$, των Been and Jefferies (1985) σε κάθε στάδιο της φόρτισης. Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη διαφορά της τρέχουσας τιμής του δείκτη πόρων, e , από την τιμή του δείκτη πόρων στην ΚΚ για την τρέχουσα τιμή της ισοτροπικής τάσης, $e_c(p')$. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μία σαφή εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς της άμμου από την καταστατική παράμετρο, ψ (Manzari and Dafalias 1997, Li and Dafalias 2000). Η εξέλιξη των παραμέτρων η και ε_{vol} (ή $\Delta u / p'_{in}$) βρέθηκε καλά συσχετισμένη με την εξέλιξη της καταστατικής παραμέτρου, ψ , όπου $\eta = q / p'$ είναι ο αποκλίνων λόγος τάσεων, ε_{vol} είναι η ογκομετρική παραμόρφωση και $\Delta u / p'_{in}$ είναι η υπερπίεση του ύδατος πόρων κανονικοποιημένη ως προς τη μέση ενεργό τάση στο τέλος της ισότροπης στερεοποίησης. Για παράδειγμα, ο αποκλίνων λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation point) (Ishihara et al. 1975) αυξάνεται ενώ ο αποκλίνων λόγος τάσεων, η_p , και η απόλυτος τιμή του λόγου διαστολικότητας, $D_p = d\varepsilon_{vol}^p / d\varepsilon_q^p$, στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας (peak failure) μειώνονται όταν η καταστατική παράμετρος, ψ , γίνεται λιγότερο αρνητική, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**: σημειώνεται ότι ο άνω δείκτης p στον ορισμό του D σημαίνει «πλαστικός» και ότι στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις για τον προσδιορισμό του D . Επίσης, η σχέση λόγου τάσεων - διαστολικότητας, $\eta - D$, είναι διαφορετική για πυκνή και χαλαρή άμμο, δηλαδή εξαρτάται από την καταστατική παράμετρο, ψ , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4**.

Πειραματικά αποτελέσματα, μέρος II: Μηχανικά χαρακτηριστικά άμμου υπό συνθήκες μονότονης ρευστοποίησης και γενικευμένης αστοχίας

Για τη μελέτη της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς της άμμου παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα (άμμος IC) σε μέση ενεργό τάση, $p'_c = 200$ kPa (ή 100 kPa ή 300 kPa). Έπειτα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση εμποδιζόμενης στράγγισης υπό σταθερή

μέση ολική τάση, p , και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3) = 0.5$, διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α (ή $\alpha_{\sigma'_1}$) (βλ. **Σχήμα 5**): οι δοκιμές αυτές ανήκουν στην κατηγορία A (A-series tests). Σημειώνεται ότι κατά την απόθεση της άμμου υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργούνται οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης (bedding planes) πάνω στα οποία προσανατολίζονται επιλεκτικά οι μεγάλοι άξονες των μη σφαιρικών κόκκων σχηματίζοντας μία εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή (inherently anisotropic fabric) (**Arthur and Menzies 1972, Oda 1972**). Επομένως, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του κύριου άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς τα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου. Αξίζει, όμως, να επισημανθεί ότι ανισότροπη εσωτερική δομή παράγεται όχι μόνο εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των μεγάλων αξόνων των μη σφαιρικών κόκκων αλλά και εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής (contact normal vectors) των κόκκων (σφαιρικών ή μη) και των μεγάλων αξόνων των κενών μεταξύ των κόκκων. Τα τρία αυτά στοιχεία εσωτερικής δομής εξελίσσονται κατά τη φόρτιση των κοκκωδών υλικών με διαφορετικούς ρυθμούς (**Oda et al. 1985, Wang et al. 2017**).

Η χαλαρή άμμος επέδειξε εντόνως ανισότροπα μηχανικά χαρακτηριστικά στις δοκιμές αστράγγιστης φόρτισης κατά τις οποίες οι τιμές των α , b και p παραμέτρων διατηρήθηκαν σταθερές (δοκιμές ακτινικής φόρτισης) (radial loading tests). Τα **Σχήματα 6a και b** δείχνουν τις ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q_d - p'$ και τις καμπύλες οκταεδρικών διατμητικών τάσεων – παραμορφώσεων ($\tau_{oct} - \gamma_{oct}$), αντιστοίχως· σημειώνεται ότι q_d είναι η διαφορά τάσεων $\sigma'_1 - \sigma'_3$, η οποία ισούται με την αποκλίνουσα τάση, q , όταν $b = 0$ ή 1. Στα διαγράμματα παρατηρείται η τυπική συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης (limited flow deformation) (**Nakata et al. 1998**) για τη χαλαρή κορεσμένη άμμο η οποία εκδηλώνεται με την πτώση της αντοχής, q_d , μετά το σημείο παροδικού μεγίστου (transient-peak state) και με ταυτόχρονη συσσώρευση μονότονης διατμητικής παραμόρφωσης και υπερπίεσης του ύδατος πόρων (**Vaid and Chern 1983**). Η πτώση της αντοχής, q_d , οφείλεται στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του ύδατος πόρων (**Sassitharan et al. 1993**) ενώ ο αποκλίνων λόγος τάσεων, $\eta = q / p'$, αυξάνεται, δηλαδή το αμμώδες υλικό κρατύνεται με ταυτόχρονη απομείωση των ενεργών τάσεων (**Lade et al. 1988**). Λόγω των παραμέτρων ελέγχου (control parameters) που επιλέχθηκαν η μείωση της αντοχής οδηγεί σε αστάθεια (instability) (Lade, 1993), με στοιχεία δυναμικής απόκρισης και διακλάδωση (bifurcation) της συμπεριφοράς του συστήματος συσκευή φόρτισης – δοκίμιο μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης πέραν του οποίου ανακτάται η αντοχή, ο έλεγχος των παραμέτρων φόρτισης και η ευστάθεια (**Triantafyllos et al. 2019**).

Η συμπεριφορά της άμμου γίνεται, εν γένει, περισσότερο συστολική όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή, q_d , στο σημείο παροδικού μεγίστου και στο σημείο αλλαγής φάσης να μειώνεται με τη γωνία α : επίσης, η κανονικοποιημένη υπερπίεση του ύδατος πόρων, $\Delta u / p'_{in}$, και η οκταεδρική

διατμητική παραμόρφωση, γ_{oct} , στο σημείο αλλαγής φάσης αυξάνονται όταν αυξάνεται η γωνία α . Στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας η τιμή του λόγου τάσεων, $\sin \varphi_p$ (ο δείκτης p σημαίνει «στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας» που αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση των λόγων τάσεων $\sin \varphi$ και η), μειώνεται, εν γένει, με την αύξηση της γωνίας α . Μολαταύτα, η περισσότερο ασθενής απόκριση παρατηρείται όταν η γωνία α λαμβάνει τιμές μεταξύ 60° και 75° , διότι τότε ένα από τα επίπεδα όπου ο λόγος των τάσεων γίνεται μέγιστος (maximum stress obliquity planes) τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης. Επομένως, η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου στο σημείο παροδικού μέγιστου αντοχής, στο σημείο αλλαγής φάσης και στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας.

Τα σημεία παροδικού μέγιστου αντοχής στις ακτινικές δοκιμές αστράγγιστης φόρτισης ταυτίζονται πρακτικώς με τα σημεία εκκίνησης της αστάθειας (instability points) και σε αυτά αντιστοιχεί ένας λόγος τάσεων, $\sin \varphi_{ip}$ (ο δείκτης ip σημαίνει «στο σημείο αστάθειας»), ο οποίος μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α . Ενώνοντας, επομένως, τα σημεία παροδικού μέγιστου αντοχής με την αρχή των αξόνων στον $q_d - p'$ χώρο τάσεων προκύπτουν γραμμές με διαφορετική κλίση ανάλογα με την τιμή της γωνίας α , οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν τις Γραμμές Αστάθειας (Instability Lines) κατά τον ορισμό του **Lade (1993)**. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή ορίστηκε η Επιφάνεια Αστάθειας (Instability Surface, IS) στον $Y - X$ εκτροπικό χώρο τάσεων, όπου $Y = 2\tau_{z\theta} / (\sigma'_{zz} + \sigma'_{\theta\theta})$ και $X = (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta}) / (\sigma'_{zz} + \sigma'_{\theta\theta})$, η οποία διέρχεται από τα σημεία αστάθειας και αποτελεί τη γενίκευση της έννοιας της γραμμής αστάθειας του Lade (**Triantafyllos et al. 2019**). Στη συνέχεια, εξετάστηκε αν η εκκίνηση της μονότονης ρευστοποίησης υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης που περιλαμβάνουν συνεχή στροφή των κύριων αξόνων τάσεως μπορεί να συσχετιστεί με τη διάσχιση της Επιφάνειας Αστάθειας (EA) ή κάποιας εναλλακτικής επιφάνειας όπως η Τοπική Οριακή Επιφάνεια (Local Boundary Surface) που ορίστηκε από τους **Symes et al. (1984)** και **Shibuya et al. (1987, 2003a, 2003b)**.

Επεξηγήσεις σχετικά με τον προσδιορισμό των σημείων αστάθειας, των γραμμών αστάθειας και της επιφάνειας αστάθειας δίνονται στα **Σχήματα 7a και b** τα οποία δείχνουν τις τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τρεις αστράγγιστες δοκιμές μονοτονικής φόρτισης με διαφορετικές τιμές της γωνίας κατεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσεως, α , και κοινές τιμές των b και p παραμέτρων. Στο **Σχήμα 7a** επισημαίνονται τα σημεία αστάθειας (συμπαγείς κύκλοι) και οι γραμμές αστάθειας (διακεκομμένες γραμμές) ενώ οι ίδιες οι τασικές οδεύσεις (συμπαγείς γραμμές) αποτελούν την προβολή ενός τμήματος της Τοπικής Οριακής Επιφάνειας από τον $q_d - p' - a - b (= 0.5)$ χώρο στο $q_d - p'$ επίπεδο. Στο **Σχήμα 7b** απεικονίζονται στο $Y - X$ εκτροπικό επίπεδο οι τασικές οδεύσεις από τις ίδιες δοκιμές αστράγγιστης φόρτισης και ένα τμήμα της επιφάνειας αστάθειας, όπως αυτό προσδιορίζεται ενώνοντας τα τρία σημεία αστάθειας.

Στο **Σχήμα 8** προσδιορίζονται γεωμετρικά οι κύριες κατευθύνσεις τάσεων και παραμορφώσεων στα $Y - X$ και $Y_s - X_s$ εκτροπικά επίπεδα, όπου $Y_s = 2\tau_{z\theta}$ και $X_s = \sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta}$, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην παρούσα διδακτορική διατριβή,

ενώ στον Πίνακα 1 δίδονται οι αλγεβρικοί τύποι για τον υπολογισμό των γωνιών κατευθύνσεων των κυρίων τάσεων. Η τασική όδευση που απεικονίζεται στα $Y-X$ και $Y_s - X_s$ επίπεδα του Σχήματος 8 αφορά στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως και η κατεύθυνση του κύριου άξονα της μέγιστης κύριας τάσεως, της προσαυξητικής τάσεως και της προσαυξητικής παραμορφώσεως υποδεικνύεται με την υπέρθεση των μοναδιαίων διανυσμάτων, σ , $d\sigma$ και $d\epsilon$, αντιστοίχως, στο τρέχον τασικό σημείο. Σημειώνεται ότι οι τανυστές αντιμετωπίζονται στο εξής ως διανύσματα χάριν ευκολίας του γεωμετρικού προσδιορισμού των κυρίων κατευθύνσεων χωρίς να είναι αντιπροσωπευτικά του μεγέθους τάσης και παραμόρφωσης.

Η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα σ , $d\sigma$ και $d\epsilon$ με τον οριζόντιο άξονα (X ή X_s) είναι ίση με $2\alpha_{\sigma'1}$, $2\alpha_{d\sigma'1}$ και $2\alpha_{d\epsilon1}$, αντιστοίχως, ενώ η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα $d\sigma$ με τον X_s -άξονα δεν ισούται κατ' ανάγκη με $2\alpha_{d\sigma'1}$. Με βάση τη σύμβαση που υιοθετήθηκε η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ μεταβάλλεται από την τιμή 0° στην τιμή $+45^\circ$ στην τιμή $\pm 90^\circ$ στην τιμή -45° και πάλι στην τιμή 0° όταν το διάνυσμα σ στρέφεται αντίθετα από την φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού, δείχνοντας προς τα θετικά του X_s -άξονα όταν $\alpha_{\sigma'1} = 0^\circ$ και προς τα θετικά του Y_s -άξονα όταν $\alpha_{\sigma'1} = +45^\circ$. η ίδια σύμβαση χρησιμοποιείται για τις γωνίες $\alpha_{d\sigma'1}$ και $\alpha_{d\epsilon1}$. Εναλλακτικά, η γωνία $\alpha_{\sigma'1}^*$ (ή $\alpha_{d\sigma'1}^*$ ή $\alpha_{d\epsilon1}^*$) μεταβάλλεται από την τιμή 0° στην τιμή $+45^\circ$ στην τιμή $+90^\circ$ στην τιμή $+135^\circ$ και τέλος στην τιμή $+180^\circ/0^\circ$ όταν το διάνυσμα σ (ή $d\sigma$ ή $d\epsilon$) στρέφεται αντίθετα από την φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού ξεκινώντας από τον X_s -άξονα. Η δεύτερη σύμβαση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας μη ομοαξονικότητας (non-coaxiality angle), $\xi = \alpha_{d\epsilon1}^* - \alpha_{\sigma'1}^*$, η οποία υποδεικνύει την απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμορφώσεως από την κύρια κατεύθυνση τάσεως. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις για τον προσδιορισμό του ξ με την παραδοχή ότι η ακτινική και εφαπτομενική παραμόρφωση είναι ίσες

Το Σχήμα 9 δείχνει την επιφάνεια αστάθειας, IS, της χαλαρής άμμου και τα περιγράμματα ίσων τιμών γ_{oct} και $\Delta u / p'_{in}$ κατά τη συστολική φάση απόκρισης στο $Y - X$ επίπεδο, όπως προσδιορίστηκαν από τα δεδομένα των αστράγγιστων δοκιμών ακτινικής φόρτισης. Η επιφάνεια αστάθειας και τα περιγράμματα είναι ελλείψεις (ή τμήματα ελλείψεων) συμμετρικές ως προς τον X -άξονα, των οποίων ο μικρός άξονας είναι παράλληλος προς τον Y -άξονα σε θέση με $X > 0$. Επομένως, η εκκίνηση της αστάθειας και η ανάπτυξη μίας δεδομένης τιμής της παραμέτρου $\Delta u / p'_{in}$ ή γ_{oct} αντιστοιχεί σε μικρότερο λόγο τάσεων, $\sin \varphi$, όταν η γωνία α ($\alpha_{\sigma'1}$) αυξάνεται, υποδεικνύοντας την επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας στην παραμορφωσιμότητα της άμμου. Η επιφάνεια αστάθειας και το περίγραμμα $\Delta u / p'_{in} = 0.60$ είναι «ανοικτά» στο ένα άκρο διότι η άμμος αναπτύσσει $\Delta u / p'_{in} < 0.60$ και παραμένει ευσταθής όταν η κατεύθυνση του $\sigma'1$ -άξονα είναι κοντά στην κατακόρυφο. Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται, επίσης, και τα διανύσματα $d\epsilon$ στα σημεία αστάθειας τα οποία αποκλίνουν από την κατεύθυνση της κύριας τάσης (ακτινική κατεύθυνση) και κλίνουν προς την κατεύθυνση του Y -άξονα. Δεδομένου ότι η κύρια κατεύθυνση προσαυξητικής παραμόρφωσης $\alpha_{d\epsilon1} = \pm 45^\circ$ ($\alpha_{d\epsilon1}^* = +45^\circ$ ή $+135^\circ$) αντιστοιχεί σε παραμόρφωση τύπου

απλής διάτμησης (simple-shear deformation mode) συνάγεται ότι η ύπαρξη οριζόντιων επιπέδων διαστρωμάτωσης πιθανώς να προάγει την παραμόρφωση αυτού του τύπου λόγω της κινηματικής διευκόλυνσης της ολίσθησης στα επίπεδα διαστρωμάτωσης απομειώνοντας την απόκλιση των διανυσμάτων τάσεων και παραμορφώσεων (μη-ομοαξονικότητα) (Miura et al. 1986, Triantafyllos et al. 2019).

Για τη μελέτη της επίδρασης της ιστορίας στερεοποίησης και φόρτισης στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά της άμμου παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό, τα οποία στερεοποιήθηκαν ανισότροπα (άμμος AC) σε μέση ενεργό τάση, $p'_c = 200$ kPa (ή 100 kPa), και σε διάφορους λόγους τάσεων στερεοποίησης, $K_c = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$ (ο δείκτης c σημαίνει «στην κατάσταση στερεοποίησης»). Στη δεύτερη φάση στερεοποίησης μεταβλήθηκε η τιμή της παραμέτρου b από 0 σε 0.5 και της τάσεως p' από p'_c σε $p'_{in} (> p'_c)$ και στη συνέχεια επιβλήθηκε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των κύριων αξόνων τάσεως και σταθερές p και $b (= 0.5)$ παραμέτρους. Στις αστράγγιστες δοκιμές τύπου B (B-series tests) η αποκλίνουσα τάση, q , αυξάνεται μονότονα ενώ ταυτόχρονα στρέφονται οι κύριοι άξονες τάσεως. Στις αστράγγιστες δοκιμές τύπου C (C-series tests) η αποκλίνουσα τάση, q , διατηρείται σταθερή ενώ στρέφονται οι κύριοι άξονες τάσεως προκαλώντας την ανάπτυξη υπερπίεσης του ύδατος πόρων και, επομένως, την αύξηση του αποκλίνοντος λόγου τάσεων, $\eta = q / p'$, καθώς οι ενεργές τάσεις αποφορτίζονται ισότροπα ($d\sigma'_1 = d\sigma'_2 = d\sigma'_3 = -du < 0$) (Symes et al. 1984, Nakata et al. 1998, Sivathayalan and Vaid 2002, Yang et al. 2007, Triantafyllos et al. 2019). Αξίζει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές τύπου B η γωνία της κύριας κατεύθυνσης τάσης, $\alpha_{\sigma'_1}$, δεν μπορεί να μεταβληθεί πέραν της τιμής $+45^\circ$ δεδομένου ότι η γωνία της κύριας κατεύθυνσης προσαυξητικής τάσης, $\alpha_{d\sigma'_1}$, είναι σταθερή και ίση με $+45^\circ$ (υπό ευσταθείς συνθήκες), ενώ στις δοκιμές τύπου C είναι δυνατόν να εκτελεστούν πολλαπλοί κύκλοι μονότονης στροφής των κύριων αξόνων τάσεως.

Τα Σχήματα 10a και b δείχνουν τις τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τις δοκιμές τύπου B και C* (C* είναι οι δοκιμές τύπου C κατά τις οποίες η αστάθεια προκλήθηκε κατά το πρώτο μισό του πρώτου κύκλου στροφής των κύριων αξόνων τάσεως). Στο Σχήμα 10a οι διακεκομμένες ευθείες γραμμές που διέρχονται από την αρχή των αξόνων, είναι οι γραμμές αστάθειας του Lade για τη χαλαρή ισότροπα στερεοποιημένη άμμο όπως προσδιορίστηκαν στις δοκιμές τύπου A. Η τιμή της γωνίας $\alpha_{\sigma'_1}$ υποδεικνύεται με ετικέτες σε ορισμένα τασικά σημεία (μη-συμπαγείς κύκλοι) συμπεριλαμβανομένων των σημείων αστάθειας (συμπαγείς κύκλοι). Η διακεκομμένη καμπύλη γραμμή αποτελεί μία εκτίμηση της τασικής όδευσης C2 κατά την ασταθή φάση απόκρισης, για την οποία τα καταγεγραμμένα δεδομένα είναι ανεπαρκή λόγω χρήσης χαμηλής συχνότητας καταγραφής σε αυτήν τη δοκιμή. Στο Σχήμα 10b απεικονίζονται η επιφάνεια αστάθειας για $Y \geq 0$ και τα σημεία αστάθειας, ενώ τα μοναδιαία διανύσματα de υποδεικνύουν την κύρια κατεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης στα σημεία αστάθειας.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 10a και b και η ανάλυση των παραμορφώσεων υποδεικνύουν ότι στις δοκιμές τύπου B η ανάπτυξη μίας

συγκεκριμένης τιμής παραμόρφωσης, γ_{oct} , και η πρόκληση αστάθειας απαιτεί μικρότερη αύξηση της γωνίας $\Delta\alpha_{\sigma'1}$ και της τάσης, q_d , όταν η τιμή του K_c μειώνεται· η παράμετρος $\Delta\alpha_{\sigma'1}$ εκφράζει τη μονότονη αύξηση της γωνίας της κύριας κατεύθυνσης τάσεως. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν την τρωτότητα της χαλαρής AC άμμου έναντι ρευστοποίησης που προκαλείται από μικρές διαταραχές στο μέγεθος και την κατεύθυνση των κυρίων τάσεων όταν η στατική διατμητική τάση είναι υψηλή (Sivathayalan and Vaid 2002, Georgiannou and Konstadinou 2014, Triantafyllos et al. 2019). Από την άλλη πλευρά, όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρή η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ στο σημείο αστάθειας μεγαλώνει και η αντοχή, q_d , στο σημείο αστάθειας και στο σημείο αλλαγής φάσης μικραίνει. Σημειώνεται ότι η ανισότροπη στερεοποίηση ενισχύει την ανισοτροπία που δημιουργείται κατά την απόθεση της άμμου (Hu et al. 2010) και αυτή η αλλαγή εντοπίζεται μακροσκοπικά στη διόγκωση της Τοπικής Οριακής Επιφάνειας γύρω από το σημείο στερεοποίησης στον $q_d - p' - a$ χώρο (Shibuya et al. 2003b). Επομένως, οι τασικές οδεύσεις από τις δοκιμές τύπου B αποτελούν ίχνη πάνω σε διαφορετικές Τοπικές Οριακές Επιφάνειας ανάλογα με την τιμή του λόγου K_c . Παρομοίως, στις δοκιμές τύπου C η ανάπτυξη συγκεκριμένης τιμής παραμόρφωσης, γ_{oct} , και η πρόκληση αστάθειας απαιτεί μικρότερη αύξηση της γωνίας $\Delta\alpha_{\sigma'1}$ όταν η τιμή του K_c μειώνεται. Επίσης, για μία δεδομένη τιμή του λόγου K_c η μονότονη στροφή $\Delta\alpha_{\sigma'1}$ μέχρι την εκκίνηση της αστάθειας είναι μεγαλύτερη στις δοκιμές τύπου C σε σύγκριση με τις δοκιμές τύπου B.

Το **Σχήμα 10b** δείχνει ότι στις δοκιμές φόρτισης τύπου B και C*, στις οποίες επιβάλλεται στροφή των κύριων αξόνων τάσεως, η αστάθεια της χαλαρής AC άμμου συμβαίνει όταν η τασική όδευση διασχίζει την επιφάνεια αστάθειας, IS, που έχει οριστεί από τις δοκιμές ακτινικής φόρτισης σε χαλαρή IC άμμο. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η γωνία διατμητικής αντίστασης, φ , στο σημείο αστάθειας εξαρτάται μόνο από την τιμή της γωνίας της κύριας κατεύθυνσης τάσεως, $\alpha_{\sigma'1}$, ενώ είναι ανεξάρτητη από τον λόγο τάσεων στερεοποίησης, K_c , και την ιστορία φόρτισης που προηγείται της κινητοποίησης της κατάστασης $(\alpha_{\sigma'1}, \varphi)$, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα των Nakata et al. (1998), Sivathayalan and Vaid (2002), Georgiannou et al. (Konstadinou+Triantafyllos)(2018). Το **Σχήμα 11a** δείχνει τις τασικές οδεύσεις και τα σημεία αστάθειας στο $Y - X$ επίπεδο από τις δοκιμές τύπου A, B και C* σε χαλαρή άμμο στερεοποιημένη σε τάση $p'_c = 200$ kPa, ενώ το **Σχήμα 11b** δείχνει τα σημεία αστάθειας από τις ίδιες δοκιμές στο $\varphi - \alpha_{\sigma'1}$ επίπεδο. Παρόμοια συμπεριφορά άμμου παρατηρήθηκε σε δοκιμές φόρτισης τύπου A και B με τάση στερεοποίησης $p'_c = 100$ kPa, δηλαδή η αστάθεια συνέβη όταν η τασική όδευση διέσχισε την επιφάνεια αστάθειας, IS. Μολαταύτα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι τασικές οδεύσεις στο **Σχήμα 11a** διασχίζουν την επιφάνεια αστάθειας υπό μία μεγάλη γωνία. Θεωρητικά, το έργο δευτέρας τάξεως, d^2W (Hill 1958), πρέπει αναγκαστικά να μηδενιστεί για να συμβεί αστάθεια και επειδή αυτή η ποσότητα εξαρτάται από την κατεύθυνση προσανζητικής τάσης και την ιστορία φόρτισης (Darve et al. 1995) είναι πιθανόν η ευστάθεια να διατηρηθεί εάν η επιφάνεια αστάθειας διατμηθεί υπό διαφορετικές κατευθύνσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες από τις τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο του **Σχήματος 11a** παρουσιάζουν ένα διακριτό χαρακτηριστικό μετά το σημείο αστάθειας που υποδεικνύει ότι συμβαίνει στροφή των κύριων αξόνων τάσεων είτε προς την κατεύθυνση $\alpha_{\sigma'} = 0^\circ$ είτε προς την κατεύθυνση $\alpha_{\sigma'} = 90^\circ$ διότι η τάση Y_s αποφορτίζεται μη αναλογικά ως προς την τάση X_s . Αυτή η αυθόρμητη (ανεξέλεγκτη) συμπεριφορά, η οποία παρατηρείται και στις δοκιμές ακτινικής φόρτισης, αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα διακλάδωσης αφού η τασική όδευση ακολουθεί μία απρόβλεπτη, μη μοναδική πορεία που εξαρτάται από τις ατέλειες του συστήματος συσκευή φόρτισης – δοκίμιο (**Desrues and Georgopoulos 2006**). Οι **Triantafyllos et al. (2019)** πρότειναν ότι η εγγενής ανισοτροπία, μεταξύ άλλων παραγόντων, επηρεάζει την ασταθή (στοιχεία διακλάδωσης) συμπεριφορά του συστήματος δεδομένου ότι αυτή είναι περισσότερο ευδιάκριτη όταν η αστάθεια συμβαίνει σε συνδυασμούς τάσεων με $22.5^\circ \leq \alpha_{\sigma'} \leq 35^\circ$ ή με $60^\circ \leq \alpha_{\sigma'} \leq 75^\circ$, δηλαδή είτε όταν ένα από τα επίπεδα οιονεί αστοχίας τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης ή όταν η ολίσθηση στο οριζόντιο επίπεδο είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός παραμόρφωσης (δηλ. όταν $\alpha_{del} = +45^\circ$, βλ. και **Σχήμα 10b**). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι ασταθείς τασικές οδεύσεις ακολουθούν παρόμοιες διαδρομές ανεξαρτήτως της προηγούμενης ιστορίας φόρτισης (π.χ. βλ. τις τασικές οδεύσεις A4, A6, B1, B4, C1) και αυτή η συμπεριφορά συνδέεται συχνά με τη διάτμηση κάποιας οριακής επιφάνειας που περιγράφει την καταστατική συμπεριφορά του αμμόδου υλικού (**Roscoe et al. 1958, Symes et al. 1984**).

Τα **Σχήματα 12a και b** δείχνουν τις τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τις δοκιμές τύπου C, στις οποίες η αστάθεια συνέβη μετά την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως. Αυτό επετεύχθη επιλέγοντας υψηλότερες τιμές του λόγου τάσεων στερεοποίησης, K_c , οι οποίες, ωστόσο, αντιστοιχούν σε στατική τάση, q_d , μεγαλύτερη από την ελάχιστη αντοχή της ισότροπα στερεοποιημένης άμμου για $\alpha_{\sigma'} \geq 45^\circ$. Δεδομένου ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του ύδατος πόρων υπό ευσταθείς συνθήκες μειώνεται μετά τον πρώτο κύκλο στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως (**Ishihara and Towhata 1983, Nakata et al. 1998, Yang et al. 2007**) η τασική όδευση από τις δοκιμές τύπου C διατέμνει την επιφάνεια αστάθειας υπό μικρή γωνία. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 12b** η ευστάθεια διατηρείται όταν η επιφάνεια αστάθειας τανύζεται υπό μικρή γωνία (σχεδόν εφαπτομενικά) ενώ, όπως θα δειχτεί στη συνέχεια, χάνεται όταν η τασική όδευση στο $q_d - p'$ επίπεδο διατέμνει τον φθίνοντα κλάδο της Τοπικής Οριακής Επιφάνειας με φορά προς τα έξω.

Οι ετικέτες που επισυνάπτονται στους κοίλους κύκλους στο **Σχήμα 12a** υποδεικνύουν την τιμή της γωνίας $\alpha_{\sigma'}$ στις αντίστοιχες τασικές καταστάσεις, ενώ οι ετικέτες που επισυνάπτονται στους συμπαγείς ρόμβους υποδεικνύουν την τιμή της γωνίας $\alpha_{\sigma'}$ στα σημεία αστάθειας. Στην περίπτωση της τασικής όδευσης C6, ο συμπαγής ρόμβος υποδεικνύει την κατάσταση στην οποία η άμμος αστοχεί στην κορυφαία τιμή q_d/p' (ή q/p') και χάνεται ο έλεγχος του προγράμματος φόρτισης (loss of controllability) (**Nova 1994**), ενώ η δυναμική αστάθεια που οδηγεί στην παροδική μονότονη ρευστοποίηση (flow instability) συμβαίνει σε μία άλλη κατάσταση κορυφαίας αστοχίας που

υποδεικνύεται με ένα τετράγωνο το οποίο έχει ένα σύμβολο x στο κέντρο του· ουσιαστικά, η άμμος ρευστοποιείται αφού προηγουμένως έχει επιβληθεί στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως πάνω στην επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας.

Η καμπύλη που προσαρμόζεται στους συμπαγείς ρόμβους (σημεία αστάθειας) στο $Y-X$ επίπεδο του **Σχήματος 12b** ονομάζεται η εξελιγμένη επιφάνεια αστοχίας (evolved instability surface) και είναι ένα τμήμα έλλειψης (με τον κύριο άξονά της να ταυτίζεται με τον X -άξονα και τον δευτερεύοντα άξονα της να είναι παράλληλος στον Y -άξονα σε θέση με $X > 0$) που βρίσκεται μεταξύ της αρχικής επιφάνειας αστοχίας (initial instability surface) και της επιφάνειας κορυφαίας αστοχίας. Τονίζεται ότι είναι δυνατόν να οριστούν διαφορετικές επιφάνειες αστάθειας που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιστορίες φόρτισης και στερούνται εγγενούς αξίας (Darve et al. 1995). Μολαταύτα, η χρησιμότητα αυτών των νοητικών κατασκευασμάτων έγκειται στο γεγονός ότι επισημαίνουν την εξάρτηση της συνθήκης εκκίνησης της αστάθειας από την ιστορία τάσεων – παραμορφώσεων. Επίσης, υποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά της άμμου κατά τη φάση της παροδικής μονότονης ρευστοποίησης επηρεάζεται από την εγγύτητα του σημείου αστάθειας προς την επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας, πιθανώς εξ αιτίας της εξελισσόμενης ανισοτροπίας (evolving / induced anisotropy).

Η επίδραση της ιστορίας τάσεων στη συνθήκη αστάθειας χαλαρής άμμου επισημαίνεται στο **Σχήμα 13** το οποίο δείχνει τη γωνία διατμητικής αντίστασης, φ , σε συνάρτηση με τη γωνία κύριας κατεύθυνσης τάσεως, $\alpha_{\sigma'1}$, στα σημεία αστάθειας και κορυφαίας αστοχίας. Τα σημεία αστάθειας στις δοκιμές τύπου A συμβολίζονται με συμπαγείς (ή κοίλους) κύκλους, στις δοκιμές τύπου B ή C* (C1-2) με συμπαγή τετράγωνα και στις δοκιμές τύπου C (C3-6) με συμπαγείς ρόμβους (ή με το τετράγωνο που έχει το σύμβολο x στο κέντρο του). Τα σημεία κορυφαίας αστοχίας στις δοκιμές όλων των τύπων απεικονίζονται με τα σύμβολα x . Το **Σχήμα 13** επίσης δείχνει την αρχική επιφάνεια αστάθειας, την εξελιγμένη επιφάνεια αστάθειας, την επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας και την όδευση εξέλιξης των συνδυασμών $(\alpha_{\sigma'1}, \varphi)$ στη δοκιμή C6. Είναι προφανές ότι η τιμή της γωνίας φ_{ip} στο σημείο αστάθειας δεν είναι αποκλειστική συνάρτηση της γωνίας $\alpha_{\sigma'1}$ αλλά εξαρτάται, επίσης, και από την ιστορία φόρτισης. Για παράδειγμα, η γωνία φ_{ip} είναι ίση με 20.0° , 25.6° ή 39.1° στις δοκιμές A13, C3 και C6, αντιστοίχως, ενώ η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ είναι περίπου ίση με 60° . Επίσης, η όδευση εξέλιξης των συνδυασμών $(\alpha_{\sigma'1}, \varphi)$ στη δοκιμή C6 διασχίζει ευσταθώς την αρχική επιφάνεια αστάθειας και φτάνει στην επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας, πάνω στην οποία κινείται προτού προκληθεί η ασταθής μονότονη ρευστοποίηση. Σημειώνεται ότι το σχήμα της επιφάνειας κορυφαίας αστοχίας υποδεικνύει την επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας στα χαρακτηριστικά αστοχίας.

Η επίδραση της ιστορίας παραμορφώσεων στη συνθήκη αστάθειας και στη συμπεριφορά χαλαρής άμμου κατά τη μονότονη ρευστοποίηση επισημαίνεται στο **Σχήμα 14** το οποίο δείχνει την τιμή της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του ύδατος πόρων, $\Delta u / p'_{in}$, σε συνάρτηση με τη γωνία κατεύθυνσης κύριας τάσεως, $\alpha_{\sigma'1}$, στα σημεία αστάθειας και αλλαγής φάσης που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές τύπου A και C (C3-6)· σε αυτό το σχήμα θεωρείται ότι $\alpha_{pl} \equiv \alpha_{ip}$. Με σκοπό να διαχωριστεί η πλαστική

συστολή που συμβαίνει ασταθώς κατά τη μονότονη ρευστοποίηση από αυτήν που συμβαίνει πριν την εκκίνηση της αστάθειας (Borja 2006) και να ποσοτικοποιηθεί έμμεσα η πρώτη ορίστηκε η παράμετρος μονότονης ρευστοποίησης (flow parameter) $U_I = (u_{pt} - u_{ip}) / p'_{in}$. Προσομοιώσεις φόρτισης κοκκωδών υλικών με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (DEM) έχουν δείξει ότι η αποφόρτιση των τάσεων p' και q κατά την ισόχωρη μονοτονική ρευστοποίηση συνδέεται με τη μείωση του αριθμού των σημείων διεπαφής των κόκκων και την αποδυνάμωση των φορτισμένων δομών κόκκων (force chains) (Gong et al. 2012, Guo and Zhao 2013). Η παράμετρος U_I ενδέχεται να εκφράζει μακροσκοπικά αυτήν την αποδόμηση, η οποία εξαρτάται από την ιστορία τάσεων – παραμορφώσεων όπως θα δειχτεί στη συνέχεια.

Το Σχήμα 14 δείχνει ότι στις δοκιμές τύπου A ο λόγος $(\Delta u / p'_{in})_{ip}$ είναι πρακτικά σταθερός και ίσος με 0.30, ανεξαρτήτως της τιμής της γωνίας $\alpha_{\sigma'1}$, ενώ ο λόγος $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ είναι ίσος με 0.44 όταν $\alpha_{\sigma'1} = 10^\circ$, έπειτα αυξάνεται σε 0.90 – 0.91 όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ λαμβάνει τιμές στο εύρος $60^\circ - 75^\circ$ και τελικά μειώνεται ελαφρώς στην τιμή 0.83 όταν $\alpha_{\sigma'1} = 90^\circ$. Αντιθέτως, στις δοκιμές τύπου C (C3-6) ο λόγος $(\Delta u / p'_{in})_{ip}$ είναι ίσος με 0.68 – 0.69 όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ κυμαίνεται μεταξύ 57.4° και 64.4° και μειώνεται σε 0.55 όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ κυμαίνεται μεταξύ 79.6° και 90.0° , ενώ ο λόγος $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ είναι ίσος με 0.85 όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ κυμαίνεται μεταξύ 57.4° και 90.0° . Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η τιμή του λόγου $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ δεν επηρεάζεται πρακτικώς από την ιστορία φόρτισης (όταν $K_c \geq 0.64$) και εξαρτάται μόνο από την τιμή α_{pt} , ενώ η τιμή της παραμέτρου $U_I = (u_{pt} - u_{ip}) / p'_{in}$ μειώνεται δραστικά στις δοκιμές C3 έως C6. Παρόμοια αποτελέσματα που αφορούν την εξάρτηση του λόγου $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ από την τιμή της γωνίας α_{pt} , η οποία πιθανώς οφείλεται στην εγγενή ανισοτροπία της άμμου, έχουν αναφερθεί από τους Yoshimine et al. (1998), Yoshimine and Ishihara (1998). Σημειώνεται ότι χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου U_I αντιστοιχούν σε υψηλότερες τιμές της παραμέτρου $\sin \phi_{ip}$ (στις δοκιμές τύπου C), υποδεικνύοντας ότι η συμπεριφορά της άμμου κατά τη μονότονη ρευστοποίηση γίνεται λιγότερο συστολική σε μία δεδομένη κύρια κατεύθυνση τάσεως, $\alpha_{\sigma'1}$, όταν η ρευστοποίηση προκαλείται πιο κοντά στην επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας, πιθανώς λόγω της εξελισσόμενης ανισοτροπίας.

Τα Σχήματα 15a και b δείχνουν την τασική όδευση στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τη δοκιμή C3 χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς με αυτούς στο Σχήμα 12. Στο Σχήμα 15a απεικονίζονται, επίσης, οι τασικές οδεύσεις από τις δοκιμές A8 και A13 με σκοπό να αποτυπωθεί η τοπική οριακή επιφάνεια (LBS) της ισότροπα στερεοποιημένης χαλαρής άμμου για $\alpha_{\sigma'1} = 45^\circ$ και 60° . Η τασική όδευση C3 τανύζει/διατέμνει την αρχική επιφάνεια αστάθειας (initial IS) στο σημείο 1 με $\alpha_{\sigma'1} = 45^\circ$ και $\phi = 22.1^\circ$ κατά τη διάρκεια του πέμπτου κύκλου φόρτισης, μολαταύτα, η ευστάθεια διατηρείται μέχρι το σημείο όπου ο φθίνων κλάδος της τοπικής οριακής επιφάνειας τανύζεται/διατέμνεται μέσα στον ίδιο κύκλο φόρτισης στο σημείο 2 με $\alpha_{\sigma'1} = 57.4^\circ$ και $\phi = 25.6^\circ$. Σημειώνεται ότι η αρχική επιφάνεια αστάθειας τανύζεται υπό μία μικρή γωνία ενώ η τοπική οριακή επιφάνεια τανύζεται με φορά προς τα έξω. Επίσης, το ένα από τα επίπεδα οιονεί αστοχίας σχηματίζει γωνία 11° με το οριζόντιο επίπεδο

διαστρωμάτωσης στο σημείο 1, ενώ ταυτίζεται με αυτό στο σημείο 2. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το σημείο αστάθειας υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης με στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως «προσελκύεται» σε συνδυασμούς $(\alpha_{\sigma'1}, \varphi)$ που αντιστοιχούν σε δυσμενείς κινηματικές συνθήκες παραμόρφωσης.

Οι τιμές των παραμέτρων $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ και $U_I = (u_{pt} - u_{ip}) / p'_{in}$ στη δοκιμή C3 είναι 0.86 και 0.18, αντιστοίχως. Όταν συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές στη δοκιμή A11, οι οποίες είναι 0.70 και 0.39, μπορεί να συναχθεί ότι το χαλαρότερο δοκίμιο C3 ($e = 0.721$), το οποίο ρευστοποιήθηκε στην κύρια κατεύθυνση τάσεως $\alpha_{ip} = 57.4^\circ$, είναι λιγότερο συστολικό κατά τη φάση της μονότονης ρευστοποίησης από το πυκνότερο δοκίμιο A11 ($e = 0.699$), το οποίο ρευστοποιήθηκε στην κύρια κατεύθυνση τάσεως $\alpha_{ip} = 49.5^\circ$. Το ίδιο συμπέρασμα συνάγεται και από τη σύγκριση των τιμών της διατμητικής παραμόρφωσης, γ_{oct} , στο σημείο αλλαγής φάσης στις δοκιμές C3 και A11, που είναι 3.9% και 3.5%, αντιστοίχως. Προφανώς, η ιστορία τάσεων-παραμορφώσεων που προηγείται της έναρξης της μονότονης ρευστοποίησης επηρεάζει την μεταγενέστερη συμπεριφορά παρόλο που η τιμή του λόγου $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$ εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους α_{pt} και e (βλ. Σχήμα 14).

Τα ζεύγη σημείων 3 – 4 και 5 – 6 στο Σχήμα 15b υποδεικνύουν την έναρξη και λήξη δύο έντονων γεγονότων ανάπτυξης συγκεντρωμένων παραμορφώσεων τα οποία συνέβησαν σε μεγάλες παραμορφώσεις (σε ονομαστική παραμόρφωση $\gamma_{oct} \approx 16\%$ και 18% , αντιστοίχως) και έγιναν αντιληπτά μέσω οπτικής παρατήρησης και ερμηνείας του τρόπου ανάπτυξης των ονομαστικών τάσεων και παραμορφώσεων· ασθενής συγκέντρωση των παραμορφώσεων, με μη ανιχνεύσιμη επίδραση στα μετρούμενα μεγέθη στα σύνορα του δοκιμίου, παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στο σημείο Η ($\gamma_{oct} = 8.2\%$) όταν η αντοχή της άμμου επανακτήθηκε υπό συνθήκες πλαστικής διαστολής μετά το σημείο αλλαγής φάσης. Οι ονομαστικές τιμές των $\alpha_{\sigma'1}$ και φ υποδεικνύουν ότι το ένα από τα επίπεδα οιονεί αστοχίας σχηματίζει γωνία 11° με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης στα σημεία 3 και 4, ενώ ταυτίζεται με αυτά στα σημεία 5 και 6. Επομένως, τα σημεία ασταθούς διακλάδωσης με συγκέντρωση των παραμορφώσεων ενδέχεται να «προσελκούνται» σε συνδυασμούς $(\alpha_{\sigma'1}, \varphi)$ που αντιστοιχούν σε δυσμενείς κινηματικές συνθήκες παραμόρφωσης, όπως ακριβώς και τα σημεία ασταθούς διακλάδωσης χωρίς συγκέντρωση των παραμορφώσεων. Όπως είναι αναμενόμενο, η ασταθής διακλάδωση χωρίς συγκέντρωση παραμορφώσεων προηγείται εκείνης με συγκέντρωση παραμορφώσεων κατά την εξέλιξη της μονότονης φόρτισης (Desrues and Viggiani 2004, Nicot and Darve 2011, Lü et al. 2018).

Τα μοναδιαία διανύσματα, $d\epsilon$, στο Σχήμα 15b υποδεικνύουν ότι η κύρια κατεύθυνση της προσαυξητικής παραμόρφωσης βρίσκεται μεταξύ των κύριων κατευθύνσεων της τάσης (διάνυσμα σ) και της προσαυξητικής τάσης (διάνυσμα $d\sigma$) υστερώντας πίσω από τη δεύτερη. Σημειώνεται ότι το διάνυσμα $d\sigma$ είναι κάθετο προς το διάνυσμα σ και δεν έχει αναγκαστικά την ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα ds . Η ανάλυση των δεδομένων δείχνει ότι η γωνία μη ομοαξονικότητας, $\zeta = \alpha_{d\epsilon 1}^* - \alpha_{\sigma'1}^*$, φθίνει με την αύξηση της γωνίας διατμητικής αντίστασης, φ , καθώς ο ένας κύκλος στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως διαδέχεται τον άλλον, όμως επηρεάζεται και από την αλλαγή του

προσανατολισμού του σ'_1 -άξονα ως προς την κατακόρυφο μέσα σε κάθε κύκλο· το **Σχήμα 19** που παρουσιάζεται στη συνέχεια συνοψίζει τα χαρακτηριστικά μη ομοαξονικότητας της άμμου στη δοκιμή C3 καθώς και στις άλλες δοκιμές τύπου B και C. Η μη ομοαξονική συμπεριφορά αλλάζει απότομα στο σημείο αστάθειας μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης (σημείο 2) όπου παρατηρείται ο μηδενισμός της γωνίας ξ καθώς η όδευση ακολουθεί την ακτινική κατεύθυνση κατά τη μονότονη ρευστοποίηση ($d\epsilon = \sigma = -d\sigma$), διότι οι τάσεις Y_s και X_s αποφορτίζονται αναλογικά σε αυτήν τη δοκιμή· υπό αυτές τις συνθήκες ελαχιστοποιείται το κανονικοποιημένο έργο δευτέρας τάξεως, d^2W_{norm} (**Πίνακας 1**). Μετά την κορυφαία αστοχία της άμμου η τασική όδευση κινείται πάνω στην επιφάνεια αστοχίας ενώ η άμμος παραμορφώνεται υπό πρακτικά σταθερό αποκλίνοντα λόγο τάσεων, η , σταθερή μέση ενεργό τάση, p' , και σταθερή γωνία μη ομοαξονικότητας, ξ .

Η σταθερή κατάσταση στην οποία εισέρχεται τελικώς η άμμος μετά την αστοχία δεν αντιστοιχεί στην κρίσιμη κατάσταση, καθώς η τιμή e είναι χαμηλότερη της $e_c(p')$, ενώ διακόπτεται από την εκκίνηση ασταθειών συγκεντρωμένης παραμόρφωσης στα σημεία 3 και 5 (**Triantafyllos et al. 2019**). Στα σημεία αυτά η γωνία ξ αυξάνεται απότομα καθώς η κύρια κατεύθυνση προσανυξητικής παραμόρφωσης διακλαδίζεται προς την τιμή $\alpha_{del} = -45^\circ$ ($\alpha_{del}^* = 135^\circ$) που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση τύπου απλής διάτμησης, η οποία συγκεντρώνεται στο κάτω μισό μέρος του δοκιμίου. Μολαταύτα, οι ομοαξονικές συνθήκες παραμόρφωσης αποκαθίστανται στο τέλος των γεγονότων αστάθειας συγκεντρωμένης παραμόρφωσης, δηλαδή στα σημεία 4 και 6 (**Roscoe 1970, Vardoulakis et al. 1978, Zhang and Thornton 2007**). Παρομοίως, τα γεγονότα αστάθειας συγκεντρωμένης παραμόρφωσης αποτυπώνονται και στη μετρούμενη (εξωτερικώς) πίεση του ύδατος πόρων η οποία στο αρχικό στάδιο αυξάνεται απότομα, υποδηλώνοντας την ανάπτυξη πλαστικής συστολής μέσα στη ζώνη συγκεντρωμένων παραμορφώσεων πιθανώς λόγω της έντονης μη ομοαξονικότητας, ενώ στο τελικό στάδιο μειώνεται, επειδή η άμμος παραμορφώνεται προς την κρίσιμη κατάσταση (**Desrues et al. 1996, Vardoulakis and Georgopoulos 2005**).

Τα **Σχήματα 16a και b** δείχνουν την τασική όδευση στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τη δοκιμή C6 χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς με αυτούς στο **Σχήμα 12**. Η τασική όδευση κινείται από την κατάσταση στερεοποίησης (σημείο 1 με $\eta = 0.38$) στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας (σημείο 3 με $\eta = 1.23$) υπό ευσταθείς συνθήκες ενώ οι ενεργές κύριες τάσεις αποφορτίζονται ισότροπα ($d\sigma'_1 = d\sigma'_2 = d\sigma'_3 = -du < 0$), λόγω της ανεξέλεγκτης ανάπτυξης της πίεσης του ύδατος πόρων. Αυτά τα ευρήματα είναι πρωτότυπα διότι, σύμφωνα με σύγχρονα προσομοιώματα καταστρωμένα στα πλαίσια της θεωρίας διακλάδωσης, η κατεύθυνση ισότροπης αποφόρτισης περιλαμβάνεται στο σύνολο των ασταθών κατευθύνσεων της χαλαρής άμμου ακόμα και σε χαμηλές τιμές του αποκλίνοντος λόγου τάσεων, μακριά από την κορυφαία αστοχία (**Darve and Laouafa 2000, Darve et al. 2004, Sibille et al. 2007, Prunier et al. 2009**). Σημειώνεται ότι η αρχική επιφάνεια αστάθειας τανύζεται σε διαφορετικά σημεία είτε εφαπτομενικά (π.χ. στο σημείο 2) είτε υπό μικρή γωνία, ενώ η τασική όδευση κινείται συνεχώς κάτω από την τοπική οριακή επιφάνεια μέχρι να

φτάσει στη γραμμή κορυφαίας αστοχίας, στο σημείο 3. Σε αυτό το σημείο η τιμή της στατικής τάσης q_d είναι μικρότερη από την ελάχιστη αντοχή της άμμου που αντιστοιχεί στην τρέχουσα τιμή της γωνίας $\alpha_{\sigma'1}$ ($= 30.2^\circ$) και ως εκ τούτου δεν προκαλείται μονότονη ρευστοποίηση (Poulos et al. 1985).

Στο σημείο 3 ($\gamma_{oct} = 1.7\%$) η πίεση του ύδατος πόρων αρχίζει να μειώνεται ελαφρώς υποδεικνύοντας ότι συμβαίνει ήπια πλαστική διαστολή η οποία οδηγεί σε χαλάρωση (softening) υπό συνθήκες μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης διότι το τασικό σημείο κινείται υποχρεωτικά στην επιφάνεια κορυφαίας αστοχίας, της οποίας το σχήμα επηρεάζεται από την εγγενή ανισοτροπία της άμμου (βλ. Σχήμα 13 και την αναφορά Symes et al. 1984). Ταυτόχρονα, η τάση q_d αρχίζει να μειώνεται εν μέρει λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται στις μεμβράνες που περιβάλλουν το δοκίμιο και εν μέρει λόγω της απόκρισης της άμμου (διότι το τασικό σημείο οφείλει να παραμείνει πάνω στην τοπική οριακή επιφάνεια που κατέρχεται) και, επομένως, ο έλεγχος του προγράμματος φόρτισης χάνεται. Η απώλεια του ελέγχου του προγράμματος φόρτισης υπό οιονεί στατικές συνθήκες υποδηλώνει την εκκίνηση μίας αστάθειας μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης η οποία αντιστοιχεί σε αυξανόμενες ενεργές κύριες τάσεις ($d\sigma'_1, d\sigma'_2, d\sigma'_3 \geq 0$) και μειούμενο αποκλίνοντα λόγο τάσεων ($d\eta < 0$), χωρίς την πρόκληση μονότονης ρευστοποίησης, επιβεβαιώνοντας για πρώτη φορά με φυσικό πείραμα τις προβλέψεις των προσομοιωμάτων του Darve (Darve and Laouafa 2000, Darve et al. 2004, Sibille et al. 2007, Prunier et al. 2009). Έπειτα, η πίεση του ύδατος πόρων αρχίζει να αυξάνεται ξανά και στο σημείο 4 προκαλείται δυναμική αστάθεια που οδηγεί σε μονότονη ρευστοποίηση.

Στο σημείο 4 η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ είναι 64.4° , η γωνία φ είναι 39.1° και η παραμόρφωση $\gamma_{oct} \approx 6.6\%$ (η ακριβής τιμή του γ_{oct} είναι άγνωστη διότι το όργανο μέτρησης της γωνίας στρέψης βγήκε εκτός ορίων λειτουργίας ακριβώς πριν από το σημείο 4). Από μία φαινομενολογική σκοπιά η μονότονη ρευστοποίηση συνέβη όταν κατά τη στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως η τοπική οριακή επιφάνεια βρέθηκε κάτω από το τασικό σημείο και η ελάχιστη αντοχή της άμμου έγινε μικρότερη από την τρέχουσα τιμή της στατικής διατμητικής τάσης (βλ. Σχήμα 16a). Από μία μικροσκοπική σκοπιά η μονότονη ρευστοποίηση συνέβη όταν ένα από τα επίπεδα οιονεί αστοχίας έγινε οριζόντιο, υποδεικνύοντας ότι οι ασταθείς διακλαδώσεις υπό αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως συμβαίνουν επιλεκτικά σε τασικούς συνδυασμούς που αντιστοιχούν σε δυσμενείς κινηματικές συνθήκες παραμόρφωσης, δηλαδή σε ολίσθηση/διάτμηση πάνω στα επίπεδα διαστρωμάτωσης της άμμου.

Όσον αφορά την παραμόρφωση της άμμου στη δοκιμή C6 πριν την εκκίνηση της αστάθειας παρατηρήθηκαν παρόμοια χαρακτηριστικά μη ομοαξονικότητας όπως αυτά στη δοκιμή C3. Συγκεκριμένα, η γωνία μη ομοαξονικότητας, ζ , μειώνεται με την αύξηση του φ , όμως, μέσα στον κύκλο φόρτισης υπάρχει η περιοχή του $\alpha_{\sigma'1}$ από -45° έως -22.5° , που αντιστοιχεί σε αποφόρτιση της τάσεως $\tau_{z\theta}$, στην οποία το ζ λαμβάνει υψηλές τιμές, που μειώνονται και αυτές με την αύξηση της γωνίας φ . Αυτή η συμπεριφορά διερευνήθηκε περαιτέρω για να εξακριβωθεί εάν σχετίζεται με τη σύζευξη των ελαστικών και πλαστικών χαρακτηριστικών παραμόρφωσης της άμμου

(elastic – plastic coupling) (Tatsuoka and Ishihara 1974, Hueckel 1976, Dafalias 1977). Η άμμος παραμορφώνεται μετά το σημείο 3 σε μία σταθερή κατάσταση που χαρακτηρίζεται από μικρές αλλαγές στον αποκλίνοντα λόγο τάσεων, η , στη μέση ενεργό τάση, p' , και στη γωνία μη ομοαξονικότητας, ξ , η οποία, όμως, διακόπτεται από την εκκίνηση της αστάθειας στο σημείο 4. Το Σχήμα 19 που παρουσιάζεται στη συνέχεια συνοψίζει τα χαρακτηριστικά μη ομοαξονικότητας της άμμου στη δοκιμή C3 καθώς και στις άλλες δοκιμές τύπου B και C.

Η τασική όδευση D1 με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Σχήμα 17 είναι κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιωθεί, πρώτον, ότι η κατεύθυνση τάνυσης της αρχικής επιφάνειας αστάθειας στο $Y - X$ επίπεδο και της τοπικής οριακής επιφάνειας στο $q_d - p'$ επίπεδο επηρεάζει τη συνθήκη αστάθειας της χαλαρής άμμου και, δεύτερον, ότι η αποφόρτιση της μη διαγώνιας συνιστώσας, $\tau_{z\theta}$, του τανυστή τάσεων επηρεάζει τη μη ομοαξονική συμπεριφορά της άμμου σε ένα φαινόμενο ελαστικής – πλαστικής σύζευξης. Η μονότονη στροφή των κύριων αξόνων τάσεως πραγματοποιείται στη δοκιμή D1 με συχνότητα $f = 10^{-3}$ Hz ενώ η μέση ολική τάση, p , διατηρείται πρακτικώς σταθερή, η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , ταλαντώνεται μεταξύ της τιμής 0.40, όταν $\alpha_{\sigma'1} = \pm 90^\circ$, και της τιμής 0.52, όταν $\alpha_{\sigma'1} = 0^\circ$, και οι τάσεις q και q_d μεταβάλλονται περιοδικά με τρόπο που εξασφαλίζει την αποφόρτισή τους όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ μεταβάλλεται από -35° σε 0° ή από 35° σε 90° , δηλαδή στις περιοχές αποφόρτισης της τάσεως $\tau_{z\theta}$. Σημειώνεται ότι οι τάσεις q και q_d απομειώνονται εντόνως όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ μεταβάλλεται από 45° σε 90° , δηλαδή στην περιοχή που συνέβησαν οι αστάθειες στις δοκιμές C3 έως C6 (βλ. Σχήμα 12). Επίσης, παρατηρείται ότι η μικρή μεταβολή του b δεν αναμένεται να μεταβάλλει την τοπική οριακή επιφάνεια της χαλαρής άμμου, ειδικά στην περιοχή «εφελκυσμού» (Lam and Tatsuoka 1988, Shibuya et al. 2003a).

Τα Σχήματα 18a και b δείχνουν την τασική όδευση στο $q_d - p'$ και $Y - X$ επίπεδο, αντιστοίχως, από τη δοκιμή D1 χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς με αυτούς στο Σχήμα 12. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο μερικός έλεγχος της κατεύθυνσης τάνυσης στο $Y - X$ επίπεδο μέσω της ελεγχόμενης αποφόρτισης της αποκλίνουσας τάσεως, q , καθυστερεί την εκκίνηση της ασταθούς μονότονης ρευστοποίησης. Συγκεκριμένα, όταν η αρχική επιφάνεια αστάθειας και η τοπική οριακή επιφάνεια τανύζονται σχεδόν ταυτόχρονα στη γειτονιά του σημείου 1, η κατεύθυνση τάνυσης είναι εφραπτόμενη στην πρώτη επιφάνεια και προσανατολισμένη προς το εσωτερικό της δεύτερης, επομένως, δεν προκαλείται αστάθεια. Έπειτα, η τασική όδευση συνεχίζει να κινείται πάνω στην αρχική επιφάνεια αστάθειας και κάτω από την τοπική οριακή επιφάνεια διότι η ελεγχόμενη αποφόρτιση της τάσης q περιορίζει τον ρυθμό ανάπτυξης της υπερπίεσης του ύδατος πόρων.

Είναι ενδιαφέρον να συγκριθούν τα αποτελέσματα από τις δοκιμές D1 και C3 στις οποίες η τασική όδευση τανύζει την αρχική επιφάνεια αστάθειας περίπου στο ίδιο σημείο στο $Y - X$ επίπεδο. Σε αντίθεση με τη δοκιμή C3, στη δοκιμή D1 η ασταθής μονότονη ρευστοποίηση προκαλείται στο σημείο 2, μακριά από το σημείο 1, όταν ο φθίνων κλάδος της τοπικής οριακής επιφάνειας τανύζεται με φορά προς τα έξω.

Σημειώνεται ότι τα σημεία αστάθειας στις δοκιμές D1 και C3 βρίσκονται κοντά στον $\sigma'_1 - \sigma'_2 - \sigma'_3$ χώρο τάσεων και ότι η όδευση ακολουθεί στα σημεία αυτά την κατεύθυνση ισότροπης αποφόρτισης, όμως οι τιμές της γωνίας α_{ip} είναι διαφορετικές: επίσης, τα σημεία αστάθειας ανήκουν στην ίδια εξελιγμένη επιφάνεια αστάθειας. Η σύγκριση της απόκρισης της άμμου στις δοκιμές D1 και A17 αναδεικνύει την επίδραση της ιστορίας φόρτισης στην παροδική μονότονη ρευστοποίηση: η τιμή των παραμέτρων $(\Delta u / p'_{in})_{pt}$, $U_I = (u_{pt} - u_{ip}) / p'_{in}$ και $\gamma_{oct,pt}$ είναι 0.90, 0.23 και 3.3%, και 0.91, 0.59 και 4.5%, αντιστοίχως, υποδεικνύοντας ότι το δοκίμιο D1, με $e = 0.738$ και $\alpha_{ip} = -85.5^\circ$, συμπεριφέρεται λιγότερο συστολικά από το δοκίμιο A17, με $e = 0.727$ και $\alpha_{ip} = 79.1^\circ$, κατά την παροδική μονότονη ρευστοποίηση λόγω της διαφορετικής ιστορίας τάσεων – παραμορφώσεων.

Η παραμόρφωση της άμμου στη δοκιμή D1 είναι μη ομοαξονική με χαρακτηριστικά παρόμοια εκείνων της άμμου στις δοκιμές C3 και C6 (βλ. **Σχήμα 19b** στη συνέχεια). Η γωνία ζ μειώνεται, εν γένει, με τη γωνία φ , μηδενίζεται απότομα στο σημείο αστάθειας (σημείο 2) και γίνεται αναπάντεχα μικρή στο σημείο 1, διότι η ολίσθηση πάνω στο οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης που είχε ενεργοποιηθεί προγενέστερα εμμένει. Η διαφορά της απόκρισης της άμμου στη δοκιμή D1 σε σύγκριση με τις δοκιμές C3 και C6 έγκειται στο γεγονός ότι η γωνία ζ είναι ιδιαίτερα υψηλή και στις δύο περιοχές αποφόρτισης της τάσης $\tau_{z\theta}$, δηλαδή όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ μεταβάλλεται από -35° σε 0° ή από 45° σε 90° . Δεδομένου ότι η αποφόρτιση της αποκλίνουσας τάσης, q , οδηγεί στη μείωση του αποκλίνοντος λόγου τάσεων, η , μολονότι η πίεση του ύδατος πόρων, u , αυξάνεται, τα ελαστικά χαρακτηριστικά της άμμου είναι περισσότερο τονισμένα στις φάσεις ταυτόχρονης αποφόρτισης των τάσεων q και $\tau_{z\theta}$. Καθώς ο αριθμός των κύκλων φόρτισης αυξάνεται ο $\tau_{z\theta} - \gamma_{z\theta}$ βρόχος υστέρησης επιδεικνύει μειούμενα μέτρα αποφόρτισης, πιθανώς λόγω των πλαστικών μεταβολών στην εσωτερική δομή που επήλθαν κατά τη φόρτιση, υποδεικνύοντας ότι η εξάρτηση της γωνίας ζ από τη γωνία φ στις φάσεις αποφόρτισης είναι ένα φαινόμενο σύζευξης των ελαστικών και πλαστικών χαρακτηριστικών παραμόρφωσης της άμμου.

Τα **Σχήματα 19a και b** δείχνουν τη σχέση μεταξύ των γωνιών ζ και φ υπό ευσταθείς συνθήκες στις δοκιμές τύπου C (C1 έως C6) και B, αντιστοίχως, ενώ στο δεύτερο σχήμα συμπεριλαμβάνονται και τα αποτελέσματα από τη δοκιμή D1. Η άμμος στις δοκιμές τύπου C στερεοποιήθηκε ανισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_c = 200$ kPa και σε λόγο τάσεων με εύρος $K_c = 0.48 - 0.75$, και τα χαλαρά δοκίμια ($e = 0.704 - 0.731$) υποβλήθηκαν σε στροφή των κύριων αξόνων τάσεως διατηρώντας την αποκλίνουσα τάση, q , σταθερή. Σε αυτές τις δοκιμές η γωνία του διανύσματος $d\sigma$ με το διάνυσμα σ στον $Y_s - X_s$ χώρο (βλ. **Σχήμα 8a**) παραμένει σταθερή στις 90° όσο διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Η άμμος στις δοκιμές B1, B2 και B3 στερεοποιήθηκε ανισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_c = 200$ kPa και σε λόγους τάσεων $K_c = 0.80, 0.50$ και 0.40 , αντιστοίχως, ενώ στη δοκιμή B7 η άμμος στερεοποιήθηκε σε τάση $p'_c = 100$ kPa και σε λόγο τάσεων $K_c = 0.40$. Τα χαλαρά δοκίμια ($e = 0.711 - 0.728$) υποβλήθηκαν σε στροφή των κύριων αξόνων τάσεως διατηρώντας την κατεύθυνση του διανύσματος $d\sigma$ σταθερή στις $\alpha_{d\sigma'1} = +45^\circ$ και αυξάνοντας μονότονα την αποκλίνουσα τάση, q . Στις

δοκιμές τύπου B η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων $d\sigma$ και σ μειώνεται ξεκινώντας από την τιμή 90° .

Δύο διακριτές καμπύλες, οι οποίες επισημαίνονται με το γράμμα L ή U, απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ του ξ και του φ στις δοκιμές τύπου C, ανεξαρτήτως της τιμής του K_c (με εξαίρεση την τιμή $K_c = 0.48$, στη δοκιμή C1, που θα συζητηθεί στη συνέχεια), του e και του αριθμού των προηγούμενων κύκλων φόρτισης. Η L-καμπύλη, που αντιστοιχεί σε τασικές καταστάσεις με το $\alpha_{\sigma'1}$ εκτός της περιοχής ($-45^\circ, -22.5^\circ$), δείχνει ότι η γωνία ξ μειώνεται μη γραμμικά με τη γωνία φ και τείνει να γίνει σταθερή για $\varphi \geq 35^\circ$, δηλαδή όταν η άμμος αστοχεί. Η σταθεροποίηση του ξ με το φ σχετίζεται με την επίτευξη της σταθερής κατάστασης χωρίς τάση για μεταβολή του όγκου, όπως παρατηρήθηκε στη δοκιμή C3, ή με τάση για ήπια πλαστική διαστολή, όπως παρατηρήθηκε στις δοκιμές C1 και C6· μολαταύτα, η σταθερή κατάσταση διακόπτεται από την εκκίνηση ασταθειών μη συγκεντρωμένης ή συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Σημειώνεται ότι προσομοιώσεις της στροφής των κύριων αξόνων τάσεως υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και σταθερές ενεργές κύριες τιμές τάσεως με χρήση της μεθόδου διακριτών στοιχείων έχουν δείξει ότι τα κοκκώδη υλικά εισέρχονται τελικώς σε σταθερή κατάσταση με παρόμοια χαρακτηριστικά (Tong et al. 2014, Li et al. 2016, Theocharis et al. 2019). Αντίθετα, η U-καμπύλη, που αντιστοιχεί σε τασικές καταστάσεις με το $\alpha_{\sigma'1}$ εντός της περιοχής ($-45^\circ, -22.5^\circ$), δείχνει ότι το ξ μειώνεται μη γραμμικά με το φ χωρίς σημάδια σταθεροποίησης, ενώ λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από αυτές που αντιστοιχούν στην L-καμπύλη για $\varphi \leq 25^\circ$. Παρόμοια αποτελέσματα από δοκιμές στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως διατηρώντας σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεων έχουν αναφερθεί από τους Tong et al. (2010).

Το Σχήμα 19b δείχνει ότι η σχέση μεταξύ του ξ και του φ στη δοκιμή D1 περιγράφεται από τις ίδιες καμπύλες (L και U) με αυτές στις δοκιμές τύπου C, με μόνη διαφορά το ότι η γωνία ξ είναι ιδιαίτερα υψηλή και στις δύο περιοχές αποφόρτισης της τάσης $\tau_{z\theta}$. Αντιθέτως, στις δοκιμές τύπου B διαφορετικές καμπύλες περιγράφουν τη σχέση του ξ με το φ πριν την κορυφαία αστοχία, με τη γωνία ξ να αυξάνεται για δεδομένη τιμή του φ (ή του η) όταν ο λόγος K_c μειώνεται· μολαταύτα, η εξελισσόμενη τιμή της γωνίας $\alpha_{\sigma'1}$ που αναγράφεται στις ετικέτες πρέπει και αυτή να ληφθεί υπόψη. Η τιμή της μέσης τάσης p'_c στις δοκιμές B3 (200 kPa) και B7 (100 kPa) με $K_c = 0.40$ και $e = 0.727 - 0.728$ φαίνεται να μην επηρεάζει την τιμή του ξ πριν την αστοχία. Μετά την αστοχία η τιμή του p'_c έχει μεγαλύτερη επίδραση στη γωνία φ από ότι στη γωνία ξ , ενώ η τιμή του K_c έχει μικρή επίδραση στη γωνία ξ , με τα σημεία (φ, ξ) να βρίσκονται κοντά στην L-καμπύλη που ορίστηκε στις δοκιμές τύπου C. Μολαταύτα, η σταθερή κατάσταση δεν επιτυγχάνεται μετά την αστοχία στις δοκιμές τύπου B διότι συμβαίνει έντονη πλαστική διαστολή και το ξ μειώνεται, ενώ ο ρυθμός στροφής των κύριων αξόνων τάσεως μειώνεται και αυτός, καθώς η κύρια κατεύθυνση τάσεως $\alpha_{\sigma'1} = +45^\circ$ προσεγγίζεται με σταθερή κατεύθυνση προσανυξητικής τάσεως $\alpha_{d\sigma'1} = +45^\circ$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η γωνία ξ πριν την κορυφαία αστοχία στις δοκιμές B3 και B7 είναι μεγαλύτερη από αυτήν που παρατηρείται στη δοκιμή C6 για παρόμοια τιμή των γωνιών φ και $\alpha_{\sigma'1}$, παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός στροφής των κύριων αξόνων τάσεως

είναι μικρότερος στις πρώτες δοκιμές (βλ. τα σημεία σύγκρισης P, P1 και P2). Στις δοκιμές B3 και B7 ο λόγος τάσεων στερεοποίησης K_c είναι 0.40 ενώ στη δοκιμή C6 είναι 0.64. Επιπροσθέτως, η σύγκριση μεταξύ των τιμών του ζ αφορά καταστάσεις στροφής των κύριων αξόνων τάσεως που έπονται της ανισότροπης στερεοποίησης με $\alpha_{\sigma\gamma} = 0^\circ$ στην περίπτωση των δοκιμών B3 και B7, ενώ στην περίπτωση της δοκιμής C6 έχει ήδη προηγηθεί ένας κύκλος φόρτισης. Αντιθέτως, στη δοκιμή C1 με $K_c = 0.48$ η τιμή του ζ στην αρχική φάση φόρτισης μετά την ανισότροπη στερεοποίηση είναι υψηλότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην L-καμπύλη και υψηλότερη από τις τιμές που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές B3 και B7. Σημειώνεται, επίσης, ότι η διατμητική παραμόρφωση, ε_q , που αναπτύσσεται στη φάση της ανισότροπης στερεοποίησης μειώνεται στις δοκιμές B3, B7, C1 και C6 κατά τη σειρά αναγραφής και ότι η ανισότροπη στερεοποίηση περιλαμβάνει μία φάση προ-διάτμησης κατά την οποία ο λόγος η αυξάνεται υπό σταθερή τάση p' .

Τα δεδομένα από τις δοκιμές B3, B7, C1 και C6 υποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά της άμμου γίνεται εντόνως μη ομοαξονική όταν οι κύριοι άξονες τάσεως στραφούν ύστερα από μία διαδικασία διάτμησης και παραμόρφωσης με σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως. Υποδεικνύουν, επίσης, ότι ο ρυθμός στροφής των κύριων αξόνων τάσεως έχει τότε δευτερεύουσα επίδραση στη μη ομοαξονικότητα της άμμου σε σύγκριση με την ένταση της προ-διάτμησης. Επομένως, η πλαστική συστολή λόγω της έντονης μη ομοαξονικότητας σε αυτήν την περίπτωση ενδέχεται να δρα ως αποσταθεροποιητικός παράγοντας και να συσχετίζεται με την τρωτότητα των ανισότροπα στερεοποιημένων άμμων έναντι ρευστοποίησης όταν η στατική διατμητική τάση είναι υψηλή (βλ. **Σχήμα 10**). Συγκεκριμένα, μία μικρή τασική διαταραχή η οποία περιλαμβάνει στροφή των κύριων αξόνων τάσεως (π.χ. η αλλαγή της γεωμετρίας μίας πλαγιάς στο πεδίο) προκαλεί έντονη μη ομοαξονικότητα και πλαστική συστολή που οδηγεί στην αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης με τρόπο ανάλογο ως προς αυτόν που περιγράφηκε από τον καθηγητή Βαρδουλάκη (**Vardoulakis et al. 1978, Vardoulakis and Graf 1985, Vardoulakis and Georgopoulos 2005**) για την περίπτωση της αστάθειας συγκεντρωμένης παραμόρφωσης.

Πειραματικά αποτελέσματα, μέρος III: Πρέπει η Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης να αναθεωρηθεί ώστε να περιλαμβάνει την επίδραση της εσωτερικής δομής;

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της εσωτερικής δομής της άμμου στην κρίσιμη κατάσταση παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως (ακτινική φόρτιση). Η μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση τερματίστηκε στις διάφορες δοκιμές σε τασικές καταστάσεις μετά την κορυφαία αστοχία και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην κρίσιμη κατάσταση. Έπειτα, οι συνθήκες στράγγισης άλλαξαν με σπουδή ώστε να μην προκληθεί μεταβολή στις ενεργές τάσεις τη στιγμή της αλλαγής και να εξασφαλιστεί στην επόμενη φάση στροφής των κύριων αξόνων (KA) τάσεως ο έλεγχος των ενεργών κύριων τιμών (KT) τάσεως και η ελεύθερη στράγγιση του δοκιμίου. Η στροφή των KA τάσεως εκτελέστηκε διατηρώντας σταθερές τις ενεργές KT τάσεως σύμφωνα με το «πείραμα σκέψης» του καθηγητή Δαφαλιά (**Dafalias 2016**). Εκτελέστηκε, επίσης,

στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές ενεργές ΚΤ τάσεως μετά την ανισότροπη στερεοποίηση της άμμου, χωρίς να προηγηθεί φόρτιση.

Τα **Σχήματα 20a και b** δείχνουν την όδευση τάσεων και παραμορφώσεων, αντιστοίχως, από τη δοκιμή PAR1 στο εκτροπικό επίπεδο τάσεων και παραμορφώσεων, αντιστοίχως. Το δοκίμιο σε αυτήν τη δοκιμή στερεοποιήθηκε ανισότροπα σε $\eta = 1.01$ ($K_c = 0.40$) και $p'_c = 100$ kPa και υποβλήθηκε σε έναν πλήρη κύκλο στροφής των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές τιμές $p' = 100$ kPa, $\eta = 1.01$ και $b = 0$, χωρίς να προηγηθεί φόρτιση. Το **Σχήμα 20a** δείχνει ότι η παραμόρφωση της άμμου είναι εντόνως μη ομοαξονική αφού η κύρια κατεύθυνση της προσανξητικής παραμόρφωσης (διάνυσμα $d\varepsilon$) βρίσκεται μεταξύ των κύριων κατευθύνσεων της τάσης (διάνυσμα σ) και της προσανξητικής τάσης (διάνυσμα $d\sigma$) υστερώντας πίσω από τη δεύτερη. Η όδευση παραμορφώσεως στο **Σχήμα 20b** υποδεικνύει ότι η πλαστική παραμορφωσιμότητα της άμμου επηρεάζεται έντονα από την εγγενή και εξελισσόμενη ανισοτροπία της εσωτερικής δομής: Το θετικό και αρνητικό μέγιστο του X_e είναι 0.08% και -1.06%, αντιστοίχως, με το αρνητικό μέγιστο να αναπτύσσεται όταν $\alpha^*_{d\varepsilon l} = 135^\circ$, ενώ το θετικό και αρνητικό μέγιστο του Y_e είναι 0.93% και -1.14%, αντιστοίχως. Η επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας υποδηλώνεται από το γεγονός ότι το ακτινικό διάνυσμα στο τέλος του κύκλου φόρτισης (το οποίο δείχνει την παραμένουσα παραμόρφωση) έχει προσανατολισμό $\alpha^*_{d\varepsilon l} = 135^\circ$ και το κέντρο της ανοικτής ελλειπτικής τροχιάς παραμορφώσεων βρίσκεται σε θέση με $X_e < 0$.

Το **Σχήμα 21a** δείχνει την εξέλιξη των μεγεθών ε_{vol} , σ'_1 , σ'_2 και σ'_3 με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$ ενώ το **Σχήμα 21b** δείχνει την εξέλιξη των γωνιών $\alpha^*_{d\varepsilon l}$ και $\alpha^*_{d\sigma'1}$ με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$. Οι διακεκομμένες γραμμές στο **Σχήμα 21b** αντιστοιχούν στη συνθήκη ομοαξονικής παραμόρφωσης, $\alpha^*_{d\varepsilon l} = \alpha^*_{\sigma'1}$, και οι ετικέτες N απαριθμούν το πλήθος των ολοκληρωμένων κύκλων στροφής των ΚΑ τάσεως. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 21a**, κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου στροφής των ΚΑ τάσεως συσσωρεύεται προοδευτικά συστολική ογκομετρική παραμόρφωση παρά το γεγονός ότι οι ενεργές ΚΤ τάσεως διατηρούνται πρακτικώς σταθερές. Η κλίση $d\varepsilon_{vol} / d\alpha^*_{\sigma'1}$ είναι πολύ μικρή όταν η γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$ αυξάνεται από 0° σε 22.5° , έπειτα αυξάνεται και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν $\alpha^*_{\sigma'1} = 114^\circ$ ($\alpha_{\sigma'1} = -66^\circ$), όπως υποδεικνύεται με τη διακεκομμένη εφαπτόμενη γραμμή, και τελικά μειώνεται μετά από αυτό το σημείο. Το **Σχήμα 21b** δείχνει ότι η γωνία μη ομοαξονικότητας, $\zeta = \alpha^*_{d\varepsilon l} - \alpha^*_{\sigma'1}$, μεταβάλλεται μέσα στον κύκλο φόρτισης, όντας περίπου ίση με 11.5° όταν $\alpha^*_{\sigma'1} = 33.5^\circ$ ($\alpha^*_{d\varepsilon l} = 45^\circ$), δηλαδή όταν η παραμόρφωση του δοκιμίου αντιστοιχεί σε οιονεί απλή διάτμηση ($d\varepsilon_{zz} = 0$, $d\varepsilon_{\theta\theta} = d\varepsilon_{rr} \rightarrow 0^+$, $d\varepsilon_{z\theta} \neq 0$), και μειώνεται ραγδαία καθώς η γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$ αυξάνεται από 33.5° σε 45° διότι ο μηχανισμός ολίσθησης στα επίπεδα διαστρωμάτωσης εμμένει. Η μέγιστη γωνία $\zeta = 21^\circ$ παρατηρείται για $\alpha^*_{\sigma'1} = 114^\circ$ ($\alpha_{d\varepsilon l} = 135^\circ$) όταν ο ρυθμός $d\varepsilon_{vol} / d\alpha^*_{\sigma'1}$ γίνεται ταυτόχρονα μέγιστος και το δοκίμιο παραμορφώνεται σε οιονεί απλή διάτμηση. Παρατηρείται, επίσης, ότι η γωνία ζ αυξάνεται όταν η τάση $\tau_{z\theta}$ αποφορτίζεται.

Το **Σχήμα 22** δείχνει τα αποτελέσματα από τη δοκιμή PAR3: Το **Σχήμα 22a** δείχνει την τασική όδευση στο $q - p'$ επίπεδο, το **Σχήμα 22b** δείχνει την εξέλιξη των μεγεθών η , ε_{vol} (αριστερός κατακόρυφος άξονας) και $\Delta u / p'_{in}$ (δεξιός κατακόρυφος άξονας) με την

παραμόρφωση ε_q , το **Σχήμα 22c** δείχνει την τασική όδευση στο $Y_s - X_s$ επίπεδο και το **Σχήμα 22d** δείχνει την όδευση παραμορφώσεως στο $Y_e - X_e$ επίπεδο. Το δοκίμιο σε αυτήν τη δοκιμή στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_c = 100$ kPa και υποβλήθηκε σε μονοτονική αστράγγιστη ακτινική φόρτιση με $b = 0.5$ και $\alpha_{\sigma'1} = 15^\circ$. Η μονοτονική ακτινική φόρτιση τερματίστηκε στην τασική κατάσταση μετά την κορυφαία αστοχία με $p' = 343$ kPa, $\eta = 1.05$ και $\varepsilon_q = 7.6\%$, ενώ η άμμος διαστελλόταν πλαστικά υπό ομοαξονικές συνθήκες παραμόρφωσης και χωρίς εμφανή στον γυμνό οφθαλμό σημάδια συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, εκτελέστηκε στροφή των ΚΑ τάσεως υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και διατηρώντας σταθερές τις ενεργές ΚΤ τάσεως. Το **Σχήμα 23a** δείχνει την εξέλιξη των μεγεθών ε_{vol} , σ'_1 , σ'_2 και σ'_3 με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$ κατά τη φάση της στροφής των ΚΑ τάσεως, ενώ το **Σχήμα 23b** δείχνει την εξέλιξη των γωνιών $\alpha^*_{\delta\sigma'1}$ και $\alpha^*_{d\sigma'1}$ με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$ κατά τη διάρκεια και των δύο φάσεων.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 22** και **23** υποδεικνύουν ότι η παραμόρφωση της άμμου κατά την ακτινική φόρτιση είναι αρχικά μη ομοαξονική όμως γίνεται σταδιακά ομοαξονική στη φάση της πλαστικής διαστολής και χαλάρωσης μετά την κορυφαία αστοχία. Έπειτα, η παραμόρφωση γίνεται ακαριαία μη ομοαξονική και η άμμος αρχίζει να συστέλλεται πλαστικά ακριβώς τη στιγμή που αρχίζει η στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές τις ενεργές ΚΤ τάσεως. Οι τιμές των μεγεθών $d\varepsilon_{vol} / d\varepsilon_q$ και ζ τη στιγμή εκείνη είναι 0.47 και 27.8° , αντιστοίχως, καθώς όμως η γωνία $\alpha_{\sigma'1}$ μεταβάλλεται από 15.0° σε 42.3° ο λόγος $d\varepsilon_{vol} / d\alpha_{\sigma'1}$ παραμένει πρακτικά σταθερός ενώ η γωνία ζ μειώνεται ραγδαία. Η ανάλυση των δεδομένων υποδεικνύει ότι η άμμος στη δοκιμή PAR3 βρίσκεται κοντά στην κρίσιμη κατάσταση όταν εκκινείται η στροφή των κύριων αξόνων τάσεως και, παρά το γεγονός ότι προηγουμένως παρατηρείται πλαστική διαστολή υπό ομοαξονικές συνθήκες παραμόρφωσης, τη στιγμή εκκίνησης η συμπεριφορά της άμμου γίνεται ακαριαία συστολική και εντόνως μη ομοαξονική.

Το **Σχήμα 24** παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τις δοκιμές PAR2 και PAR4 μαζί με αυτά από τη δοκιμή PAR3. Συγκεκριμένα, το **Σχήμα 24a** δείχνει την εξέλιξη των μεγεθών η (αριστερός κατακόρυφος άξονας) και ε_{vol} (δεξιός κατακόρυφος άξονας) με την παραμόρφωση ε_q , το **Σχήμα 24b** δείχνει την εξέλιξη των μεγεθών ε_{vol} (αριστερός κατακόρυφος άξονας) και ζ (δεξιός κατακόρυφος άξονας) με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}$, το **Σχήμα 24c** δείχνει τις οδεύσεις παραμόρφωσης στο $Y_e - X_e$ επίπεδο και το **Σχήμα 24d** δείχνει την εξέλιξη του συνδυασμού (p', e) στο καταστατικό επίπεδο μαζί με τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης, η οποία θεωρείται μοναδική ανεξαρτήτως του τύπου φόρτισης (Li and Dafalias 2012, Salvatore et al. 2017, Zhou et al. 2017). Στις δοκιμές PAR2-4 η άμμος στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_c = 100$ kPa ή 200 kPa, έπειτα υποβλήθηκε σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με $b = 0.5$ και $\alpha_{\sigma'1} = 15^\circ$ και ύστερα σε στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές τις ενεργές ΚΤ τάσεως, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Το **Σχήμα 24b** δείχνει μόνο τα αποτελέσματα από τη φάση στροφής των ΚΑ τάσεως, ενώ τα υπόλοιπα σχήματα και από τις δύο φάσεις. Οι συνθήκες κατά την εκκίνηση της στροφής των ΚΑ τάσεως στις δοκιμές τύπου PAR παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5**. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στη δοκιμή PAR4 η εκκίνηση της στροφής

των ΚΑ τάσεως έγινε σε μικρότερη διατμητική παραμόρφωση, ε_q , από ότι στη δοκιμή PAR3, ενώ στη δοκιμή PAR2 έγινε σε μεγαλύτερη. Επίσης, σημειώνεται ότι στη δοκιμή PAR2 υπήρχαν εμφανείς ζώνες συγκεντρωμένης παραμόρφωσης στο δοκίμιο όταν ξεκίνησε η στροφή των ΚΑ τάσεως.

Τα αποτελέσματα στο **Σχήμα 24** δείχνουν καθαρά ότι η άμμος επιδεικνύει έντονη μη ομοαξονικότητα και πλαστική συστολή όταν η μονοτονική φόρτιση με σταθερούς ΚΑ τάσεως διακοπεί στη φάση της χαλάρωσης από μία συνεχή στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές ενεργές ΚΤ τάσεως. Μάλιστα, η ένταση της μη ομοαξονικότητας και της συσχετισμένης πλαστικής συστολής γίνεται μεγαλύτερη όταν η προηγούμενη διατμητική διαδικασία (προδιάτμηση) είναι εντονότερη σε όρους συσσώρευσης διατμητικής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, κατά την εκκίνηση της στροφής των ΚΑ τάσεως στις δοκιμές PAR4, PAR3 και PAR2 η διατμητική παραμόρφωση, ε_q , είναι 4.7%, 7.6% και 12.4%, αντιστοίχως, η γωνία ζ είναι 25.9°, 27.8° και 32.5°, αντιστοίχως, και ο λόγος $d\varepsilon_{vol} / d\varepsilon_q$ είναι 0.10, 0.47 και 0.97, αντιστοίχως. Καθώς, όμως, η στροφή των ΚΑ τάσεως συνεχίζεται η γωνία μη ομοαξονικότητας, ζ , φθίνει ραγδαίως και η εξέλιξη του ζ με το $\sigma_{\sigma 1}$ γίνεται κοινή στις τρεις δοκιμές ανεξάρτητα από την ιστορία φόρτισης, ενώ ο λόγος διαστολικότητας, $d\varepsilon_{vol} / d\varepsilon_q$, παραμένει διαφορετικός. Το «πείραμα σκέψης» του καθηγητή Δαφαλιά (**Dafalias 2016**) είναι η οριακή περίπτωση της ακολουθίας των πειραμάτων που παρουσιάζονται εδώ και δεδομένου ότι τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά μη ομοαξονικότητας και πλαστικής συστολής γίνονται σταδιακά εντονότερα καθώς προσεγγίζεται η κρίσιμη κατάσταση συνάγεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επαληθεύουν τον ισχυρισμό ότι η Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης που προτάθηκε από τους **Li and Dafalias (2012)** αποτελεί μία αναγκαία αναθεώρηση της κλασσικής Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πρωτότυπα διότι υποδεικνύουν ότι η επίδραση της προδιάτμησης στην ένταση της μη ομοαξονικότητας και πλαστικής συστολής κατά τη μεταγενέστερη στροφή των ΚΑ τάσεως είναι σημαντικότερη από την επίδραση των παραμέτρων η , p' , b και e . Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους **Tong et al. (2010)**, το μέγεθος της συστολικής ογκομετρικής παραμόρφωσης, ε_{vol} , που συσσωρεύεται κατά τη στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές ενεργές ΚΤ τάσεως αυξάνεται όταν κάθε μία από τις παραμέτρους η , p' , b και e αυξάνεται. Μολαταύτα, η άμμος στη δοκιμή PAR4 συστέλλεται λιγότερο από ότι η άμμος στη δοκιμή PAR3 παρόλο που η τιμή των παραμέτρων η και p' είναι μεγαλύτερη στην πρώτη δοκιμή, ενώ η τιμή των παραμέτρων b και e είναι πρακτικά η ίδια (βλ. **Πίνακα 5**).

Επίσης, σύμφωνα με τους **Miura et al. (1986)**, **Gutierrez et al. (1991)**, **Li and Yu (2010)** και **Tong et al. (2010, 2014)** το μέγεθος της γωνίας μη ομοαξονικότητας, ζ , μειώνεται όταν η στροφή των ΚΑ τάσεως εκτελείται σε μεγαλύτερο η , σε μεγαλύτερο b και σε μεγαλύτερο e . Μολαταύτα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 25** το οποίο απεικονίζει την εξέλιξη του ζ με το $\sigma_{\sigma 1}^*$ στις δοκιμές PAR1-4, η γωνία ζ στη δοκιμή PAR4 είναι μεγαλύτερη από αυτήν στη δοκιμή PAR1 παρόλο που στην πρώτη δοκιμή η τιμή των

παραμέτρων η , b και e είναι μεγαλύτερη. Το παρατηρούμενο φαινόμενο μετά την αλλαγή της κατεύθυνσης των ΚΑ τάσεως είναι, όμως, παροδικό και η δέσμη των σημείων από τις δοκιμές PAR2-4 φαίνεται να κινείται προς τα σημεία από τη δοκιμή PAR1 καθώς η στροφή των ΚΑ τάσεως εξελίσσεται. Τέλος, τονίζεται ότι το παροδικό αυτό φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση που η προδιάτμηση επιβάλλεται κατά την ανισότροπη στερεοποίηση της άμμου με υψηλή στατική διατμητική τάση, όπως εδείχθη στις δοκιμές αστράγγιστης φόρτισης τύπου Β και C (βλ. Σχήμα 19b). Η πρωτοτυπία σε αυτήν την περίπτωση έγκειται στο γεγονός ότι η επίδραση της προδιάτμησης στην ένταση της μη ομοαξονικότητας είναι σημαντικότερη από την επίδραση του ρυθμού στροφής των κύριων αξόνων τάσεως που έχει επισημανθεί από τους **Gutierrez et al. (1991)**.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά της άμμου M31 υπό συνθήκες τριαξονικής και γενικευμένης φόρτισης. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση της ανισοτροπίας της άμμου στη μονότονη ρευστοποίηση, στη γενικευμένη αστοχία και στην κρίσιμη κατάσταση. Τα δοκίμια της άμμου παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό και στερεοποιήθηκαν σε μεγάλο εύρος τάσεων $p'_c = (\sigma'_{1c} + \sigma'_{2c} + \sigma'_{3c}) / 3$ και λόγου τάσεων $K_c = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$. Η μονοτονική ή ανακυκλική φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με σταθερούς ή στρεφόμενους κύριους άξονες (ΚΑ) τάσεως και με δύο διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$. Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου και σε δύο συσκευές τριαξονικής φόρτισης του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Όλες οι συσκευές τροποποιήθηκαν ή αναβαθμίστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών κρίσιμης κατάστασης της άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής συμπίεσης υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια άμμου στερεοποιημένα ισότροπα σε μέση ενεργό τάση, p'_c , από 100 kPa έως 6000 kPa. Προσδιορίστηκε μία μοναδική γραμμή κρίσιμης κατάστασης στον $p' - e - q$ χώρο, ανεξάρτητη των αρχικών συνθηκών και του τύπου της όδευσης φόρτισης (στραγγιζόμενη ή αστράγγιστη). Η συμπεριφορά της άμμου καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης μέχρι την κρίσιμη κατάσταση μπορεί να συσχετιστεί με την εξέλιξη της καταστατικής παραμέτρου, ψ , των **Been and Jefferies (1985)**. Για παράδειγμα, ο αποκλίνων λόγος τάσεων, η , στο σημείο αλλαγής φάσης αυξάνεται ενώ ο αποκλίνων λόγος τάσεων, η , και η απόλυτος τιμή του λόγου διαστολικότητας, D , στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας μειώνονται όταν η καταστατική παράμετρος, ψ , γίνεται λιγότερο αρνητική. Επίσης, η σχέση λόγου τάσεων – διαστολικότητας, $\eta - D$, είναι διαφορετική για χαλαρή και πυκνή άμμο.

Για τη μελέτη της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς της άμμου παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα (άμμος IC) σε μέση ενεργό τάση, $p'_c = 200$ kPa (ή 100 kPa ή 300 kPa). Έπειτα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική

αστράγγιστη φόρτιση με σταθερή μέση ολική τάση, p , και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = 0.5$, διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μεγάλης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία $\alpha_{\sigma'_1}$ (ή α) (ακτινική φόρτιση). Δοκιμές εκτελέστηκαν για τιμές της γωνίας $\alpha_{\sigma'_1}$ από 0° έως 90° . Η χαλαρή άμμος επέδειξε τυπική συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης (limited flow deformation) με πτώση της αντοχής, q , μετά από το σημείο παροδικού μεγίστου, λόγω της αύξησης της πίεσης του ύδατος πόρων, και ανάκτηση της αντοχής μετά από το σημείο αλλαγής φάσης. Στη φάση της παροδικής μονότονης ρευστοποίησης η απόκριση του συστήματος δοκίμιο – συσκευή φόρτισης γίνεται ασταθής λόγω των επιλεγμένων παραμέτρων ελέγχου, ενώ το δοκίμιο δεν εμφανίζει σημάδια συγκεντρωμένης παραμόρφωσης.

Η συμπεριφορά της άμμου στις δοκιμές ακτινικής φόρτισης (δοκιμές τύπου A) γίνεται, εν γένει, περισσότερο συστολική όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή, q , στο σημείο παροδικού μεγίστου και στο σημείο αλλαγής φάσης να μειώνεται με τη γωνία $\alpha_{\sigma'_1}$. Επίσης, η κανονικοποιημένη υπερπίεση του ύδατος πόρων, $\Delta u / p'_{in}$, και η οκταεδρική διατμητική παραμόρφωση, γ_{oct} , στο σημείο αλλαγής φάσης αυξάνονται όταν αυξάνεται η γωνία α . Στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας η τιμή του λόγου τάσεων, $\sin \varphi$, μειώνεται, εν γένει, με την αύξηση της γωνίας $\alpha_{\sigma'_1}$. Μολαταύτα, η περισσότερο ασθενής απόκριση παρατηρείται όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'_1}$ λαμβάνει τιμές μεταξύ 60° και 75° , διότι τότε ένα από τα επίπεδα οιονεί αστοχίας (maximum stress obliquity planes) τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης. Επομένως, η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου στο σημείο παροδικού μεγίστου αντοχής, στο σημείο αλλαγής φάσης και στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας.

Τα σημεία παροδικού μεγίστου στις δοκιμές ακτινικής φόρτισης ταυτίζονται πρακτικά με τα σημεία στα οποία προκαλείται η αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης και εκκινείται η φάση της μονότονης ρευστοποίησης. Τα σημεία αυτά ορίζουν στο $Y-X$ εκτροπικό επίπεδο τάσεων την Επιφάνεια Αστάθειας (IS) η οποία αποτελεί τη γενίκευση της Γραμμής Αστάθειας του Lade (Lade 1993) αφού υποδεικνύει τους συνδυασμούς $(\alpha_{\sigma'_1}, \varphi)$ στους οποίους προκαλείται η αστάθεια υπό συνθήκες γενικευμένης ακτινικής φόρτισης. Παρατηρήθηκε ότι η αστάθεια προκαλείται σε μικρότερο λόγο τάσεων $\sin \varphi$ όταν η γωνία $\alpha_{\sigma'_1}$ γίνεται μεγαλύτερη. Παρομοίως, μία δεδομένη τιμή της παραμόρφωσης, γ_{oct} , ή της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του ύδατος πόρων, $\Delta u / p'_{in}$, στη συστολική φάση απόκρισης αναπτύσσεται σε μικρότερο λόγο τάσεων $\sin \varphi$ όταν η γωνία α γίνεται μεγαλύτερη. Τα δεδομένα αυτά υποδεικνύουν ότι η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει την παραμορφωσιμότητα και τη συνθήκη ρευστοποίησης της άμμου.

Για τη μελέτη της επίδρασης της ιστορίας στερεοποίησης και φόρτισης στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά της άμμου παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό, τα οποία στερεοποιήθηκαν ανισότροπα (άμμος AC) σε μέση ενεργό τάση, $p'_c = 200$ kPa (ή 100 kPa), και σε διάφορους λόγους τάσεων

στερεοποίησης, K_c ($= 0.40 - 0.80$). Στη δεύτερη φάση στερεοποίησης μεταβλήθηκε η τιμή της παραμέτρου b από 0 σε 0.5 και της τάσεως p' από p'_c σε p'_{in} ($> p'_c$) και στη συνέχεια επιβλήθηκε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των ΚΑ τάσεως και σταθερές p και b ($= 0.5$) παραμέτρους. Στις αστράγγιστες δοκιμές τύπου Β η αποκλίνουσα τάση, q , αυξάνεται μονότονα ενώ ταυτόχρονα στρέφονται οι ΚΑ τάσεως. Στις αστράγγιστες δοκιμές τύπου C η αποκλίνουσα τάση, q , διατηρείται σταθερή ενώ στρέφονται οι ΚΑ τάσεως προκαλώντας την ανάπτυξη υπερπίεσης του ύδατος πόρων και, επομένως, την αύξηση του αποκλίνοντος λόγου τάσεων, $\eta = q / p'$, καθώς οι ενεργές τάσεις αποφορτίζονται ισότροπα ($d\sigma'_1 = d\sigma'_2 = d\sigma'_3 = -du < 0$). Στη δοκιμή D1 η αποκλίνουσα τάση, q , μεταβάλλεται περιοδικά ενώ στρέφονται οι ΚΑ τάσεως με πρακτικά σταθερές p και b ($= 0.40 - 0.52$) παραμέτρους.

Η αστάθεια στις δοκιμές τύπου Β προκαλείται μετά από μία μικρή αύξηση της αποκλίνουσας τάσης και στροφή των ΚΑ τάσεως όταν ο λόγος K_c είναι μικρός, υποδηλώνοντας την τρωτότητα της ανισότροπα στερεοποιημένης άμμου έναντι ρευστοποίησης όταν η στατική διατμητική τάση είναι μεγάλη. Η στροφή των ΚΑ τάσεως υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση στις δοκιμές τύπου C επιφέρει πλαστική συστολή, αστάθεια, παροδική μονότονη ρευστοποίηση και τελικά αστοχία της άμμου για τις τιμές του K_c που εξετάστηκαν σε αυτήν την εργασία. Για μία δεδομένη τιμή του K_c η στροφή των ΚΑ τάσεως μέχρι την εκκίνηση της αστάθειας είναι μεγαλύτερη στις δοκιμές τύπου C σε σύγκριση με τις δοκιμές τύπου Β. Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι η αστάθεια προκαλείται όταν η τασική όδευση από τις δοκιμές τύπου Β και C διατέμνει την επιφάνεια αστάθειας που ορίστηκε στις δοκιμές τύπου Α υπό μία μεγάλη γωνία. Αντιθέτως, δεν προκαλείται αστάθεια όταν η τάνυση γίνεται υπό μικρή γωνία ή εφαπτομενικά.

Και στους δύο τύπους δοκιμών η παραμόρφωση της άμμου κατά τη στροφή των ΚΑ τάσεως είναι μη ομοαξονική, με τη γωνία μη ομοαξονικότητας, ζ , να μειώνεται, εν γένει, καθώς αυξάνεται ο λόγος τάσεων $\sin \varphi$ (ή η). Στις δοκιμές τύπου C και στη δοκιμή D1 παρατηρήθηκαν διακριτά μοτίβα μη ομοαξονικής συμπεριφοράς αντιστοιχούντα στη φόρτιση και αποφόρτιση της μη διαγώνιας συνιστώσας, $\tau_{z\theta}$, του τανυστή τάσεως. Τα μοτίβα αυτά ήταν κοινά σε όλες τις δοκιμές, ανεξαρτήτως της τιμής του K_c και του αριθμού των κύκλων στροφής των ΚΑ τάσεως, με εξαίρεση την αρχική φάση στροφής μετά από την ανισότροπη στερεοποίηση σε χαμηλό K_c . Στην περίπτωση της φόρτισης, η γωνία ζ μειώνεται μη γραμμικά με τη γωνία φ , ενώ μετά την αστοχία της άμμου η γωνία ζ σταθεροποιείται καθώς η άμμος παραμορφώνεται στην σταθερή κατάσταση· μολαταύτα, η σταθερή κατάσταση διακόπτεται από την πρόκληση ασταθειών συγκεντρωμένης ή μη παραμόρφωσης. Στην περίπτωση της αποφόρτισης, η γωνία ζ είναι ιδιαίτερα υψηλή και μειώνεται μη γραμμικά με τη γωνία φ , χωρίς να δείχνει σημάδια σταθεροποίησης, πιθανώς λόγω της σύζευξης των ελαστικών και πλαστικών χαρακτηριστικών παραμόρφωσης (elastic – plastic coupling). Στις δοκιμές τύπου Β παρατηρήθηκαν διακριτά μοτίβα εξάρτησης του ζ από το φ πριν την κορυφαία αστοχία ανάλογα με την τιμή του K_c , ενώ μετά την κορυφαία αστοχία η

συμπεριφορά είναι παρόμοια για όλες τις τιμές του K_c χωρίς, όμως, να παρατηρείται η σταθερή κατάσταση.

Στις δοκιμές τύπου Β και C στις οποίες η άμμος στερεοποιήθηκε σε πολύ χαμηλό K_c παρατηρήθηκε έντονη μη ομοαξονικότητα και πλαστική συστολή κατά τη στροφή των ΚΑ τάσεως που ακολούθησε αμέσως μετά την ανισότροπη στερεοποίηση. Η επίδραση της προδιάτμησης στην ένταση της μη ομοαξονικότητας αποδείχθηκε σημαντικότερη από την επίδραση του ρυθμού στροφής των κύριων αξόνων τάσεως που έχει επισημανθεί από τους [Gutierrez et al. \(1991\)](#). Το φαινόμενο αυτό δικαιολογεί, ίσως, την τρωτότητα των ανισότροπα στερεοποιημένων άμμων έναντι ρευστοποίησης, σε συνθήκες στροφής των ΚΑ τάσεως, όταν η στατική διατμητική τάση είναι υψηλή. Συγκεκριμένα, μία μικρή τασική διαταραχή που περιλαμβάνει στροφή των ΚΑ τάσεως (π.χ. η αλλαγή της γεωμετρίας μίας πλαγιάς) επιφέρει έντονη μη ομοαξονικότητα και πλαστική συστολή λόγω της προδιάτμησης με αποτέλεσμα να προκαλείται αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης, με τρόπο ανάλογο προς αυτόν που περιγράφηκε από τον καθηγητή Βαρδουλάκη για την περίπτωση της αστάθειας συγκεντρωμένης παραμόρφωσης ([Vardoulakis et al. 1978](#), [Vardoulakis and Graf 1985](#), [Vardoulakis and Georgopoulos 2005](#)).

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές τύπου C υποδεικνύουν ότι οι συνδυασμοί φ και $\alpha_{\sigma 1}$ στο σημείο εκκίνησης της μονότονης ρευστοποίησης (σημείο αστάθειας) δεν είναι μοναδικοί, παρόλο που κάτι τέτοιο διατυπώνεται σε παρελθοντικές έρευνες ([Nakata et al. 1998](#), [Sivathayalan and Vaid 2002](#)). Η συνθήκη εκκίνησης και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης της μονότονης παραδοικής ρευστοποίησης εξαρτώνται από την ιστορία τάσεων – παραμορφώσεων, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του λόγου τάσεων στερεοποίησης, K_c , και της κατεύθυνσης της προσανζητικής τάσεως. Η εξάρτηση αυτή είναι θεωρητικώς αναμενόμενη αφού το έργο δευτέρας τάξεως, d^2W , το οποίο πρέπει να μηδενιστεί για να προκληθεί η αστάθεια, είναι μία κατευθυντική ποσότητα που εξαρτάται από την ιστορία φόρτισης ([Daouadji et al. 2011](#)). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η εκκίνηση αμφοτέρων των ασταθειών μη συγκεντρωμένης και συγκεντρωμένης παραμόρφωσης κατά τη μονότονη φόρτιση με στροφή των ΚΑ τάσεως συμβαίνει επιλεκτικά σε τασικές καταστάσεις που αντιστοιχούν σε δυσμενείς κινηματικές συνθήκες παραμόρφωσης, δηλαδή σε διάτμηση ή / και ολίσθηση στα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης· επιβεβαιώθηκε, μάλιστα, ότι η αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης συμβαίνει πριν την αστάθεια συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Τα δεδομένα αυτά υποδεικνύουν την επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας και της ιστορίας φόρτισης στην ασταθή συμπεριφορά της άμμου.

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας υποδεικνύουν ότι η τασική κατάσταση της χαλαρής άμμου που υποβάλλεται σε στροφή των ΚΑ τάσεως υπό αστράγγιστες συνθήκες και με σταθερή αποκλίνουσα τάση μπορεί να μεταβληθεί κατά την κατεύθυνση ισότροπης αποφόρτισης ($d\sigma'_1 = d\sigma'_2 = d\sigma'_3 < 0$) από το σημείο ανισότροπης στερεοποίησης έως την κατάσταση κορυφαίας αστοχίας χωρίς να προκληθεί αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης (μονότονη ρευστοποίηση). Αυτά τα ευρήματα είναι πρωτότυπα διότι, σύμφωνα με σύγχρονα προσομοιώματα

καταστρωμένα στα πλαίσια της θεωρίας διακλάδωσης, η κατεύθυνση ισότροπης αποφόρτισης περιλαμβάνεται στο σύνολο των ασταθών κατευθύνσεων της χαλαρής άμμου ακόμα και σε χαμηλές τιμές του αποκλίνοντος λόγου τάσεων, μακριά από την κορυφαία αστοχία (Darve and Laouafa 2000, Darve et al. 2004, Sibille et al. 2007, Prunier et al. 2009). Στη συνέχεια, εδείχθη ότι μία οιονεί στατική αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης μπορεί να προκληθεί υπό αυξανόμενες ενεργές τάσεις και μειούμενο αποκλίνοντα λόγο τάσεων, ακολουθούμενη από μία δυναμική αστάθεια μη συγκεντρωμένης παραμόρφωσης (μονότονη ρευστοποίηση) υπό μειούμενες ενεργές τάσεις και αποκλίνοντα λόγο τάσεων. Η πρωτοτυπία εδώ έγκειται στο γεγονός ότι επιβεβαιώνονται για πρώτη φορά με φυσικό πείραμα οι προβλέψεις των προσομοιωμάτων του Darve σχετικά με τη δυνατότητα πρόκλησης αστάθειας σε κατεύθυνση που αντιστοιχεί σε αυξανόμενες ενεργές τάσεις (Darve and Laouafa 2000, Darve et al. 2004, Sibille et al. 2007, Prunier et al. 2009).

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της εσωτερικής δομής της άμμου στην κρίσιμη κατάσταση παρασκευάστηκαν χαλαρά δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν, πρώτα, σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως (ακτινική φόρτιση) και, έπειτα, σε στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές ενεργές ΚΤ τάσεων όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην κρίσιμη κατάσταση. Παρατηρήθηκε ότι η άμμος επιδεικνύει έντονη μη ομοαξονικότητα και συστέλλεται πλαστικά όταν η φόρτιση με σταθερούς ΚΑ τάσεως διακόπτεται από μία συνεχή στροφή των ΚΑ τάσεως. Η ένταση της μη ομοαξονικότητας και της συσχετισμένης πλαστικής συστολής γίνεται μεγαλύτερη όταν η προηγούμενη διατμητική διαδικασία (προδιάτμηση) είναι εντονότερη σε όρους συσσώρευσης διατμητικής παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα είναι πρωτότυπα διότι υποδεικνύουν ότι η επίδραση της προδιάτμησης στη συμπεριφορά της άμμου είναι σημαντικότερη από αυτήν των παραμέτρων η , p' , b και e που έχει επισημανθεί σε παρελθοντικές έρευνες (Miura et al. 1986, Li and Yu 2010, Tong et al. 2010 and 2014), όμως η επίδραση αυτή είναι παροδική και φθίνει καθώς συνεχίζεται η στροφή των ΚΑ τάσεως.

Συγκεκριμένα, εδείχθη ότι η άμμος συμπεριφέρεται εντόνως μη ομοαξονικά και συστέλλεται αμέσως όταν εκκινείται η στροφή των ΚΑ τάσεως με σταθερές τις ενεργές ΚΤ τάσεως πολύ κοντά στην κρίσιμη κατάσταση, μολονότι στην προηγούμενη φάση ακτινικής φόρτισης διαστελλόταν πλαστικά στην κατάσταση αστοχίας υπό ομοαξονικές συνθήκες παραμόρφωσης· μάλιστα, το φαινόμενο γίνεται προοδευτικά εντονότερο καθώς προσεγγίζεται η κρίσιμη κατάσταση. Το «πείραμα σκέψης» του καθηγητή Δαφαλιά (Dafalias 2016) είναι η οριακή περίπτωση της ακολουθίας των δοκιμών που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία, επομένως, τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται επαληθεύουν τον ισχυρισμό ότι η Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης που προτάθηκε από τους Li and Dafalias (2012) αποτελεί μία αναγκαία αναθεώρηση της κλασικής Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής προσφέρουν νέα γνώση και συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση της επίδρασης της ανισοτροπίας και της ιστορίας φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου. Η διαδικασία απόθεσης και

η ιστορία φόρτισης επηρεάζουν τον σχηματισμό και την εξέλιξη της εσωτερικής δομής και αυτή η διαδικασία στο μικροσκοπικό επίπεδο καθορίζει εν τέλει τη μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά της άμμου σε κάθε κατάσταση, συμπεριλαμβανομένης της κρίσιμης. Αναδεικνύεται, επομένως, η αναγκαιότητα ανάπτυξης προσομοιωμάτων που δύνανται να προσομοιώσουν την επίδραση της εσωτερικής δομής στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου υπό γενικευμένες και σύνθετες συνθήκες φόρτισης, όπως αυτές που επιβλήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ως μελλοντικός στόχος έρευνας τίθεται η εφαρμογή τεχνικών πειραματικής μέτρησης του τανυστή δομής κοκκωδών υλικών μέσω φυσικών ιδιοτήτων όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η ταχύτητα διάδοσης των μηχανικών κυμάτων. Επίσης, ένα ελκυστικό αντικείμενο για μελλοντική έρευνα αφορά τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου υπό συνθήκες πραγματικής τριαξονικής φόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (BIBLIOGRAPHY)

- Arthur JRF, Menzies BK (1972) Inherent anisotropy in a sand. *Géotechnique* 22 (1), 115–129
- Been K, Jefferies MG (1985) A state parameter for sands. *Géotechnique* 35 (2), 99–112
- Been K, Jefferies MG, Hachey J (1991) The critical state of sands. *Géotechnique* 41 (3), 365–381
- Borja RI (2006) Condition for liquefaction instability in fluid-saturated granular soils. *Acta Geotechnica* 2006; 1:211-224
- Brewer R (1964) Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, Inc. pp. 129-158
- Casagrande A, Carillo N (1944) Shear failure of anisotropic materials. *Proc. Boston Soc. Civ. Engrs*, 31, 74-87
- Dafalias YF (1977) Elasto-plastic coupling within a thermodynamic strain space formulation of plasticity. *Int. J. Non-Linear Mech.*, Vol. 12, pp. 327-337
- Dafalias YF (2016) Must critical state theory be revisited to include fabric effects? *Acta Geotechnica* (2016) 11:479, DOI 10.1007/s11440-016-0441-0
- Daouadji A, Darve F, Al Gali H, Hicher PY, Laouafa F, Lignon S, Nicot F, Nova R, Pinheiro M, Prunier F, Sibille L, Wan R (2011) Diffuse failure in geomaterials: Experiments, theory and modelling. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* (2011), 35(16), 1731-1773
- Darve F, Flavigny M, Meghachou M (1995) Constitutive modelling and instabilities of soil behaviour. *Computers and Geotechnics* 17 (1995), 203-224
- Darve F, Laouafa F (2000) Instabilities in granular materials and application to landslides. *Mech. Cohes-Frict. Mater.*, 2000; 5:627-652
- Darve F, Servant G, Laouafa F, Khoa HDV (2004) Failure in geomaterials: continuous and discrete analysis. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 193 (2004), 3057-3085
- Desrues J, Hammad W (1989) Shear banding dependency on mean stress level in sand. *Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies*, International Workshop, Gdańsk-Sobieszewo, September 25-30, 1989
- Desrues J, Chambon R, Mokni M, Mazerolle F (1996) Void ratio inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique* 46 (3), 529-546

Desrues J, Viggiani G (2004) Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28: 279-321

Desrues J, Georgopoulos I-O (2006) An investigation of diffuse failure modes in undrained triaxial tests on loose sand. *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, 585-594

Fu P, Dafalias YF (2011) Fabric evolution within shear bands of granular materials and its relation to critical state theory. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35: 1918-1948

Georgiannou VN, Konstadinou M (2014) Torsional shear behavior of anisotropically consolidated sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE* 140 (2), ISSN: 1090-0241/04013017(14)

Gong G, Thornton C, Chan AHC (2012) DEM simulations of undrained triaxial behavior of granular material. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 138, No 6, 560-566

Guo N, Zhao J (2013) The signature of shear-induced anisotropy in granular media. *Computers and Geotechnics*, 47, 1-15

Gutierrez M, Ishihara K, Towhata I (1991) Flow theory for sand during rotation of principal stress direction. *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp. 121-132

Hight DW, Gens A, Symes MJ (1983) The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Géotechnique* 33, No. 4, 355-383

Hill R (1958) A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (1958); 6:239-249

Hu M, O'Sullivan C, Jardine RR, Jiang M (2010) Stress-induced anisotropy in sand under cyclic loading. *Granular Matter*, 12: 469-476

Hueckel T (1976) Coupling of elastic and plastic deformation of bulk solids. *Mechanica* 11:227-235

Ishihara K, Tatsuoka F, Yasuda S (1975) Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, 29-44

Ishihara K, Towhata I (1983) Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads. *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, 11-26

Ishihara K (1993) Liquefaction and flow failure during earthquake. *Géotechnique*, Vol. 43, No. 3, pp.351-415

Lade PV, Nelson RB, Ito YM (1988) Instability of granular materials with nonassociated flow. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 114, No. 12, 2173-2191

- Lade PV (1993) Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm. *Canadian Geotechnical Journal* 30: 895-904
- Lam WK, Tatsuoka F (1988) Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand. *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp. 89-106
- Li XS, Wang Y (1998) Linear representation of steady-state line for sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(12), 1215-1217
- Li XS, Dafalias YF (2000) Dilatancy for cohesionless soils. *Géotechnique* 50, No. 4, 449-460
- Li X, Li XS (2009) Micro-macro quantification of the internal structure of granular materials. *J. Eng. Mech.*, 135(7), 641-656
- Li X, Yu H-S (2010) Numerical investigation of granular material behaviour under rotational shear. *Géotechnique* 60, No. 5, 381-394
- Li XS, Dafalias YF (2012) Anisotropic critical state theory: role of fabric. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 138, No. 3, 263-275
- Li X, Yang D, Yu H-S (2016) Macro deformation and micro structure of 3D granular assemblies subjected to rotation of principal stress axes. *Granular Matter* (2016) 18:53, DOI: 10.1007/s10035-016-0632-2
- Lü X, Huang M, Qian J (2018) Influences of loading direction and intermediate principal stress ratio on the initiation of strain localization in cross-anisotropic sand. *Acta Geotech.*, 13: 619-633, 2018
- Manzari MT, Dafalias YF (1997) A critical state two-surface plasticity model for sands. *Géotechnique* 47, No. 2, 255-272
- Masson S, Martinez J (2001) Micromechanical analysis of the shear behavior of a granular material. *J. Eng. Mech.*, 127(10), 1007-1016
- Miura K, Miura S, Toki S (1986) Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation. *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, 36-52
- Nakata Y, Hyodo M, Murata H, Yasufuku N (1998) Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation. *Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, 115-128
- Nicot F, Darve F (2011) Diffuse and localized failure modes: Two competing mechanisms. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 35, 586-601
- Nova R (1994) Controllability of the incremental response of soil specimens subjected to arbitrary loading programmes. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 5(2):193-201

- Oda M (1972) Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material. *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, 18-36
- Oda M, Nemat-Nasser S, Konishi J (1985) Stress-induced anisotropy in granular masses. *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, 85-97
- Poulos SJ, Castro G, France JW (1985) Liquefaction evaluation procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.6, pp. 772-792
- Prunier F, Nicot F, Darve F, Laouafa F, Lignon S (2009) Three-dimensional multiscale bifurcation analysis of granular media. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 135, No. 6, 493-509
- Roscoe KH, Schofield AN, Wroth CP (1958) On the yielding of soils. *Géotechnique* 8 (1), 22–53
- Roscoe KH (1970) The influence of strains in soil mechanics. Tenth Rankine Lecture, *Géotechnique* 20, No. 2, 129-17
- Salvatore E, Mondoni G, Ando E, Albano M, Viggiani G (2017) Determination of the critical state of granular materials with triaxial tests. *Soils Found.* (2017), <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.005>
- Sasitharan S, Robertson PK, Segoo DC, Morgenstern NR (1993) Collapse behavior of sand. *Can. Geotech. J.* 30, 569-577
- Satake M (1978) Constitution of mechanics of granular materials through graph representation. *Theoretical and Applied Mechanics* 26, University of Tokyo Press, pp. 257-266
- Schofield AN, Wroth CP (1968) *Critical state soil mechanics*. McGraw-Hill, London
- Shibuya S, Hight DW (1987) A bounding surface of granular materials. *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, 123-136
- Shibuya S, Hight DW, Jardine RJ (2003a) Four-dimensional local boundary surfaces of an isotropically consolidated loose sand. *Soils and Foundations*, Vol.43, No.2, 89-103
- Shibuya S, Hight DW, Jardine RJ (2003b) Local boundary surfaces of a loose sand dependent on consolidation path. *Soils and Foundations*, Vol.43, No.3, 85-93
- Sibille L, Nicot F, Donzé FV, Darve F (2007) Material instability in granular assemblies from fundamentally different models. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2007; 31:457–481
- Sivathayalan S, Vaid YP (2002) Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (1): 63 - 76

- Symes MJ, Gens A, Hight DW (1984) Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand. *Géotechnique* 34, No. 1, 11-27
- Tatsuoka F, Ishihara K (1974) Drained deformation of sand under cyclic stresses reversing direction. *Soils and Foundations*, Vol.14, No.3, pp. 51-65
- Theocharis AI, Vairaktaris E, Dafalias YF, Papadimitriou AG (2017) Proof of incompleteness of Critical State Theory in granular mechanics and its remedy. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 143 (2), 1-12
- Theocharis AI, Vairaktaris E, Dafalias YF, Papadimitriou AG (2019) Necessary and sufficient conditions for reaching and maintaining critical state. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43: 2041-2045
- Thornton C (2000) Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media. *Géotechnique* 50, No. 1, 43-53
- Tong Z, Zhang J, Yu Y, Ga Zhang (2010) Drained deformation behavior of anisotropic sands during cyclic rotation of principal stress axes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No.11, pp. 1509-1518
- Tong Z, Fu P, Dafalias YF, Yao Y (2014) Discrete element method analysis of non-coaxial flow under rotational shear. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2014; 38:1519–1540
- Triantafyllos PK, Georgiannou VN, Dafalias YF, Georgopoulos I-O (2019) New findings on the evolution of the instability surface of loose sand. *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00887-7>
- Triantafyllos PK, Georgiannou VN, Pavlopoulou EM, Dafalias YF (2020) Strength and dilatancy of sand before and after stabilisation with colloidal-silica gel. *Géotechnique* (under review)
- Tsomokos A (2005) Experimental study of the behaviour of a soil element under monotonic and cyclic torsional shear. PhD Thesis, National Technical University of Athens
- Vaid YP, Chern JC (1983) Effect of static shear on resistance to liquefaction. *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp. 47-60
- Vardoulakis I, Goldscheider M, Gudehus G (1978) Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1978, 2: 99-128
- Vardoulakis I, Graf B (1985) Calibrations of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments. *Géotechnique* 35, No. 3, 299-317

Vardoulakis I, Sulem J (1995) Bifurcation analysis in geomechanics. Chapman and Hall, 1995

Vardoulakis I, Georgopoulos I-O (2005) The “stress-dilatancy” hypothesis revisited: shear-banding related instabilities. *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp. 61-76

Verdugo R, Ishihara K (1996) The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp. 81-91

Wang R, Fu P, Zhang J-M, Dafalias YF (2017) Evolution of various fabric tensors for granular media toward the critical state. *J. Eng. Mech.*, 2017, 143(10): 04017117

Wiebicke M, Andò E, Salvatore E, Viggiani G, Herle I (2017) Experimental measurement of granular fabric and its evolution under shearing. *Powders and Grains (2017)*, EPJ Web of Conferences. 140. 02020. 10.1051/epjconf/201714002020.

Wroth CP, Basset RH (1965) A stress-strain relationship for the shearing behaviour of a sand. *Géotechnique* 15, No. 1, 32-56

Yang ZX, Li XS, Yang J (2007) Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil. *Géotechnique* 57, No. 4, 371-384

Yoshimine M, Ishihara K, Vargas W (1998): Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand. *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, 179-188

Yoshimine M, Ishihara K (1998) Flow potential of sand during liquefaction. *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, 189-198

Zhang L, Thornton C (2007) A numerical examination of the direct shear test. *Géotechnique* 57, No. 4, 343-354

Zhou W, Liu J, Ma G, Chang X (2017) Three-dimensional DEM investigation of critical state and dilatancy behaviors of granular materials. *Acta Geotechnica* (2017) 12:527-540

ΠΙΝΑΚΕΣ (TABLES)

Πίνακας 1 Κατάλογος των συμβόλων και των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μέσων τάσεων, παραμορφώσεων και άλλων παραμέτρων στις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης

Table 1 List of symbols and equations used to calculate the average stresses, strains and other parameters in torsional-shear tests

Direction	HC	Stress	Strain
-----------	----	--------	--------

Vertical

$$\sigma_{zz} = \frac{F}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\epsilon_{zz} = -\frac{V_H}{H}$$

Circumferential

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i}$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{(\epsilon_{vol} - \epsilon_{zz})}{2} \quad \text{or} \quad \epsilon_{\theta\theta} = \epsilon_{vol} - \epsilon_{zz}$$

Radial

$$\sigma_{rr} = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i}$$

$$\epsilon_{rr} = \frac{(\epsilon_{vol} - \epsilon_{zz})}{2} \quad \text{or} \quad \epsilon_{rr} = 0$$

Rotational

$$T_{z\theta} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}$$

$$\gamma_{z\theta} = 2\epsilon_{z\theta} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$$

Principal

Stress

Strain

Major

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}}{2} +$$

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{zz} + \epsilon_{\theta\theta}}{2} +$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + T_{z\theta}^2}$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{zz} - \epsilon_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + \epsilon_{z\theta}^2}$$

Intermediate

$$\sigma_2 = \sigma_{rr}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_{rr}$$

Minor

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}}{2} -$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_{zz} + \epsilon_{\theta\theta}}{2} -$$

$$- \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + T_{z\theta}^2}$$

$$- \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{zz} - \epsilon_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + \epsilon_{z\theta}^2}$$

Invariant

Stress

Strain

$$q = \left(\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}\right)^{1/2}$$

$$\gamma = \left(\frac{2}{9}\{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2\}\right)^{1/2}$$

$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u$$

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (= \frac{-\Delta V}{V})$$

$$T_{oct} = \frac{1}{3}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}^{1/2}$$

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3}\{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2\}^{1/2}$$

Parameters	Stress	Strain
Difference	$q_d = \sigma_1 - \sigma_3$	
	$X = \frac{\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta}}{\sigma'_{zz} + \sigma'_{\theta\theta}}, X_s = \sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta}$	$X_\epsilon = \frac{\epsilon_{zz} - \epsilon_{\theta\theta}}{2}$
	$Y = \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma'_{zz} + \sigma'_{\theta\theta}}, Y_s = 2\tau_{z\theta}$	$Y_\epsilon = \epsilon_{z\theta}$
Direction of major principal stress/strain	$\alpha \equiv \alpha_{\sigma'1} = 0.5 \cdot \tan^{-1} \frac{Y}{X} =$ $= 0.5 \cdot \tan^{-1} \frac{Y_s}{X_s}$	$\alpha_{\epsilon1} = 0.5 \cdot \tan^{-1} \frac{Y_\epsilon}{X_\epsilon}$
Direction of major principal incremental stress/strain	$\alpha_{d\sigma'1} = 0.5 \cdot \tan^{-1} \frac{dY_s}{dX_s}$	$\alpha_{d\epsilon1} = 0.5 \cdot \tan^{-1} \frac{dY_\epsilon}{dX_\epsilon}$
Ratio	$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$	
Ratio	$\sin \varphi = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$	
Ratio	$\eta = \frac{q}{p}$	
Ratio	$K_c = \frac{\sigma'_{3c}}{\sigma'_{1c}}$	
Second-order work	$d^2W = (d\sigma_{zz} - d\sigma_{\theta\theta}) \left(\frac{d\epsilon_{zz} - d\epsilon_{\theta\theta}}{2} \right) + 2d\tau_{z\theta} d\epsilon_{z\theta},$ for isochoric conditions under $b=0.5$	
Normalised second-order work	$d^2W_{norm} = d^2W / \left[\sqrt{(d\sigma_{zz} - d\sigma_{\theta\theta})^2 + (2d\tau_{z\theta})^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{d\epsilon_{zz} - d\epsilon_{\theta\theta}}{2} \right)^2 + (d\epsilon_{z\theta})^2} \right],$ for isochoric conditions under $b=0.5$	
Angle between the σ'_{1}-axis and the planes of $\max(\tau/\sigma'_n)$	$\theta_{1,2} = \pm (45^\circ - \varphi_{mob} / 2)$	

Πίνακας 2 Κατάλογος των βασικών συμβόλων και συντομογραφιών

Table 2 Notations and abbreviations

α material constant used in the relationship of the critical state line in the $e - (p'/p_a)^\alpha$ plane

ε_1 major principal strain

ε_2 intermediate principal strain

ε_3 minor principal strain

ε_q deviatoric strain, $\varepsilon_q = 2^{1/2}/3[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2}$

ε_{vol} volumetric strain, $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

η stress ratio, $\eta = q/p'$

λ slope of the critical state line in the $e - (p'/p_a)^\alpha$ plane

ζ non-coaxiality angle, $\zeta = \alpha_{d\varepsilon_1} - \alpha_{\sigma'_1}$

σ'_1 major effective principal stress

σ'_2 intermediate effective principal stress

σ'_3 minor effective principal stress

φ angle of shearing resistance (degrees)

φ_c angle of shearing resistance at the critical state (degrees)

ψ state parameter of Been and Jefferies, $\psi = e - e_c(p')$

ACST anisotropic critical state theory

B Skempton's pore-pressure coefficient

c cohesion

CSL critical state line in the $e - p'$ plane

CST critical state theory

D dilatancy ratio, $D = d\varepsilon^p_{vol} / d\varepsilon^p_q$ (the superscript p stands for plastic)

e void ratio, $e = V_v / V_s$

$e_c(p')$ void ratio at the critical state at mean effective stress p'

e_Γ material constant indicating the intercept of the critical state line in the $e - (p'/p_a)^\alpha$ plane with the $p' = 0$ axis

HCA hollow cylinder apparatus

IP instability point

IS instability surface

M stress ratio, q / p' , at the critical state

PA principal axes

PTP phase-transformation point

PV principal values

p' mean effective stress, $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3$

p_a atmospheric pressure at zero elevation (101 kPa)

q deviatoric stress, $q = [1/2((\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2)]^{1/2}$

u pore-water pressure in excess of atmospheric pressure

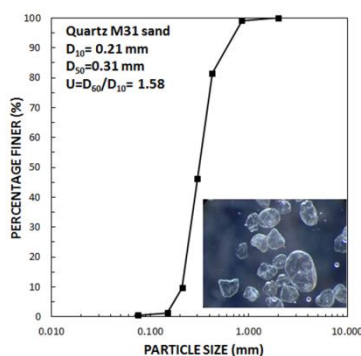
V_s volume of sand particles

V_v volume of voids

Πίνακας 3 Φυσικά χαρακτηριστικά της άμμου M31

Table 3 Physical characteristics of M31 Sand

Specific gravity, G_s (-):	2.66
Minimum void ratio, e_{min} (-):	0.50
Maximum void ratio, e_{max} (-):	0.80
Grain size D_{10} (mm):	0.214
Grain size D_{30} (mm):	0.258
Grain size D_{50} (mm):	0.310
Grain size D_{60} (mm):	0.339
Coefficient of uniformity, C_u (-):	1.58
Coefficient of curvature, C_h (-):	0.92



D_p is the grain size (diameter) corresponding to $p\%$ finer in the grain size distribution curve. The coefficient of uniformity is $C_u = D_{60} / D_{10}$ while the coefficient of curvature is $C_h = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$

Πίνακας 4 Παράμετροι κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31

Table 4 Critical-state parameters of M31 Sand

$e_c(p') = e_r - \lambda(p'/p_a)^\alpha, p_a=101 \text{ kPa}$ and $\eta_c = (q/p')_c = M$				
	e_r	λ	α	M (for $b = 0$)

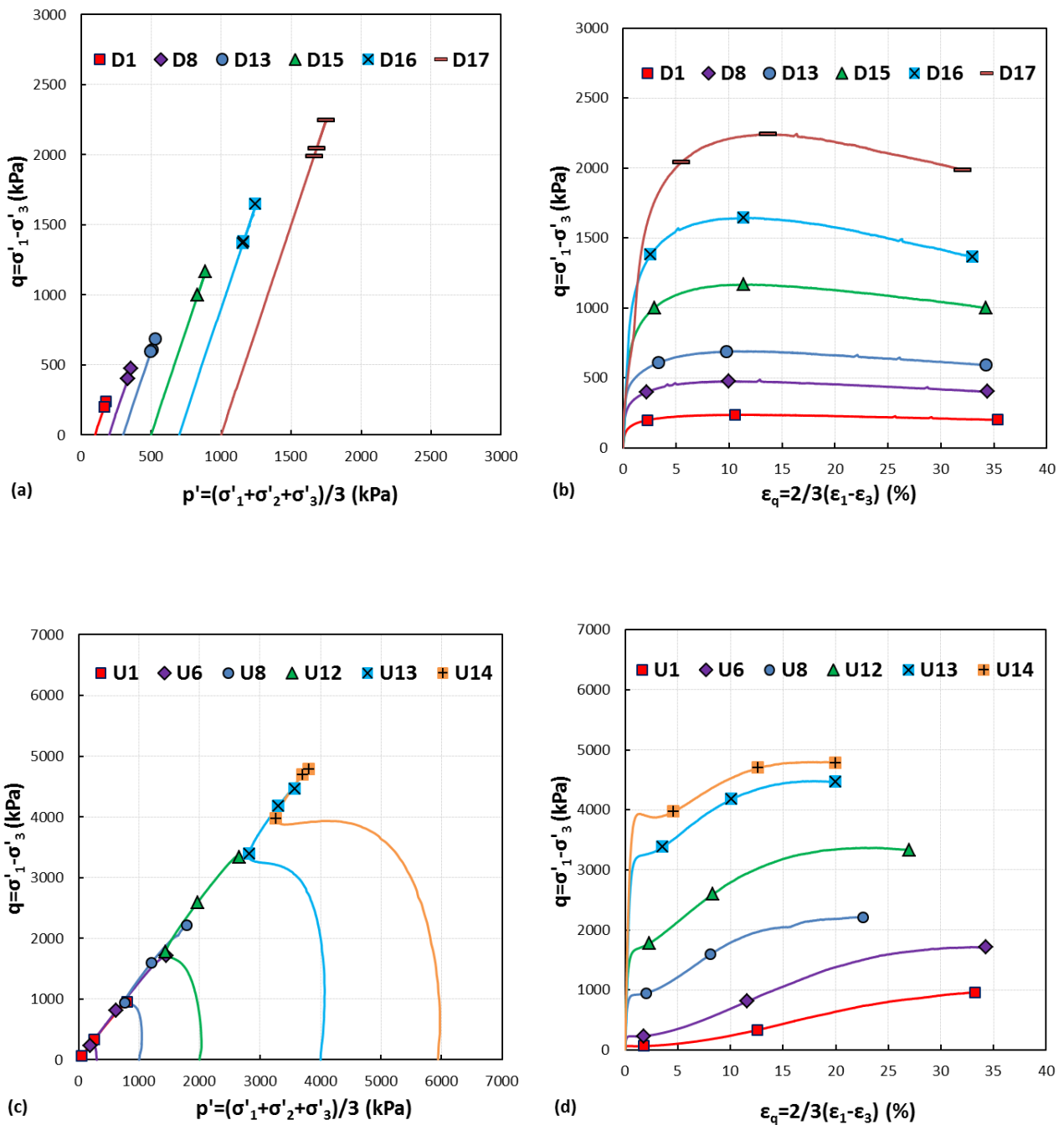
M31 Sand	0.7682	0.0112	0.70	1.24
-----------------	--------	--------	------	------

Πίνακας 5 Συνθήκες κατά την έναρξη της στροφής των κύριων αξόνων τάσεως στις δοκιμές τύπου PAR

Table 5 Conditions at the initiation of stress rotation in PAR-series tests

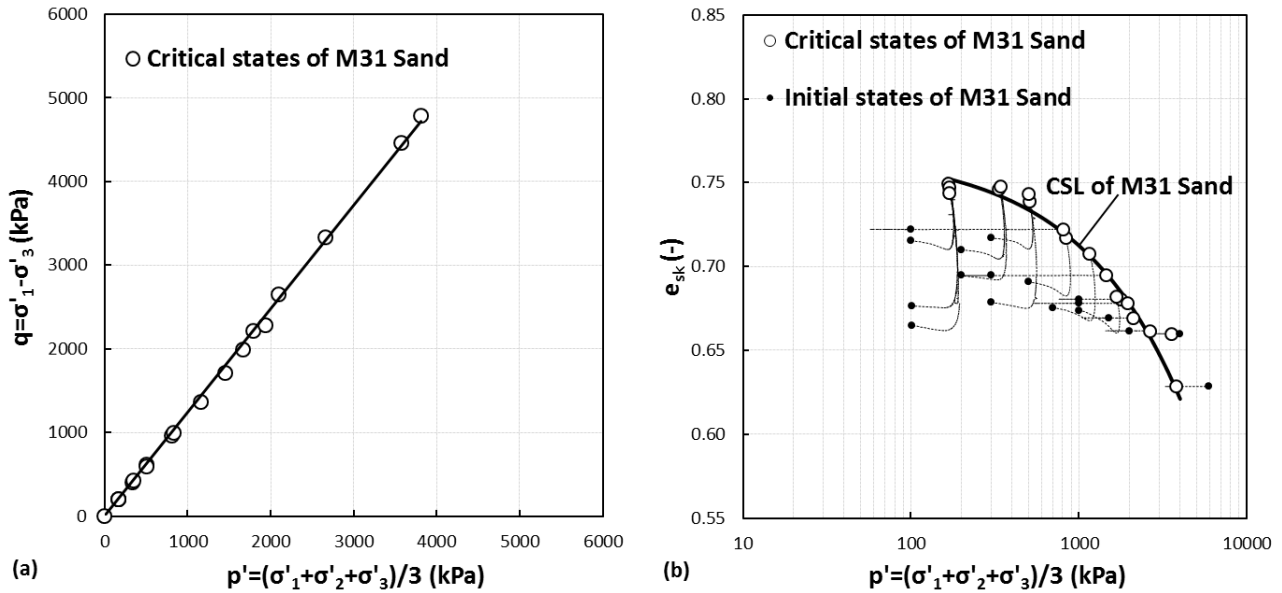
Test	η (-)	p' (kPa)	b (-)	α (°)	ε_q (%)	e (-)	ψ (-)	Pre-shearing
PAR1	1.01	100	0	0	0.78	0.693	-0.064	AC
PAR2	1.02	507	0.5	15	12.4	0.726	-0.008	RL
PAR3	1.05	343	0.5	15	7.6	0.744	0.003	RL
PAR4	1.12	402	0.5	15	4.7	0.733	-0.006	RL

ΣΧΗΜΑΤΑ (FIGURES)



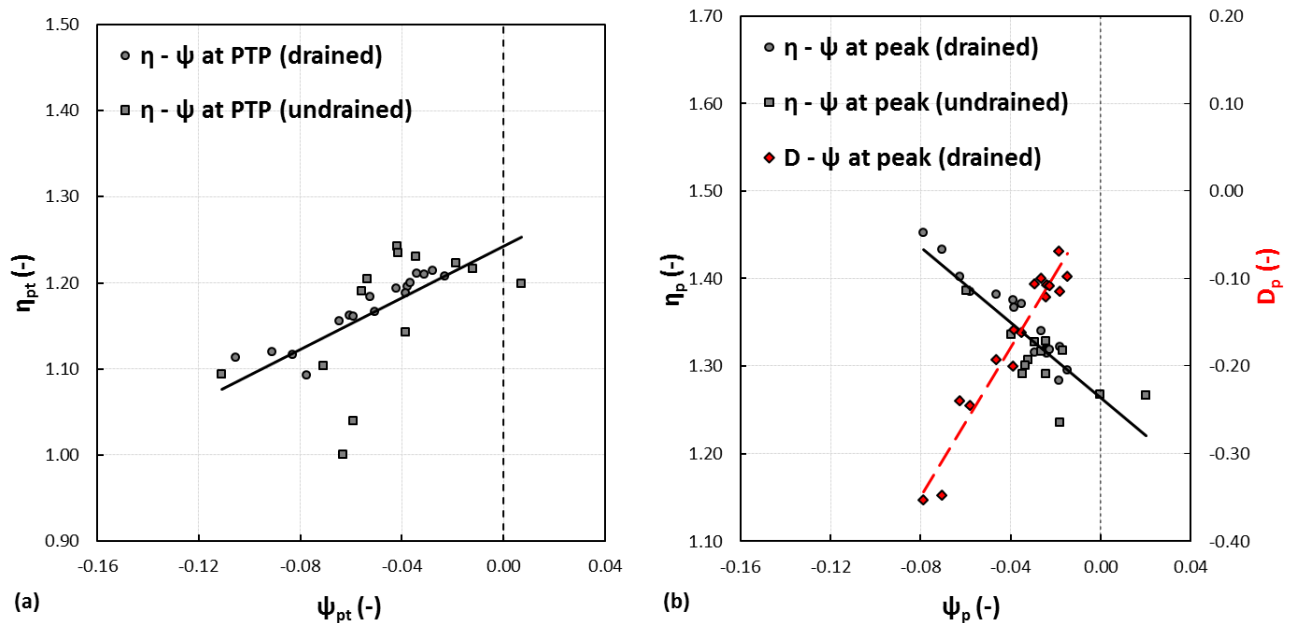
Σχ. 1 Απόκριση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου σε μονοτονική τριαξονική συμπίεση υπό στραγγιζόμενες (a & b) και αστράγγιστες (c & d) συνθήκες. a & b Ενεργές τασικές οδεύσεις στο $q - p'$ επίπεδο. c & d Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης – παραμόρφωσης ($q - \epsilon_q$)

Fig. 1 Response of IC sand to monotonic triaxial compression under drained (a & b) and undrained (c & d) conditions. a & b Effective stress paths in the $q - p'$ plane. c & d Deviatoric stress – strain curves ($q - \epsilon_q$)



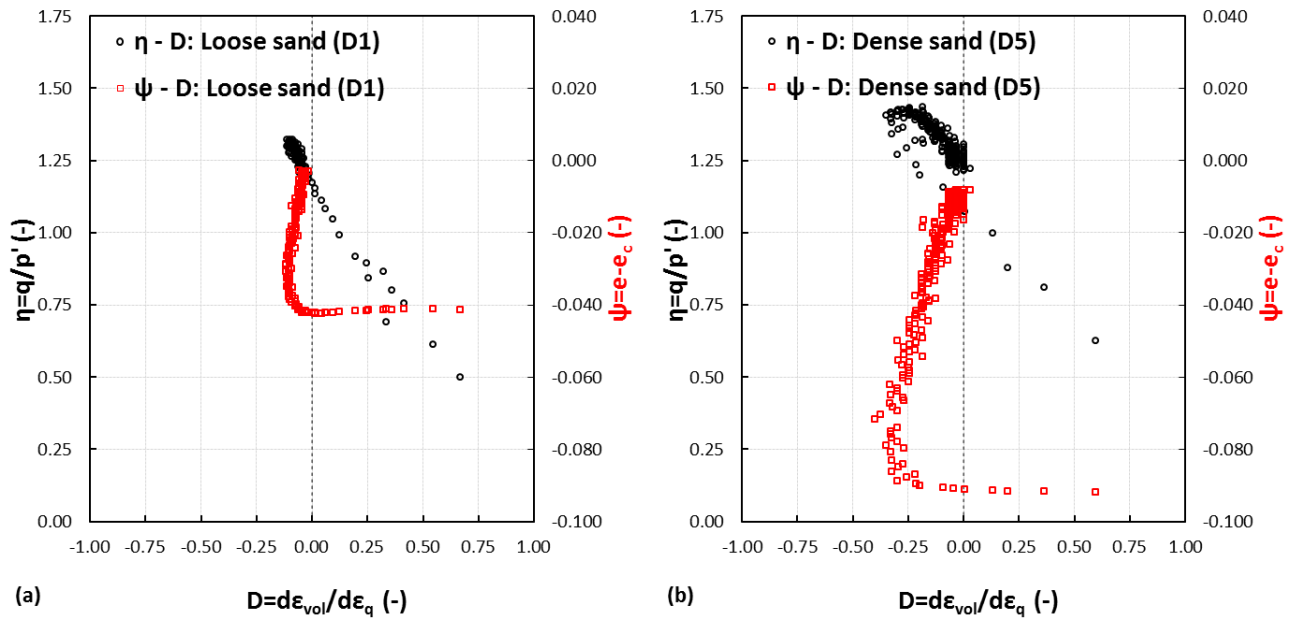
Σχ. 2 Προβολή της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης της άμμου M31 στο $q - p'$ επίπεδο τάσεων (a) και στο $e - p'$ καταστατικό επίπεδο (b)

Fig. 2 Projection of the Critical State Line of M31 Sand in the $q - p'$ stress plane (a) and in the $e - p'$ state diagram (b)



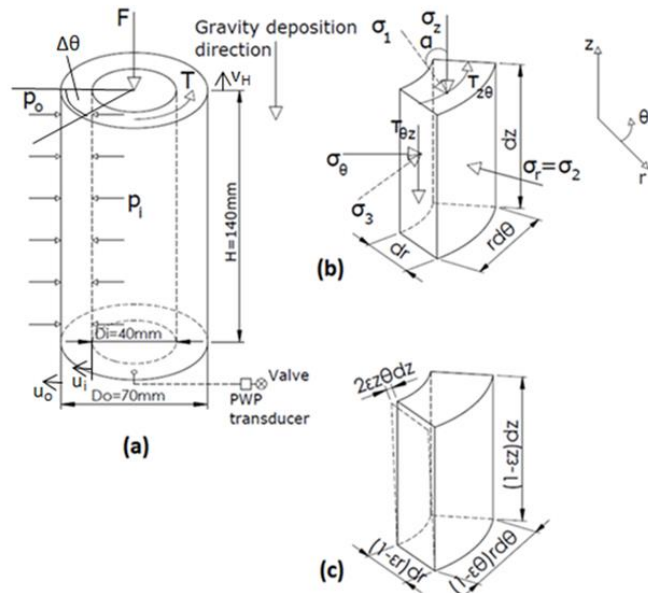
Σχ. 3 Λόγος τάσεων, η , σε συνάρτηση με την καταστατική παράμετρο, ψ , στο σημείο αλλαγής φάσης (a) και λόγος τάσεων, η , και λόγος διαστολικότητας, D , σε συνάρτηση με την καταστατική παράμετρο, ψ , στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας (b)

Fig. 3 Stress ratio, η , against the state parameter, ψ , at phase transformation point (a) and stress ratio, η , and dilatancy ratio, D , against the state parameter, ψ , at peak failure state (b)



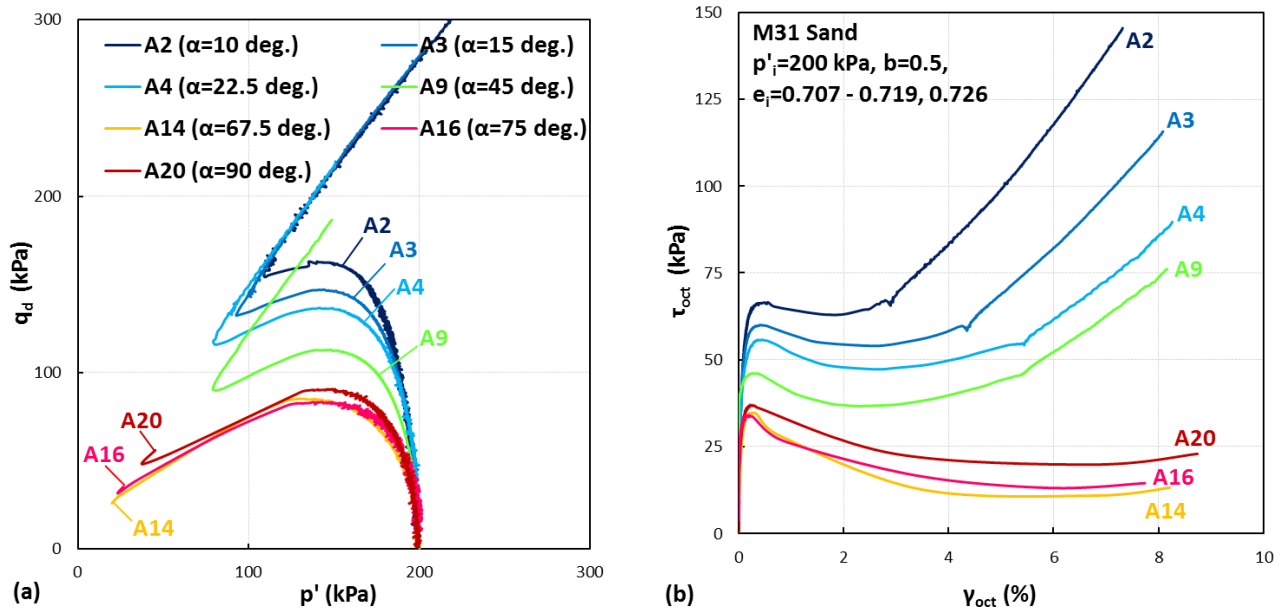
Σχ. 4 Σχέση λόγου τάσεων – διαστολικότητας, $\eta - D$, και εξέλιξη της καταστατικής παραμέτρου, ψ , σε συνάρτηση με τον λόγο διαστολικότητας, D , για χαλαρή (a) και πυκνή άμμο (b)

Fig. 4 Stress – dilatancy relationship, $\eta - D$, and evolution of state parameter, ψ , with the dilatancy ratio, D , for loose (a) and dense sand (b)



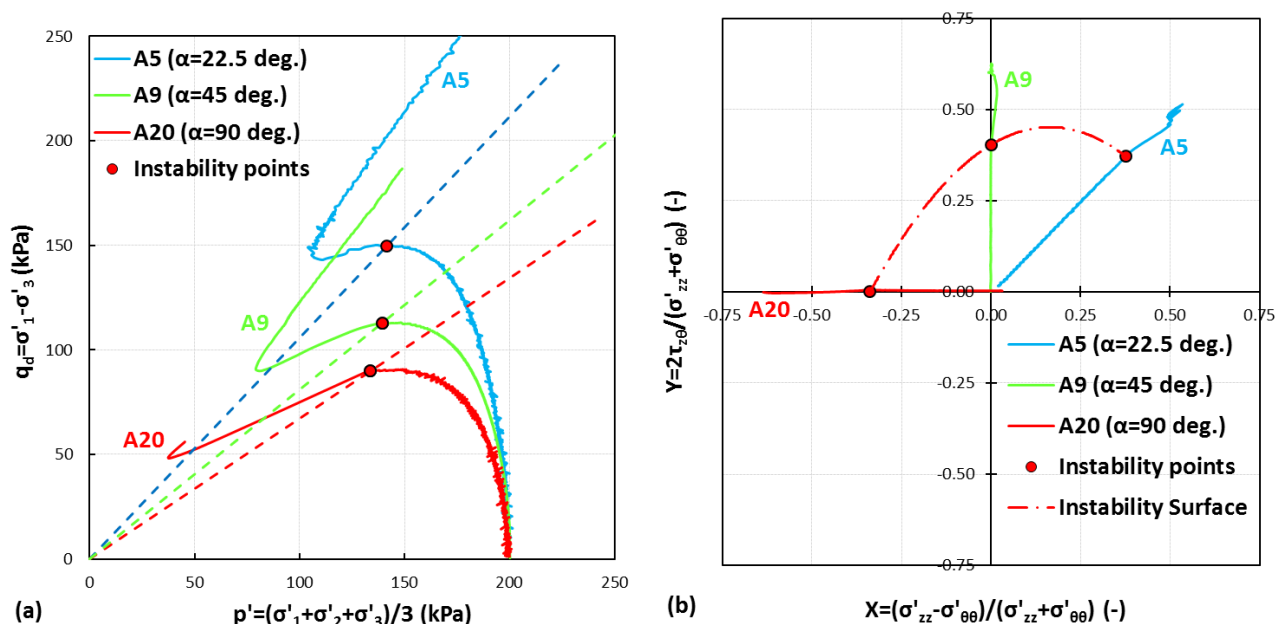
Σχ. 5 a Κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο και επιβαλλόμενα συνοριακά φορτία. **b** Συνιστώσες τάσεως στο μη παραμορφωμένο εδαφικό στοιχείο. **c** Συνιστώσες παραμορφώσεως αντιστοιχούσες σε συνδυασμό πολύ-αξονικής και στρεπτικής παραμόρφωσης

Fig. 5 a Hollow-cylinder specimen and applied boundary loads. **b** Stress components on the undeformed soil element. **c** Strain components associated with the combined multiaxial and torsional deformation



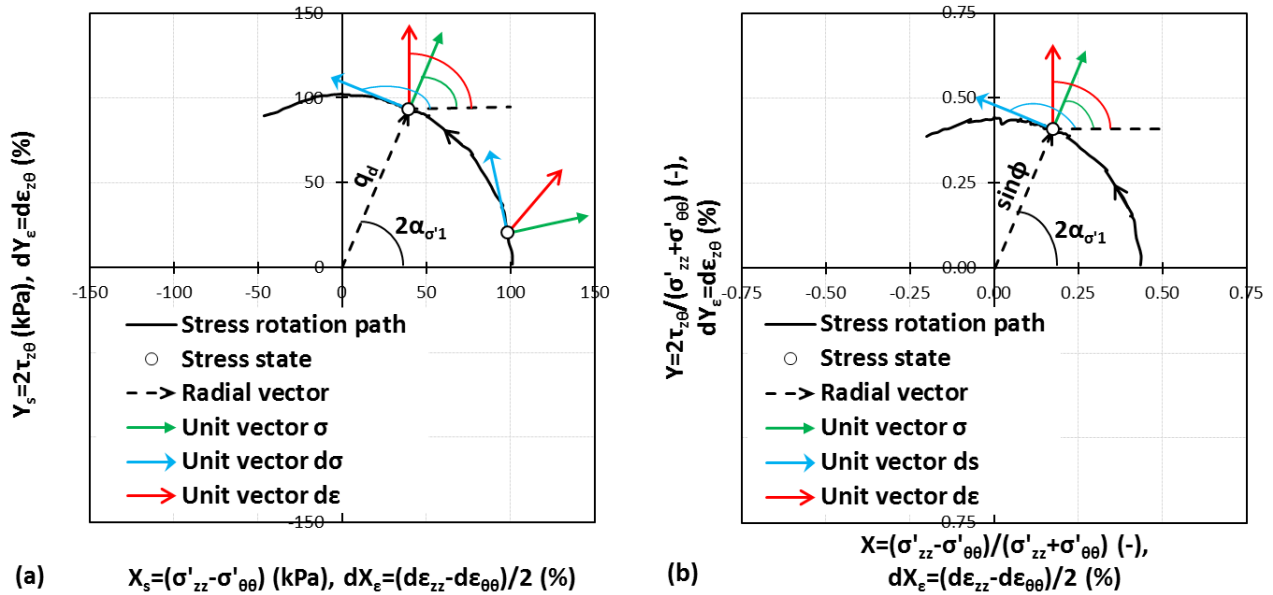
Σχ. 6 Απόκριση χαλαρής ισότροπα στερεοποιημένης άμμου σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με σταθερές α , b και p παραμέτρους **a** Ενεργές τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ επίπεδο. **b** Καμπύλες οκταεδρικής διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης ($\tau_{oct} - \gamma_{oct}$)

Fig. 6 Response of loose IC sand to monotonic undrained loading with constant α , b and p parameters **a** Effective stress paths in the $q_d - p'$ plane. **b** Octahedral shear stress – strain curves ($\tau_{oct} - \gamma_{oct}$)



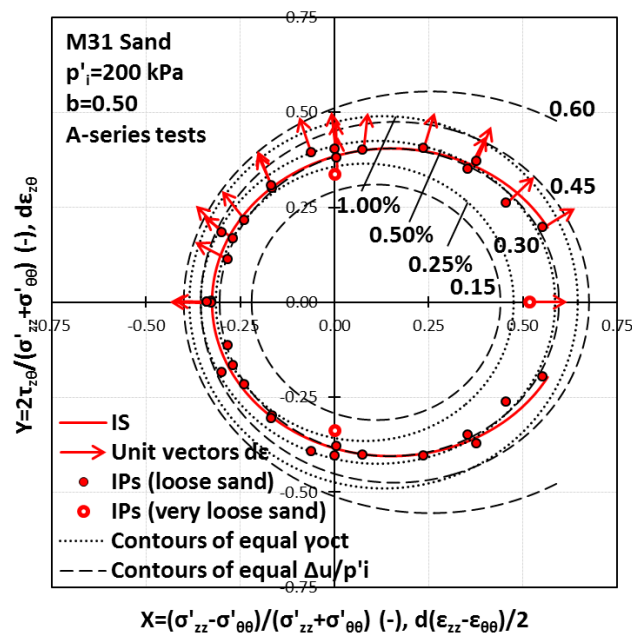
Σχ. 7 Ορισμός της Τοπικής Οριακής Επιφάνειας, των Γραμμών Αστάθειας και της Επιφάνειας Αστάθειας της χαλαρής ισότροπα στερεοποιημένης άμμου με τη βοήθεια των τασικών οδεύσεων **a** στο $q_d - p'$ επίπεδο και **b** στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 7 Definition of the Local Boundary Surface (Symes et al. 1984, Sibuya and Hight 1987), Instability Lines (Lade 1993) and Instability Surface (Triantafyllos et al. 2019) of loose isotropically consolidated sand by means of stress paths **a** in the $q_d - p'$ plane and **b** in the $Y - X$ plane



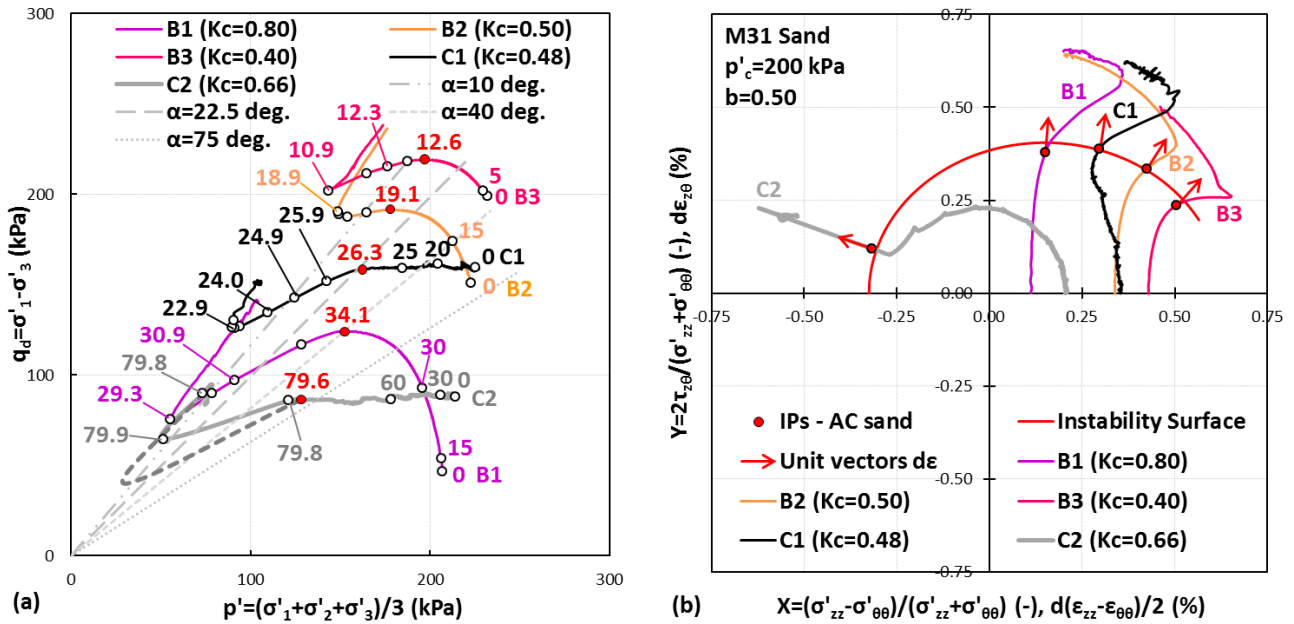
Σχ. 8 Τασική όδευση που σχετίζεται με στροφή των κύριων αξόνων τάσεως και κύριες κατευθύνσεις τάσεως, σ , προσαυξητικής τάσεως, $d\sigma$, και προσαυξητικής παραμορφώσεως, $d\epsilon$: **a** στο $Y_s - X_s$ επίπεδο και **b** στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 8 Stress path associated with rotation of the stress principal axes and principal directions of stress, σ , incremental stress, $d\sigma$, and incremental strain, $d\epsilon$: **a** in the $Y_s - X_s$ plane and **b** in the $Y - X$ plane



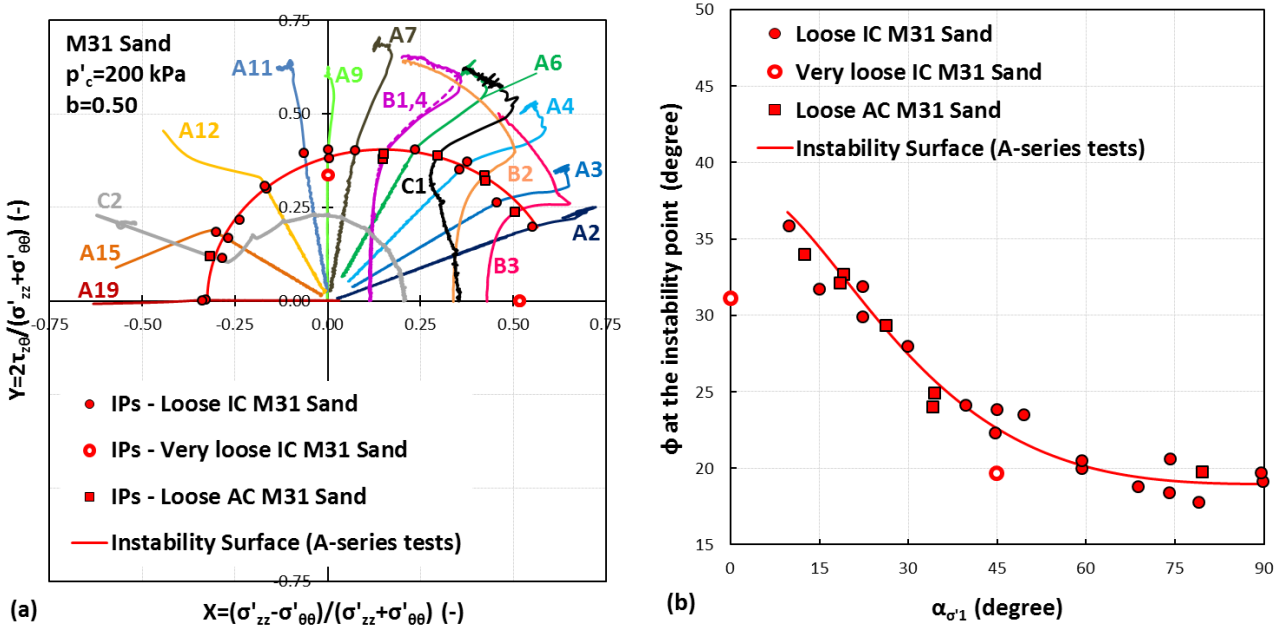
Σχ. 9 Επιφάνεια αστάθειας της χαλαρής ισότροπα στερεοποιημένης άμμου και περιγράμματα ίσων τιμών γ_{oct} και $\Delta u / p'_{in}$ κατά τη συστολική φάση απόκρισης στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 9 Instability surface (IS) of loose isotropically consolidated sand and contours of equal γ_{oct} and $\Delta u / p'_{in}$ during the contractive phase of response in the $Y - X$ plane



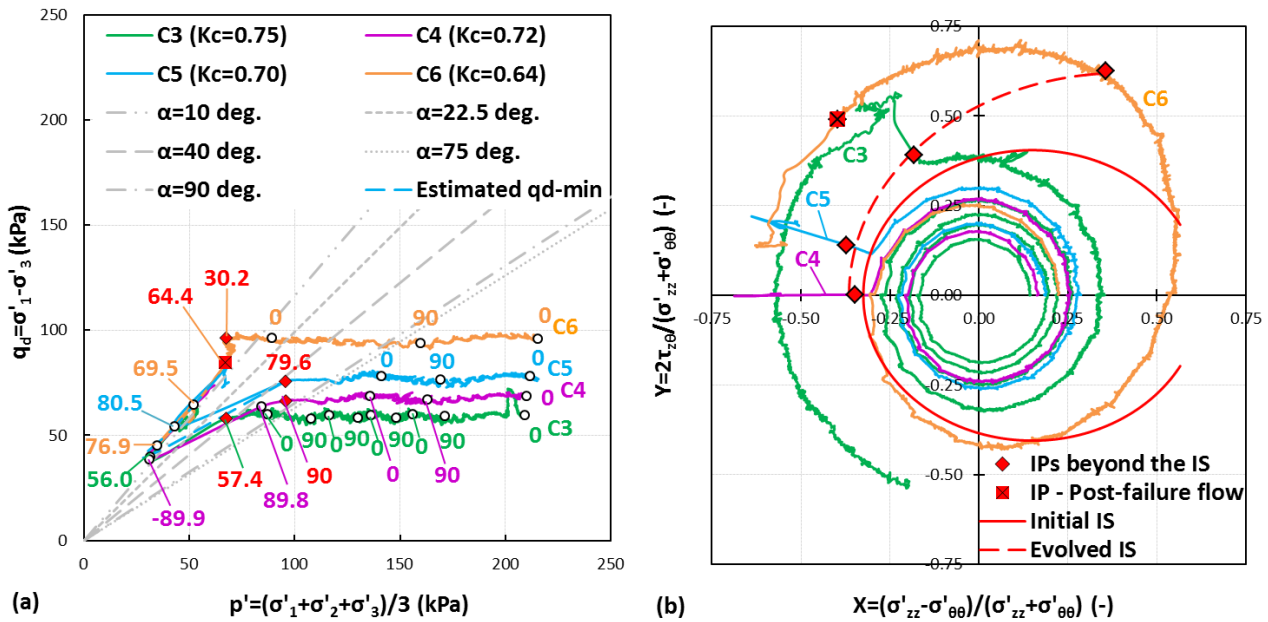
Σχ. 10 Απόκριση χαλαρής ανισότροπα στερεοποιημένης άμμου σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των κύριων αξόνων τάσεως και σταθερές b και p παραμέτρους. **a** Ενεργές τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ επίπεδο. **b** Τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 10 Response of loose AC sand to monotonic undrained loading with rotating stress principal axes and constant b and p parameters. **a** Effective stress paths in the $q_d - p'$ plane. **b** Stress paths in the $Y - X$ plane



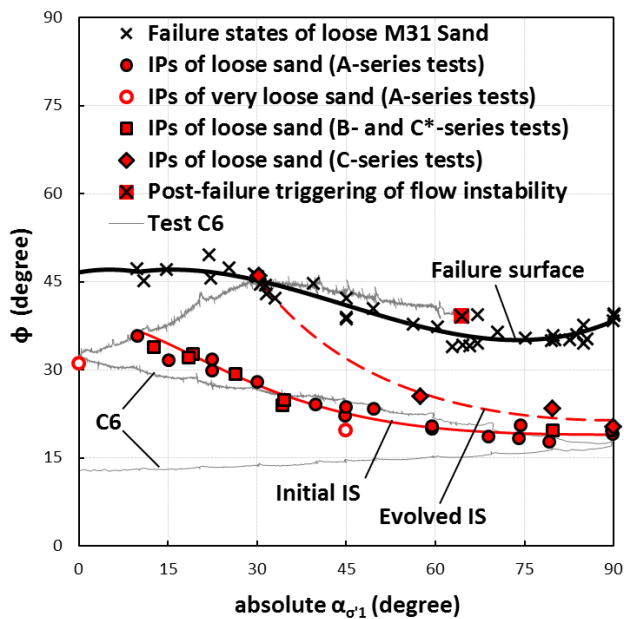
Σχ. 11 Σημεία αστάθειας χαλαρής άμμου για διαφορετικές ιστορίες στερεοποίησης και αστράγγιστη φόρτιση. **a** Σημεία αστάθειας και τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο. **b** Σημεία αστάθειας στο $\phi - \alpha_{\sigma'1}$ επίπεδο

Fig. 11 Instability points of loose sand for different histories of consolidation and undrained loading. **a** Instability points and stress paths in the $Y - X$ plane. **b** Instability points in the $\phi - \alpha_{\sigma'1}$ plane



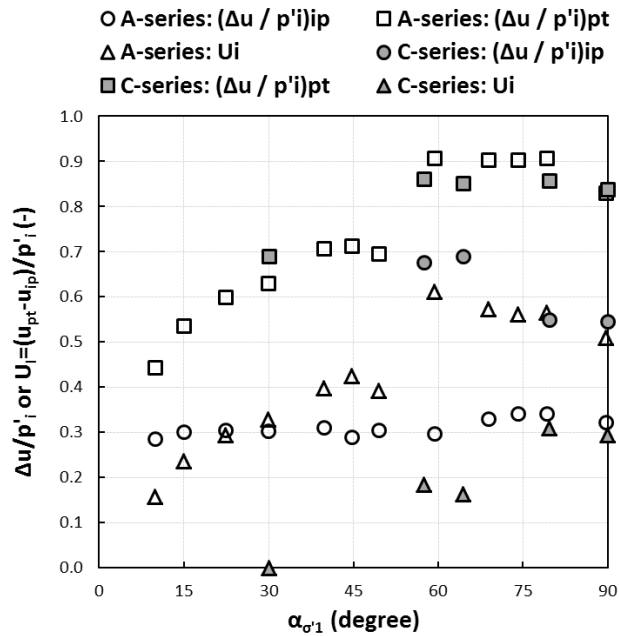
Σχ. 12 Απόκριση χαλαρής ανισότροπα στερεοποιημένης άμμου σε μονοτονική αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των κύριων αξόνων τάσεως και σταθερές q, p και b παραμέτρους. **a** Ενεργές τασικές οδεύσεις στο $q_d - p'$ επίπεδο. **b** Τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 12 Response of loose AC sand to monotonic undrained loading with rotating stress principal axes and constant q, p and b parameters. **a** Effective stress paths in the $q_d - p'$ plane. **b** Stress paths in the $Y - X$ plane



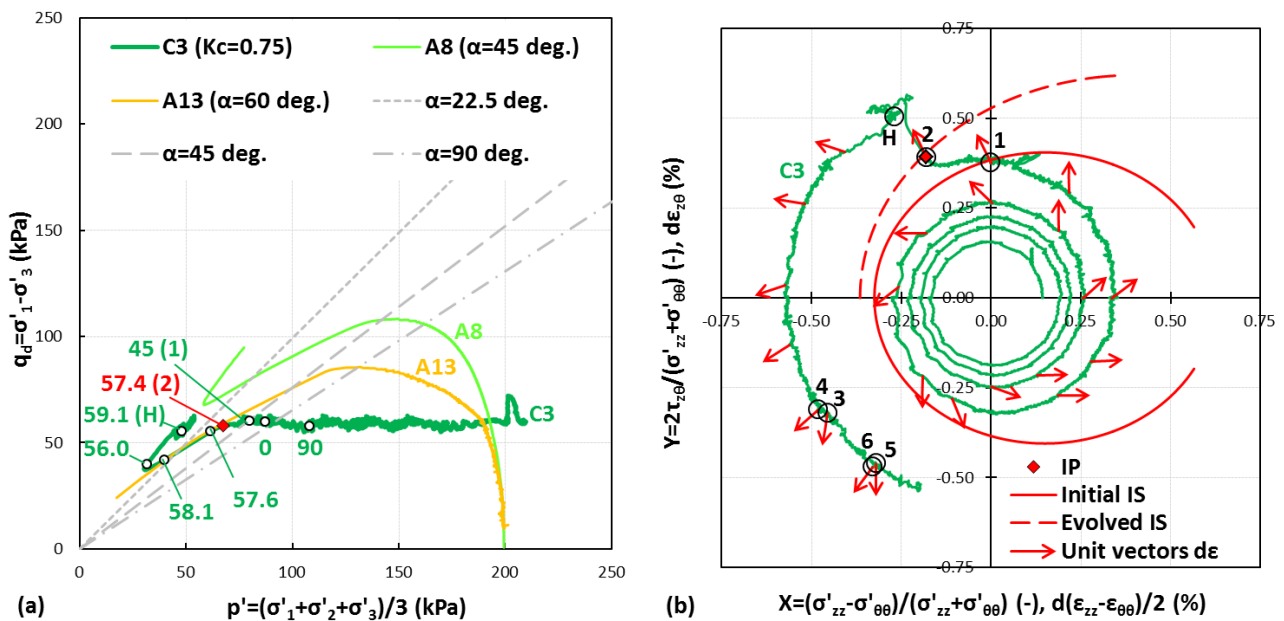
Σχ. 13 Επίδραση της ιστορίας τάσεων στη συνθήκη αστάθειας χαλαρής άμμου: γωνία διατμητικής αντίστασης, ϕ , σε συνάρτηση με τη γωνία κύριας κατεύθυνσης τάσεως, α_{σ_1} , στα σημεία αστάθειας και κορυφιαίας αστοχίας

Fig. 13 Stress history effects on the flow instability condition of loose sand: mobilised angle of shearing resistance, ϕ , against the principal stress direction angle, α_{σ_1} , at the instability and peak-failure states



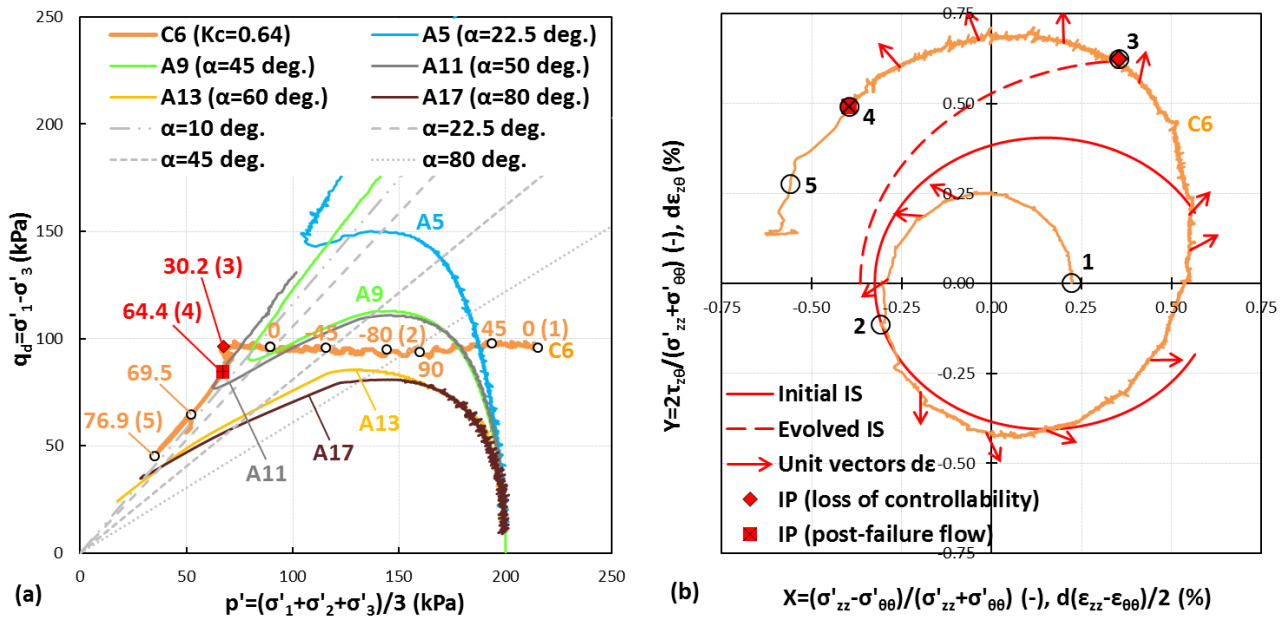
Σχ. 14 Επίδραση της ιστορίας παραμορφώσεων στη συνθήκη αστάθειας και στη συμπεριφορά της χαλαρής άμμου κατά τη μονότονη ρευστοποίηση: κανονικοποιημένη υπερπίεση του ύδατος πόρων, $\Delta u / p'_{in}$, και παράμετρος μονότονης ρευστοποίησης, U_l , σε συνάρτηση με τη γωνία κύριας κατεύθυνσης τάσεως, $\alpha_{\sigma'1}$, στα σημεία αστάθειας και αλλαγής φάσης

Fig. 14 Strain history effects on the triggering condition and deformation pattern of flow of loose sand: normalised excess pore-water pressure, $\Delta u / p'_{in}$, and flow parameter, U_l , against the principal stress direction angle, $\alpha_{\sigma'1}$, at the instability and phase-transformation points



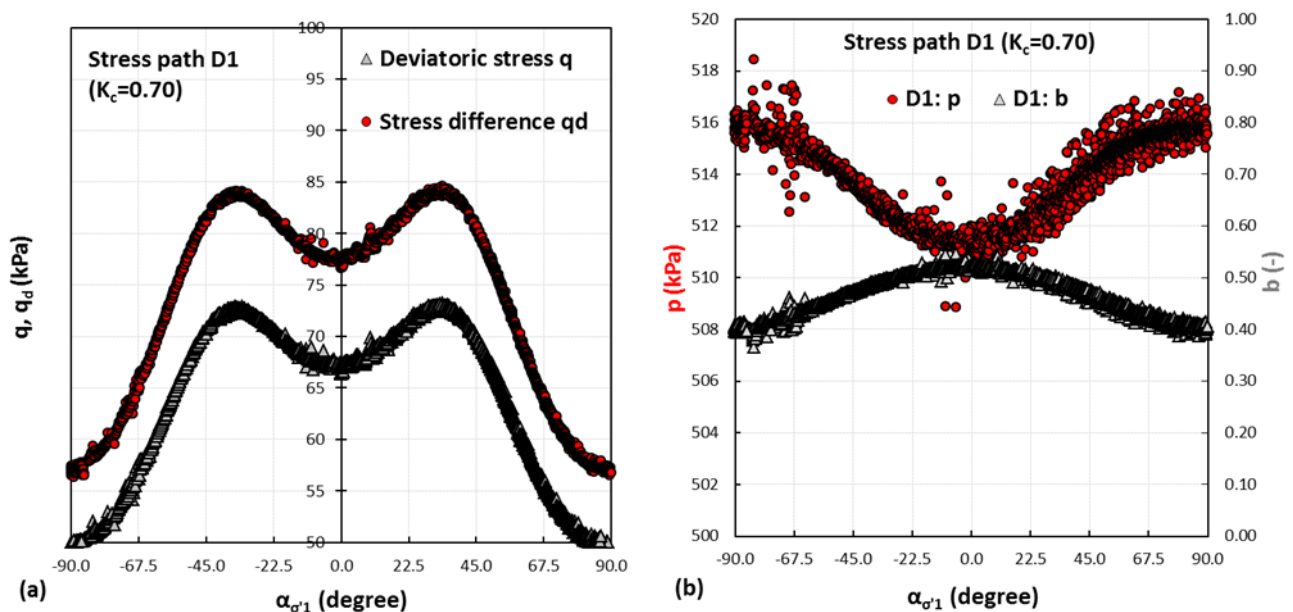
Σχ. 15 Τασική όδευση από τη δοκιμή C3: **a** στο $q_d - p'$ επίπεδο και **b** στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 15 Stress path from test C3: **a** in the $q_d - p'$ plane and **b** in the $Y - X$ plane



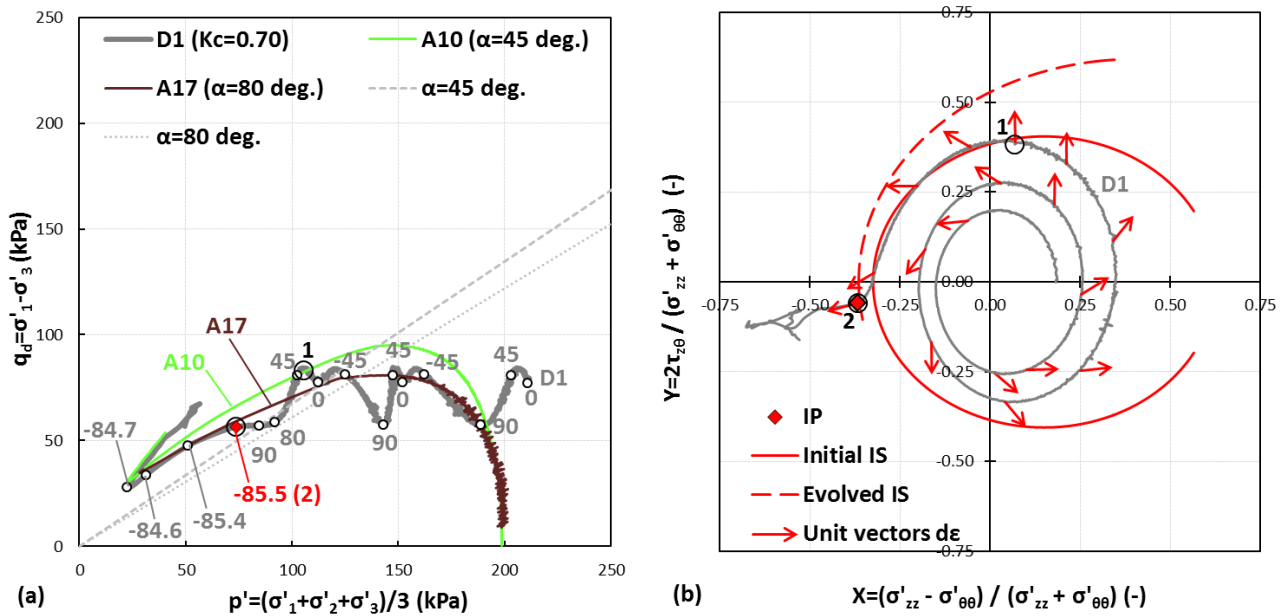
Σχ. 16 Τασική όδευση από τη δοκιμή C6: **a** στο $q_d - p'$ επίπεδο και **b** στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 16 Stress path from test C6: **a** in the $q_d - p'$ plane and **b** in the $Y - X$ plane



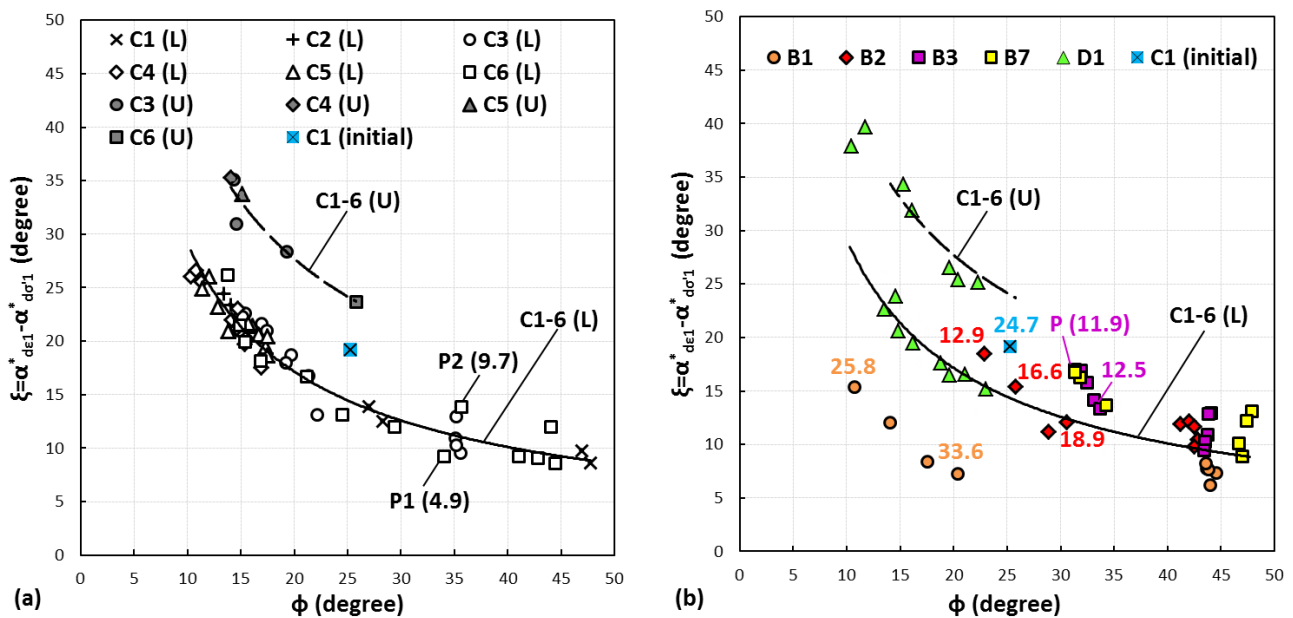
Σχ. 17 Χαρακτηριστικά της τασικής όδευσης D1. **a** Περιοδική μεταβολή των τάσεων q και q_d με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}$. **b** Περιοδική μεταβολή της τάσης p και της παραμέτρου b με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}$

Fig. 17 Characteristics of the stress path D1. **a** Periodic change of q and q_d with $\alpha_{\sigma'1}$. **b** Periodic change of p and b with $\alpha_{\sigma'1}$



Σχ. 18 Τασική όδευση από τη δοκιμή D1: **a** στο $q_d - p'$ επίπεδο και **b** στο $Y - X$ επίπεδο

Fig. 18 Stress path from test D1: **a** in the $q_d - p'$ plane and **b** in the $Y - X$ plane



Σχ. 19 Επίδραση της ιστορίας τάσεων – παραμορφώσεων στη μη ομοαξονική συμπεριφορά της άμμου υπό αστράγγιστη φόρτιση με στροφή των κύριων αξόνων τάσεως. **a** Σχέση μεταξύ των γωνιών ξ και ϕ στις δοκιμές τύπου C. **b** Σχέση μεταξύ των γωνιών ξ και ϕ στις δοκιμές τύπου B και στη δοκιμή D1

Fig. 19 Stress – strain history effects on the non-coaxiality of sand under undrained loading with rotation of the stress principal axes. **a** Relationship between the angles ξ and ϕ in the C-series tests. **b** Relationship between the angles ξ and ϕ in the B-series tests and in test D1

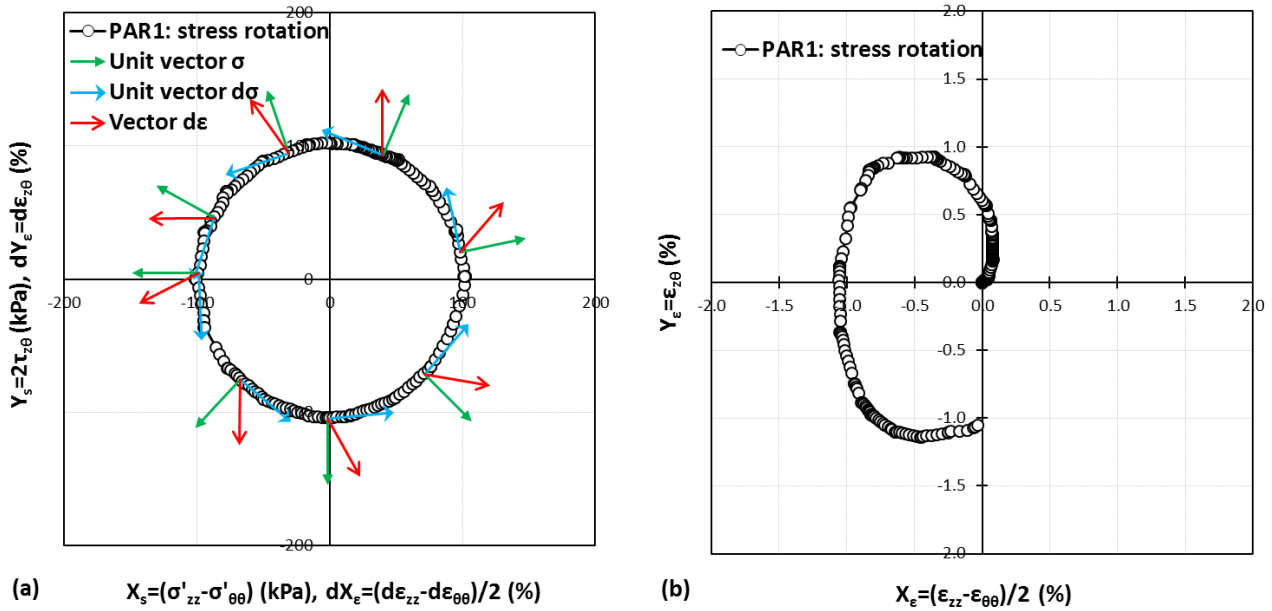


Fig. 20 Στροφή των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως στη δοκιμή PAR1 με $\eta = 1.01$, $b = 0$ και $p' = 100$ kPa. **a** Τασική όδευση στο $Y_s - X_s$ επίπεδο. **b** Όδευση παραμορφώσεως στο $Y_\varepsilon - X_\varepsilon$ επίπεδο

Fig. 20 Rotation of the stress principal axes at constant effective stress principal values in test PAR1 at $\eta = 1.01$, $b = 0$ and $p' = 100$ kPa. **a** Stress path in the $Y_s - X_s$ plane. **b** Strain path in the $Y_\varepsilon - X_\varepsilon$ plane

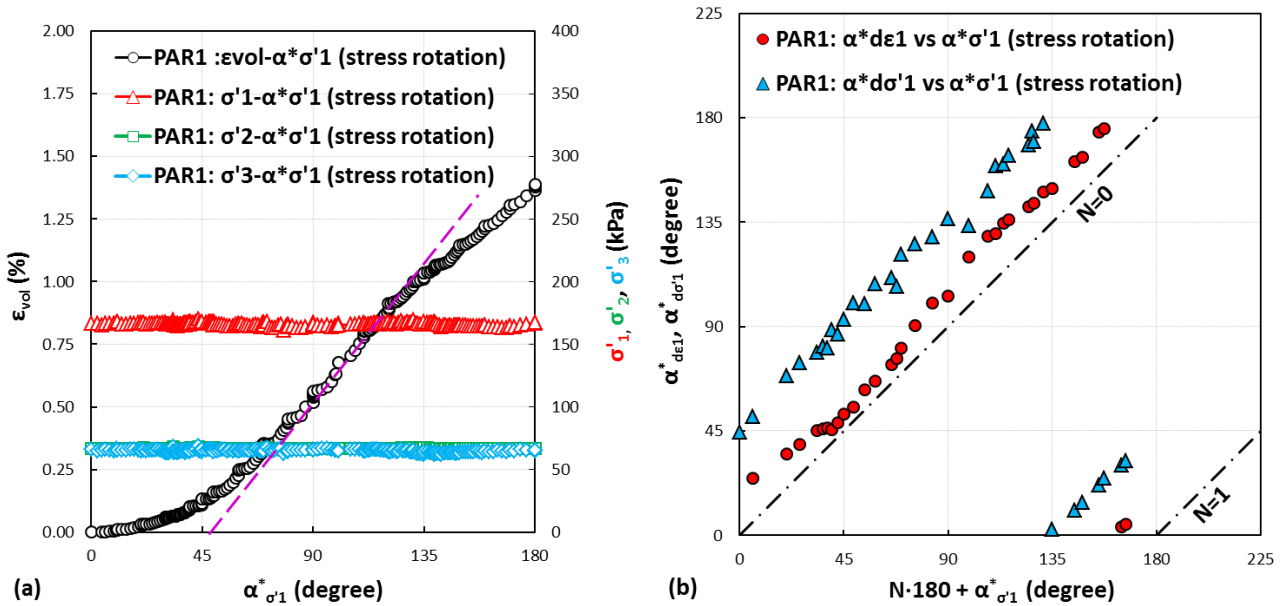


Fig. 21 Στροφή των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως στη δοκιμή PAR1 με $\eta = 1.01$, $b = 0$ και $p' = 100$ kPa. **a** Εξέλιξη των μεγεθών ε_{vol} , σ'_1 , σ'_2 και σ'_3 με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$. **b** Εξέλιξη των μεγεθών $\alpha^*_{d\varepsilon1}$ και $\alpha^*_{d\sigma'1}$ με τη γωνία $\alpha^*_{\sigma'1}$

Fig. 21 Rotation of the stress principal axes at constant effective stress principal values in test PAR1 at $\eta = 1.01$, $b = 0$ and $p' = 100$ kPa. **a** Evolution of ε_{vol} , σ'_1 , σ'_2 and σ'_3 with $\alpha^*_{\sigma'1}$. **b** Evolution of $\alpha^*_{d\varepsilon1}$ και $\alpha^*_{d\sigma'1}$ with $\alpha^*_{\sigma'1}$

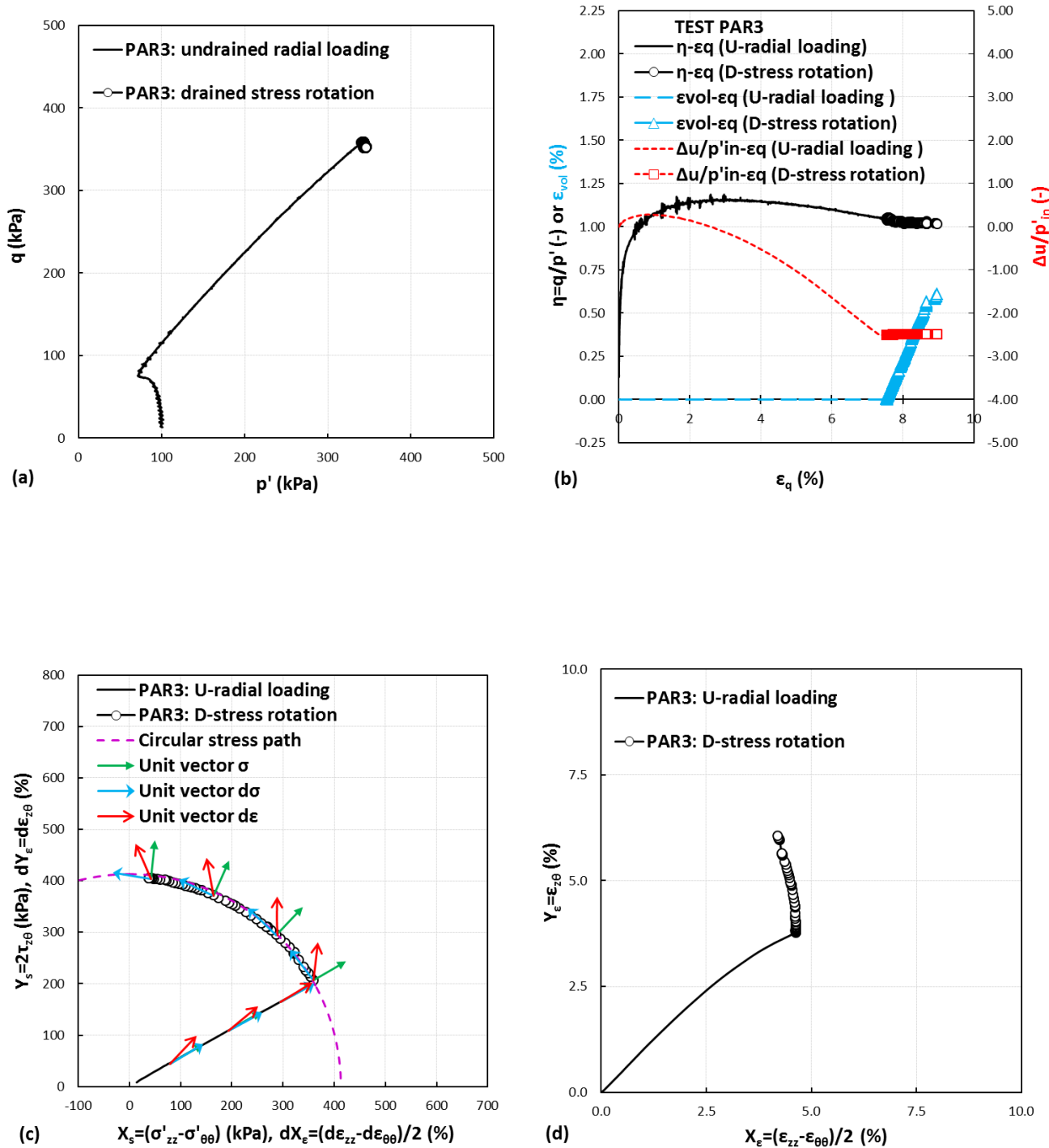


Fig. 22 Στροφή των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως στη δοκιμή PAR3 με $\eta = 1.05$, $b = 0.5$ και $p' = 343$ kPa. **a** Τασική όδευση στο $q-p'$ επίπεδο. **b** Εξέλιξη των μεγεθών η , ϵ_{vol} και $\Delta u/p'_i$ με την παραμόρφωση ϵ_q . **c** Τασική όδευση στο Y_s-X_s επίπεδο. **d** Όδευση παραμορφώσεως στο $Y_\epsilon-X_\epsilon$ επίπεδο

Fig. 22 Rotation of the stress principal axes at constant effective stress principal values in test PAR3 at $\eta = 1.05$, $b = 0.5$ and $p' = 343$ kPa. **a** Stress path in the $q-p'$ plane. **b** Evolution of η , ϵ_{vol} and $\Delta u/p'_i$ with ϵ_q . **c** Stress path in the Y_s-X_s plane. **d** Strain path in the $Y_\epsilon-X_\epsilon$ plane

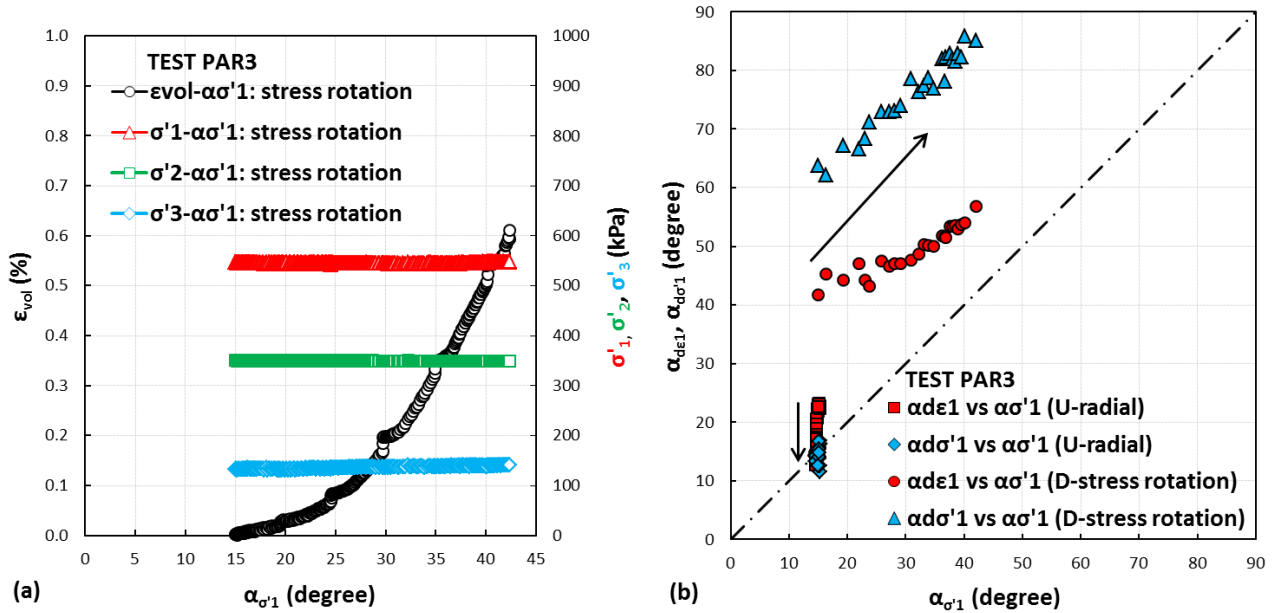
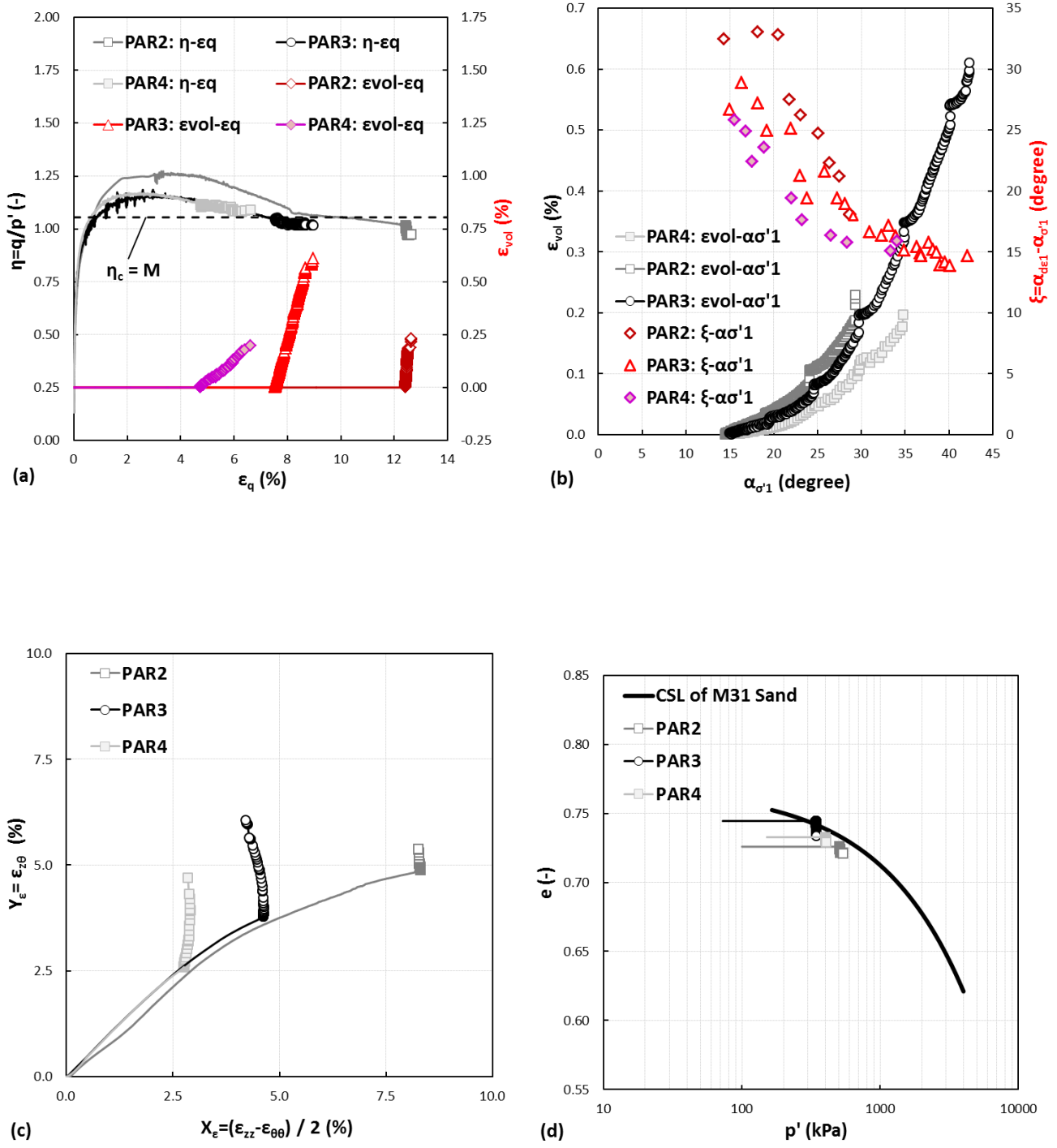


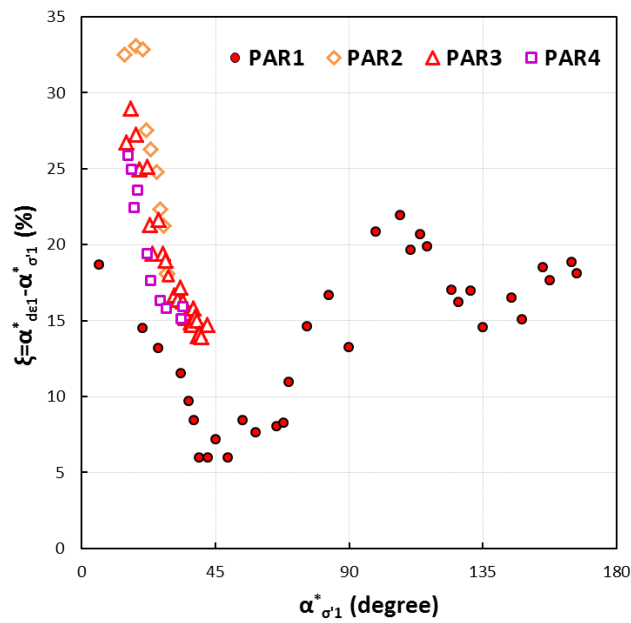
Fig. 23 Στροφή των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές τις ενεργές κύριες τιμές τάσεως στη δοκιμή PAR3 με $\eta = 1.05$, $b = 0.5$ και $p' = 343$ kPa. **a** Εξέλιξη των μεγεθών ϵ_{vol} , σ'_1 , σ'_2 και σ'_3 με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}^*$. **b** Εξέλιξη των μεγεθών $\alpha_{d\epsilon1}^*$ και $\alpha_{d\sigma'1}^*$ με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}^*$

Fig. 23 Rotation of the stress principal axes at constant effective stress principal values in test PAR3 at $\eta = 1.05$, $b = 0.5$ and $p' = 343$ kPa. **a** Evolution of ϵ_{vol} , σ'_1 , σ'_2 and σ'_3 with $\alpha_{\sigma'1}^*$. **b** Evolution of $\alpha_{d\epsilon1}^*$ και $\alpha_{d\sigma'1}^*$ with $\alpha_{\sigma'1}^*$



Σχ. 24 Επίδραση της ιστορίας τάσεων – παραμορφώσεων, πλησιάζοντας την κρίσιμη κατάσταση, στη διαστολικότητα και μη ομοαξονικότητα της άμμου κατά τη στροφή των κύριων αξόνων τάσεως. **a** Εξέλιξη των μεγεθών η και ϵ_{vol} με την παραμόρφωση ϵ_q . **b** Εξέλιξη των μεγεθών ϵ_{vol} και ζ με τη γωνία $\alpha_{\sigma'1}$. **c** Οδεύσεις παραμορφώσεως στο $Y_\epsilon - X_\epsilon$ επίπεδο. **d** Εξέλιξη της κατάστασης της άμμου στο $e - p'$ επίπεδο

Fig. 24 Stress – strain history effects, nearing critical state, on the dilatancy and non-coaxiality of sand during rotation of the stress principal axes. **a** Evolution of η and ϵ_{vol} with ϵ_q . **b** Evolution of ϵ_{vol} and ζ with $\alpha_{\sigma'1}$. **c** Strain paths in the $Y_\epsilon - X_\epsilon$ plane. **d** Evolution of the state of sand in the $e - p'$ plane



Σχ. 25 Επίδραση της ιστορίας τάσεων – παραμορφώσεων στη μη ομοαξονικότητα της άμμου κατά τη στροφή των κύριων αξόνων τάσεως με σταθερές ενεργές κύριες τιμές τάσεως: Εξέλιξη της γωνίας ζ με τη γωνία $\alpha_{\sigma_1}^*$

Σχ. 25 Stress – strain history effects on the non-coaxiality of sand under rotation of the stress principal axes at constant effective stress principal values: Evolution of the angle ζ with angle $\alpha_{\sigma_1}^*$

