



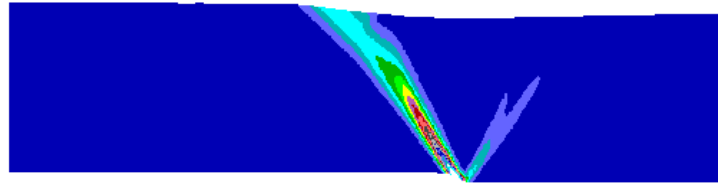
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ
ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ
ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ**

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΘΕΛΕΡΙΤΗ

Επιβλέπων: **Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου**, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



Diploma Thesis

**NUMERICAL SIMULATION OF THE FAULT
RUPTURE PROPAGATION THROUGH
ANISOTROPIC SOIL**

PARASKEVI THELERITI

Supervisor: **Achilleas G. Papadimitriou**, Assistant Professor NTUA

MΑΡΤΙΟΣ / ΜΑΡCH 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αχιλλέα Παπαδημητρίου, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την υπομονή και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μεταδιδάκτορα Γιάννη Χαλούλο, για την εποικοδομητική συνεργασία μας και τις πολύτιμες συμβουλές του που μου παρείχε τους τελευταίους μήνες.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα ακόμα να απευθύνω στις πολύ καλές μου φίλες από το Κιάτο που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν από καρδιάς όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε δύσκολη και εύκολη στιγμή.

Ένα εξίσου μεγάλο ευχαριστώ στους δικούς μου ξεχωριστούς ανθρώπους που γνώρισα και παρέμειναν δίπλα μου κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, για την υποστήριξή τους και την αληθινή φιλία που χτίσαμε μαζί αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη τους και την αστείρευτη δύναμη που μου παρέχουν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνεί την διάδοση διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω ανισοτροπικής άμμου. Η διερεύνηση γίνεται με τη χρήση ενός νέου σοφιστευμένου ελαστο-πλαστικού προσομοιώματος SANISAND που λαμβάνει υπόψη την εξελισσόμενη ανισοτροπία δομής των κόκκων της άμμου, μετά από επιτυχή σύγκριση με τις μετρήσεις ενός πειράματος φυγοκεντρική για διάρρηξη κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης πάχους 20m. Η ανάγκη χρήση ενός τέτοιου σοφιστευμένου προσομοιώματος υπογραμμίζεται από προκαταρκτικές αναλύσεις με απλουστευμένο προσομοίωμα (ελαστο-πλαστικό με χαλάρωση) που υποδεικνύουν ικανοποιητική ακρίβεια, αλλά χρειάζονται αναβαθμονόμηση προκειμένου να διατηρηθεί η ακρίβεια για αλλαγή στο πάχος της στρώσης, ή σε βασικές παραμέτρους του εδάφους (π.χ. σχετική πυκνότητα).

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την επίδραση της σχετικής πυκνότητας της άμμου, σε διαρρήξεις κανονικών, ανάστροφων και «κατακόρυφων» ρηγμάτων. Μεταξύ άλλων, οι αναλύσεις αυτές επιβεβαίωσαν ότι οι μετατοπίσεις ρήγματος που χρειάζονται για την ανάδυση της διάρρηξης είναι μικρές για κανονικά ρήγματα, μεγάλες για ανάστροφα και ενδιάμεσες για τα κατακόρυφα. Αυτή η διαφορά αποδόθηκε στην αντίστοιχη διαφορά στη αναγκαία μετατόπιση τοίχου αντιστήριξης για αστοχία κατά Rankine σε ενεργητική και παθητική κατάσταση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Επιπλέον προέκυψε ότι όσο μικραίνει η σχετική πυκνότητα της άμμου, τόσο μεγαλώνει η αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια, και τόσο η διάρρηξη μετατοπίζεται προς το σταθερό και το κινούμενο τέμαχος, για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, αντίστοιχα. Τέλος βρέθηκε ότι όσο μικραίνει η σχετική πυκνότητα της άμμου, τόσο ρηχαίνει και γίνεται ευρύτερο το κατακρήμνισμα στα κανονικά ρήγματα. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, η επίδραση του τύπου του ρήγματος είναι πιο σημαντική από την επίδραση της σχετικής πυκνότητας.

Πιο σημαντικά, διερευνήθηκε η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της δομής στη διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης, με την έμφαση να δίδεται στην επίδραση της αρχικής μικρο-δομής, θεωρώντας ως «οριζόντια» δομή αυτή που δημιουργείται από τη βαρύτητα, και ως «κατακόρυφη» δομή εκείνη που προκύπτει αν περιστραφεί η «οριζόντια» δομή κατά 90°. Με βάση τις συγκρίσεις για

τις 2 διαφορετικές κατευθύνσεις της δομής, προέκυψε ότι στο «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμμική με τη διεύθυνση της οριζόντιας μικρο-δομής, με αποτέλεσμα μια τέτοια μικρο-δομή να είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Αντίστοιχα, στα «κατακόρυφα» ρήγματα, το τασικό πεδίο είναι μορφής απλής διάτμησης, και συνεπώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή βρίσκονται το ίδιο κοντά (ή μακριά) από την Κρίσιμη Κατάσταση. Ως αποτέλεσμα αυτού, η διάρρηξη ενός κανονικού ρήγματος χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση στο υπόβαθρο για να αναδυθεί στην επιφάνεια μιας άμμου με κατακόρυφη δομή, συγκριτικά με ό,τι χρειάζεται σε μια άμμο με οριζόντια δομή. Το αντίθετο συμβαίνει για τη διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος, ενώ σε κατακόρυφα ρήγματα η θεώρηση οριζόντιας ή κατακόρυφης δομής δεν επηρεάζει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης.

Επιπλέον, ποιοτικά, μία άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή σχετικά μικρότερης πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος. Για κατακόρυφα ρήγματα, η θεώρηση οριζόντιας ή κατακόρυφης δομής δεν αλλάζει τη μορφή της διάρρηξης, ουσιαστικά. Ποσοτικά, η επίδραση αυτή είναι πρακτικώς ισοδύναμη με μεταβολή της σχετικής πυκνότητας κατά $\pm (20-30)\%$, για την ακραία μεταβολή της κατεύθυνσης της μικρο-δομής που θεωρήθηκε, και άρα μικρότερη για πιο φυσιολογικές μεταβολές της μικρο-δομής.

Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια, δε συνεπάγεται Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος της διάρρηξης. Το να επιτευχθεί Κρίσιμη Κατάσταση σε ολόκληρο το μήκος της διάρρηξης χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος.

ABSTRACT

This thesis investigates the active fault rupture propagation through anisotropic sand. The investigation is performed by using a new elasto-plastic constitutive model called SANISAND, which takes into account the evolving fabric anisotropy. It is enabled after successful comparison of finite difference numerical results with the measurements of a centrifuge experiment for normal fault rupture propagation through a 20m sand layer. The need for using such a sophisticated model is dictated by preliminary analyses with a simplified model (elasto-plastic with strain softening). Such models may offer satisfactory accuracy, but also require recalibration in order to maintain this accuracy for a change in the thickness of the layer, or other basic soil parameters (e.g. relative density).

In addition, parametric analyses were performed in order to investigate the effect of the relative density of the sand in normal, reverse and “vertical” faults ruptures. These analyses confirm that the fault displacement needed for rupture surfacing is small for normal faults, large for the reverse ones and intermediate for “vertical” faults. This difference is similar to the difference in the required retaining wall movement for active and passive Rankine failure under drained conditions. Moreover, it is shown that the lower the relative density of the sand, the larger the required fault displacement for rupture surfacing, and the greater the shifting of the rupture towards the stationary and the moving block, for normal and reverse faults respectively. Finally, it is found that as the relative density of the sand decreases on top of normal faults, the graben at the ground surface becomes shallower and wider. However, in general, the effect of the fault type is more important than the effect of the relative density for the problem of rupture propagation.

More importantly, an investigation of the effect of evolving sand fabric anisotropy on the fault rupture propagation process was investigated. The emphasis was set on the effect of the initial fabric, considering as “horizontal” fabric the one that is created by gravity, and “vertical” the fabric that results by rotating the “horizontal” fabric by 90°. Based on the comparison of numerical results for these two different fabric directions, it is shown that the “extensional” stress field in normal fault rupture, the loading direction is collinear with the direction of the horizontal fabric and as a result such a fabric is closer to Critical State, while the opposite occurs in reverse fault rupture

where a “compressional” stress field is applied. Similarly, in the "vertical" fault rupture, the stress field is reminiscent of simple shear loading, and therefore the horizontal and the vertical fabrics are similarly close (or far) from the Critical State. As a result, the rupture of a normal fault needs larger fault displacement for rupture surfacing when the sand has a vertical fabric, in comparison to what is required when it has a horizontal fabric. The opposite is true for a reverse fault rupture, while for “vertical” faults, sands with “horizontal” or “vertical” fabrics require the same fault displacement for rupture surfacing.

Moreover, qualitatively, a sand with “vertical” fabric behaves like a sand with “horizontal” fabric of lower density, when subjected to normal fault rupture conditions, while the opposite is true for reverse fault rupture conditions. For “vertical” faults, whether the fabric is “horizontal” or “vertical” does not essentially affect the rupturing process. Quantitatively, this effect is practically equivalent to a change of the relative density by $\pm (20-30)\%$, for the extreme change in the direction of the fabric that was considered herein, and thus it is expected less intense for more realistic differences in the initial sand fabric.

Finally, it is underlined here that rupture surfacing does not imply Critical State conditions all along the rupture, since to attain Critical State throughout the entire length of the rupture requires considerably larger fault displacement.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Πειραματικές διερευνήσεις της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης	3
2.2 Αριθμητικές διερευνήσεις της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΟΦΙΣΤΕΥΜΕΝΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Αρχές προσομοιώματος SANISAND	19
3.2.1 Γενικά.....	19
3.2.2 Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής A	20
3.2.3 Επίδραση του A στη διαστολικότητα	22
3.2.4 Ακρίβεια SANISAND στην προσομοίωση	24
3.3 Προσομοίωση δοκιμής φυγοκεντριστή για διάδοση διάρρηξη ρήγματος.....	25
3.3.1 Διάταξη πειράματος και αριθμητική προσομοίωση	25
3.3.2 Διερεύνηση αξιοπιστίας 2Δ προσομοίωσης	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΡΗΣΕΩΣ ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή	31
--------------------	----

4.2 Επίδραση βαθμονόμησης ελαστικής δυσκαμψίας E με το βάθος	32
4.2.1 Δοκιμές εδαφικού στοιχείου	32
4.2.2 Ανάλυση της διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος.....	35
4.3 Επίδραση βαθμονόμησης διαστολικότητας και χαλάρωσης	37
4.3.1 Δοκιμές εδαφικού στοιχείου	37
4.3.2 Ανάλυση της διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΛΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή	43
5.2 Διάδοση διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων (γωνίας 45°).....	45
5.3 Διάδοση διάρρηξης ανάστροφων ρηγμάτων (γωνίας 135°)	48
5.4 Διάδοση διάρρηξης «κατακόρυφων» ρηγμάτων (γωνίας 85°).....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΛΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή	57
6.2 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω χαλαρής άμμου (Dr = 20%).....	58
6.2.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)	58
6.2.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$).....	62
6.2.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$).....	67
6.3 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω άμμου μέσης πυκνότητας (Dr = 50%) ..	72
6.3.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)	72
6.3.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$).....	76
6.3.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$).....	81

6.4 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω πυκνής άμμου ($D_r = 80\%$)	86
6.4.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)	86
6.4.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$)	91
6.4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$)	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα	101
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Το φαινόμενο της διάδοσης της διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα που έχει απασχολήσει τους μηχανικούς ήδη από την δεκαετία του 1970. Η συμπεριφορά των διαρρήξεων των ρηγμάτων εντός της εδαφικής στρώσης είναι βασικός παράγοντας για το σχεδιασμό κρίσιμων κατασκευών που συνορεύουν με περιοχές ενεργών ρηγμάτων. Έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες έρευνες ότι η θέση ανάδυσης της διάρρηξης και η προκαλούμενη παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους ποικίλει ανάλογα με το πάχος και τον τύπο (συνεκτικό ή μη-συνεκτικό) και την ιστορία φόρτισης (προστερεοποίηση, πυκνότητα) του εδάφους. Η σχετική βιβλιογραφία εμπεριέχει παρατηρήσεις πεδίου, πειράματα υπό κλίμακα και αριθμητικές προσομοιώσεις. Παρά το εύρος τη σχετικής βιβλιογραφίας, το συγκεκριμένο θέμα εξακολουθεί να μελετάται διεθνώς, δεδομένης της διακινδύνευσης που προκαλεί στα δομικά έργα και τα έργα υποδομής (π.χ. θεμελιώσεις γεφυρών, φράγματα, υπόγειοι αγωγοί). Ως επί το πλείστον, οι αριθμητικές διερευνήσεις του φαινομένου γίνονται στη βιβλιογραφία με απλουστευμένα προσομοιώματα (π.χ. ελαστο-πλαστικό με χαλάρωση) που δεν προσομοιώνουν με ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών. Έτσι λοιπόν, στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης, με χρήση ενός σοφιστευμένου προσομοιώματος που λαμβάνει υπόψη και την εξελισσόμενη ανισοτροπία του εδάφους και συνεπώς περιγράφει με ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά του.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αναφορά σε υπάρχουσες βιβλιογραφικές διερευνήσεις που έχουν υλοποιηθεί για την διάδοση διάρρηξης μέσω εδάφους. Η βιβλιογραφική έρευνα αφορά τόσο σε πειράματα υπό κλίμακα, όσο και σε αριθμητικές προσομοιώσεις, και επικεντρώνεται σε διερευνήσεις χωρίς ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι αρχές του σοφιστευμένου προσομοιώματος SANISAND που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και η ακρίβειά του στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου. Επίσης, παρουσιάζεται η προσομοίωση μιας δοκιμής φυγοκεντρική για τη διάδοση διάρρηξης ρήγματος με το εν λόγω προσομοίωμα, ως μέσο για τη διακρίβωση αξιοπιστίας της αριθμητικής μεθοδολογίας.

Ακολουθεί το **Κεφάλαιο 4**, όπου εξετάζεται η επίδραση της χρήσης απλουστευμένου προσομοιώματος για την διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση αυτή μελετάται τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε επίπεδο συστήματος, με αναφορά στη δοκιμή φυγοκεντρική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η διερεύνηση επικεντρώνεται στην επίδραση της βαθμονόμησης της ελαστικής δυσκαμψίας E με το βάθος, καθώς και στην επίδραση βαθμονόμησης της διαστολικότητας και χαλάρωσης.

Αργότερα, στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται αναφορά στην προσομοίωση της διάδοσης διάρρηξης ρηγμάτων διαφορετικών τύπων μέσω αμμώδους στρώσης διαφορετικών πυκνοτήτων, με χρήση του σοφιστευμένου προσομοιώματος SANISAND. Ειδικότερα, εξετάζονται παραμετρικά οι διαρρήξεις κανονικών, ανάστροφων και «κατακόρυφων» ρηγμάτων μέσω αμμώδους στρώσης σχετικών πυκνοτήτων $D_r=20\%$, 50% και 80% .

Στο **Κεφάλαιο 6** μελετήθηκε η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της άμμου στη διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται και πάλι το σοφιστευμένο προσομοίωμα SANISAND, και συγκρίνονται οι προβλέψεις για τη διάδοση διάρρηξης για δύο έντονα διαφορετικές δομές της άμμου, μια όπως προκύπτει με τη βαρύτητα (οριζόντια δομή) και τη δομή που προκύπτει αν η οριζόντια δομή περισταφεί κατά 90° (κατακόρυφη δομή). Στην πράξη, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5 (που αντιστοιχούν σε οριζόντια δομή), με τα νέα που αφορούν στην κατακόρυφη δομή κόκκων.

Η εργασία ολοκληρώνεται στο **Κεφάλαιο 7** με τα συμπεράσματα και τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο. Υπογραμμίζεται η ύπαρξη **Παραρτήματος** με τα αναλυτικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις των Κεφαλαίων 5 και 6.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Πειραματικές διερευνήσεις της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης

Ιστορικά μία από τις πρώτες σχετικές πειραματικές διερευνήσεις ήταν του Sanford (1959), ο οποίος διερεύνησε πειραματικά τη διάδοση της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος σε μια ιζηματογενή εδαφική στρώση υπό κλίμακα. Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποίησε τέσσερα (4) διαφορετικά εδάφη: (1) άμμο θαλάσσης, (2) μείγμα 85% άμμου και 15% αργίλου, (3) χονδρόκοκκη άμμο και (4) λεπτόκοκκη άμμο. Το πάχος (H) της εδαφικής στρώσης στο προσομοίωμα του πειράματος που ταυτίζεται με το πραγματικό πάχος εδάφους στο πεδίο για πειράματα 1g, κυμαίνονταν από 2.5 cm έως 10 cm, ενώ οι παράμετροι αντοχής εκτιμήθηκαν πειραματικά ως $c' < 0.15$ kPa και $\phi' = 45^\circ$ έως 58° . Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη πειραματική διερεύνηση ήταν αρχικά η μείωση της γωνίας της διάρρηξης καθώς αυτή προσέγγιζε την επιφάνεια. Επιπλέον, με μείωση του πάχους της εδαφικής στρώσης παρατηρήθηκε αντίστοιχη μείωση της γωνίας διάρρηξης, ενώ για τα περισσότερα συνεκτικά εδάφη εμφανίστηκαν εφελκυστικές ρωγμές στην επιφάνεια της στρώσης και μάλιστα αρκετά πριν εμφανιστεί η διάρρηξη στην επιφάνεια. Αντιθέτως, τα μη συνεκτικά εδάφη δεν εμφάνισαν τέτοιου είδους ρωγμές, ενώ στην περίπτωση της χονδρόκοκκης άμμου η διάρρηξη δεν εμφανίστηκε καθόλου στην επιφάνεια.

Παρόμοια αποτελέσματα εξήχθησαν και από τους Friedman et al (1976), οι οποίοι προσομοίωσαν τη διάδοση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος σε στρώσεις ψαμμίτη και ασβεστόλιθου. Οι εξεταζόμενες κλίσεις του ρήγματος κυμαίνονταν από 30° έως 90° , ενώ το πάχος της εδαφικής στρώσης τόσο του πειράματος όσο και του πεδίου δεν ξεπερνούσε το 1cm. Για να εξαλείψουν την επίδραση της μικρής κλίμακας του προσομοιώματος επέβαλλαν τεχνητώς μια «γεωστατική» τάση άνω των 200 kPa. Από το σύνολο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε η σταδιακή μείωση της γωνίας διάρρηξης κατά την διάδοσή του προς την επιφάνεια με κλίση προς το σταθερό τέμαχος της πειραματικής συσκευής. Επιπλέον, η μετακίνηση της εδαφικής στρώσης που απαιτήθηκε ώστε η διάρρηξη να εμφανιστεί στην επιφάνεια ήταν της

τάξης του 15% έως 20% του πάχους του προσομοιώματος, ενώ για επιβολή επιπλέον μετακίνησης παρατηρήθηκε δευτερεύουσα ρωγμή στο μετακινούμενο τέμαχος. Τέλος, στην επιφάνεια παρατηρήθηκαν μικρές εφελκυστικές ρωγμές και μάλιστα πολύ πριν αναδυθεί η κύρια διάρρηξη.

Με τα κανονικά ρήγματα της Βόρειας θάλασσας ασχολήθηκε ο Horsfield (1977), διεξάγοντας μια σειρά πειραμάτων προκειμένου να διερευνήσει την αλληλεπίδραση της μορφής, της γεωμετρίας αλλά και της θέσης των διαρρήξεων που εμφανίζονται στην επιφάνεια με μετακινήσεις βαθύτερων ρηγμάτων. Το υποθαλάσσιο έδαφος το προσομοίωσε με μία μέσης πυκνότητας άμμο ($e \approx 0.67$) και λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα κλίμακας χρησιμοποίησε άμμο με συνοχή c της τάξης των 0.25 kPa. Εφαρμόζοντας ένα εύρος τιμών της γωνίας β του επιπέδου του ρήγματος (από 30° έως 90°), συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα μεταξύ χαμηλών και υψηλών επιπέδων επιβαλλόμενης μετατόπισης αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας διάδοσης της διάρρηξης καθώς αυτό προσέγγιζε την επιφάνεια της στρώσης, κάτι αναμενόμενο για κανονικά ρήγματα. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα, εμφανιζόταν ως φαινομενικά «ανάστροφο» ρήγμα λόγω της μορφής που λάμβανε η επιφάνεια του εδάφους στο προσομοίωμα. Τέλος, στα υψηλότερα επίπεδα μετατοπίσεων οι διαρρήξεις ήταν πιο ευδιάκριτες με ξεκάθαρες κλίσεις για τις διάφορες γωνίες β του ρήγματος, ενώ στις περιπτώσεις πιο μικρών γωνιών ρήγματος β (30° και 60°) εμφανίστηκε επιπλέον μία δευτερεύουσα διάρρηξη που σχημάτισε ένα κατακρήμνισμα (τάφρο) με την κύρια διάρρηξη.

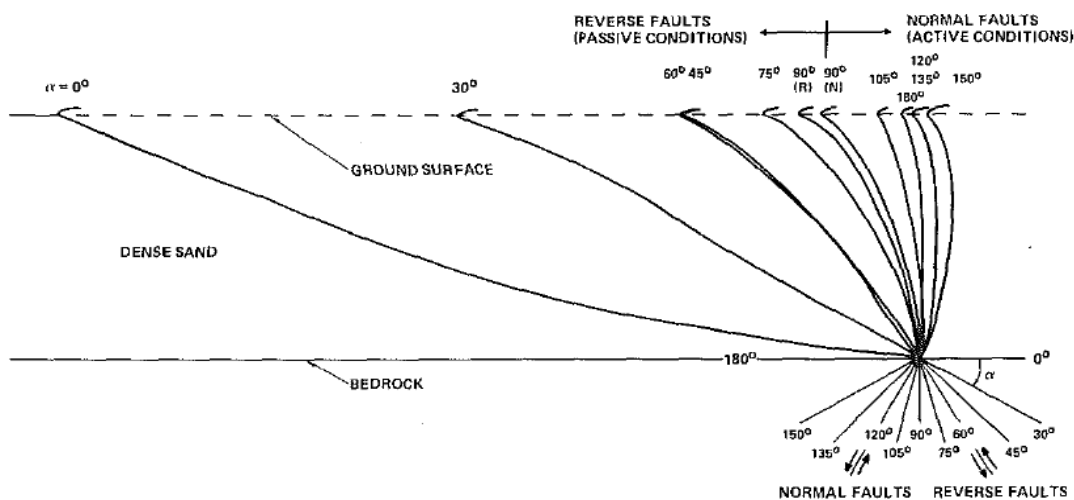
Αργότερα, οι Walters & Thomas (1982) διερεύνησαν τη διάδοση της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος σε μη συνεκτικά εδάφη. Για το πείραμά τους χρησιμοποίησαν μια στρώση των 24cm από ομοιόμορφα διαβαθμισμένη άμμο, η οποία αντιστοιχεί σε πραγματικό πάχος άμμου $H=24\text{cm}$ στο πεδίο. Αρχικά, με την επιβολή μικρής μετατόπισης παρατηρήθηκαν τοπικές διατμητικές αστοχίες χωρίς ωστόσο να εμφανιστεί ρωγμή στην επιφάνεια της στρώσης. Με αύξηση όμως της επιβαλλόμενης μετατόπισης, η διάρρηξη προσέγγισε την επιφάνεια στην περιοχή του υποκείμενου τεμάχους και μάλιστα παρατηρήθηκε και σε αυτή την πειραματική διερεύνηση μια συνεχής μείωση της γωνίας διάδοσης της διάρρηξης, όσο πλησίαζε στην επιφάνεια. Τέλος, σε ακόμα μεγαλύτερες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις εμφανίστηκε μια

δευτερεύουσα διάρρηξη σχεδόν κατακόρυφη, ενώ κατά μήκος αυτής της διάρρηξης παρουσιάστηκαν περαιτέρω ρηγματώσεις με επιπλέον αύξηση της μετατόπισης.

Οι Roth et al (1981) προσομοίωσαν για πρώτη φορά σε φυγοκεντρική την διάδοση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος έως την επιφάνεια εδαφικής στρώσης. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό 50g επιτάχυνση, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια δοκιμή με 10g. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιβαλλόμενη φυγοκεντρική επιτάχυνση επηρεάζει την αλληλεπίδραση της συνοχής c' και της γωνίας τριβής ϕ' με την συνολική διατμητική αντοχή του εδάφους, έτσι ώστε η συνοχή να κυριαρχεί υπό 1g, ενώ για μεγαλύτερες φυγοκεντρικές επιταχύνσεις η αντοχή του εδάφους να εξαρτάται κυρίως από τη γωνία τριβής. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μία χαλαρή άμμος, μία πυκνή και μία λεπτόκοκκη ιλυώδης άμμος από το πεδίο (Ottawa sand). Η μετακίνηση που επιβλήθηκε στο προσομοίωμα έγινε με δύο τρόπους: δυναμικά σε 0.01sec και στατικά σε 5sec, ώστε να εκτιμηθεί και η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων στο πείραμα. Τα αποτελέσματα από το πρώτο πείραμα σε φυγοκεντρική έρχονται σε συμφωνία με την έως τότε διεθνή βιβλιογραφία, εφόσον σε όλες τις πειραματικές δοκιμές τους, η γωνία διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος μειωνόταν όσο η διάρρηξη προσέγγιζε την επιφάνεια, με όλες τις εδαφικές διαρρήξεις να κλίνουν προς το σταθερό τέμαχος. Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι στην πυκνή άμμο ήταν πιο ξεκάθαρες οι κλίσεις των διαρρήξεων κατά την διάδοσή τους συγκριτικά με της χαλαρής, ενώ παράλληλα η γωνία με την οποία η διάρρηξη αναδυόταν στην επιφάνεια της πυκνής άμμου ήταν πιο μικρή. Διαφορά στην γωνία διάδοσης της διάρρηξης παρατηρήθηκε επίσης και μεταξύ δυναμικής και στατικής επιβολής της μετακίνησης, με την πρώτη περίπτωση να οδηγεί σε περισσότερο ομαλές κλίσεις σε βάθος και πιο απότομες κοντά στην επιφάνεια. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί η επίδραση της επιτάχυνσης των 50g και 10g στην συμπεριφορά του εξεταζόμενου εδαφικού υλικού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα πειράματα των 50g η διάρρηξη παρουσίασε κλίση πολύ πριν την εμφάνισή της στην επιφάνεια με την γωνία να μειώνεται σταδιακά, σε αντίθεση με τα 10g όπου σχηματίστηκαν δύο διαφορετικές διαρρήξεις, μία σχεδόν κατακόρυφη και μια δεύτερη με αρκετά μικρή κλίση.

Στη συνέχεια, οι Lade & Cole (1984) διεξήγαγαν μια σειρά από πειράματα με στόχο να μελετήσουν τη θέση και το εύρος της ζώνης διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων στην επιφάνεια ενός ξηρού μη-συνεκτικού εδάφους.

Εξέτασαν δύο διαφορετικά εδάφη, μια πυκνή ομοιόμορφη άμμο με $\phi = 58^\circ$ και $\psi = 30^\circ$ και ένα μείγμα της ίδιας άμμου με μπάλες διογκωμένης πολυστερίνης (φελιζόλ) προσομοιώνοντας έτσι μια χαλαρή άμμο με $\phi = 30^\circ$ και $\psi = 0^\circ$. Το πάχος H της εδαφικής στρώσης του πειράματος και του πεδίου ήταν περίπου 45cm, ενώ οι γωνίες α του ρήγματος που εξετάστηκαν ήταν για τα κανονικά ρήγματα μεταξύ 90° και 180° και για τα ανάστροφα μεταξύ 0° και 90° , όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 2.1**. Ένα πρώτο συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η εμφάνιση των διαρρήξεων στην επιφάνεια του εδάφους για κανονικά ρήγματα συνέβη σε μικρότερες μετατοπίσεις ρήγματος απ' ό τι συνέβη για ανάστροφα ρήγματα. Επιπλέον, όπως αναμενόταν για τα κανονικά ρήγματα, όσο η μετακίνηση του τεμάχου αυξανόταν δευτερεύουσες διαρρήξεις έκαναν την εμφάνισή τους και μάλιστα για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας του ρήγματος σχηματίστηκε κατακρήμνισμα. Τέλος, διαφορές παρατηρήθηκαν και για τα διαφορετικά εδαφικά υλικά, με τη διάρρηξη στην πυκνή άμμο να είναι ευκρινέστερη σε αντίθεση με τις διαρρήξεις στη χαλαρή άμμο, οι οποίες εκτεινόταν σε μεγαλύτερη επιφάνεια με κλίση προς το υπερκείμενο τέμαχος.

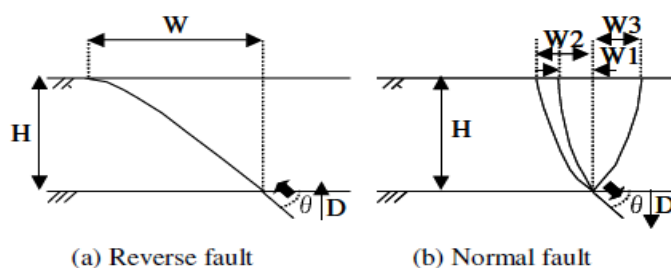


Σχήμα 2.1 Αποτυπώσεις των κύριων διαρρήξεων σε πειράματα πυκνής άμμου για διάφορες γωνίες κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων. (Lade and Cole, 1984)

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 2.1**, από τις δοκιμές προέκυψε ότι τα κανονικά ρήγματα ακολουθούν παρόμοια διάρρηξη μέσω του εδάφους, ανεξάρτητα της γωνίας κλίσης του ρήγματος, ενώ στα περισσότερα πειράματα η εικόνα της επιφάνειας της εδαφικής στρώσης προσομοίαζε την εικόνα διάρρηξης στην επιφάνεια ενός ψευδo-ανάστροφου ρήγματος, κάτι που σπάνια παρατηρείται στο πεδίο. Επιπλέον, είναι

ευδιάκριτη η διαφορά στις διαρρήξεις μεταξύ κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων, με τα πρώτα να κλίνουν προς το κινούμενο τέμαχος και τα δεύτερα προς το σταθερό τέμαχος. Τέλος, γενικό συμπέρασμα αυτής της έρευνας ήταν ότι η διάδοση της διάρρηξης ενός ρήγματος, κανονικού ή ανάστροφου, σε ένα ξηρό μη-συνεκτικό έδαφος εξαρτάται κυρίως από την γωνία διαστολικότητας ψ , και όχι από τις παραμέτρους αντοχής c' και ϕ' .

Αργότερα, οι Lee et al (2004) εξέτασαν την διάδοση διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων σε ξηρή άμμο εκτελώντας πειράματα τόσο σε φυγοκεντρική όσο και σε συνθήκες 1g. Για τα πειράματα σε συνθήκες 1g, χρησιμοποιήθηκαν μια μέσης πυκνότητας άμμος με σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$ και μια πυκνή με $D_r = 85\%$. Το πάχος της εδαφικής στρώσης του προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης του 1g, μεταβαλλόταν για τα ανάστροφα ρήγματα από 10cm έως 60cm και παρέμεινε σταθερό στα 20cm για τα κανονικά, ενώ μελετήθηκαν ρήγματα με γωνίες β ίσες με 30° , 45° και 60° . Βασικά συμπεράσματα των πειραμάτων σε συνθήκες 1g ήταν η μείωση της γωνίας των διαρρήξεων ανάστροφων ρηγμάτων κατά την διάδοσή τους προς την επιφάνεια, με τις αναπτυσσόμενες επιφανειακές ρωγμές να εξαπλώνονται σε μεγαλύτερο εύρος.



Σχήμα 2.2 Σκαριφήματα για την τυπική μορφή διάρρηξης μέσω εδαφικής στρώσης για ανάστροφα και κανονικά ρήγματα. (Lee et al, 2004)

Αντίθετα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**, για τα κανονικά ρήγματα παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας κατά την πορεία της διάρρηξης του ρήγματος προς την επιφάνεια, ενώ παρατηρήθηκε η σταδιακή δημιουργία τριών (3) διαφορετικών διαρρήξεων οι οποίες σχημάτισαν κατακρήμνισμα. Σε ότι αφορά στην επίδραση της γωνίας κλίσης του ρήγματος, προέκυψε ότι είναι αισθητή μόνο στα ανάστροφα ρήγματα, με τις

μεγαλύτερες κλίσεις (π.χ. 60°) να δημιουργούν εκτός από την αναμενόμενη μετατόπιση του εδάφους και επιπλέον παραμόρφωση της επιφάνειας κοντά στην διάρρηξη. Στην περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων ωστόσο, οι διαρρήξεις επηρέασαν μεγαλύτερο πλάτος επιφανειακής ζώνης στη μέση πυκνότητας άμμο συγκριτικά με εκείνο της μεγαλύτερης πυκνότητας άμμο. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι αύξηση της γωνίας στα ανάστροφα ρήγματα απαιτεί μεγαλύτερη μετατόπιση ώστε η διάρρηξη να αναδυθεί στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης, σε αντίθεση με την μικρότερη απαίτηση σε μετατόπιση στην περίπτωση των κανονικών. Επιπλέον, στα κανονικά ρήγματα προέκυψε αμελητέα η επίδραση της πυκνότητας των άμμων στην απαιτούμενη μετατόπιση, σε αντίθεση με τα ανάστροφα ρήγματα, όπου για τη μέση πυκνότητας άμμο χρειάστηκε περίπου διπλάσια μετατόπιση συγκριτικά με της πυκνής άμμου, ώστε η διάρρηξη να αναδυθεί στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Τέλος, η αύξηση του πάχους H της εδαφικής στρώσης επηρέασε μόνο τα ανάστροφα ρήγματα και μάλιστα τη μέσης πυκνότητας άμμο, στην οποία παρατηρήθηκαν περισσότερες επιφανειακές διαρρήξεις.

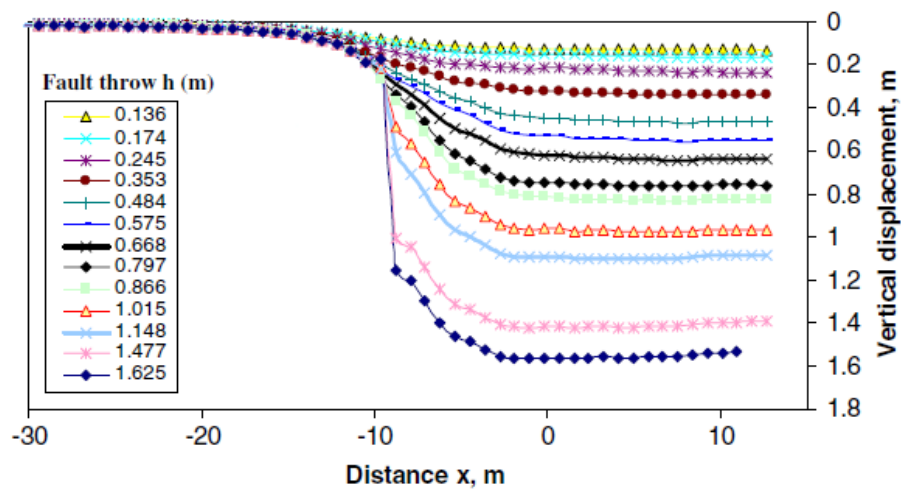
Στην ίδια δημοσίευση των Lee et al. (2004), για το πείραμα με φυγοκεντρική εξετάστηκαν ανάστροφα ρήγματα γωνίας 45° σε μία άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r = 75\%$. Αξίζει να αναφερθεί ότι στα πειράματα με φυγοκεντρική ο πραγματικό πάχος H του πεδίου δεν ταυτίζεται με το πάχος του προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης όπως συμβαίνει στα πειράματα $1g$, αλλά προκύπτει ως N φορές το πάχος του προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης σε cm , όπου N είναι η επιβαλλόμενη επιτάχυνση g του φυγοκεντρική. Έτσι, στο πείραμα αυτό εξετάστηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά προσομοιώματα άμμου με πάχη $15cm$, $20cm$ και $30cm$ που αντιστοιχούν στο πεδίο σε στρώση άμμου πάχους $H=20cm*20g=4m$, $H=30cm*20g=6m$, $H=15cm*50g=7.5m$ και $H=30cm*30g=9m$, για επιτάχυνση φυγοκεντρική $2*20g$, $50g$ και $30g$ αντίστοιχα. Αρχικά, προέκυψε ότι το εύρος των επιφανειακών διαρρήξεων ήταν ανεξάρτητο του πάχους H της εδαφικής στρώσης και μάλιστα παρατηρήθηκε περιορισμένο σε σύγκριση με τις συνθήκες $1g$. Ομοίως, η απαιτούμενη μετατόπιση ώστε η διάρρηξη να αναδυθεί στην επιφάνεια δεν επηρεάστηκε από το πάχος της άμμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα με συνθήκες $1g$ όπου τα επίπεδα τάσεων είναι χαμηλά, προέκυψε ότι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά της ισοτροπικής άμμου είναι η γωνία διαστολικότητας ψ . Αντιθέτως, στα πιο ρεαλιστικά πειράματα με φυγοκεντρική

λόγω των μεγαλύτερων εδαφικών τάσεων η διαστολικότητα ψ επηρεάζει λιγότερο την συμπεριφορά της άμμου, και έτσι θεωρήθηκε ότι προσεγγίζει καλύτερα τις συνθήκες στο πεδίο.

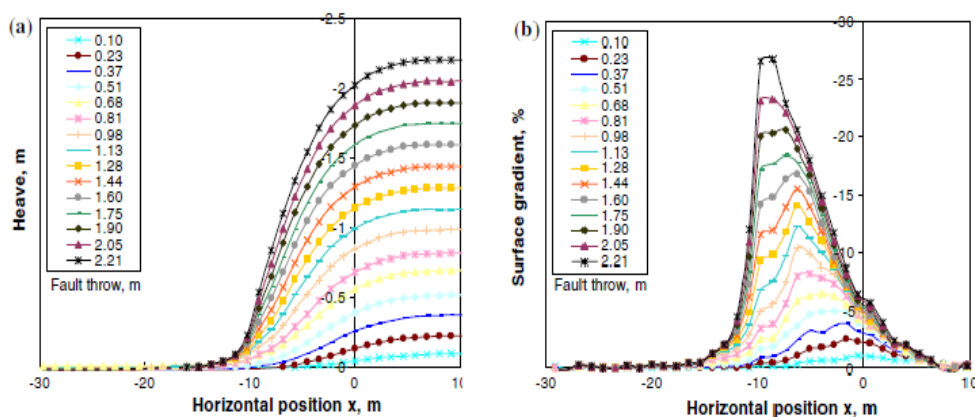
Πιο πρόσφατα, οι Bransby et al (2008) εκτελώντας μία σειρά πειραμάτων σε φυγοκεντριστή, μελέτησαν την διάδοση της διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων στο έδαφος. Επισημαίνεται ότι στην εν λόγω δημοσίευση έγιναν και πειράματα για την αλληλεπίδραση των διαρρήξεων με επιφανειακή θεμελίωση, αλλά εδώ γίνεται αναφορά μόνο στα πειράματα χωρίς θεμελίωση (συνθήκες ελευθέρου πεδίου). Αρχικά εξετάστηκαν κανονικά ρήγματα κλίσης 60° σε ξηρή άμμο με πάχος προσομοιώματος $H=21.60\text{cm}$, ενώ η επιτάχυνση του φυγοκεντριστή προσαρμόστηκε στα $115g$, αντιστοιχώντας έτσι σε πραγματικό πάχος στρώσης ξηρής άμμου στο πεδίο ίσο με $H=21.60\text{cm} \cdot 115g=25\text{m}$. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν σχετικής πυκνότητας $D_r = 60\%$ με γωνίες τριβής και διαστολικότητας $\phi' = 35^\circ$ και $\psi' = 6^\circ$ αντίστοιχα. Σύμφωνα με το **Σχήμα 2.3**, προέκυψε ότι για μικρές επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος $h < 0.2\text{m}$, η επιφάνεια της άμμου παρέμεινε ανεπηρέαστη, ενώ οι τοπικές ρωγμές που παρατηρήθηκαν αποδόθηκαν στην υψηλή διαστολικότητα της άμμου για τα χαμηλά επίπεδα των εδαφικών τάσεων πλησίον της επιφάνειας. Με αύξηση της παραμόρφωσης σε $h < 0.8\text{m}$, εμφανίστηκαν ρηγματώσεις στο πάχος H της άμμου, χωρίς ωστόσο η κύρια διάρρηξη του ρήγματος να αναδυθεί στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Με περαιτέρω αύξηση της μετακίνησης περίπου στο 4% του πάχους H , η διάρρηξη εμφανίστηκε στην επιφάνεια με κλίση περίπου 67° , ενώ παρατηρήθηκε και σχετικά απότομη μεταβολή στις κατακόρυφες μετακινήσεις. Τέλος, προέκυψε ότι η παραμόρφωση της άμμου σταμάτησε όταν η διάρρηξη αναδύθηκε στην επιφάνεια, ενώ μερικές ρωγμές και τοπικές μετακινήσεις έλαβαν χώρα αποκλειστικά στο υπερκείμενο τέμαχος.

Παράλληλα, εξετάστηκαν ανάστροφα ρήγματα γωνίας 60° σε ξηρή άμμο πάχους προσομοιώματος $H=13.40\text{cm}$, ενώ η επιτάχυνση του φυγοκεντριστή προσαρμόστηκε στα $115g$, αντιστοιχώντας έτσι σε πραγματικό πάχος στρώσης ξηρής άμμου στο πεδίο ίσο με $H=13.40\text{cm} \cdot 115g=15\text{m}$. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του **Σχήματος 2.4**, για επιβολή μικρής μετακίνησης $h < 1\text{m}$ παρατηρείται σταδιακή παραμόρφωση της επιφάνειας με την κύρια διάρρηξη του ρήγματος να μην έχει αναδυθεί στην επιφάνεια. Για μετακίνηση h περίπου ίση με το 10% του πάχους H της άμμου, η

διάρρηξη είναι πλέον εμφανής με κλίση 50° ως προς την επιφάνεια. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή της κλίσης της επιφάνειας εμφανίστηκε στο σημείο όπου η διάρρηξη του ρήγματος έτμησε την επιφάνεια, ενώ η ζώνη της παραμορφωμένης επιφάνειας παρατηρήθηκε αρκετά πιο ευρεία σε σύγκριση με τα κανονικά ρήγματα. Τέλος, η κλίση της επιφάνειας μεταβαλλόταν με την μετακίνηση h και μάλιστα η μέγιστη τιμή της κλίσης εμφανιζόταν σε σημείο που απομακρυνόταν από το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης του ρήγματος, με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα της κατακόρυφης μετατόπισης της επιφάνειας της άμμου (σε βάθος $z = 0.9\text{m}$) συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης x από το σημείο τομής επιφάνειας-διάρρηξης και της επιβαλλόμενης μετακίνησης h . (Bransby et al, 2008)



Σχήμα 2.4 Διαγράμματα (a) του προφίλ της μετακίνησης της άμμου στην επιφάνεια και (b) της κλίσης της επιφάνειας, συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης x από το σημείο τομής επιφάνειας-διάρρηξης και της επιβαλλόμενης μετακίνησης h . (Bransby et al, 2008)

Τέλος, οι Cai et al (2016) εκτελώντας πειράματα σε φυγοκεντριστή, μελέτησαν τη διάδοση της διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων γωνίας 70° σε εδαφική στρώση ξηρής άμμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην άμμο είχαν τοποθετηθεί πάσσαλοι, ώστε να εξεταστεί η επίδρασή τους στη πορεία της διάρρηξης του ρήγματος. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά μόνο στα αποτελέσματα για συνθήκες ελευθέρου πεδίου (μακριά από τους πασσάλους). Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της εδαφικής στρώσης, χρησιμοποιήθηκε η άμμος Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r = 65\%$ και γωνίας τριβής $\phi' = 35^\circ$. Επιπλέον, το πάχος της εδαφικής στρώσης του προσομοιώματος ήταν $H=40\text{cm}$, ενώ η επιτάχυνση του φυγοκεντριστή προσαρμόστηκε στα $50g$, αντιστοιχώντας έτσι σε πραγματικό πάχος στρώσης άμμου Toyoura στο πεδίο ίσο με $H=40\text{cm} \cdot 50g=20\text{m}$. Η επιβολή της μετακίνησης στο προσομοίωμα πραγματοποιήθηκε σε πέντε βήματα, με την μέγιστη τιμή μετακίνησης να προσεγγίζει τα 2m . Αρχικά προέκυψε ότι η γωνία της διάρρηξης του ρήγματος αυξανόταν κατά την πορεία διάδοσής του, δημιουργώντας μάλιστα αρκετά απότομη κλίση στην επιφάνεια του μετακινούμενου τεμάχου του προσομοιώματος. Παράλληλα, για επιβολή μικρής μετακίνησης $h=0.4\text{m}$, παρατηρήθηκε εξάπλωση των διαρρήξεων στο στρώμα της άμμου, ενώ επηρεάστηκε κυρίως το μετακινούμενο τέμαχος στο οποίο και εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες εδαφικές μετατοπίσεις. Με επιβολή μεγαλύτερων ωστόσο μετακινήσεων ($h > 1\text{m}$), το εύρος των διαρρήξεων περιορίστηκε αισθητά, δημιουργώντας πλέον μια κύρια διάρρηξη η οποία και αναδύθηκε στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Τέλος, μελετώντας τις οριζόντιες μετατοπίσεις της άμμου προέκυψε ότι κατά κύριο λόγο εμφανίστηκαν στο μετακινούμενο τέμαχος του προσομοιώματος, με την μέγιστη τιμή τους να συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης, σε βάθος μικρότερο των 8m .

2.2 Αριθμητικές διερευνήσεις της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης

Οι Roth et al. (1982) χρησιμοποίησαν την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για να μελετήσουν την διάδοση της διάρρηξης ανάστροφων ρηγμάτων σε άμμο. Εξετάστηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά εδαφικά υλικά, μία χαλαρή άμμο, δύο μεγαλύτερης πυκνότητας άμμοι με γωνία διαστολικότητας $\psi=0^\circ$ και 10° αντίστοιχα και μια καλά διαβαθμισμένη αργιλώδης άμμο από το πεδίο (Ottawa sand). Το πάχος

της εδαφικής στρώσης του προσομοιώματος ήταν $H=17.8\text{cm}$, ενώ η επιτάχυνση του φυγοκεντριστή προσαρμόστηκε στα $30g$, αντιστοιχώντας έτσι σε πραγματικό πάχος εδαφικής στρώσης στο πεδίο ίσο με $H=17.8\text{cm}\cdot 30g=5.5\text{m}$, ενώ η μέγιστη μετατόπιση που επιβλήθηκε ήταν περίπου 0.75m . Οι αναλύσεις έγιναν με βάση ένα μη γραμμικό καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιεί το κριτήριο αστοχίας των Drucker-Prager. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις διαφορετικές άμμους προέκυψε ότι η επιφανειακή ζώνη των διαρρήξεων στην περίπτωση της χαλαρής άμμου ήταν περισσότερο ευρεία και μάλιστα η κλίση των διαρρήξεων κοντά στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης ήταν αρκετά μεγαλύτερη. Επιπλέον, για την άμμο Ottawa παρατηρήθηκε μεγαλύτερο άλμα της παραμορφωμένης επιφάνειας, δηλαδή σχετική ολίσθηση του ενός τεμάχου ως προς το άλλο. Για όλες τις άμμους ωστόσο, με αύξηση της γωνίας διαστολικότητας ψ παρατηρήθηκε μείωση της γωνίας διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος ως προς την επιφάνεια. Τέλος, βασικό συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η συμπεριφορά της άμμου ελέγχεται κυρίως από τις παραμέτρους αντοχής του εδάφους.

Αργότερα, οι Bray et al (1994) προσομοίωσαν κανονικά και ανάστροφα ρήγματα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το ύψος της εδαφικής στρώσης H του προσομοιώματος κυμαινόταν από 24m έως 91m . Εξετάστηκαν τρεις (3) γωνίες ρήγματος 45° , 60° και 90° , ενώ η επιβαλλόμενη μετακίνηση πραγματοποιήθηκε αργά για την εξάλειψη δυναμικών φαινομένων. Όσον αφορά στο έδαφος ήταν μη προστερεοποιημένη άργιλος με λόγο Poisson $\nu = 0.49$, συντελεστή ωθήσεων $K_0 = 0.5$ και γραμμικά μεταβαλλόμενα με το βάθος z μέτρο ελαστικότητας E και αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u . Οι αναλύσεις έγιναν με το υπερβολικό καταστατικό προσομοίωμα των Duncan et al (1980), το οποίο αν και απλουστευμένο είναι ικανό να ελέγχει την παραμόρφωση αστοχίας των αργιλικών εδαφών. Βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης για τα κανονικά ρήγματα ήταν ότι με αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης η πορεία διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος εμφάνιζε όλο και μεγαλύτερη γωνία β προς την επιφάνεια. Μεταβάλλοντας αργότερα τα εδαφικά χαρακτηριστικά προέκυψε ότι με αύξηση του συντελεστή ωθήσεων K_0 ή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u , η αστοχία σε διάτμηση και εφελκυσμό απαιτούσε μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος. Επίσης, με μείωση του λόγου Poisson ν παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης της επιφάνειας, ενώ η μείωση του μέτρου ελαστικότητας E διεύρυνε την ζώνη των παραμορφωμένων

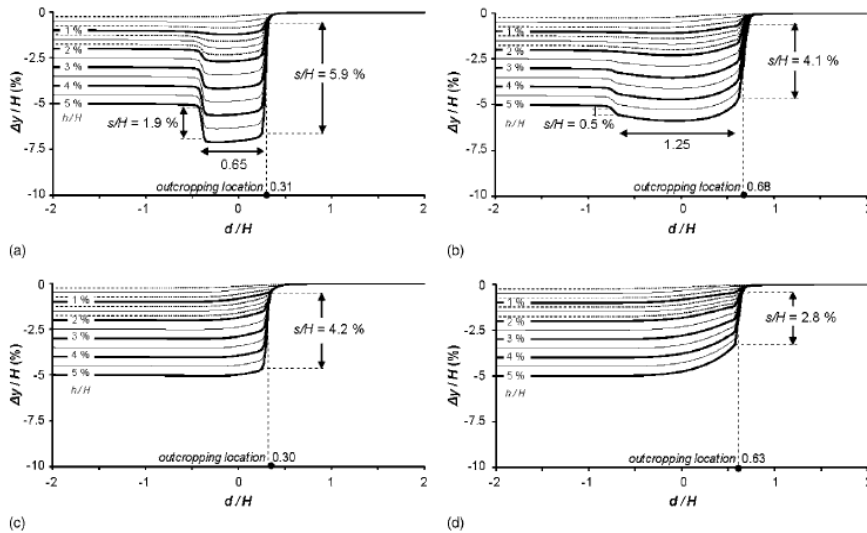
στοιχείων. Τέλος, συμπέραναν ότι πιο σημαντικός παράγοντας στην διάδοση του ρήγματος ήταν η παραμόρφωση αστοχίας του εδάφους, εφόσον με αύξησή της αυξάνονταν γραμμικά η μετατόπιση που απαιτούνταν για να αναδυθεί η διάρρηξη στην επιφάνεια και παράλληλα μειωνόταν η παραμόρφωση του εδάφους στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια, οι Loukidis et al. (2009) προσομοίωσαν με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών τη διάδοση κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων σε διαφορετικά εδάφη με γωνίες β από 45° έως 75° . Οι αναλύσεις έγιναν με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb με χαλάρωση, με τις γωνίες διαστολικότητας ψ και τριβής ϕ να μειώνονται με αύξηση της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους. Το πάχος της εδαφικής στρώσης ήταν $H = 20\text{m}$ και το πλάτος 80m . Όσον αφορά στα εδαφικά υλικά, εξέτασαν στρώματα πυκνής και χαλαρής άμμου, καθώς και στρώματα κανονικά προφορτισμένης και υπερστερεοποιημένης αργίλου. Βασική διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων ήταν η μείωση της γωνίας της διάρρηξης όσο προσέγγισε προς την επιφάνεια για τα ανάστροφα ρήγματα, και το ανάποδο για τα κανονικά. Παράλληλα, για μικρές γωνίες του κανονικού ρήγματος $\beta < 45^\circ + \psi/2$, εμφανιζόταν μία δευτερεύουσα διάρρηξη, η οποία σχημάτιζε με την κύρια ένα κατακρήμνισμα εύρους μεταξύ $0.7H$ και $1.6H$. Το πλάτος αυτής της τάφρου μειωνόταν με αύξηση της γωνίας ψ , ενώ στην περίπτωση της αργίλου δεν παρατηρούταν καθόλου ο σχηματισμός της. Τέλος, συμπέραναν ότι οι παράμετροι αντοχής c' και ϕ' είναι οι κύριοι που επιδρούν στην μετάδοση της διάρρηξης των ρηγμάτων.

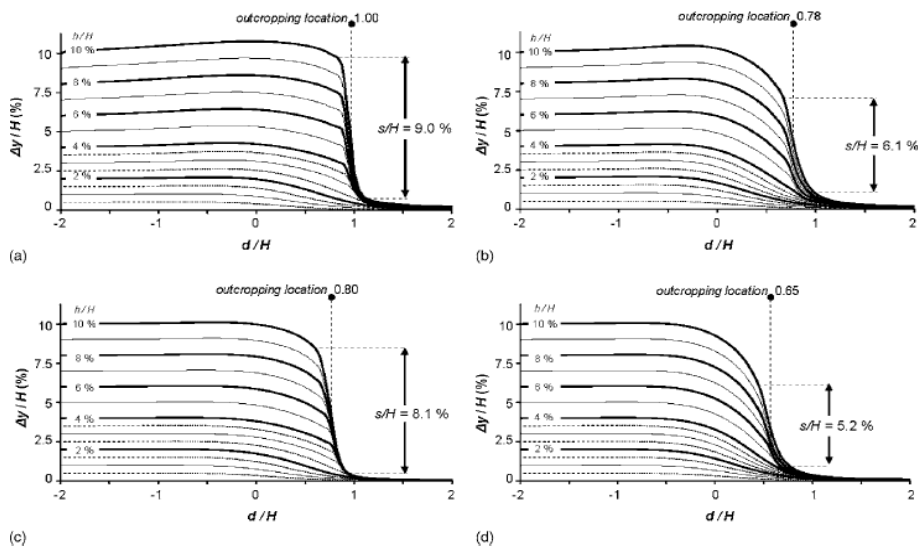
Οι Anastasopoulos et al. (2007) μελέτησαν την διάδοση διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων με κλίση 45° και 60° ως προς την βάση του προσομοιώματος, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το προσομοίωμα της ανάλυσης ήταν ελαστοπλαστικό ιστροπικό Mohr-Coulomb, ενώ το πάχος της εδαφικής στρώσης ήταν $H=40\text{m}$ και το πλάτος 160m . Η επιβαλλόμενη μετακίνηση h κυμαινόταν από 0.25% έως 5% του πάχους H για τα κανονικά ρήγματα, ενώ ήταν διπλάσια για τα ανάστροφα. Όσον αφορά τα εδαφικά υλικά εξετάστηκαν δύο κατηγορίες άμμου, μία χαλαρή με γωνία τριβής $\phi = 32^\circ$, παραμένουσα γωνία τριβής $\phi_{\text{res}} = 30^\circ$, γωνία διαστολικότητας $\psi = 3^\circ$ και μια πυκνή άμμος αντίστοιχα με $\phi = 45^\circ$, $\phi_{\text{res}} = 30^\circ$ και $\psi=18^\circ$. Επιπλέον το μέτρο διάτμησης G αυξανόταν γραμμικά με το

βάθος z , ενώ η διατμητική παραμόρφωση διαρροής γ_y παρέμεινε σταθερή είτε στο 1.5% είτε στο 5% και για τις δύο άμμους. Για τα κανονικά ρήγματα αρχικά παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας διάρρηξης του ρήματος προς την επιφάνεια. Μάλιστα με αύξηση της γωνίας τριβής ϕ ή της διαστολικότητας ψ παρατηρούνταν περαιτέρω αύξηση της γωνίας της διάρρηξης. Επιπλέον αυξάνοντας τη διατμητική παραμόρφωση διαρροής γ_y του εδάφους απαιτήθηκε μεγαλύτερη μετακίνηση υποβάθρου προκειμένου να επιτευχθεί η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Πιο αναλυτικά, όπως παρατηρείται και στο **Σχήμα 2.5** από τους Anastasopoulos et al. (2007) για γωνίες ρήματος $\alpha < 45^\circ + \psi/2$ δημιουργείται μια δευτερεύουσα διάρρηξη αντίθετης κατεύθυνσης με την κύρια, η οποία για μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις αναδύεται στην επιφάνεια σχηματίζοντας ένα κατακρήμνισμα. Επίσης, το κατακρήμνισμα φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από την γωνία τριβής ϕ , η αύξηση της οποίας προκαλεί μείωση του εύρους της τάφρου, σε αντίθεση με την ελάχιστη ευαισθησία της στις μεταβολές της διαστολικότητας ψ . Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της χαλαρής άμμου, το κατακρήμνισμα εμφανιζόταν πιο εκτεταμένο συγκριτικά με εκείνο της πυκνής. Παράλληλα το ύψος του άλματος της διάρρηξης s στην επιφάνεια επηρεαζόταν από τη διατμητική παραμόρφωση διαρροής γ_y , τη γωνία τριβής ϕ και την διαστολικότητα ψ , και συγκεκριμένα με αύξηση των γ_y και ψ να οδηγούν σε μείωση του ύψους s . Όπως παρατηρείτε και στο **Σχήμα 2.5**, ο λόγος s/H είναι επίσης συνάρτηση της ανηγμένης επιβαλλόμενης μετακίνησης h/H και της γωνίας του ρήματος. Τέλος στη μελέτη των κανονικών ρηγμάτων παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ωθήσεων K_o επιδρούσε στην πορεία της διάρρηξης του ρήματος και στην απαιτούμενη μετακίνηση h/H , με αύξηση του K_o να αυξάνει την απαίτηση σε μετακίνηση h ρήματος για να επιτευχθεί η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Μάλιστα, με αύξηση του μέτρου διάτμησης G και μείωση του K_o η διάρρηξη παρουσίαζε άλμα στην επιφάνεια, δημιουργώντας την ψευδαίσθηση ενός ανάστροφου ρήματος. Επιπρόσθετα, με αύξηση της γωνίας τριβής ϕ ή της διαστολικότητας ψ παρατηρήθηκε μείωση της γωνίας της διάρρηξης του ρήματος όσο αυτή προσεγγίζει στην επιφάνεια. Σε ό,τι αφορά στην απαιτούμενη μετακίνηση h/H , προέκυψε ότι είναι αύξουσα συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης διαρροής γ_y . Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.6**, το ύψος s του άλματος στην επιφάνεια του εδάφους για σταθερή επιβαλλόμενη μετακίνηση, εξαρτάται από τη διατμητική παραμόρφωση διαρροής γ_y , την γωνία του ρήματος και την διαστολικότητα ψ . Ειδικότερα, με αύξηση της πλαστικότητας γ_y μειώνεται το

ύψος s σε αντίθεση με τη θετική επίδραση της διαστολικότητας ψ . Επιπλέον, ο λόγος s/H είναι συνάρτηση και της κανονικοποιημένης επιβαλλόμενης μετατόπισης h/H . Έτσι, ανεξάρτητα από την πυκνότητα της άμμου, όταν η γωνία ρήγματος είναι $\alpha = 60^\circ$ το ύψος s της ρηγματωμένης επιφάνειας αυξάνεται με αύξηση της μετατόπισης h/H , με αργότερο ωστόσο ρυθμό μεταβολής σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το ρήγμα έχει γωνία $\alpha=45^\circ$.

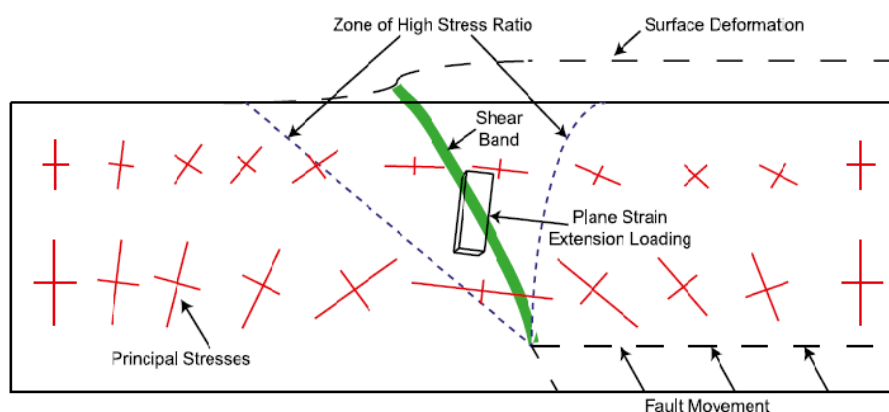


Σχήμα 2.5 Διαγράμματα κανονικών ρηγμάτων που συσχετίζουν τη κανονικοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση $\Delta y/H$ της επιφάνειας της εδαφικής στρώσης με τη κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετακίνηση του βράχου h/H για: (a) $\alpha=45^\circ$ πυκνή άμμο ($\gamma=1.5\%$), (b) $\alpha=45^\circ$ χαλαρή άμμο ($\gamma=3\%$), (c) $\alpha=60^\circ$ πυκνή άμμο και (d) $\alpha=60^\circ$ χαλαρή άμμο. (Anastasiopoulos et al, 2007)



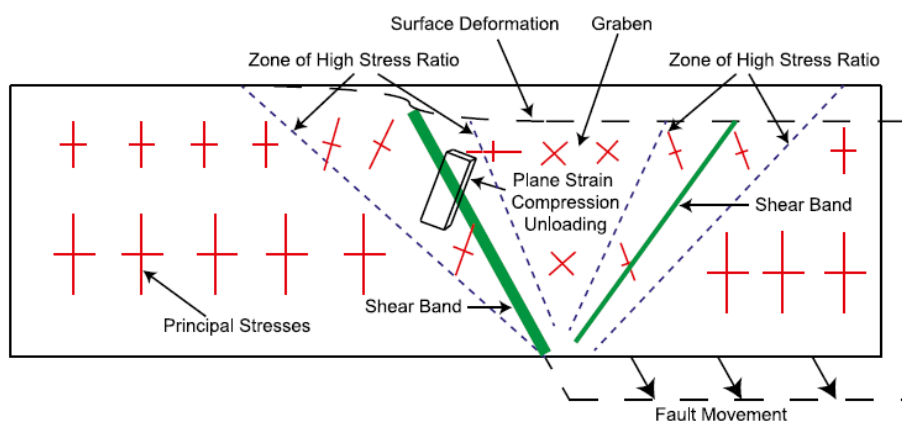
Σχήμα 2.6 Διαγράμματα ανάστροφων ρηγμάτων που συσχετίζουν τη κανονικοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση $\Delta y/H$ της επιφάνειας της εδαφικής στρώσης με τη κανονικοποιημένη επιβαλλόμενη μετακίνηση του βράχου h/H για: (a) $\alpha=45^\circ$ πυκνή άμμο ($\gamma=0.5\%$), (b) $\alpha=45^\circ$ χαλαρή άμμο ($\gamma=3\%$), (c) $\alpha=60^\circ$ πυκνή άμμο και (d) $\alpha=60^\circ$ χαλαρή άμμο. (Anastasiopoulos et al, 2007)

Πιο πρόσφατα, οι Oettle and Bray (2013) εξέτασαν την διάδοση της διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων γωνίας 60° σε στρώμα ξηρής άμμου πάχους 15m, κάνοντας αναλύσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο λογισμικό FLAC. Χρησιμοποίησαν ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο UBCSAND, με το οποίο προσομοιώθηκε η μη γραμμική συμπεριφορά της άμμου και προσδιορίστηκε με ακρίβεια η παραμόρφωση αστοχίας του εδάφους. Αρχικά προέκυψε ότι η τασική όδευση για την περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων φάνηκε να ακολουθεί ανάλογη διακύμανση με τις αντίστοιχες συνθήκες παθητικής ώθησης κατά Rankine, ενώ αντίστοιχα η συμπεριφορά των κανονικών ρηγμάτων σχετίστηκε με την κατάσταση ενεργητικής φόρτισης Rankine. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.7** από τους Oettle and Bray (2013), παρατηρήθηκε ότι η διάρρηξη των ανάστροφων ρηγμάτων διαδόθηκε στο στρώμα της άμμου ακολουθώντας περίπου τη ίδια γωνία με εκείνη του ρήγματος, μειώνοντας ωστόσο σταδιακά την κλίση της κατά την πορεία της προς την επιφάνεια. Επιπλέον, οι τάσεις αλλά και οι παραμορφώσεις του εδάφους κοντά στην ζώνη διάρρηξης ήταν οι μεγαλύτερες που παρατηρήθηκαν, με το εύρος των παραμορφώσεων να λαμβάνει χώρα κυρίως στο μετακινούμενο τέμαχος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και ότι για ανάστροφα ρήγματα παρατηρείται στροφή της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων, ακόμη και αρκετά μακριά από τη ζώνη διάτμησης, τόσο στο μετακινούμενο όσο και στο σταθερό τέμαχος.



Σχήμα 2.7 Σκαρίφημα για την μορφή της διάρρηξης λόγω της διάδοσης μέσω εδαφικής στρώσης άμμου ανάστροφου ρήγματος γωνίας 60° , για επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης $h = 0.5m$. (Oettle and Bray 2013)

Αντίθετα, σύμφωνα με το **Σχήμα 2.8** από τους Oettle and Bray (2013), η γωνία διάδοσης της διάρρηξης των κανονικών ρηγμάτων παρέμεινε περίπου σταθερή προς την επιφάνεια, ακολουθώντας πορεία με πιο απότομη κλίση σε σύγκριση με την γωνία του ρήγματος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στα κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας, εμφανίστηκε μια δευτερεύουσα ζώνη διάρρηξης η οποία σχημάτισε με την κύρια διάρρηξη ένα κατακρήμνισμα. Τέλος, προέκυψε ότι η αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης ήταν μικρότερη στην περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων σε σύγκριση με τα ανάστροφα ρήγματα.



Σχήμα 2.8 Σκαρίφημα για την μορφή της διάρρηξης λόγω της διάδοσης μέσω εδαφικής στρώσης άμμου κανονικού ρήγματος γωνίας 60° , για επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης $h=0.7\text{m}$. (Oettle and Bray 2013)

Στη συνέχεια, οι Oettle and Bray (2016) μελέτησαν την διάδοση της διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων γωνίας 60° σε στρώμα ξηρής άμμου πάχους 15m , κάνοντας αναλύσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο λογισμικό FLAC. Σκοπός της μελέτης ήταν η σύγκριση πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα αναλύσεων δύο νέων προσομοιωμάτων για τη συμπεριφορά της άμμου UBCSAND I και UBCSAND II, τα οποία βασίστηκαν στο αρχικό προσομοίωμα UBCSAND που είχε χρησιμοποιηθεί από τους Oettle and Bray (2013). Πιο συγκεκριμένα, με τα δύο νέα προσομοιώματα περιγράφηκε καλύτερα η χαλάρωση και της άμμου μετά τη μέγιστη αντοχή και μέχρι την Κρίσιμη Κατάσταση. Αρχικά προέκυψε ότι η νέα περιγραφή της χαλάρωσης προσέγγισε αρκετά καλά την διαστολική συμπεριφορά της άμμου στην περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων, αλλά

όχι και στην περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων όσον αφορά την κλίση της διάρρηξης κατά την πορεία της προς την επιφάνεια της εδαφικής στρώσης, προσέγγισαν χωρίς σημαντικές αποκλίσεις τα πειραματικά δεδομένα τόσο για τα κανονικά ρηγματα όσο και για τα ανάστροφα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μια μικρή αλλά σταθερή διαφορά στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης του ρηγματος στην επιφάνεια της άμμου μεταξύ αναλύσεων και πειραματικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην βελτίωση του προσομοιώματος UBCSAND II, το οποίο παράλληλα προσομοίωσε με μεγάλη ακρίβεια τη θέση και το εύρος του κατακρημνίσματος που εμφανίστηκε στα κανονικά ρηγματα για επιβολή μεγάλων μετατοπίσεων. Επισημαίνεται ότι οι εργασίες των Oettle and Bray (2013, 2016) είναι οι μόνες στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιούν σοφιστευμένα ελαστο-πλαστικά προσομοιώματα (παραλλαγές ή το ίδιο το UBCSAND) για την ανάλυση της διάδοσης διάρρηξης ενεργού ρηγματος μέσω εδαφικής στρώσης, και υπογραμμίζουν τα κέρδη που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιων αριθμητικών εργαλείων. Παρόλα αυτά, τα προσομοιώματα αυτά προβλέπουν ιστροπική συμπεριφορά για τις άμμους, δηλαδή δε λαμβάνουν υπόψη την ανισοτροπία δομής που έχουν οι άμμοι στο πεδίο, και αυτό υπογραμμίστηκε από την αδυναμία καλής πρόβλεψης της χαλάρωσης και της διαστολικότητας της άμμου εξίσου για διαρρήξεις κανονικών και ανάστροφων ρημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΟΦΙΣΤΕΥΜΕΝΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης με χρήση ενός σοφιστευμένου καταστατικού προσομοιώματος της οικογένειας SANISAND, το οποίο έχει πρόσφατα προταθεί (Papadimitriou et al. 2015), στο πλαίσιο της Θεωρίας Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (Anisotropic Critical State Theory, ACST των Li & Dafalias 2012). Το σοφιστευμένο ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα αυτό λαμβάνει υπόψη του τη μικρο-δομή (fabric) της άμμου και την εξέλιξή της λόγω φόρτισης, και θεωρείται ιδανικό για τη μελέτη προβλημάτων όπου δημιουργούνται ζώνες διάτμησης (shear bands) εντός συνεχούς μέσου.

Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι η διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης που είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Έτσι, στην επόμενη παράγραφο 3.2 παρουσιάζονται κάποιες πολύ βασικές αρχές του προσομοιώματος SANISAND ώστε να γίνει κατανοητή η χρήση του στο πλαίσιο της εργασίας, καθώς και η ακρίβειά του στην προσομοίωση της άμμου Toyoura, με μια ομάδα τιμών σταθερών ανεξαρτήτως σχετικής πυκνότητας και επιπέδου τάσεων. Στη συνέχεια, στην παράγραφο 3.3 παρουσιάζεται μια πρόσφατη δοκιμή φυγοκεντρική που αφορά τη διάδοση διάρρηξης ενός κανονικού ρήγματος με γωνία βύθισης 70° που υπόκειται στρώσης άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r = 65\%$. Αυτή η δοκιμή αποτελεί το στόχο προσομοίωσης με χρήση του SANISAND, με βάση την οποία διακριβώνεται και η ακρίβεια αυτού του σοφιστευμένου προσομοιώματος σε προβλήματα συνοριακών τιμών που σχετίζονται με δημιουργία ζωνών διάτμησης.

3.2 Αρχές προσομοιώματος SANISAND

3.2.1 Γενικά

Πρόκειται για ένα απλό ανισοτροπικό μοντέλο για άμμους το οποίο βασίζεται στη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (ACST), η οποία έχει πρόσφατα

προταθεί από τους Li & Dafalias (2012). Ειδικότερα, αυτή η θεώρηση συνδυάζεται με ένα προσομοίωμα από την πλατφόρμα καταστατικών προσομοιωμάτων του SANISAND, ακρονύμιο της απλής (Simple) ανισοτροπικής (ANIsotropic) άμμου (SAND). Η πλατφόρμα αυτή στηρίζεται σε καινοτόμες έρευνες των Manzari & Dafalias (1997) και των Li & Dafalias (2000), οι οποίοι συσχέτισαν την επίδραση των συνόρων και της διόγκωσης των επιφανειών του προσομοιώματος μέσω της παραμέτρου κατάστασης ψ (Been and Jefferies 1985). Αυτή η πρωτότυπη ιδέα επέτρεψε την προσομοίωση της συμπεριφοράς της άμμου ανεξαρτήτως των αρχικών συνθηκών, με ένα απλό σύστημα μεταβλητών, το οποίο έκτοτε υιοθετήθηκε από ένα μεγάλο αριθμό ελαστο-πλαστικών προσομοιωμάτων τα οποία συνίστανται στην οικογένεια προσομοιωμάτων SANISAND. Στην παρούσα εργασία, εισάγεται επιπλέον ένα νέο στοιχείο της ACST, η Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής A , η οποία τροποποιεί την παράμετρο κατάστασης ψ και καθορίζει εκ νέου την παράμετρο κατάστασης διαστολικότητας ζ , που αντιπροσωπεύει την εξελισσόμενη ανισοτροπία της δομής.

3.2.2 Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής A

Ως \mathbf{F} ορίζεται το αποκλίνον τμήμα ενός συμμετρικού τανυστή δευτέρας τάξης, ο οποίος σχετίζεται με χαρακτηριστικά της μικρο-δομής της άμμου όπως το σχήμα και ο προσανατολισμός των κενών ή η χωρική κατανομή των διευθύνσεων των διεπαφών κόκκων, μετά από κανονικοποίηση. Ο τανυστής μικρο-δομής \mathbf{F} είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας της άμμου και σχετίζεται με την ανισοτροπία και την εξέλιξή της κατά την διάρκεια της φόρτισης, ενώ η σχέση που τον περιγράφει είναι η εξής:

$$\mathbf{F} = F\mathbf{n}_F \quad (1)$$

όπου F είναι το μέτρο του τανυστή \mathbf{F} και \mathbf{n}_F ο μοναδιαίος μέτρο αποκλίνων τανυστής που καθορίζει την κατεύθυνση του \mathbf{F} . Παρακάτω, με \mathbf{n} συμβολίζεται ο μοναδιαίος μέτρο αποκλίνων τανυστής που δηλώνει την κατεύθυνση της φόρτισης, η οποία συνήθως ορίζεται ως η κατεύθυνση της επαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης της άμμου. Έτσι, η Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής A (Fabric Anisotropy Variable, FAV) ορίζεται ως:

$$A = \mathbf{F} : \mathbf{n} = FN \quad (2)$$

όπου το σύμβολο $\langle \cdot \rangle$ υπονοεί το διπλό εσωτερικό γινόμενο (πρώτη αναλλοίωτη του γινομένου) των δύο τανυστών και $N = \mathbf{n}_F : \mathbf{n}$ είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που απεικονίζει τη σχετική διεύθυνση των \mathbf{F} και \mathbf{n} . Σε τριαξονικό χώρο τάσεων, ο τανυστής κατεύθυνσης φόρτισης \mathbf{n} μπορεί να οριστεί και ως το βαθμωτό μέγεθος s που παίρνει τιμές +1 και -1 για φόρτιση σε τριαξονική συμπίεση (triaxial compression, TC) και τριαξονικό εφελκυσμό (triaxial extension, TE), αντίστοιχα. Ομοίως, η κατεύθυνση της μικρό-δομής στο χώρο (που απεικονίζεται γενικώς με τον τανυστή \mathbf{n}_F) στον τριαξονικό χώρο τάσεων μπορεί να οριστεί και ως ένα βαθμωτό μέγεθος s_F που παίρνει τιμές +1 και -1 για οριζόντια δομή κόκκων (για απόθεση σύμφωνα με τη βαρύτητα) και για κατακόρυφη δομή κόκκων αντίστοιχα. Επομένως, σε τριαξονικό χώρο τάσεων ισχύει ότι $N = s_F s$.

Σύμφωνα με την θεωρία ACST, ο τανυστής δομής \mathbf{F} αναμένεται να προσεγγίσει κατά την διάρκεια μονοτονικής φόρτισης την Κρίσιμη Κατάσταση. Γι' αυτό, η τιμή του F τείνει προς το 1.0 και η τιμή του \mathbf{n}_F τείνει προς το \mathbf{n} . Με βάση τον στόχο της παρούσας εργασίας, θεωρώντας ότι η μέγιστη τιμή του F είναι 1, την οποία και αποκτά μόνο στην κρίσιμη κατάσταση αστοχίας, ο ρυθμός αύξησής του από την αρχική τιμή F_{in} (σταθερά του προσομοιώματος) σε 1 είναι μία απλουστευμένη εκδοχή της πρότασης των Li & Dafalias (2012), η οποία είναι η εξής:

$$\dot{F} = \langle L \rangle c(N - F) \quad (3)$$

με c συμβολίζεται ο ρυθμός εξέλιξης της μικρό-δομής κατά την διάρκεια της φόρτισης, L είναι ο δείκτης φόρτισης (με $L > 0$ να υποδηλώνει μη-μηδενικές πλαστικές παραμορφώσεις) και το σύμβολο $\langle \cdot \rangle$ να είναι οι αγκύλες Macaulay για τις οποίες ισχύει $\langle L \rangle = L$ όταν $L > 0$ και $\langle L \rangle = 0$ όταν $L \leq 0$. Με βάση τη Σχέση (1), και επειδή $0 < F_{in} < 1$ (το F είναι μέτρο ενός τανυστή και είναι μη-αρνητικό), για μια οριζόντια δομή κόκκων (σύμφωνη με τη βαρύτητα) φορτίζοντας προς την κατεύθυνση της τριαξονικής θλίψης, το F αυξάνεται (εφόσον $N=1$ συνεπάγεται $\dot{F} > 0$) και ως αποτέλεσμα αυξάνεται και η τιμή του A από την αρχική θετική τιμή $A = A_{in} = F_{in} > 0$ στην μέγιστη τιμή του στην Κρίσιμη Κατάσταση, δηλαδή σε $A = 1.0$. Αντίστοιχα, φορτίζοντας ένα έδαφος με οριζόντια δομή κόκκων (σύμφωνη με τη βαρύτητα) προς την κατεύθυνση του τριαξονικού εφελκυσμού, αρχικά προκύπτει μείωση του F (εφόσον $N = -1$ που συνεπάγεται $\dot{F} < 0$) και ως αποτέλεσμα αυξάνεται

προοδευτικά αλγεβρικά η τιμή του όρου A (λόγω του $N = -1$) από την αρχική αρνητική τιμή του $A = A_{in} = -F_{in}$ σε $A = 0$ και στη συνέχεια σε $A = 1.0$. Με άλλα λόγια, η μονοτονική φόρτιση σε τριαξονικό εφελκυσμό χωρίς μεταβολή στην κατεύθυνση της φόρτισης, τελικά αναδιατάσσει την κατεύθυνση της μικρο-δομής \mathbf{n}_F προς την κατεύθυνση της φόρτισης \mathbf{n} (που είναι κατά τον τριαξονικό εφελκυσμό), και έτσι ισχύει $N = 1$ και ο όρος F αντίστοιχα πλησιάζει την μέγιστη τιμή του, που είναι και πάλι 1.0. Ύστερα προκύπτει $\dot{F} = 0$ (λόγω του ότι $N = F$ στην Σχέση (3)), ενώ η επίτευξη του $A=1.0$ σημαίνει και πάλι επίτευξη της Κρίσιμης Κατάστασης.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η κατάσταση που περιγράφεται από τη συνθήκη $A = 1.0$, έχει προταθεί από τους Li & Dafalias (2012) ως η τρίτη αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη Κρίσιμης Κατάστασης, που συμπληρώνει τις άλλες δύο συνθήκες της ισοτροπικής Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης, που σχετίζεται με την κρίσιμη τιμή του αποκλίνοντα λόγου τάσεων $\eta = M$ και τις κρίσιμες τιμές του δείκτη πόρων $e = e_c$. Έτσι λοιπόν, η Κρίσιμη Κατάσταση σύμφωνα με την ACST προκύπτει όταν και μόνο όταν έχουμε:

Σταθερές αποκλίνουσες τάσεις ($p = 0, q = 0$), και ο αποκλίνων λόγος των τάσεων $\eta = q/p = M$, όπου M ο αποκλίνων λόγος των τάσεων στη Κρίσιμη Κατάσταση,

Συσσώρευση αποκλίνουσας παραμόρφωσης (αποκλίνουσα $\epsilon_q \neq 0$) υπό σταθερό όγκο, με τον δείκτη πόρων $e = e_c$, όπου e_c ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση, και

Κρίσιμη κατάσταση της μικρό-δομής, όταν $A = 1$.

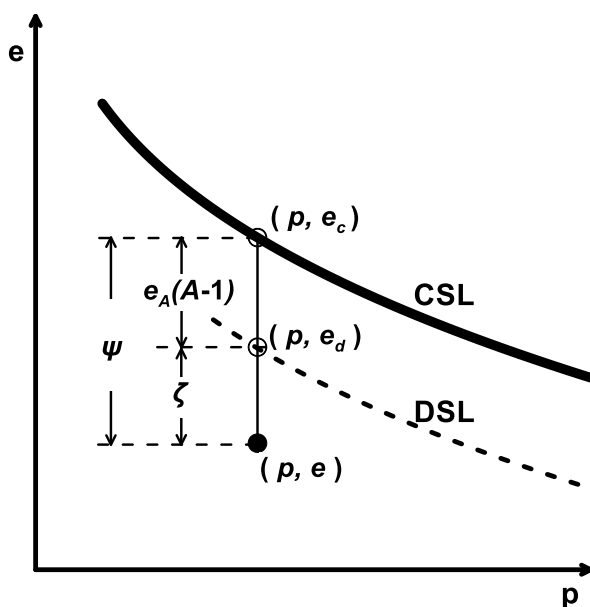
3.2.3 Επίδραση του A στη διαστολικότητα

Η παράμετρος ανισοτροπίας δομής A μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εισάγει την εξελισσόμενη ανισοτροπία της μικρό-δομής στην βασική θεωρία της κρίσιμης κατάστασης της εδαφομηχανικής. Στην θεωρία ACST των Li & Dafalias (2012), το A χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της Γραμμής Κατάστασης Διαστολικότητας (Dilatancy State Line, DSL) στο «χώρο» e - p , όπου διαχωρίζονται οι καταστάσεις που οδηγούν σε αύξηση ή μείωση του όγκου υπό διάτμηση, όπως αντίστοιχα κάνει η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (Critical State Line, CSL) στη ισοτροπική θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης. Η απόσταση του δείκτη πόρων e από την τιμή του δείκτη πόρων πάνω στην γραμμή DSL για την ίδια τάση p , που αναφέρεται ως e_d ,

ονομάζεται Παράμετρος Κατάστασης Διαστολικότητας (Dilatancy State Parameter, DSP) ζ και προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\zeta = e - e_d = (e - e_c) - e_A(A - 1) = \psi - e_A(A - 1) \quad (4)$$

όπου e_c είναι ο κρίσιμος δείκτης πόρων επί της CSL για το αντίστοιχο p , $\psi = (e - e_c)$ είναι η παράμετρος κατάστασης των Been & Jefferies (1985), A είναι η παράμετρος FAV της Σχέσης (2), και η ποσότητα $-e_A(A - 1)$ απεικονίζει την εκάστοτη κατακόρυφη παράλληλη μετατόπιση της γραμμής DSL σε σύγκριση με την σταθερή γραμμή CSL (**Σχήμα 1**). Ο όρος e_A (σταθερά του προσομοιώματος) ποσοτικοποιεί αυτή τη μετατόπιση μέχρις ότου η μικρό-δομή να θεωρηθεί ιστροπική και η παράμετρος $A = 0$, όπου και το προσομοίωμα μπορεί να θεωρηθεί σταθερό για λόγους απλοποίησης. Υπογραμμίζεται ότι με $\zeta > 0$ και $\zeta < 0$ αντίστοιχα, αποτυπώνεται η τάση για μείωση και αύξηση όγκου του εδάφους, ακριβώς όπως συμβαίνει στην ιστροπική Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης με $\psi > 0$ και $\psi < 0$. Επιπλέον, η γραμμή DSL (που μετατοπίζεται) ταυτίζεται με τη μοναδική και σταθερή CSL μόνο όταν $A = 1.0$, δηλαδή στην Κρίσιμη Κατάσταση, και επομένως μόνο τότε $\zeta = \psi$.



Σχήμα 3.1. Σχηματική αποτύπωση των παραμέτρων κατάστασης ζ και ψ και ορισμός DSL και CSL στο χώρο e - p (Li and Dafalias 2012)

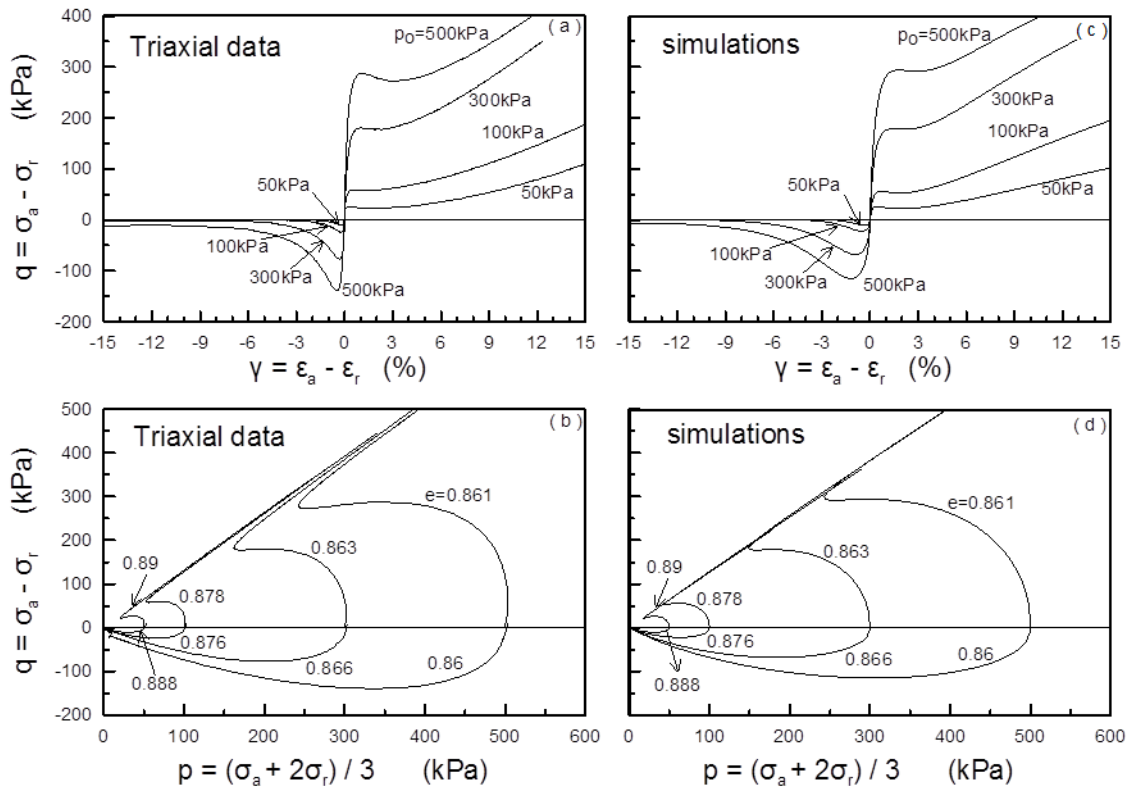
Παράλληλα, για τα συνηθισμένα εδάφη που χαρακτηρίζονται από απόθεση των κόκκων με τη βαρύτητα, οι τιμές της παραμέτρου A για φόρτιση σε εφελκυσμό είναι αρχικά αρνητικές, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για φόρτιση σε θλίψη. Επιπλέον, σύμφωνα με τις εξισώσεις (2) και (3), η παράμετρος A για φόρτιση εφελκυσμού αναμένεται να λάβει γενικώς μικρότερες αλγεβρικές τιμές σε σύγκριση με την φόρτιση θλίψης. Συνεπώς, βασισμένοι στην εξίσωση (4) και δεδομένου ότι $e_A > 0$, παρατηρείται ότι αλγεβρικά η απόσταση ζ είναι μεγαλύτερη στην φόρτιση εφελκυσμού έναντι της θλίψης. Σύμφωνα λοιπόν με την θεωρία ACST των Li & Dafalias (2012), για φόρτιση εφελκυσμού το έδαφος αναμένεται να έχει μεγαλύτερη τάση για μείωση όγκου από ό,τι σε φόρτιση θλίψης, γεγονός που επαναλαμβάνεται και επιβεβαιώνεται και από αντίστοιχα πειράματα (Yoshimine et al., 1998).

3.2.4 Ακρίβεια SANISAND στην προσομοίωση

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται παραδείγματα προσομοίωσης της συμπεριφοράς εδάφους με το σοφιστευμένο προσομοίωμα που περιγράφηκε αδρά. Έμφαση δίνεται σε δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (TC) και τριαξονικού εφελκυσμού (TE) των Yoshimine et al. (1998). Αυτές οι δοκιμές διερευνούν την μονοτονική τριαξονική συμπεριφορά της άμμου Toyoura, για ένα σχετικά μικρό εξεταζόμενο εύρος δείκτη πόρων $e = 0.86$ έως 0.89 , αλλά για ένα σχετικά μεγάλο εύρος επιβαλλόμενης τάσης $p = 50$ έως 500kPa . Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών της άμμου Toyoura με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.2**. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα διαγράμματα (a, b), ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στα διαγράμματα (c, d). Η σύγκριση αναφέρεται σε όρους αποκλινουσών τάσεων-παραμορφώσεων (διαγράμματα a, c) καθώς και τασικών οδεύσεων (διαγράμματα b, d).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 3.2**, γίνεται φανερό ότι στις δοκιμές TE η άμμος έχει πολύ μεγαλύτερη τάση για συμπίεση, σε σύγκριση με την εικόνα των τασικών οδεύσεων των TC, για το ίδιο δείκτη πόρων e και για ίδιες τιμές της τάσης p . Αυτή η έντονη διαφορά στην συμπεριφορά προσομοιώνεται πολύ καλά από το προτεινόμενο σοφιστευμένο προσομοίωμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τόσο τα πειραματικά δεδομένα όσο και τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το προσομοίωμα,

επισημαίνουν την σπουδαιότητα των αρχικών συνθηκών στην συμπεριφορά του εδάφους. Για παράδειγμα, ενώ στις δοκιμές ΤΕ για αρχικό $p = 50 - 300 \text{ kPa}$, το έδαφος φτάνει σε «στατική ρευστοποίηση» (δηλαδή $p = 0$ & $q = 0$), για αρχικό $p = 500 \text{ kPa}$ τόσο τα πειραματικά δεδομένα όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ξεκάθαρα ότι αποφεύγεται η συνθήκη «στατικής ρευστοποίησης» (καθώς $q \neq 0$), λόγω του σχετικά μικρότερου δείκτη πόρων.



Σχήμα 3.2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών ιστροπικής στερεοποιημένης άμμου Toyoura (a, b) με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (c, d) του προτεινόμενου ανισοτροπικού μοντέλου, σε όρους: a, c) αποκλινοσών τάσεων-παραμορφώσεων και b, d) τασικών γραμμών. (Papadimitriou et al. 2015)

3.3 Προσομοίωση δοκιμής φυγοκεντρική για διάδοση διάρρηξη ρήγματος

3.3.1 Διάταξη πειράματος και αριθμητική προσομοίωση

Στόχος της εργασίας αποτελεί η προσομοίωση της διάδοσης διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης. Ανωτέρω περιγράφηκε το προσομοίωμα και η

βαθμονόμησή του σε άμμο Τογουρα, ενώ εδώ γίνεται αριθμητική προσομοίωση των (σχετικών με διάδοση διάρρηξης ρήγματος) πειραμάτων σε φυγοκεντριστή των Cai et al (2016), τα οποία είναι και τα μοναδικά που χρησιμοποιούν την άμμο Τογουρα, για την οποία έχει βαθμονομηθεί το προσομοίωμα SANISAND. Η διάταξη και των δύο πειραμάτων που διεξήχθησαν από τους Cai et al παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3. Οι βασικότεροι παράμετροι των δοκιμών είναι οι εξής :

Επιτάχυνση φυγοκεντριστή : 50g

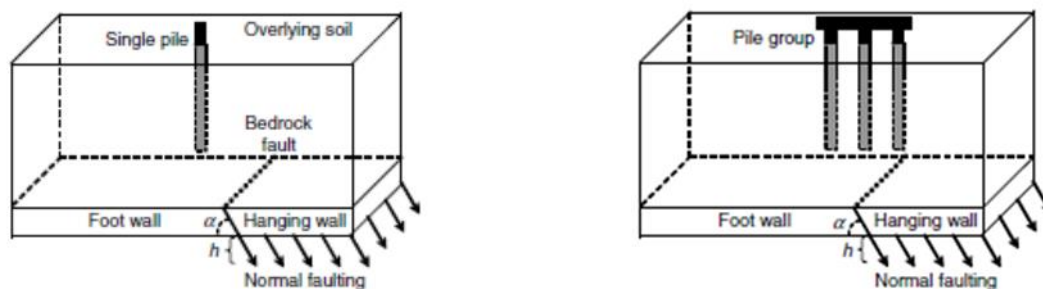
Γεωμετρία εδαφικής στρώσης (κλίμακα πρωτοτύπου): 58m (μήκος), 18m (πλάτος), 20m (ύψος)

Ιδιότητες των πασσάλων: Τετραγωνικής διατομής με εξωτερική διάμετρο $D=65\text{cm}$, μήκος $L=15\text{m}$ και δυσκαμψία $EI=187500\text{kNm}^2$ (κλίμακα πρωτοτύπου). Δεν προσομοιώνονται εδώ, καθώς η ανάλυση είναι ελευθέρου πεδίου, δηλαδή χωρίς πασσάλους.

Ιδιότητες της άμμου: Άμμος Τογουρα, σχετικής πυκνότητας $D_r=62\%$ (δοκιμή με 1 πάσσαλο) & 65% (δοκιμή με ομάδα πασσάλων)

Διεπιφάνεια άμμου - πασσάλου: Γωνία τριβής διεπιφάνειας $\delta=29^\circ$

Ρήγμα: Κανονικό, γωνίας $\alpha=70^\circ$



Σχήμα 3.3: Διάταξη των δύο πειραματικών δοκιμών των Cai et al (2016)

3.3.2 Διερεύνηση αξιοπιστίας 2Δ προσομοίωσης

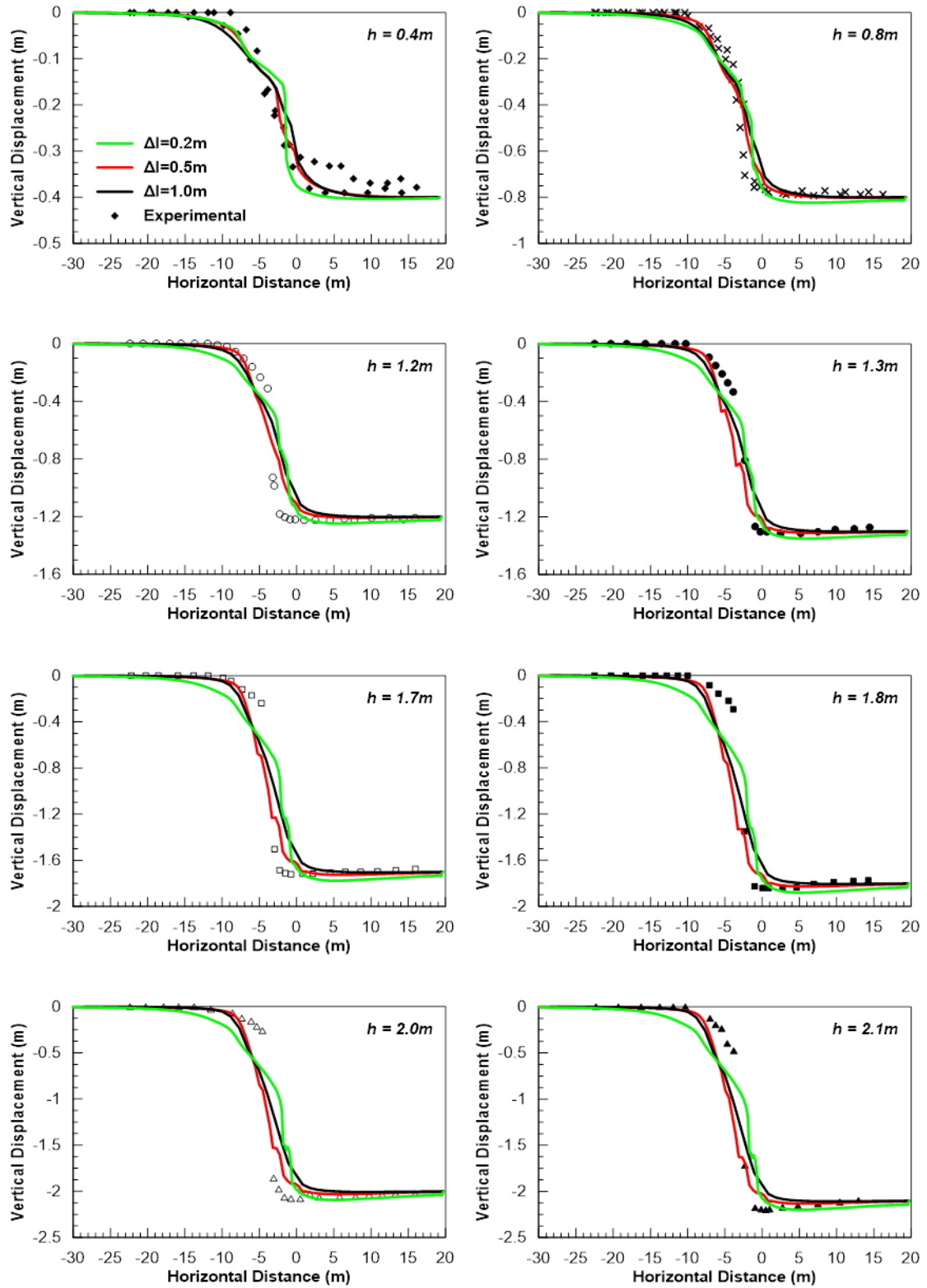
Για τις 2-D αναλύσεις, κρίσιμο είναι το γεγονός της πυκνότητας του καννάβου. Υπάρχουν δύο βασικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση της ορθότητας της δισδιάστατης προσομοίωσης με το SANISAND: (α) η 2-D ανάλυση απαιτεί ένα αρκετά πυκνό κάρναβο για το επικείμενο πρόβλημα, και οπωσδήποτε

πυκνότερο από στοιχεία διαστάσεων 1m x 1m (Loukidis et al. 2009), (β) το λογισμικό FLAC επιτρέπει την εφαρμογή ειδικών τεχνικών αναδιάταξης του καννάβου, οι οποίες πρακτικά χτίζουν εκ νέου το κάνναβο κάθε φορά που συμβαίνει ένα μη-επιθυμητό λάθος στη γεωμετρία του παραμορφωμένου καννάβου. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης περιγράφει την διαδικασία με την οποία επαναδιατάσσεται ο κάνναβος βασισμένος στην υπάρχουσα γεωμετρία, ενώ ο αλγόριθμος αντιστοιχεί τις τάσεις και τις ιδιότητες στα ίδια στοιχεία από τον παλιό στο νέο κάνναβο.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του προγραμματισμού μίας τέτοιας διαδικασίας μέσω της γλώσσας προγραμματισμού του λογισμικού FLAC, FISH, η οποία εφαρμόστηκε σε τρεις διαφορετικές ζώνες με πάχος στοιχείων $\Delta l=0.2, 0.5$ και $1.0m$. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται στα **Σχήματα 3.4 και 3.5**, με βάση την μετακίνηση του εδάφους και τους μηχανισμούς αστοχίας αντίστοιχα.

Γίνεται φανερό ότι η ζώνη με τα στοιχεία μήκους $\Delta l=0.2m$ οδηγεί σε ένα μοτίβο μικρής τοπικής μετακίνησης, καθώς επίσης και σε μία πολύ πιο κατακόρυφη ζώνη διάρρηξης. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στην μεγάλη διαστολικότητα που λαμβάνει μέρος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία προκαλείται από τις πολύ περιορισμένες εδαφικές τάσεις ως αποτέλεσμα του μικρού μεγέθους των στοιχείων (στο προσομοίωμα SANISAND η διαστολικότητα είναι συνάρτηση του δείκτη πόρων και της μέσης ενεργού τάσης).

Για περαιτέρω επιβεβαίωση των παραπάνω, οι αναλύσεις των ζωνών με $\Delta l=0.2$ and $0.5m$ επαναλήφθηκαν, θέτοντας δοκιμαστικά ίση με το μηδέν την παράμετρο διαστολικότητας του προσομοιώματος ($A_0 = 0$). Βασικό συμπέρασμα των δοκιμών αυτών ήταν η πρακτική ταύτιση των επιφανειών διάρρηξης, ανεξαρτήτως πάχους στοιχείων (δεν δείχνονται εδώ χάριν συντομίας). Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, για να βελτιστοποιηθεί η προσπάθεια προσομοίωσης μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και για να αποφευχθούν μη-ρεαλιστικές προσομοιώσεις, η περίπτωση $\Delta l = 0.5m$ επιλέχθηκε τελικά για την αριθμητική προσομοίωση, καθώς προσεγγίζει βέλτιστα την παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα και διατηρεί μια σχετικά λεπτή ζώνη διάρρηξης μέσα στην εδαφική στρώση. Επισημαίνεται ότι δεν υπάρχει αποτύπωση της ζώνης διάρρηξης στο πείραμα των Cai et al. (2016).



Σχήμα 3.4: Αριθμητική διαστάσιμη προσομοίωση διάδοσης διάρρηξης ρήγματος για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου.

$\Delta l=0.2m$



$\beta. \Delta l=0.5m$



$\gamma. \Delta l=1.0m$



Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης για $\Delta l=0.2, 0.5$ και $1.0m$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΡΗΣΕΩΣ ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική διερεύνηση της διάδοσης της διάρρηξης κανονικού ρήγματος μέσω αμμόδους στρώσης με χρήση ελαστοπλαστικού προσομοιώματος με χαλάρωση Strain Softening (SS), δηλαδή ενός απλούστερου και υπολογιστικά ευχερέστερου προσομοιώματος ανάλυσης σε σύγκριση με το SANISAND που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Σκοπός αυτής της διερεύνησης είναι να αποτιμηθεί η απόκλιση στις προβλέψεις ενός απλουστευμένου προσομοιώματος βάση των αποτελεσμάτων του πειράματος Cai et al (2016), στο οποίο στηρίζεται η διερεύνηση, καθώς και της ανάλυσης με το προσομοίωμα SANISAND.

Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια όπου εξετάστηκαν διαδοχικώς η επίδραση χρήσης του απλούστερου προσομοιώματος SS σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου και ύστερα στο επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (δοκιμή των Cai et al. 2016). Αρχικά, με βάση το προσομοίωμα SS πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε επίπεδο στοιχείου (1m x 1m), εξετάζοντας για τέσσερα διαφορετικά βάθη z(m) την συμπεριφορά του εδάφους σε δύο δοκιμές: τριαξονικής συμπίεσης και απλής διάτμησης. Έτσι, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του προσομοιώματος SS προέκυψε μία βέλτιστη βαθμονόμηση, η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως «ανάλυση αναφοράς», που συγκρινόταν καλά με την αντίστοιχη πρόβλεψη του προσομοιώματος SANISAND για διατμητικές παραμορφώσεις 10% - 20%, δηλαδή τις μεγάλες τιμές παραμορφώσεων μέσα στη ζώνη διάτμησης.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι της ανάλυσης αναφοράς είχαν τις εξής τιμές:

Μέγιστη γωνία τριβής $\phi_p=39.5^\circ$

Παραμένουσα γωνία τριβής $\phi_{res}=34^\circ$

Μέγιστη γωνία διαστολικότητας $\psi=15^\circ$

Πλαστική παραμόρφωση έως την «κρίσιμη κατάσταση» $e_q^p=20\%$

Μέτρο ελαστικότητας Young $E(\text{kPa})=9500 \cdot z(\text{m})^{0.5}$

Λόγος poisson: $\nu=0.33$.

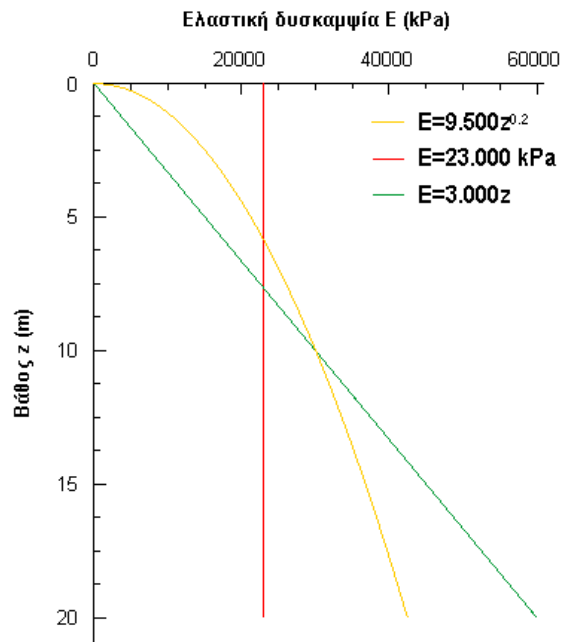
Προκειμένου, επομένως, να διερευνηθεί η αξιοπιστία του απλού προσομοιώματος SS εξετάστηκε η επίδραση δύο σημαντικών παραμέτρων του μοντέλου αυτού: α) ο τρόπος μεταβολής της ελαστικής δυσκαμψίας $E(\text{kPa})$ με το βάθος $z(\text{m})$, και β) η μέγιστη γωνία διαστολικότητας $\psi(^{\circ})$ σε συνδυασμό με την πλαστική παραμόρφωση έως την κρίσιμη κατάσταση $e_q^p(\%)$. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι εξετάστηκε ξεχωριστά η επίδραση των δύο παραμέτρων, ενώ σε κάθε περίπτωση οι υπόλοιπες παράμετροι τέθηκαν όπως στην ανάλυση αναφοράς του προσομοιώματος SS.

4.2 Επίδραση βαθμονόμησης ελαστικής δυσκαμψίας E με το βάθος

4.2.1 Δοκιμές εδαφικού στοιχείου

Εξετάστηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι μεταβολής της ελαστικής δυσκαμψίας $E(\text{kPa})$ με το βάθος $z(\text{m})$: 1) Γραμμική μεταβολή με συνάρτηση $E=3.000 \cdot z$ και 2) Σταθερή δυσκαμψία με το βάθος και ίση με $E=23.000\text{kPa}$. Υπενθυμίζουμε ότι στην ανάλυση αναφοράς η δυσκαμψία E μεταβάλλεται παραβολικά με το βάθος ακολουθώντας την συνάρτηση $E=9500 \cdot z^{0.5}$. Στο **Σχήμα 4.1** συγκρίνονται οι τρεις θεωρηθέντες τρόποι μεταβολής του E με το βάθος, απ' όπου προκύπτει ότι είναι μεταξύ τους συγκρίσιμοι και αποτελούν τρεις εναλλακτικές θεωρήσεις για την μεταβολή της ελαστικής δυσκαμψίας με το βάθος σε πραγματικές εδαφικές στρώσεις.

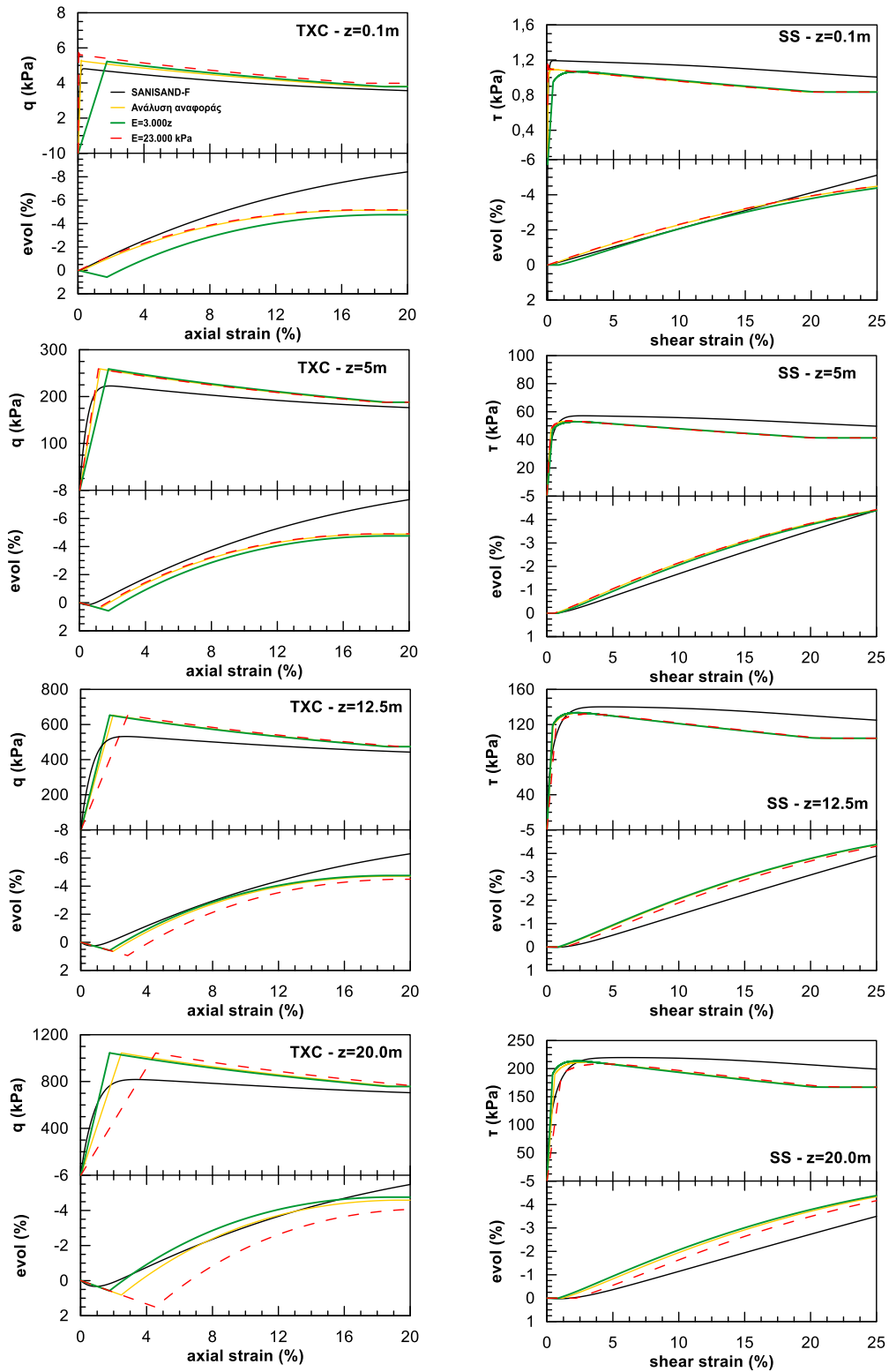
Οι τρεις αυτές παραδοχές για την μεταβολή του E με το βάθος χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε διάφορα βάθη z στο επίπεδο εδαφικού στοιχείου υπό τριαξονική συμπίεση και απλή διάτμηση. Σκοπός ήταν η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων του SS με την αντίστοιχη συμπεριφορά κατά SANISAND. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.2**, όπου απεικονίζεται για κάθε δοκιμή και για κάθε βάθος z η ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής - διατμητικής παραμόρφωσης καθώς και οι σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων για τριαξονική συμπίεση (αριστερά) και απλή διάτμηση (δεξιά).



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση των τριών παραδοχών μεταβολής της ελαστικής δυσκαμψίας E(kPa) με το βάθος z(m).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.2**, παρατηρείται ότι η ογκομετρική παραμόρφωση του απλουστευμένου προσομοιώματος είναι ίδια και ανεξάρτητη του βάθους. Αυτό σημαίνει ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η σχετική επίδραση της ενεργούς τάσης στο προσομοίωμα SS. Παράλληλα, όσον αφορά τη μέση αντοχή του εδαφικού στοιχείου κατά SS σε όλα τα βάθη z, στη τριαξονική συμπίεση φαίνεται να υπερεκτιμάται και στην απλή διάτμηση να υποεκτιμάται. Αντιθέτως, όσον αφορά στη μέση διαστολικότητα φαίνεται να υποεκτιμάται στην τριαξονική συμπίεση και να υπερεκτιμάται στην απλή διάτμηση, συγκριτικά πάντα με το προσομοίωμα SANISAND που θεωρείται ότι προσφέρει τη βέλτιστη ακρίβεια.

Πιο συγκεκριμένα, αξίζει να σημειωθεί ότι η περίπτωση με το σταθερό E υπερεκτιμά τη δυσκαμψία του εδαφικού στοιχείου για μικρά βάθη $z < 10\text{m}$, ενώ υποεκτιμά την διαστολικότητα για μεγαλύτερα βάθη $z > 10\text{m}$. Ακριβώς τα αντίθετα συμβαίνουν στην περίπτωση του γραμμικώς μεταβαλλόμενου E, χωρίς ωστόσο οι διαφορές αυτές να είναι συγκριτικά μεγάλες. Τέλος, όπως παρατηρείται και στο **Σχήμα 4.2**, στην περίπτωση της απλής διάτμησης η συμπεριφορά των διάφορων παραδοχών του προσομοιώματος SS δεν διαφέρουν έντονα από τα αποτελέσματα του ακριβέστερου SANISAND, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα στην περίπτωση της τριαξονικής συμπίεσης.



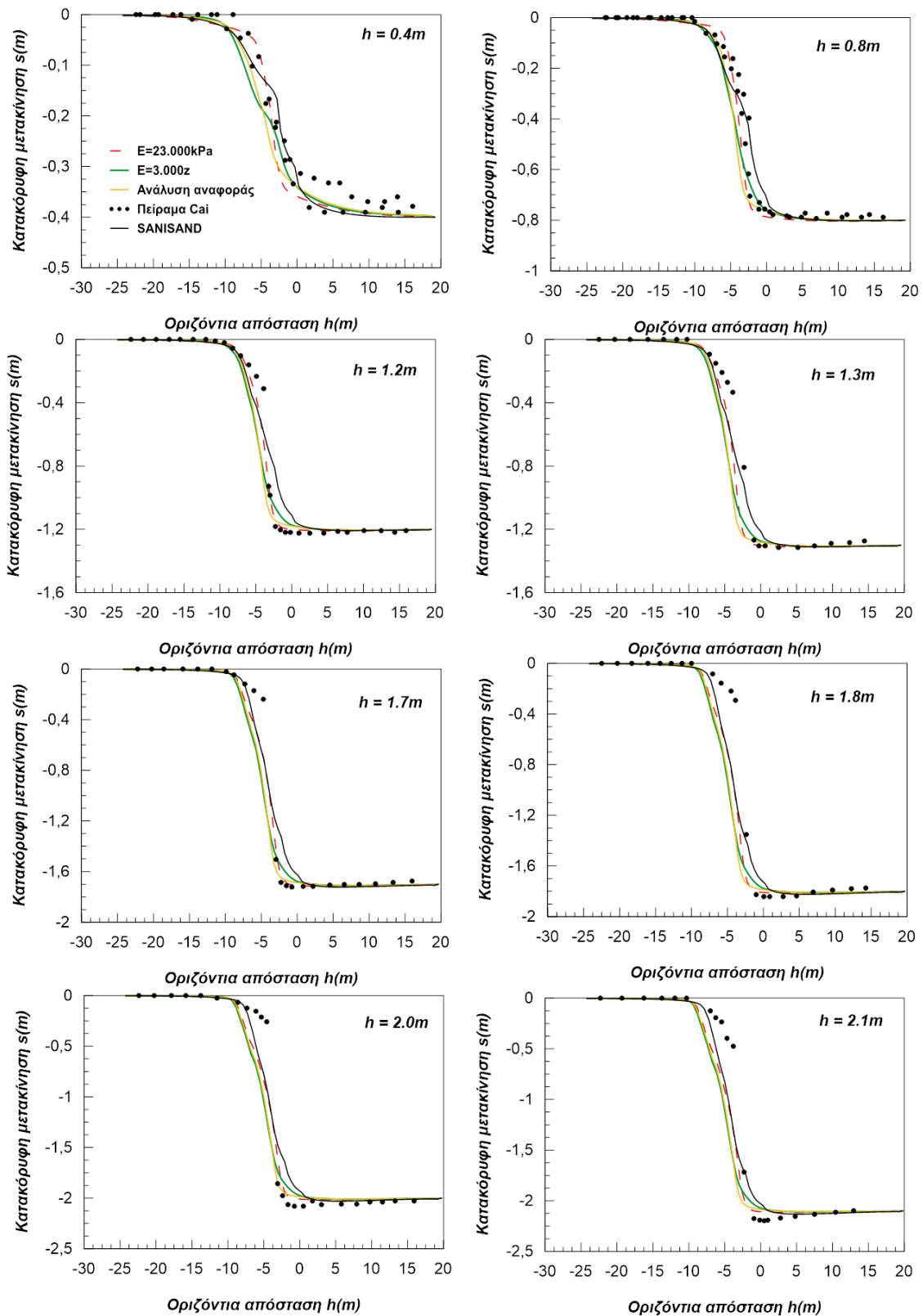
Σχήμα 4.2 Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (TXC, αριστερά) και απλής διάτμησης (δεξιά) εδαφικών στοιχείων σε διάφορα βάθη από $z=0.1\text{m}$ έως $z=20\text{m}$, για το προσομοίωμα SANISAND και τρεις διαφορετικές βαθμονομήσεις της ελαστικής δυσκαμψίας E του προσομοιώματος SS.

4.2.2 Ανάλυση της διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Εξετάστηκαν ομοίως οι τρεις (3) τρόποι μεταβολής της ελαστικής δυσκαμψίας E (kPa) με το βάθος z (m) που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.2.1 και η επίδραση τους στη χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος SS στη μελέτη της διάδοσης της διάρρηξης ενός κανονικού ρήγματος γωνίας 70° μέσω αμμώδους στρώσης. Χάρην σύγκρισης, οι διαστάσεις του προσομοιώματος των πεπερασμένων διαφορών είναι όμοιες με εκείνες της ανάλυσης κατά SANISAND του Κεφαλαίου 3. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με το προσομοίωμα SS με την αντίστοιχη συμπεριφορά κατά SANISAND, καθώς και με τα αποτελέσματα του πειράματος των Cai et al (2016). Η επιβολή της μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχους πραγματοποιήθηκε σε 8 βήματα, ώστε να είναι σύμφωνη με την πειραματική διαδικασία. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.3**, όπου απεικονίζεται για κάθε βήμα της μετατόπισης στο υπόβαθρο η παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια τόσο από αναλύσεις όσο και από το πείραμα των Cai et al (2016).

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.3** είναι ότι οι προσομοιώσεις με το SS προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και την ανάλυση με το ακριβές προσομοίωμα SANISAND. Αναμενόμενα, τα αποτελέσματα του SANISAND παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια όσον αφορά στην παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα. Αντιθέτως, τα απλουστευμένα προσομοιώματα εμφανίζουν περισσότερο απότομη κλίση της παραμορφωμένης επιφάνειας, με πιο έντονη την κλίση πλησίον της επιφάνειας στην περίπτωση του σταθερού μέτρου ελαστικής δυσκαμψίας E και μάλιστα κυρίως στα αρχικά βήματα μετατόπισης, δηλαδή για $h \leq 1.3\text{m}$ (όπου και το πρακτικό ενδιαφέρον).

Συνοψίζοντας, η επίδραση του μέτρου ελαστικής δυσκαμψίας E στην συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου κατά SS διαφαίνεται μικρής σημασίας. Είναι φανερό και από τα διαγράμματα παραμορφωμένης εδαφικής επιφάνειας για τα διαδοχικά βήματα μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχους, ότι και οι τρεις περιπτώσεις διαφορετικών μεταβολών της δυσκαμψίας E έχουν μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα του ακριβέστερου προσομοιώματος SANISAND. Η απόκλιση αυτή, τέλος, είναι ακόμη πιο ασήμαντη στα μεγαλύτερα βήματα μετατόπισης, δηλαδή για $h > 1.3\text{m}$.

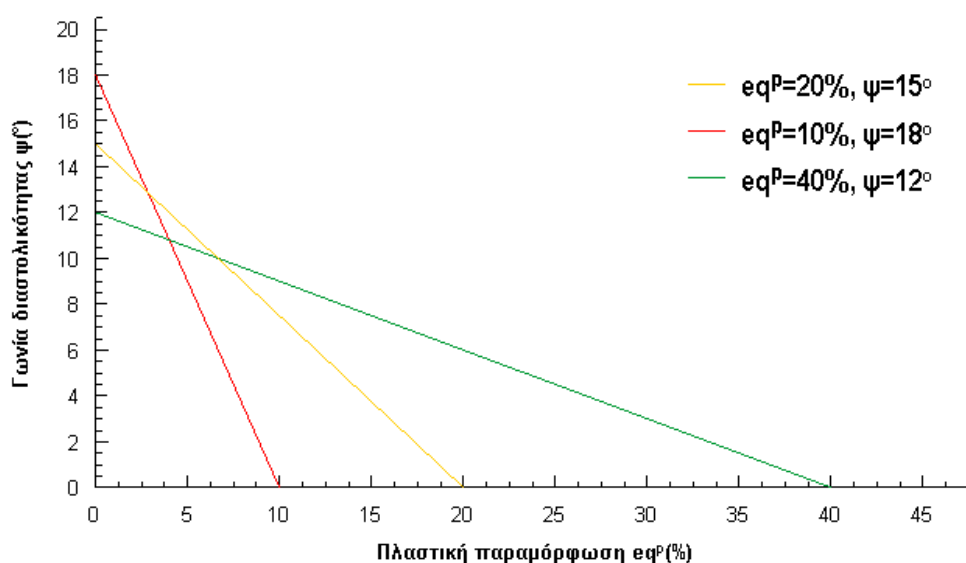


Σχήμα 4.3 Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και πειραματικών μετρήσεων για την παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια για διαδοχικά βήματα μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχου κανονικού ρήγματος (αριθμητικές προβλέψεις: SANISAND και τρεις διαφορετικές βαθμονομήσεις της ελαστικής δυσκαμψίας E για το προσομοίωμα SS).

4.3 Επίδραση βαθμονόμησης διαστολικότητας και χαλάρωσης

4.3.1 Δοκιμές εδαφικού στοιχείου

Εδώ εξετάστηκαν δύο εναλλακτικά διαφορετικά ζεύγη μέγιστης διαστολικότητας $\psi(^{\circ})$ και πλαστικής παραμόρφωσης ή χαλάρωσης $e_q^P(\%)$: 1)Μέγιστη διαστολικότητα $\psi=18^{\circ}$ και πλαστική παραμόρφωση $e_q^P=10\%$ και 2)Μέγιστη διαστολικότητα $\psi=12^{\circ}$ και πλαστική παραμόρφωση $e_q^P=40\%$. Υπενθυμίζεται ότι στην ανάλυση αναφοράς η μέγιστη διαστολικότητα είναι ίση με $\psi=15^{\circ}$ και η πλαστική παραμόρφωση με $e_q^P=20\%$, όπως συνοψίζονται στο **Σχήμα 4.4** χάριν σύγκρισης.



Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση των τριών ζευγών γωνίας διαστολικότητας $\psi(^{\circ})$ και πλαστικής παραμόρφωσης $e_q^P(\%)$.

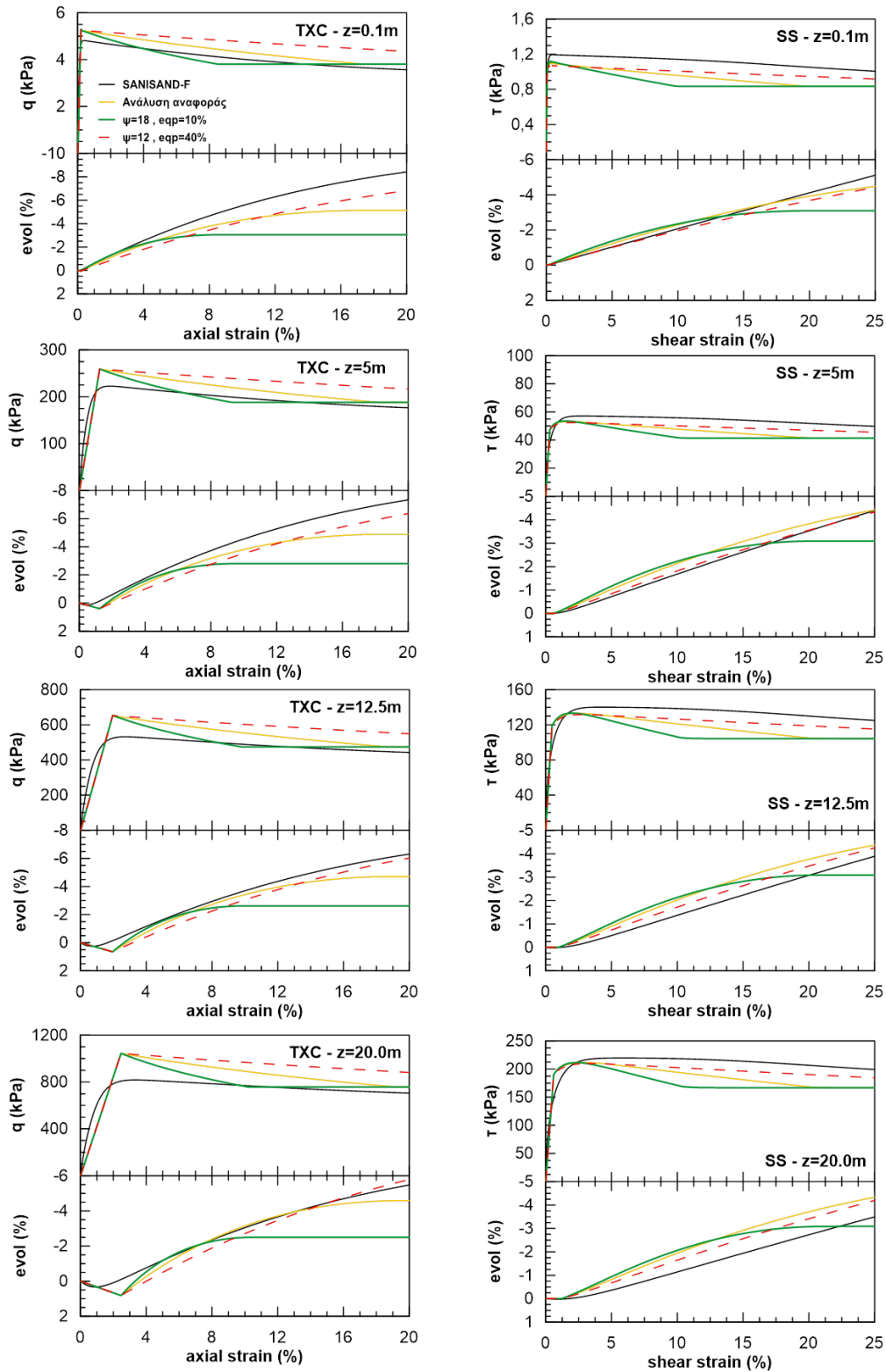
Οι τρεις αυτές παραδοχές της βαθμονόμησης διαστολικότητας και χαλάρωσης προσαρμόστηκαν στο απλουστευμένο προσομοίωμα SS και για διάφορα βάθη $z(m)$ εξετάστηκε η συμπεριφορά ενός εδαφικού στοιχείου υπό τριαξονική συμπίεση και απλή διάτμηση. Σκοπός και σε αυτή την διερεύνηση, ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων SS με την αντίστοιχη συμπεριφορά του ακριβέστερου προσομοιώματος SANISAND. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.5**, όπου απεικονίζεται για κάθε δοκιμή και για κάθε βάθος z η ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής - διατμητικής παραμόρφωσης

καθώς και οι σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων, για τριαξονική συμπίεση (αριστερά) και απλή διάτμηση (δεξιά).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.5**, παρατηρείται ότι η ογκομετρική παραμόρφωση του απλουστευμένου προσομοιώματος είναι ίδια και ανεξάρτητη του βάθους, γεγονός που σημαίνει ότι η σχετική επίδραση της ενεργούς τάσης δεν λαμβάνεται υπόψη στο απλουστευμένο προσομοίωμα SS. Επιπλέον, όσον αφορά τη μέση αντοχή του εδαφικού στοιχείου στα διάφορα βάθη z , φαίνεται να υπερεκτιμάται στη τριαξονική συμπίεση και να υποεκτιμάται στην απλή διάτμηση. Αντιθέτως, η μέση διαστολικότητα υποεκτιμάται στην τριαξονική συμπίεση και υπερεκτιμάται στην απλή διάτμηση. Αυτά τα συμπεράσματα είναι γενικής εφαρμογής, καθώς ποιοτικά προέκυψαν και στο **Σχήμα 4.3** όπου διερευνήθηκε η επίδραση της δυσκαμψίας E .

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανάλυση αναφοράς με μέγιστη διαστολικότητα ίση με $\psi=15^\circ$ και πλαστική παραμόρφωση $e_q^p=20\%$ φαίνεται να είναι η βέλτιστη παραδοχή ως προς την προσέγγιση κατά SANISAND, τόσο από άποψη αντοχής όσο και από άποψη διαστολικότητας. Είναι γεγονός επίσης ότι όσο πιο μικρή είναι η πλαστική παραμόρφωση $e_q^p(\%)$, τόσο περισσότερο απομακρύνεται η διαστολικότητα από την προσέγγιση του ακριβέστερου προσομοιώματος SANISAND. Μάλιστα, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.5**, στις δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (TXC, αριστερά) η διαστολικότητα του προσομοιώματος SANISAND συνεχίζει να αυξάνεται σημαντικά ακόμα και στην περίπτωση μεγάλων τιμών αξονικής παραμόρφωσης ($> 20\%$), και το αντίστοιχο προκύπτει και για απλή διάτμηση (δεξιά) όπου η διαστολικότητα συνεχίζει να αυξάνει και για μεγάλες τιμές διατμητικής παραμόρφωσης ($> 25\%$).

Τέλος, συγκρίνοντας τις δύο βαθμονομήσεις των Κεφαλαίων 4.2.1 και 4.3.1, προκύπτει ότι η επίδραση της βαθμονόμησης διαστολικότητας και χαλάρωσης επηρεάζει περισσότερο τις προβλέψεις του απλουστευμένου προσομοιώματος SS σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, σε σύγκριση με την βαθμονόμηση της δυσκαμψίας. Άλλωστε, είναι φανερό και από τα **Σχήματα 4.2 και 4.5**, ότι οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των παραδοχών μέγιστης διαστολικότητας ψ και πλαστικής παραμόρφωσης e_q^p του απλουστευμένου προσομοιώματος SS είναι εντονότερες σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της επίδρασης των μεταβολών ελαστικής δυσκαμψίας E .



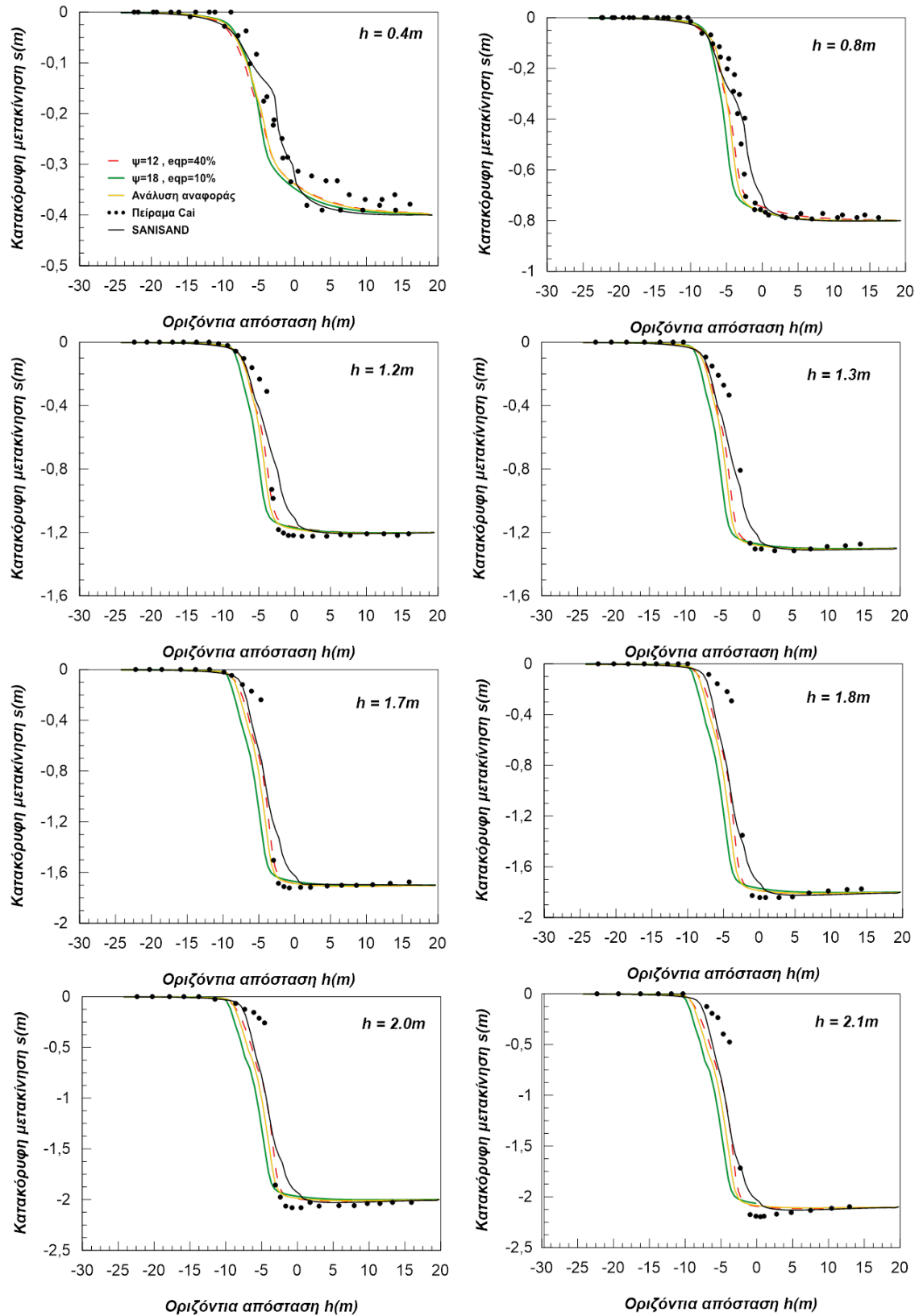
Σχήμα 4.5 Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (TXC, αριστερά) και απλής διάτμησης (δεξιά) εδαφικών στοιχείων σε διάφορα βάθη από $z=0.1\text{m}$ έως $z=20\text{m}$, για το προσομοίωμα SANISAND και τρεις διαφορετικές βαθμονομήσεις της διαστολικότητας και της χαλάρωσης του προσομοιώματος SS.

4.3.2 Ανάλυση της διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος

Εξετάστηκαν ομοίως οι τρεις (3) παραδοχές βαθμονόμησης της πλαστικής παραμόρφωσης $\epsilon_q^P(\%)$ και της διαστολικότητας $\psi(^{\circ})$ που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.3.1, καθώς και η επίδρασή τους στη χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος SS. Για τη μελέτη της διάδοσης της διάρρηξης ενός κανονικού ρήγματος γωνίας 70° οι διαστάσεις και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος πεπερασμένων διαφορών, είναι όμοια με εκείνα της ανάλυσης κατά SANISAND του Κεφαλαίου 3. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων του απλουστευμένου προσομοιώματος με την αντίστοιχη συμπεριφορά κατά SANISAND καθώς και με τα αποτελέσματα του πειράματος των Cai et al (2016).

Η επιβολή της μετατόπισης του κινούμενου τεμάχους στο υπόβαθρο πραγματοποιήθηκε ομοίως σε 8 βήματα, ώστε να είναι σύμφωνη με την πειραματική διαδικασία. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.6**, όπου απεικονίζεται για κάθε βήμα του υποβάθρου η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, με βάση τις τρεις αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα SS, το προσομοίωμα SANISAND (από Κεφάλαιο 3) και τις πειραματικές καταγραφές. Σύμφωνα λοιπόν με το **Σχήμα 4.6**, παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των παραδοχών βαθμονόμησης χαλάρωσης και διαστολικότητας από τα αποτελέσματα SANISAND είναι εντονότερες σε σύγκριση με την επιρροή της δυσκαμψίας E. Παράλληλα, γίνεται φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστική παραμόρφωση ϵ_q^P , τόσο καλύτερα προσεγγίζει την καμπύλη SANISAND. Στα τελευταία μάλιστα βήματα επιβαλλόμενης μετατόπισης φαίνεται σχεδόν να ταυτίζονται οι καμπύλες του SANISAND και του SS για πλαστική παραμόρφωση $\epsilon_q^P=40\%$. Συνεπώς προκύπτει ότι η χαλάρωση (σε όρους αντοχής) και η διαστολικότητα είναι πιο σημαντικές παράμετροι από ότι η (ελαστική) δυσκαμψία για το εν λόγω φυσικό πρόβλημα.

Κλείνοντας το Κεφάλαιο 4, υπογραμμίζεται ότι το απλουστευμένο προσομοίωμα SS θα χρειαζόταν αναβαθμονόμηση αν η άμμος του πειράματος ήταν διαφορετικής σχετικής πυκνότητας, και πιθανώς αν το πάχος της στρώσης ήταν πολύ μεγαλύτερο. Αυτές οι αναβαθμονομήσεις δεν είναι αναγκαίες για το SANISAND, γεγονός που το καθιστά ελκυστικότερο προς χρήση, πέραν της αυξημένης ακριβείας που απέδειξε στις συγκρίσεις αυτού του κεφαλαίου με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.6 Σύγκριση αριθμητικών προβλέψεων και πειραματικών μετρήσεων για την παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια για διαδοχικά βήματα μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχου κανονικού ρήγματος (αριθμητικές προβλέψεις: SANISAND και τρεις διαφορετικές βαθμονομήσεις της διαστολικότητας και της χαλάρωσης του προσομοιώματος SS).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης ρηγμάτων διαφορετικών τύπων (κανονικού, ανάστροφου, «κατακόρυφου») μέσω αμμώδους στρώσης μικρής, μέσης και μεγάλης πυκνότητας. Η προσομοίωση γίνεται με χρήση του σοφιστευμένου καταστατικού προσομοιώματος της οικογένειας SANISAND, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, όπως βαθμονομήθηκε για άμμο Toyoura και επαληθεύθηκε μέσω συγκρίσεων με το πείραμα φυγοκεντριστή των Cai et al. (2016).

Το προφίλ του εδάφους της προσομοίωσης αποτελείται από μία επίπεδη ομοιόμορφη στρώση άμμου (διαφορετικής πυκνότητας για κάθε ανάλυση), σταθερού πάχους $H=20\text{m}$ που υπέρκειται στρώσης βράχου. Μελετάται η διάδοση της διάρρηξης από τον επίπεδο οριζόντιο (πριν τη διάρρηξη) βράχο, διαμέσου του αμμώδους εδάφους και μέχρι την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια.

Όσον αφορά την πυκνότητα του καννάβου του προσομοιώματος, αξίζει να επισημανθεί ότι δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκτασή του. Ειδικότερα, παρουσιάζει μία πύκνωση στην περιοχή πέριξ του κέντρου του καννάβου (όπου εντοπίζεται το ρήγμα στο υπόβαθρο και έχει οριζόντια απόσταση ίση με το μηδέν), όπου το πάχος των στοιχείων είναι 0.5m (συμβατό με τη βαθμονόμηση στο Κεφάλαιο 3). Συνολικά περιλαμβάνονται 5.600 στοιχεία, γεγονός που τον καθιστά ένα ικανοποιητικά πυκνό για την συγκεκριμένη ανάλυση κάρναβου, που έχει πάχος 20m και συνολικό πλάτος 80m . Επιπλέον, η βάση του καννάβου είναι διαιρεμένη σε δύο τμήματα, ένα εκ των οποίων παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια της διάρρηξης (υποκείμενο σταθερό τέμαχος) και το υπόλοιπο (υπερκείμενο τέμαχος) που υλοποιεί μετακινούμενο σε βήματα τη διάρρηξη στο υπόβαθρο. Έτσι λοιπόν, σταδιακά, για την προσομοίωση του ρήγματος επιβάλλονται μετατοπίσεις κόμβων της βάσης του κάρναβου που αντιστοιχούν στο υπερκείμενο τέμαχος, που έχουν διεύθυνση παράλληλη με την εκάστοτε γωνία β του ρήγματος, ενώ στα πλευρικά όρια του καννάβου επιτρέπεται η ελεύθερη κατακόρυφη ολίσθηση. Μάλιστα, στην παρούσα

εργασία επιβλήθηκαν πέντε (5) στάδια μετατόπισης, τα εξής: $h = 0.2\text{m}, 0.4\text{m}, 0.8\text{m}, 1.2\text{m}$ και 1.6m , που αντιστοιχούν σε 1%, 2%, 4%, 6% και 8% του πάχους της εδαφικής στρώσης. Εξετάστηκαν συνολικά εννέα (9) διαφορετικές αναλύσεις, οι οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί στον **Πίνακα 5.1**. Τα ρήγματα που διερευνήθηκαν είχαν τρεις διαφορετικές γωνίες β ως προς την οριζόντιο και έτσι προέκυψαν: ένα κανονικό ρήγμα με γωνία 45° , ένα ανάστροφο με γωνία 135° (δηλαδή αντίστοιχο με το κανονικό, αλλά με αντίθετης φοράς μετακίνηση) και ένα «κατακόρυφο» με γωνία 85° . Επισημαίνεται ότι η επιλογή για γωνία 85° αντί για της «ορθότερης» 90° έγινε για αριθμητικούς λόγους, καθώς η «ορθότερη» γωνία οδηγεί σε δυσχερή εφαρμογή της διάρρηξης στο υπόβαθρο όταν αυτή φτάνει σε μεγάλες τιμές h , ενώ η απόκλιση στα αποτελέσματα κρίνεται πρακτικώς αμελητέα (π.χ. όπως παρουσιάζεται παρακάτω η διάρρηξη διαδίδεται κατακόρυφα για $\beta = 85^\circ$, όπως έχει παρατηρηθεί πολλές φορές στη φύση, βλ. Κεφάλαιο 2). Παράλληλα, διακρίθηκαν τρεις (3) διαφορετικές σχετικές πυκνότητες $D_r(\%)$ της στρώσης άμμου, μία πυκνή με $D_r=80\%$, μία χαλαρή με $D_r=20\%$ και μία μέσης πυκνότητας άμμος με $D_r=50\%$. Σε όλες τις περιπτώσεις ανεξαρτήτου σχετικής πυκνότητας, η άμμος έχει ειδικό βάρος $\gamma=1.522 \text{ kg/m}^3$, και το προσομοίωμα SANISAND δε χρειάστηκε αναβαθμονόμηση για αυτή την αλλαγή, καθώς αρκεί η αναπροσαρμογή του δείκτη πόρων e . Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται σε ξεχωριστά τα βασικά αποτελέσματα για τους διαφορετικούς τύπους ρηγμάτων, ενώ η εργασία αυτή συμπληρώνεται με το **Παράρτημα Α** όπου παρουσιάζονται πληρέστερα τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν.

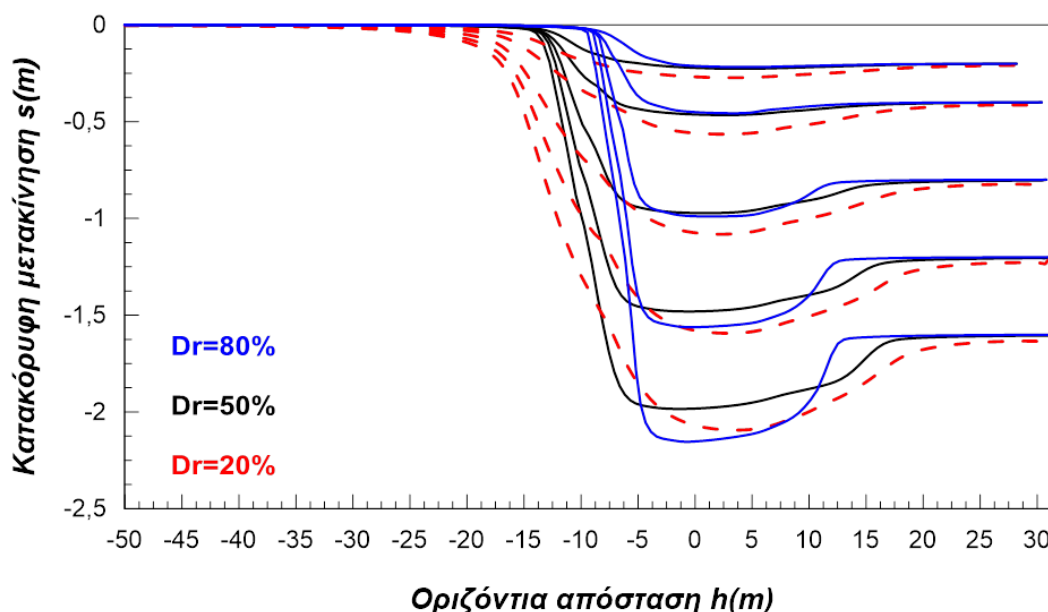
Γωνία ρήγατος $\beta(^{\circ})$	Σχετική πυκνότητα άμμου $D_r(\%)$		
	20	50	80
45	Κανονικά ρήγματα (§ 5.2)		
135	Ανάστροφα ρήγματα (§ 5.3)		
85	«Κατακόρυφα» ρήγματα (§ 5.4)		

Πίνακας 5.1 Κατηγοριοποίηση των εννέα (9) αριθμητικών αναλύσεων και των παραγράφων όπου παρουσιάζονται τα σχετικά αριθμητικά αποτελέσματα.

5.2 Διάδοση διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων (γωνίας 45°)

Στην παρούσα παράγραφο του Κεφαλαίου 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της διάδοσης κανονικού ρήγματος γωνίας 45° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και για τις τρεις παραδοχές σχετικής πυκνότητας της στρώσης άμμου.

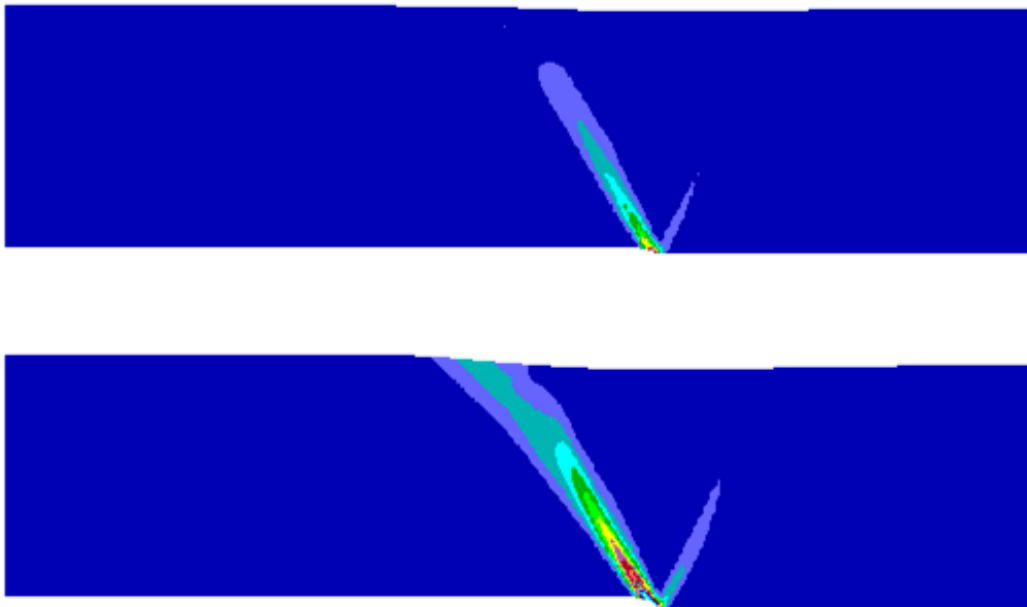
Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.1** απεικονίζεται και για τις τρεις παραδοχές πυκνότητας της άμμου η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, ξεχωριστά για τα βήματα μετατόπισης $h = 0.2, 0.4, 0.8, 1.2$ και 1.6m . Από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι όσο η άμμος γίνεται πιο πυκνή, τόσο η εμφάνιση της διάρρηξης στην επιφάνεια γίνεται πιο απότομη. Συγκρίνοντας την χαλαρή ($D_r = 20\%$) με την πυκνή άμμο ($D_r = 80\%$), προκύπτει ότι το εύρος της επιφάνειας που επηρεάζεται από την διάρρηξη είναι μεγαλύτερο στην χαλαρή άμμο, στην οποία η διάρρηξη εξαπλώνεται και στο σταθερό – υποκείμενο τέμαχος του εδάφους.



Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση τριών σχετικών πυκνοτήτων $D_r=20\%$, 50% και 80% , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

Παράλληλα, στα αρχικά στάδια επιβαλλόμενης μετατόπισης με $h < 0.8\text{m}$, η χαλαρή άμμος έχει δημιουργήσει ένα κατακρήμνισμα μεγαλύτερου βάθους σε σύγκριση με τις διαφορετικής πυκνότητας άμμους. Η εικόνα αυτή, ωστόσο, αλλάζει καθώς η

διάρρηξη προχωρά σε μεγαλύτερες μετακινήσεις. Έτσι, στο τελευταίο βήμα με μετακίνηση $h = 1.6\text{m}$ η πυκνή άμμος έχει δημιουργήσει το πιο βαθύ και στενό κατακρήμνισμα στην επιφάνεια, ξεπερνώντας σε βάθος εκείνο της χαλαρής. Τέλος, είναι διακριτό το γεγονός ότι η θέση ανάδυσης της διάρρηξης για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης παρουσιάζουν μία τάση μετακίνησης προς το υπερκείμενο τέρμαχος (μετακινούμενο) όσο η πυκνότητα της άμμου αυξάνεται.

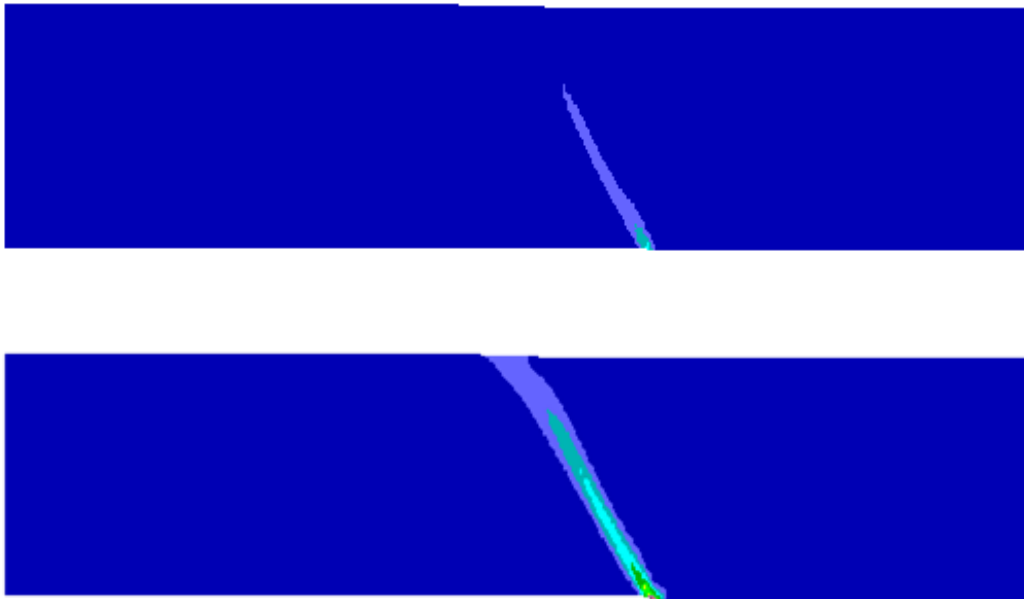


Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ (άνω) και $h=0.8\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-1). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η αναγκαία μετατόπιση όπου η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου. Στο **Σχήμα 5.2** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση πυκνότητας $D_r = 20\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h = 0.4\text{m}$ (άνω) και $h = 0.8\text{m}$ (κάτω), με τη χρωματισμένη περιοχή να αποτυπώνει τη ζώνη διάτμησης ως το τμήμα όπου η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από 5%. Γίνεται φανερό, ότι για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ η διάρρηξη έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει για $h = 0.4\text{m}$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εμφάνιση μιας δευτερεύουσας διάρρηξης που κλίνει σε αντίθετη κατεύθυνση από την κύρια

(δηλαδή προς το υπερκείμενο τέμαχος), η οποία δεν έχει αναδυθεί στην επιφάνεια του εδάφους (τουλάχιστον για $h \leq 0.8\text{m}$), αλλά η ύπαρξή της αρκεί για τη δημιουργία του κατακρημνίσματος. Από το **Σχήμα A-1** του Παραρτήματος Α, ωστόσο, φαίνεται ότι η δευτερεύουσα διάρρηξη δεν προσεγγίζει την επιφάνεια της άμμου ούτε καν για $h = 1.6\text{m}$.

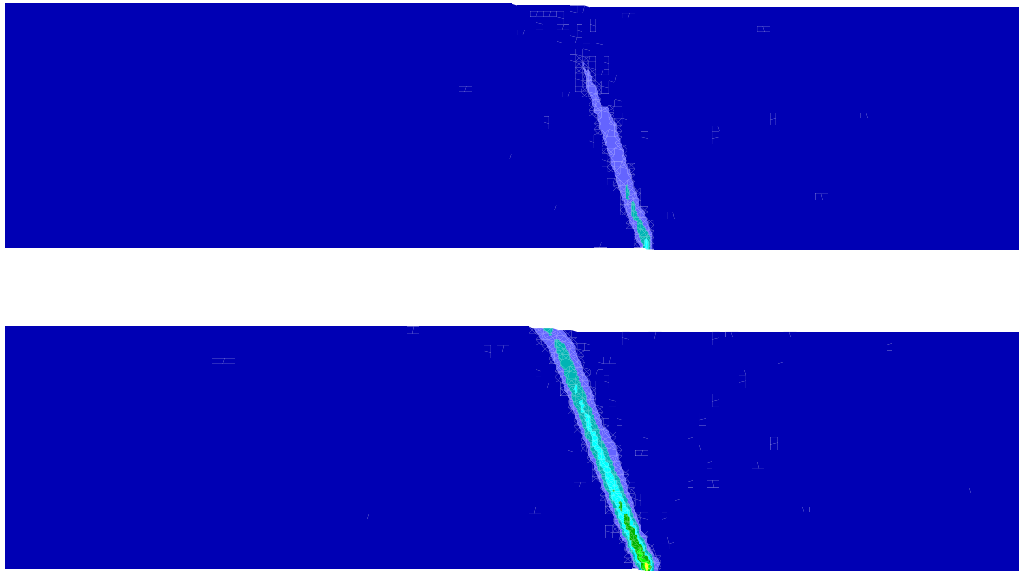
Ομοίως, στο **Σχήμα 5.3** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση μέσης πυκνότητας $D_r = 50\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h = 0.2\text{m}$ (άνω) και $h = 0.4\text{m}$ (κάτω). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου πριν το βήμα μετατόπισης $h = 0.4\text{m}$, δηλαδή για μικρότερη μετατόπιση υποβάθρου απ' ό τι στην χαλαρή άμμο. Επιπλέον, σύμφωνα με το **Σχήμα A-2** του Παραρτήματος Α, από την επιβαλλόμενη μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ εμφανίζεται μία δευτερεύουσα διάρρηξη, όμοια με εκείνη της χαλαρής άμμου, η οποία όμως έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου για $h = 1.6\text{m}$.



Σχήμα 5.3 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ (άνω) και $h=0.4\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-2). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Τέλος, όσον αφορά στη διάδοση της διάρρηξης στην πυκνή άμμο, αυτή παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη της μέσης πυκνότητας. Αυτό αποτυπώνεται στο

Σχήμα 5.4 όπου απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση μεγάλης πυκνότητας $D_r = 80\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h = 0.2\text{m}$ (άνω) και $h = 0.4\text{m}$ (κάτω). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου πριν το βήμα μετατόπισης $h = 0.4\text{m}$, δηλαδή για μικρότερη μετατόπιση υποβάθρου απ' ότι στην χαλαρή άμμο και συγκρίσιμη με εκείνη για τη μέσης πυκνότητας άμμο. Επιπλέον, σύμφωνα με το **Σχήμα Α-3** του Παραρτήματος Α, από επιβαλλόμενη μετατόπιση $h < 0.8\text{m}$ εμφανίζεται μία δευτερεύουσα διάρρηξη, αντίστοιχη με εκείνη της μέσης πυκνότητας άμμο, η οποία όμως έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου για $h = 1.2\text{m}$, δηλαδή για μικρότερη μετατόπιση ρήγματος συγκριτικά με τη μέσης πυκνότητας άμμο.



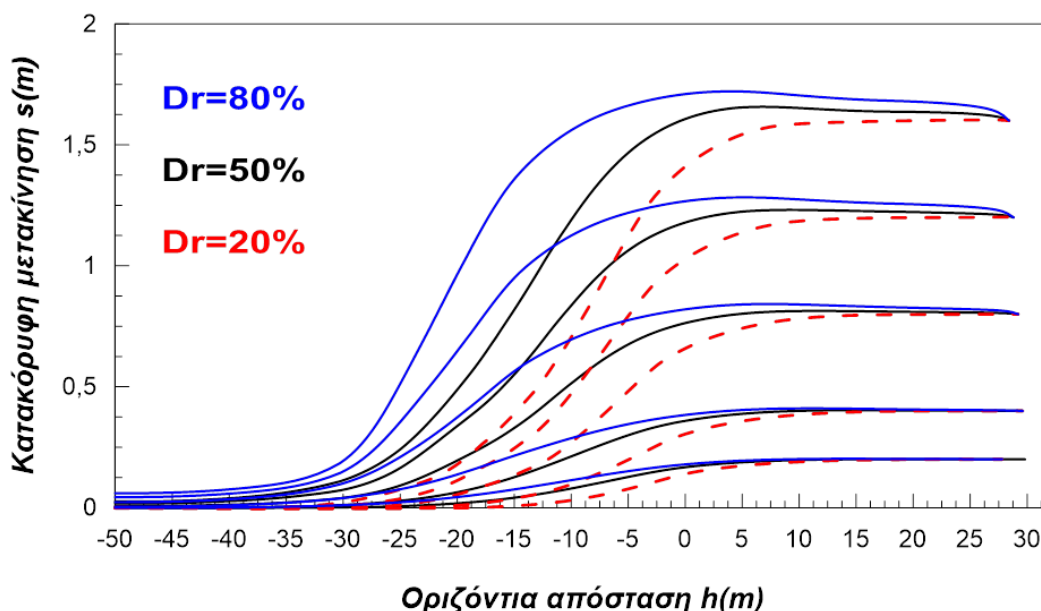
Σχήμα 5.4 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ (άνω) και $h=0.4\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-3). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

5.3 Διάδοση διάρρηξης ανάστροφων ρηγμάτων (γωνίας 135°)

Εδώ, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος γωνίας 135° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και για τις τρεις παραδοχές σχετικής πυκνότητας της στρώσης άμμου.

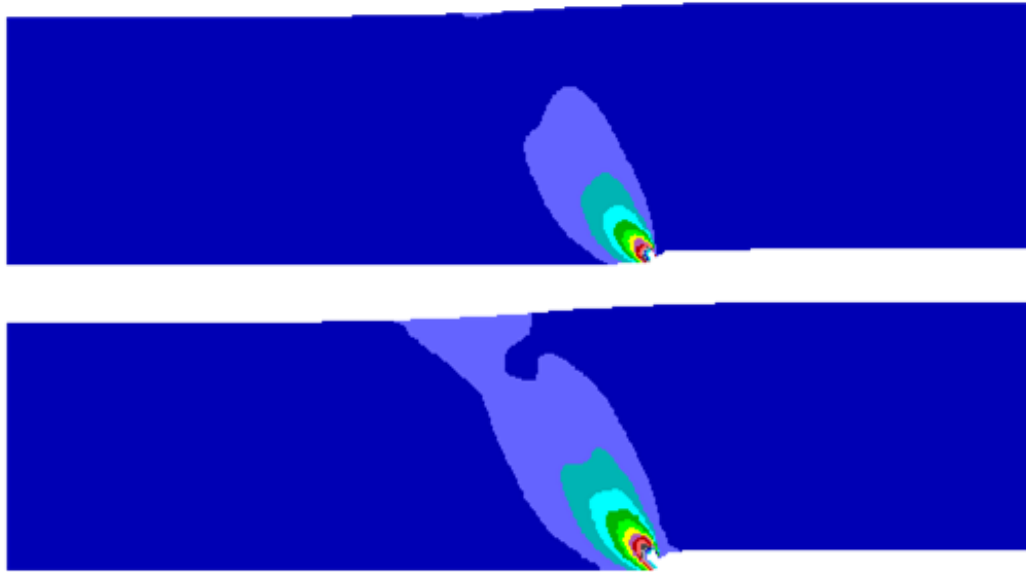
Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.5** απεικονίζεται και για τις τρεις παραδοχές πυκνότητας της άμμου η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, για διάρρηξη

ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta = 135^\circ$, ξεχωριστά για τα βήματα μετατόπισης $h = 0.2, 0.4, 0.8, 1.2$ και 1.6m . Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, γίνεται φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα της άμμου τόσο περισσότερο εξαπλώνεται η διάρρηξη προς το σταθερό τέρμαχος. Ειδικότερα, σε μικρές μετατοπίσεις ρήγματος (για $h < 0.8\text{m}$), οι παραμορφωμένες επιφάνειες για διαφορετικής πυκνότητας άμμους δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση ρήγματος, οι διαφορές μεγαλώνουν, με την αύξηση της πυκνότητας να σχετίζεται με αύξηση της διαστολικότητας και αύξηση όγκου για την περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων. Αξιοσημείωτο, τέλος, είναι το γεγονός ότι οι καμπύλες διάρρηξης της κάθε άμμου στα τελευταία βήματα της ανάλυσης είναι μεν μετατοπισμένες μεταξύ τους, όμως η κλίση τους είναι όμοια.

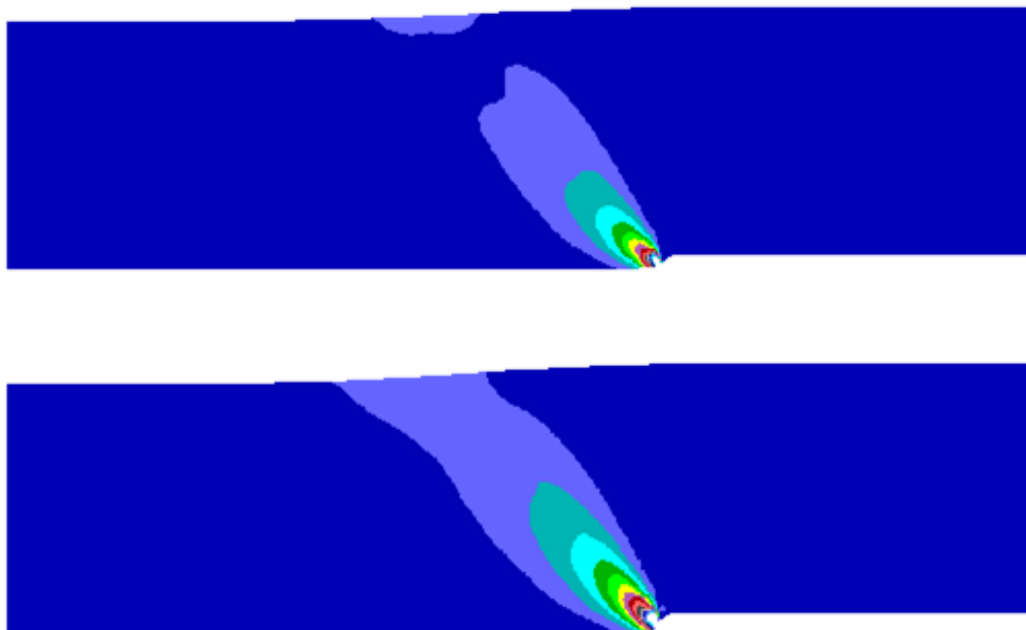


Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση τριών σχετικών πυκνοτήτων $D_r=20\%$, 50% και 80% , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

Σημαντικό είναι, επίσης, να μελετηθεί η αναγκαία μετατόπιση που απαιτείται προκειμένου η διάρρηξη να αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου. Έτσι λοιπόν, στο **Σχήμα 5.6** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση πυκνότητας $D_r=20\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ (άνω) και $h=1.6\text{m}$ (κάτω), με τη χρωματισμένη περιοχή να αποτυπώνει τη ζώνη διάτμησης ως το τμήμα όπου η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από



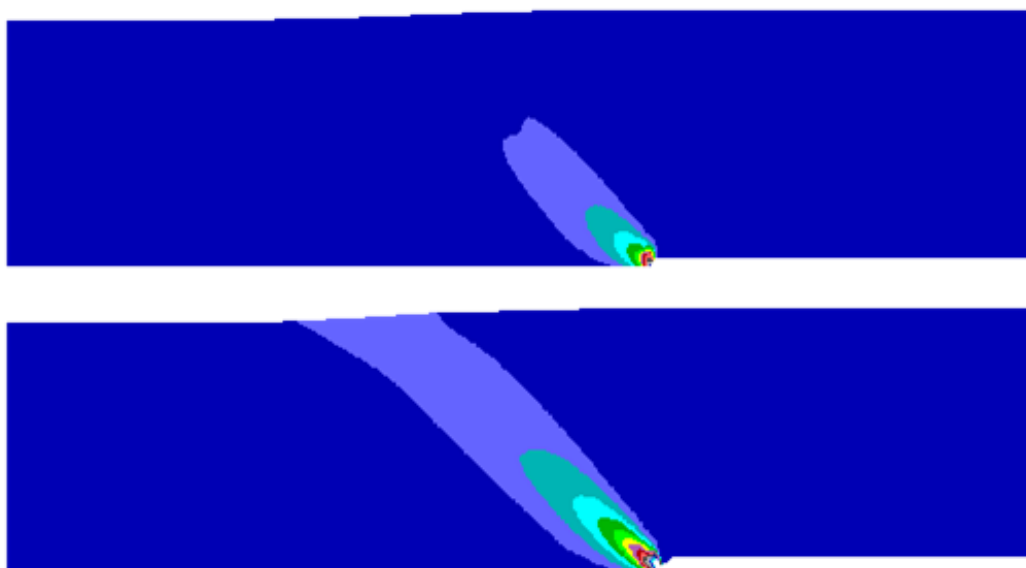
Σχήμα 5.6 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ (άνω) και $h=1.6\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-4). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 5.7 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ (άνω) και $h=1.6\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-5). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

5%. Είναι φανερό ότι η τομή της διάρρηξης του ρήγματος με την επιφάνεια της άμμου συμβαίνει για $h=1.6\text{m}$, δηλαδή στο 8% του πάχους H του προσομοιώματος.

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 5.7** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε μέσης πυκνότητας άμμο με $D_r=50\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ (άνω) και $h=1.6\text{m}$ (κάτω). Παρατηρείται ότι η μέσης πυκνότητας άμμος παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη της χαλαρής, εφόσον η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια στο τελευταίο βήμα της φόρτισης για $h=1.6\text{m}$, απαιτώντας αντίστοιχα μεγάλη επιβαλλόμενη μετατόπιση με την χαλαρή άμμο.



Σχήμα 5.8 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ (αριστερά) και $h=1.2\text{m}$ (δεξιά) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-6). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Τέλος, στο **Σχήμα 5.8** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε πυκνή άμμο με $D_r=80\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ (αριστερά) και $h=1.2\text{m}$ (δεξιά). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου στο τέταρτο βήμα επιβαλλόμενης μετατόπισης, δηλαδή για $h=1.2\text{m}$, σε αντίθεση με την χαλαρή και την μέση πυκνότητας άμμο όπου απαιτήθηκε μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος (έως $h = 1.6\text{m}$). Αξίζει να επισημανθεί επίσης, ότι σε αντίθεση με τα κανονικά ρήγματα, στα ανάστροφα ανεξάρτητα της πυκνότητας της άμμου, δεν

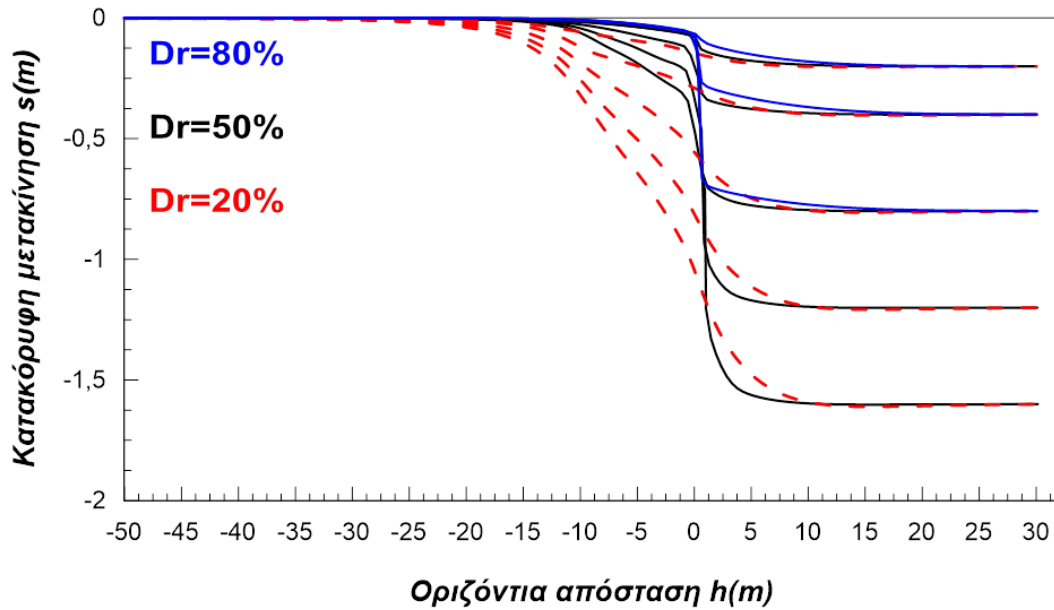
παρουσιάζεται δευτερεύουσα διάρρηξη εντός της εδαφικής στρώσης καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

5.4 Διάδοση διάρρηξης «κατακόρυφων» ρηγμάτων (γωνίας 85°)

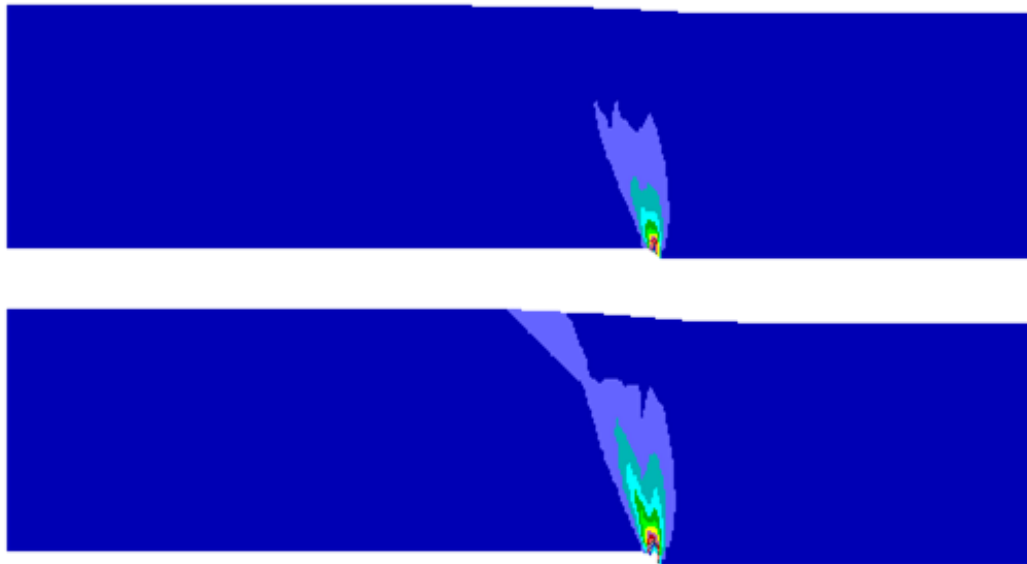
Στην παρούσα παράγραφο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της διάδοσης «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας 85° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και για τις τρεις παραδοχές σχετικής πυκνότητας της στρώσης άμμου. Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.9** απεικονίζεται και για τις τρεις παραδοχές πυκνότητας της άμμου η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$, για όλα τα βήματα μετατόπισης $h = 0.2, 0.4, 0.8, 1.2$ και 1.6m . Αρχικά παρατηρείται ποιοτική ομοιότητα των διαγραμμάτων με την εικόνα για τα κανονικά ρήγματα, γεγονός που αποδίδεται στην προς τα κάτω μετακίνηση των υπερκείμενων τεμάχων του υποβάθρου και στις δύο αναλύσεις. Ωστόσο, σημαντικές είναι και οι μεταξύ τους διαφορές. Σύμφωνα με το **Σχήμα 5.9**, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα της άμμου τόσο πιο απότομη, στενή και κατακόρυφη γίνεται η διάρρηξη. Αντίθετα, η χαλαρή άμμος αποκλίνει αρκετά από τις υπόλοιπες δύο, εμφανίζοντας μεγάλο εύρος διάρρηξης και περισσότερο ομαλή κλίση.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η ανάλυση της πυκνής άμμου σταμάτησε στο τρίτο βήμα της φόρτισης για μετακίνηση υποβάθρου $h=0.8\text{m}$. Αυτό σημαίνει ότι η παραμόρφωση του καννάβου στην επιφάνεια του εδάφους όπου αναδύεται η διάρρηξη ήταν τόσο ακραία, που δεν μπορούσε να συνεχίσει η ανάλυση συνεχούς μέσου (πρακτικώς πρόκειται για ολίσθηση του ενός δύστημτου τεμάχους ως προς το σταθερό δύστημτο τέμαχος, που δεν μπορεί να προσομοιωθεί με την ανάλυση συνεχούς μέσου). Επιπλέον, για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος ($h < 0.4\text{m}$), οι παραμορφωμένες επιφάνειες του εδάφους ταυτίζονται για την πυκνή και τη μέσης πυκνότητας άμμο, ενώ διαφαίνεται η διαφοροποίηση για τη χαλαρή άμμο.

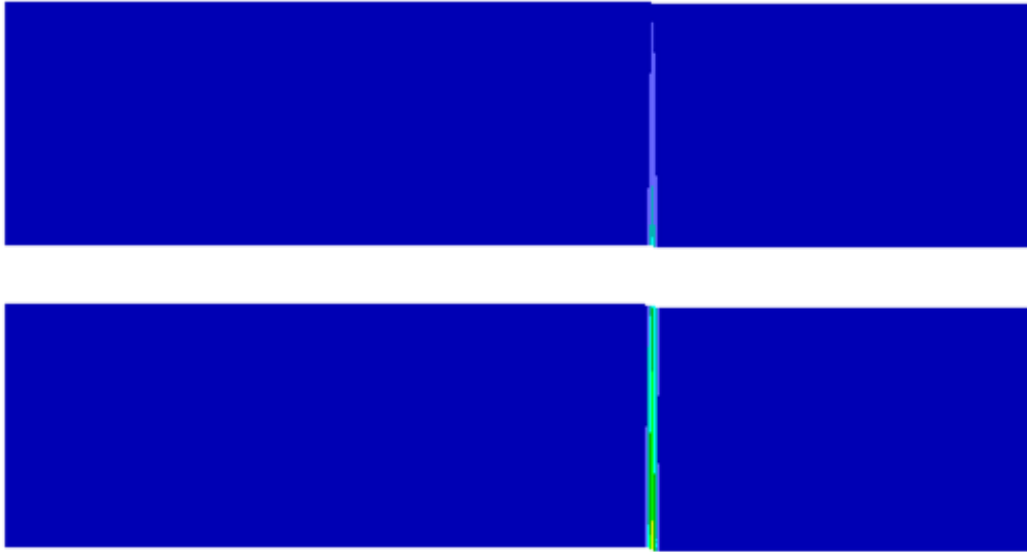
Στα **Σχήματα 5.10**, **5.11** και **5.12** που ακολουθούν, απεικονίζονται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση πυκνοτήτων $D_r=20\%$, $D_r=50\%$ και $D_r=80\%$ αντίστοιχα, για δύο βήματα επιβαλλόμενης μετατόπισης «κατακόρυφου» ρήγματος (διαφορετικά σε κάθε πυκνότητα), το μικρό βήμα όταν η διάρρηξη δεν έχει αναδυθεί και το μεγάλο όταν η διάρρηξη έχει αναδυθεί πλήρως στην επιφάνεια.



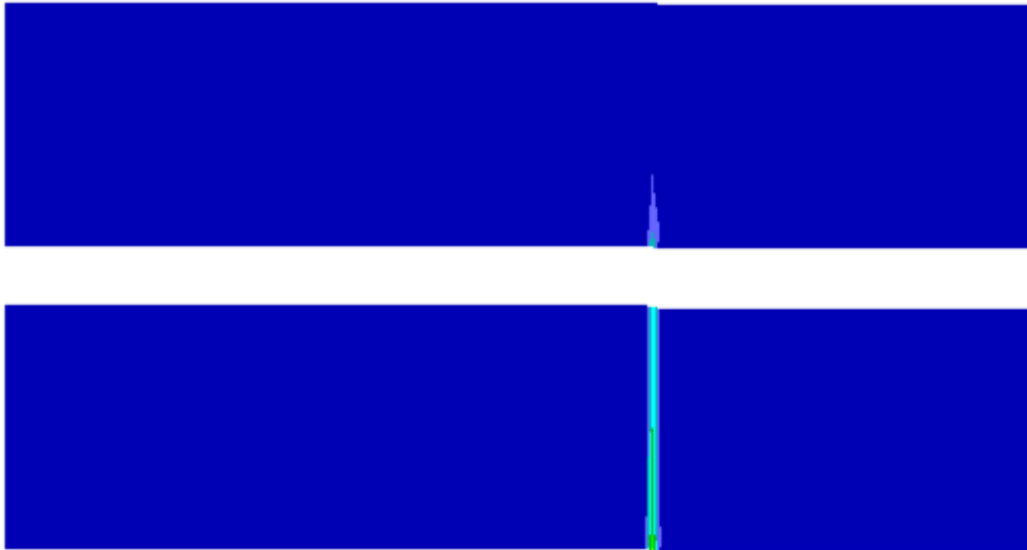
Σχήμα 5.9 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμόδη στρώση τριών σχετικών πυκνοτήτων $D_r=20\%$, 50% και 80% , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.



Σχήμα 5.10 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμόδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ (άνω) και $h=1.2\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-7). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5% .



Σχήμα 5.11 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ (άνω) και $h=0.4\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-8). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 5.12 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ (άνω) και $h=0.4\text{m}$ (κάτω) (Παράρτημα Α, Σχήμα Α-9). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Ειδικότερα, στο **Σχήμα 5.10** για επιβαλλόμενη μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ (άνω) και $h=1.2\text{m}$ (κάτω), φαίνεται ότι η απαιτούμενη μετακίνηση του ρήγματος προκειμένου να επιτευχθεί η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια της χαλαρής άμμου, είναι (μικρότερη από) $h=1.2\text{m}$, δηλαδή απαιτείται μετατόπιση ίση με 6% του πάχους H της αμμώδης στρώσης. Παράλληλα, η χαλαρή άμμος όπως φαίνεται και στο **Σχήμα A-7** του Παραρτήματος Α, εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά από τις πιο πυκνές άμμους και μάλιστα η διάρρηξη, αντίστοιχα με την παραμορφωμένη επιφάνεια (βλ. **Σχήμα 5.9**) εμφανίζεται περισσότερο ευρεία και ελαφρώς επικλινής με τάση προς το σταθερό τέμαχος, σε αντίθεση με τις απότομες, στενές και κατακόρυφες διαρρήξεις των πυκνότερων άμμων.

Ομοίως, στο **Σχήμα 5.11** απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε μέσης πυκνότητας άμμο με $D_r=50\%$ για επιβαλλόμενη μετατόπιση «κατακόρυφου» ρήγματος $h=0.8\text{m}$ (άνω) και $h=1.2\text{m}$ (κάτω), όπου παρατηρείται ότι η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου ήδη από $h = 0.4\text{m} = 2\%$ του πάχους H . Επιπλέον, στο **Σχήμα A-8** του Παραρτήματος Α παρατηρείται ότι η άμμος με $D_r=50\%$, ενώ έχει εμφανίσει μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις ακόμα και από μικρά βήματα μετατόπισης ρήγματος, συνεχίζει να παραμορφώνεται και μάλιστα για $h > 1.2\text{m}$ σχηματίζεται μια δευτερεύουσα διάρρηξη με κλίση προς το σταθερό τέμαχος, η οποία ωστόσο δεν αναδύεται στην επιφάνεια μέχρι και το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.

Τέλος, από το **Σχήμα 5.12**, γίνεται φανερό ότι η διάρρηξη στην πυκνή άμμο αναδύεται στην επιφάνεια για ίδια μετατόπιση ρήγματος με την μέσης πυκνότητας άμμο. Ωστόσο, σύμφωνα με το **Σχήμα A-9** του Παραρτήματος Α η άμμος με $D_r=80\%$ υπόκειται σε έντονη διατμητική παραμόρφωση εντός της ζώνης διάτμησης, ήδη από $h = 0.4\text{m}$, με αποτέλεσμα για $h = 0.8\text{m}$ η στρέβλωση του δικτύου πεπερασμένων διαφορών να είναι τόσο μεγάλη που να σταματάει η ανάλυση. Από φυσικής απόψεως, αυτό υπονοεί ότι πρακτικώς το κινούμενο τέμαχος τείνει να ολισθήσει ως στερεό σώμα, ως προς το σταθερό τέμαχος, μια κινηματική μορφή αστοχίας που δε μπορεί να προσομοιωθεί με ανάλυση συνεχούς μέσου χωρίς εισαγωγή στοιχείων διεπιφάνειας, κάτι που εκφεύγει των στόχων της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η επίδραση της αρχικής μικρο-δομής των κόκκων στη διάδοση της διάρρηξης ρηγμάτων μέσω αμμώδους στρώσης. Είναι γνωστό ότι στη φύση οι κόκκοι του εδάφους εναποτίθεται οριζόντια, λόγω βαρύτητας, δημιουργώντας μια εγκάρσια ισότροπη δομή. Με αυτή τη θεώρηση αρχικής μικρο-δομής (χάριν συντομίας, «οριζόντια δομή») εκτελέστηκαν οι αναλύσεις με το προσομοίωμα SANISAND στα Κεφάλαια 3, 4 και 5. Στο παρόν Κεφάλαιο, θα διερευνηθεί η επίδραση της αρχικής μικρο-δομής στη διάδοση διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, ως αρχική μικρο-δομή στο παρόν Κεφάλαιο θεωρείται εκείνη που προκύπτει αν περιστραφεί η «οριζόντια δομή» κατά 90°, δημιουργώντας τη λεγόμενη (χάριν συντομίας) «κατακόρυφη δομή» κόκκων. Με αυτή τη μικρο-δομή ως δεδομένη, επαναλαμβάνονται εδώ οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 5, και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους, ώστε να διακριβωθεί η επίδραση της μικρο-δομής των κόκκων της άμμου στο εν λόγω πρόβλημα. Προφανώς, η θεώρηση «κατακόρυφη δομής» είναι ακραία για φυσικά προβλήματα χωρίς έντονο τεκτονισμό, αλλά η επιλογή της στοχεύει στη διερεύνηση του εύρους πιθανής επίδρασης της μικρο-δομής των κόκκων.

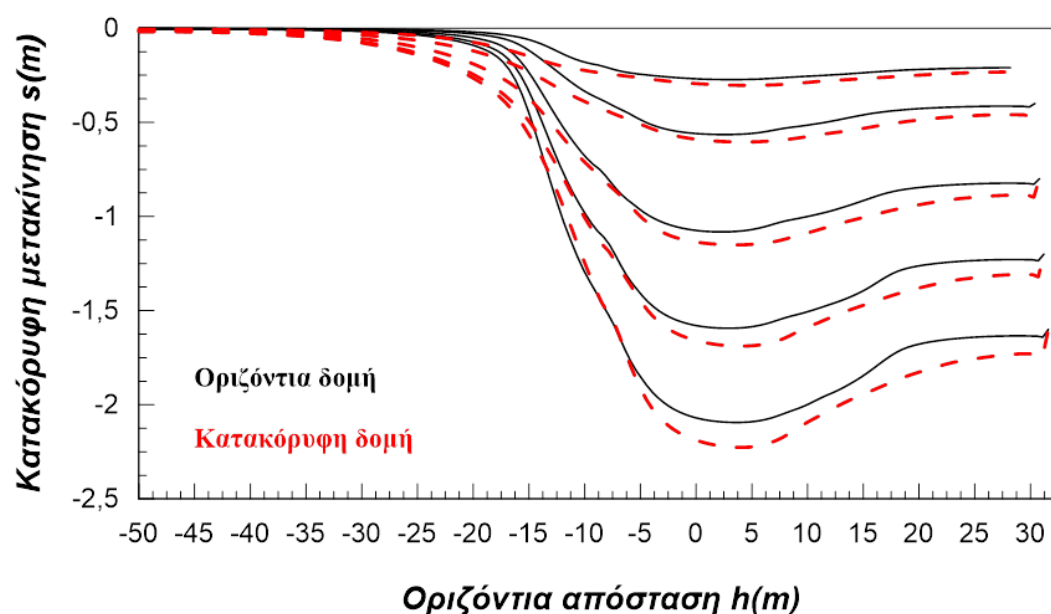
Υπογραμμίζεται εδώ ότι το σοφιστευμένο προσομοίωμα SANISAND έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της αλλαγής στην απόκριση λόγω μεταβολής της αρχικής μικρο-δομής, χωρίς ανάγκη αναβαθμονόμησης των σταθερών του προσομοιώματος, και για το λόγο αυτό είναι ιδανικό για αυτό το σκοπό. Οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν με τον ίδιο κάρναβο, τις ίδιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες, τις ίδιες σταθερές του προσομοιώματος, με εξαίρεση τον προσανατολισμό της μικρο-δομής σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Στις παραγράφους που ακολουθούν συγκρίνονται τα αποτελέσματα διάρρηξης για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» μικρο-δομή κόκκων για κάθε τιμή σχετικής πυκνότητας $D_r(\%)$ της άμμου ξεχωριστά.

6.2 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω χαλαρής άμμου ($D_r = 20\%$)

6.2.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση κανονικών ρηγμάτων σε χαλαρή αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.1** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.



Σχήμα 6.1 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχές οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

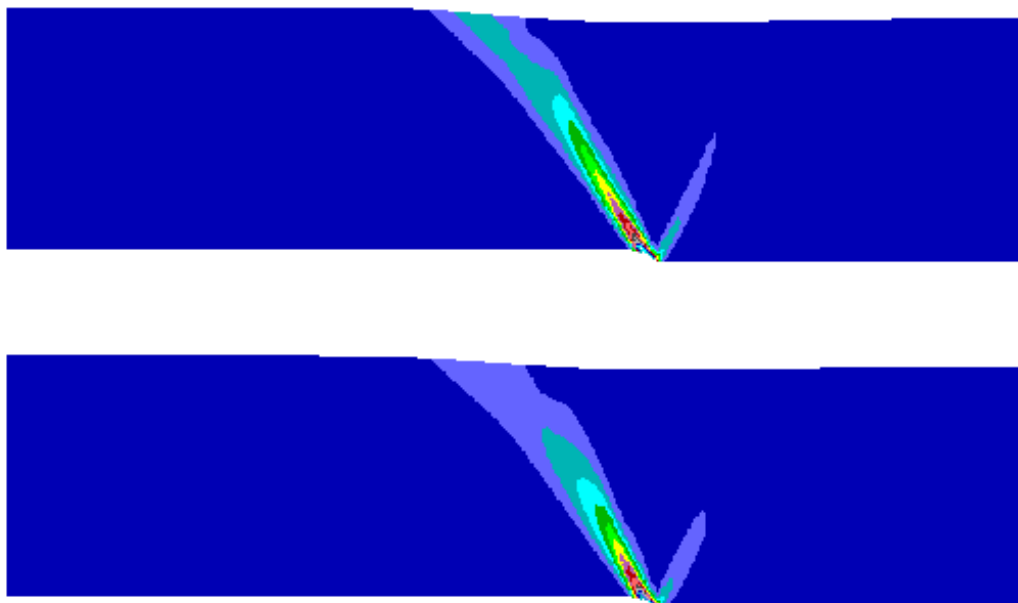
Γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση της χαλαρής άμμου, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων εξαπλώνει περισσότερο την διάρρηξη προς το σταθερό τέμαχος και δημιουργεί μια πιο ομαλή κλίση σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της οριζόντιας δομής. Επίσης, στα τελευταία στάδια της φόρτισης, για $h \geq 0.8\text{m}$, όπου και η απόκλιση των αποτελεσμάτων για τις δύο παραδοχές δομής είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να δημιουργείται βαθύτερο κατακρήμνισμα στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων. Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια χαλαρή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη

μικρότερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος.

Χάριν πληρέστερης σύγκρισης, στα **Σχήματα 6.2 και 6.3** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε χαλαρή άμμο, με μετατόπιση ρήγματος $h=0.4\text{m}$ και $h=0.8\text{m}$, αντίστοιχα. Τα σχήματα αυτά είναι διπλά, και συγκρίνουν τα σχετικά αποτελέσματα για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη του ρήγματος δεν έχει αναδυθεί πλήρως στην επιφάνεια για $h = 0.4\text{m}$, ενώ έχει πλήρως αναδυθεί για $h = 0.8\text{m}$, και για τις 2 θεωρήσεις αρχικής μικρο-δομής. Επιπλέον, διαφαίνεται να ξεκινά δευτερεύουσα διάρρηξη (προς το κινούμενο τέμαχος), η οποία δεν αναδύεται πλήρως στην επιφάνεια για $h \leq 0.8\text{m}$, ανεξαρτήτως μικρο-δομής. Λεπτομερής παρατήρηση των σχημάτων υποδεικνύει επίσης ότι οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις είναι σχετικά μεγαλύτερες για θεώρηση οριζόντιας μικρο-δομής.



Σχήμα 6.2 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-1,A-10,Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



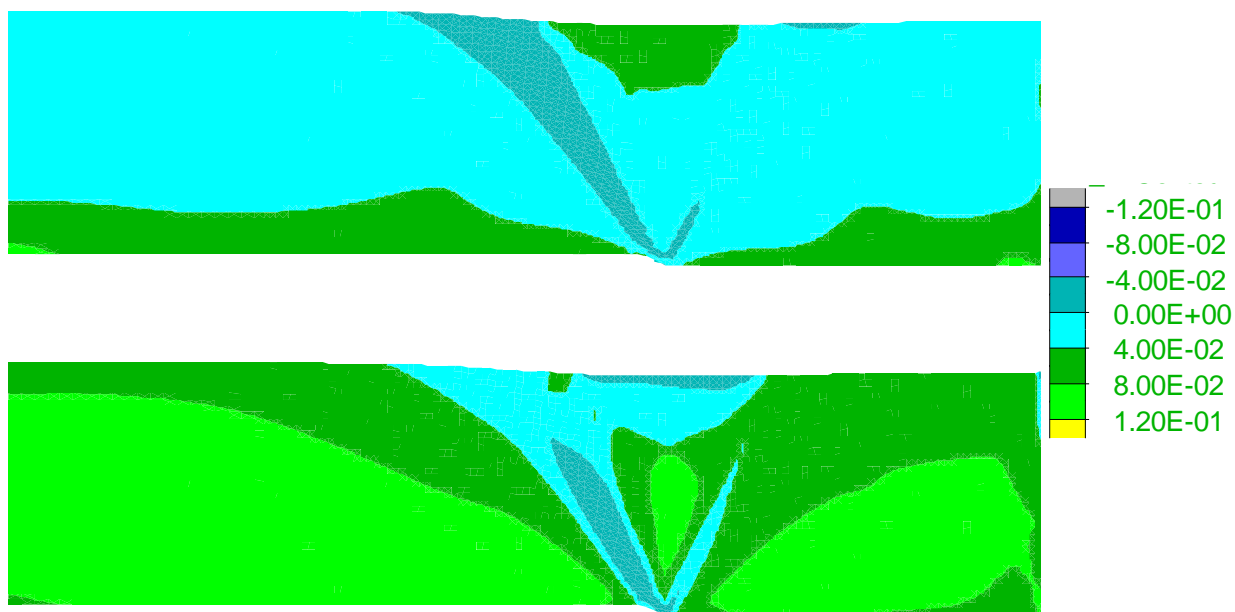
Σχήμα 6.3 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8m$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-1 και A-10, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Όλες αυτές οι παρατηρήσεις υπογραμμίζουν το συμπέρασμα ότι μια χαλαρή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη μικρότερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος.

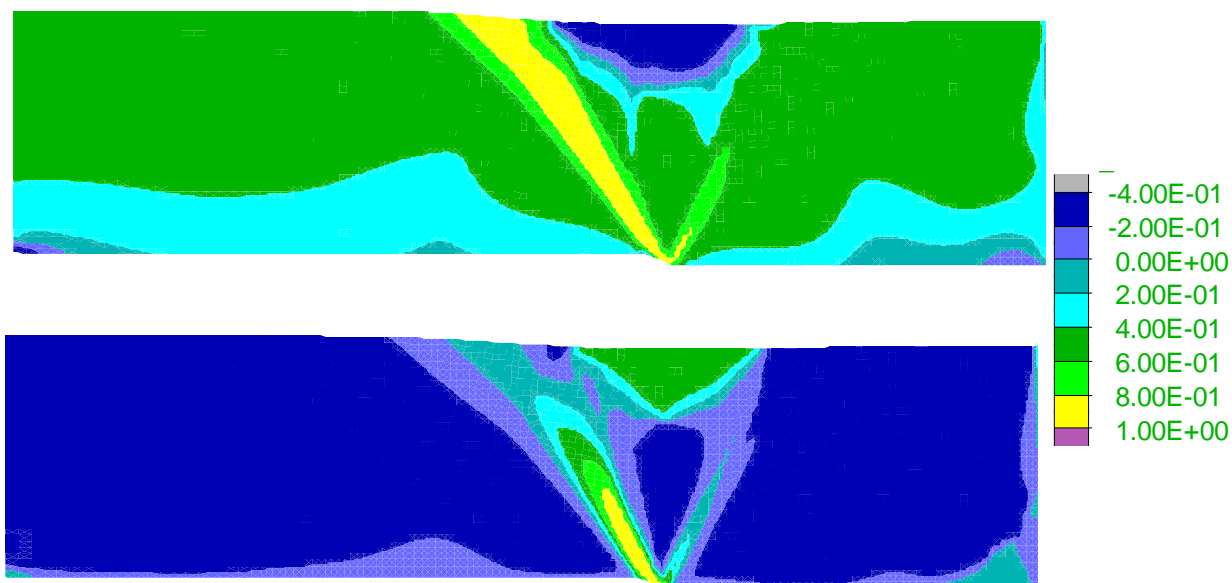
Στη συνέχεια, το **Σχήμα 6.4** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε χαλαρή αμμώδη στρώση, για μετατόπιση ρήγματος $h = 0.8m$, δηλαδή όταν η κύρια διάρρηξη δείχνει να έχει πλήρως αναδυθεί στην επιφάνεια επί τη βάση του **Σχήματος 6.3**. Ομοίως, στο **Σχήμα 6.5** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε χαλαρή άμμο για την ίδια μετατόπιση ρήγματος $h = 0.8m$. Υπενθυμίζεται ότι η κρίσιμη κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που οδηγεί και την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης σε $\zeta=0$). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι παρότι η διάρρηξη δείχνει να έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις

μικρο-δομής, η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση μόνο για τη θεώρηση της οριζόντιας μικρο-δομής. Αντιθέτως, για κατακόρυφη μικρο-δομή μόνο στο κάτω μισό της εδαφικής στρώσης (σε βάθη μεγαλύτερα από 10m) η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Αντίστοιχα, στη δευτερεύουσα διάρρηξη, σε Κρίσιμη Κατάσταση βρίσκεται μόνο η αρχή της διάρρηξης (σε βάθη 19m), και μόνο για την οριζόντια μικρο-δομή.

Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = 0.5$ και -0.5 , καθώς το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος χαρακτηρίζεται από μείωση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της οριζόντιας μικρο-δομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την κατακόρυφη δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς οριζόντια μικρο-δομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο ενός κανονικού ρήγματος. Επιπλέον όμως, η αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για κατακόρυφη μικρο-δομή, συνεπάγεται πιο θετική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ότι για οριζόντια μικρο-δομή, δηλαδή πιο συστολική συμπεριφορά για κατακόρυφη μικρο-δομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος.



Σχήμα 6.4 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ (Σχήματα A-19 και A-28, Παράρτημα Α).

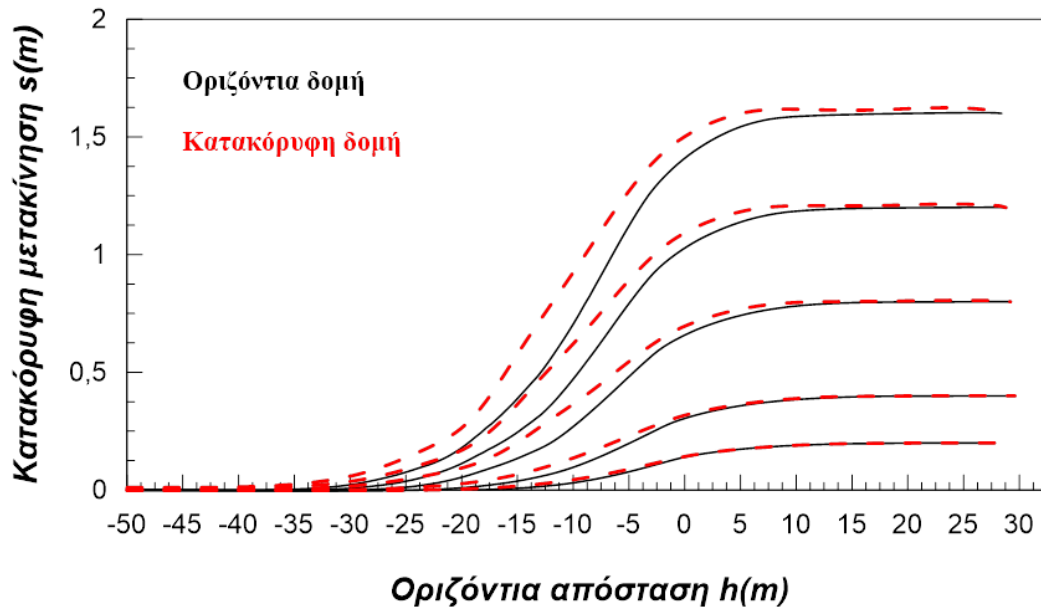


Σχήμα 6.5 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ (Σχήματα A-19 και A-28, Παράρτημα Α).

6.2.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$)

Εδώ παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε χαλαρή αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο ακόλουθο **Σχήμα 6.6**, που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.

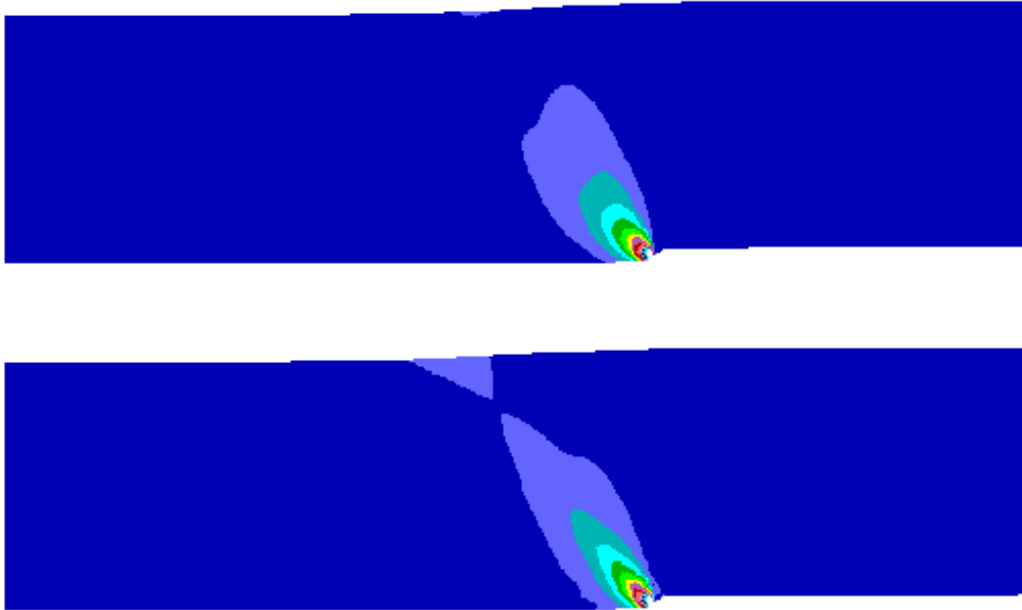
Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.6** για την χαλαρή άμμο, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων μετατοπίζει προς το σταθερό τέμαχος την διάρρηξη, με την κλίση της παραμορφωμένης επιφάνειας να γίνεται σχετικώς πιο έντονη, ειδικά για μεγάλες τιμές μετατόπισης ρήγματος ($h \geq 0.8\text{m}$). Επιπλέον, διαφαίνεται διόγκωση της επιφάνειας του εδάφους για την περίπτωση κατακόρυφης δομής κόκκων. Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια χαλαρή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.



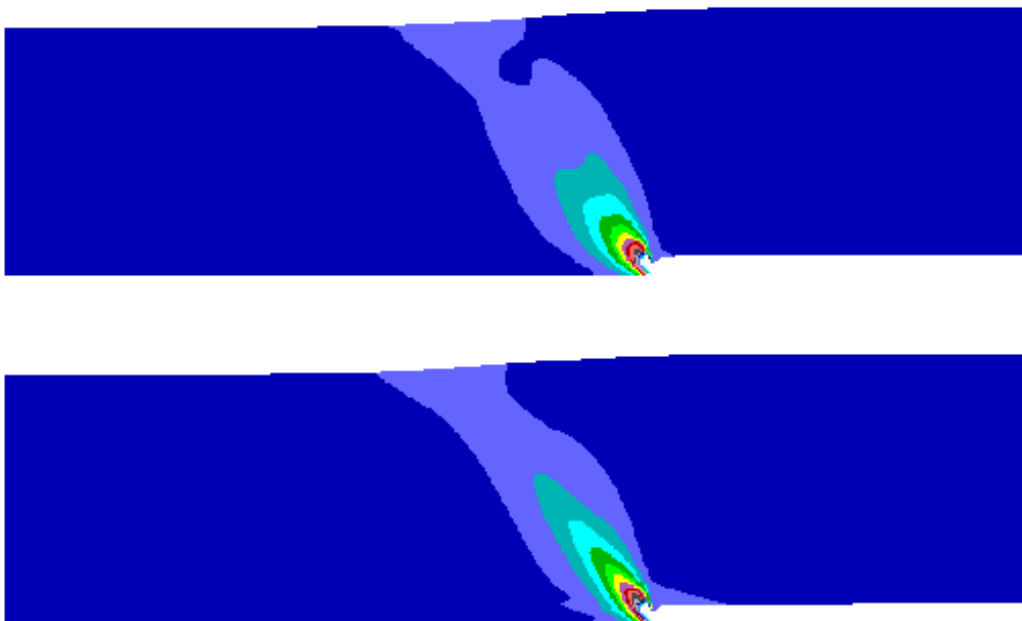
Σχήμα 6.6 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμόδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Στα **Σχήματα 6.7 και 6.8** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε χαλαρή άμμο, με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων η διάρρηξη του ρήγματος αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου για σχετικά μικρότερη μετατόπιση ρήγματος, χωρίς ωστόσο η διαφορά στην εν λόγω μετατόπιση να είναι μεγάλη για τις 2 παραδοχές δομής κόκκων. Όλες αυτές οι παρατηρήσεις υπογραμμίζουν το συμπέρασμα ότι μια χαλαρή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή συγκριτικά μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.

Τέλος, επιβεβαιώνεται από τις αναλύσεις αυτές, ότι σε ανάστροφα ρήγματα δε δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη, και ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε ανάστροφα ρήγματα απαιτεί πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος, συγκριτικά με εκείνη για κανονικά ρήγματα (βλ. προηγούμενη παράγραφο).



Σχήμα 6.7 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-4 και A-13, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



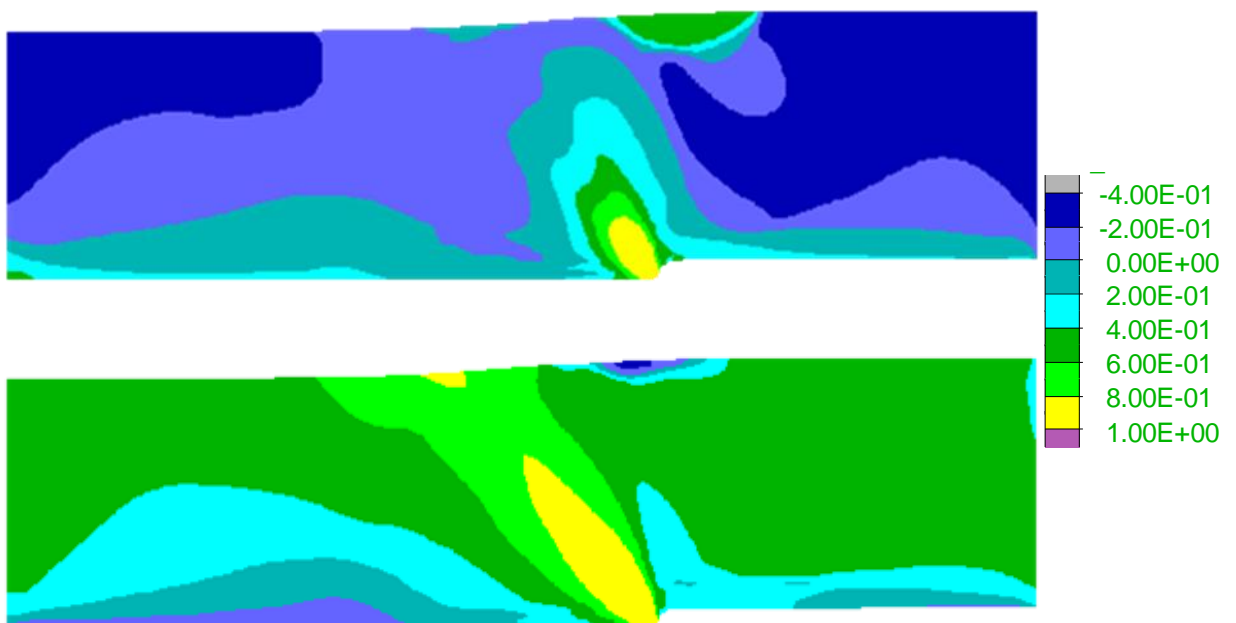
Σχήμα 6.8 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=1.6\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-4 και A-13, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Στη συνέχεια, το **Σχήμα 6.9** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε χαλαρή άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.10** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε χαλαρή άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις μικρο-δομής, η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση κυρίως για τη θεώρηση της κατακόρυφης μικρο-δομής (σε βάθη μεγαλύτερα από 7m). Αντιθέτως, για οριζόντια μικρο-δομή μόνο σε πολύ μεγάλα βάθη (μεγαλύτερα από 17m) η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Συνεπώς, η Κρίσιμη Κατάσταση στη ζώνη διάτμησης επέρχεται για μικρότερες μετατοπίσεις ρήγματος υπό κατακόρυφη δομή κόκκων, αλλά ακόμη και για $h = 1.6\text{m}$ δεν αρκεί ώστε όλη η ζώνη διάτμησης να βρεθεί σε Κρίσιμη Κατάσταση.

Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = -0.5$ και $+0.5$, καθώς το «θλιπτικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος χαρακτηρίζεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της κατακόρυφης μικροδομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την οριζόντια δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς κατακόρυφη μικροδομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «θλιπτικό» τασικό πεδίο ενός ανάστροφου ρήγματος. Επιπλέον όμως, η αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για οριζόντια μικροδομή, συνεπάγεται πιο θετική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ότι για κατακόρυφη μικροδομή, δηλαδή πιο συστολική συμπεριφορά για οριζόντια μικροδομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι οι τιμές του ζ εντός της ζώνης διάτμησης είναι πλησίον του μηδέν, ενώ στο περιβάλλον έδαφος έχουμε τιμές $\zeta > 0$ (λόγω της θεώρησης χαλαρής άμμου). Αυτές οι τιμές του ζ πλησίον του 0, υποδηλώνουν μεγάλη μείωση όγκου κατά μήκος της ζώνης διάτμησης.



Σχήμα 6.9 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-22 και A-31, Παράρτημα Α).



Σχήμα 6.10 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-22 και A-31, Παράρτημα Α).

Συνολικά προκύπτει ότι η επίδραση της δομής των κόκκων στη διάδοση της διάρρηξης δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά επηρεάζεται από το διαφορετικό τασικό πεδίο για διαρρήξεις κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων. Μάλιστα, προκύπτει ότι η δομή των κόκκων επηρεάζει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος που χρειάζεται για την ανάδυση της διάρρηξης, αλλά δεν αλλάζει την βασική παρατήρηση της βιβλιογραφίας, ότι χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυση ανάστροφων ρηγμάτων συγκριτικά με κανονικά ρήγματα ίδιας γωνίας.

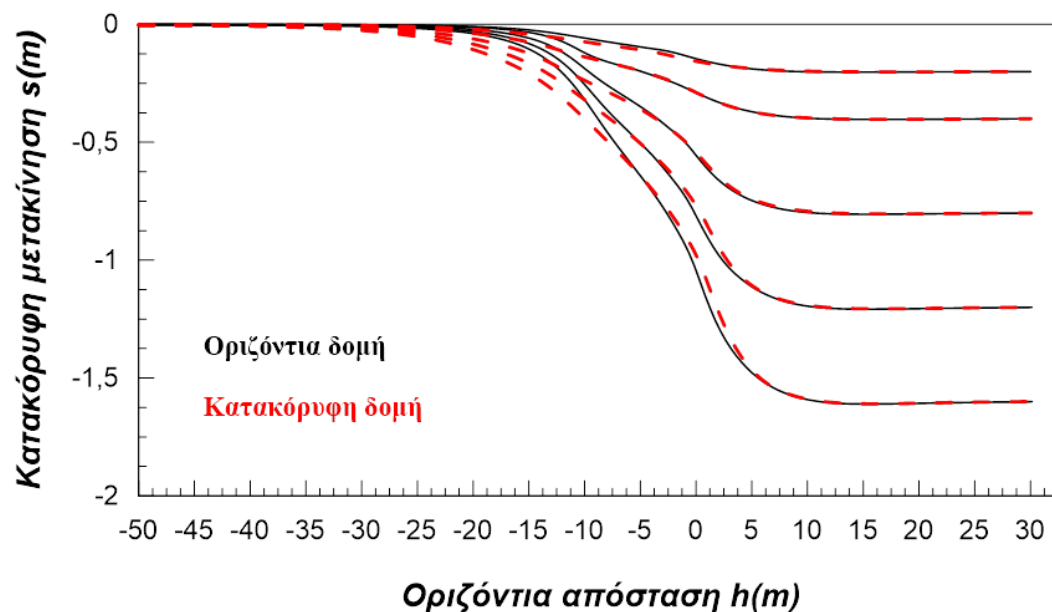
Αυτή η μεγάλη διαφορά στη μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια είναι αντίστοιχη με τη μεγάλη διαφορά στη μετατόπιση τοίχου αντιστήριξης για αστοχία κατά Rankine σε ενεργητική και παθητική κατάσταση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Συγκεκριμένα, η ενεργητική αστοχία κατά Rankine επέρχεται από μείωση της οριζόντιας τάσης (όπως στα κανονικά ρήγματα) που προκύπτει για μετατόπιση του τοίχου «προς τα έξω» σημαντικά μικρότερη (π.χ. 10 φορές) από την παθητική αστοχία κατά Rankine που επέρχεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης (όπως στα ανάστροφα ρήγματα).

6.2.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$)

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες υποπαραγράφους, εδώ παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση «κατακόρυφου» ρηγμάτων σε χαλαρή αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.11** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.11** για την χαλαρή άμμο, η παραδοχή κατακόρυφης για οριζόντια δομή κόκκων δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη της παραμορφωμένης επιφάνειας. Μάλιστα, στα πρώτα στάδια επιβαλλόμενης μετατόπισης οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Ωστόσο, καθώς η διάρρηξη ρήγματος φτάνει σε μεγάλες τιμές παραμόρφωσης ($h \geq 0.8\text{m}$), διαφαίνεται μια μικρή

απόκλιση στην παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, με την οριζόντια δομή να οδηγεί σε ελαφρώς πιο απότομη κλίση στην επιφάνεια.

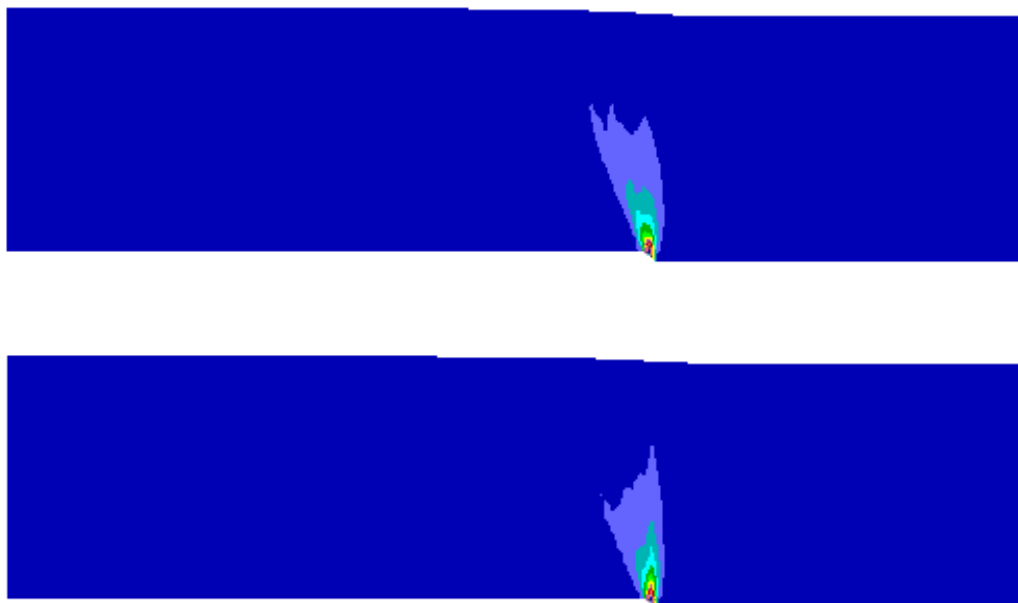


Σχήμα 6.11 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμόδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

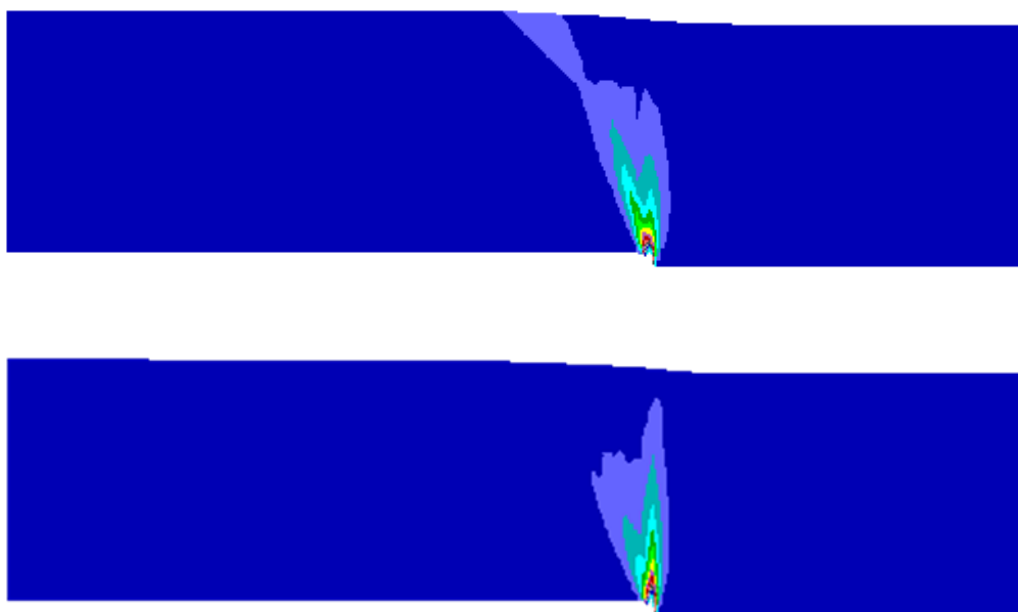
Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια χαλαρή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή λίγο μικρότερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος, αν και οι διαφορές είναι μικρές.

Στα **Σχήματα 6.12 και 6.13** που ακολουθούν, απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε χαλαρή άμμο, με μετατόπιση ρήγματος $h=0.8\text{m}$ και $h=1.2\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου για λίγο μικρότερη τιμή μετατόπισης ρήγματος όταν η δομή κόκκων είναι οριζόντια, αν και η διαφορά αυτή είναι σαφώς μικρότερη από τις όποιες διαφορές λόγω δομής που παρατηρήθηκαν για χαλαρές άμμους σε διάρρηξη από κανονικά και ανάστροφα ρήγματα (βλ. προηγούμενες παραγράφους). Μια άλλη ποιοτική διαφορά είναι ότι η διάρρηξη αναδύεται κατακόρυφα, με μια μικρή απόκλιση προς το σταθερό τέμαχος μόνο για την οριζόντια δομή, αν και οι ζώνες διάτμησης είναι αρκετά ευρείες λόγω της μικρής σχετικής

πυκνότητας της άμμου (σε επόμενες παραγράφους, όπου δείχνονται αποτελέσματα για μεγαλύτερες τιμές D_r , οι αντίστοιχες ζώνες διάτμησης είναι μικρότερου εύρους).



Σχήμα 6.12 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-7 και A-16, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 6.13 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-7 και A-16, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Τέλος, επιβεβαιώνεται ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε κατακόρυφα ρήγματα γίνεται για τιμή μετατόπισης ρήγατος $h = 0.8 - 1.2\text{m}$, δηλαδή μικρότερη απ' ό,τι χρειάζεται για ανάστροφα ρήγματα ($h = 1.2 - 1.6\text{m}$) και μεγαλύτερη απ' ό,τι χρειάζεται για κανονικά ρήγματα ($h = 0.4 - 0.8\text{m}$), σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, και αυτό ανεξαρτήτως δομής κόκκων.

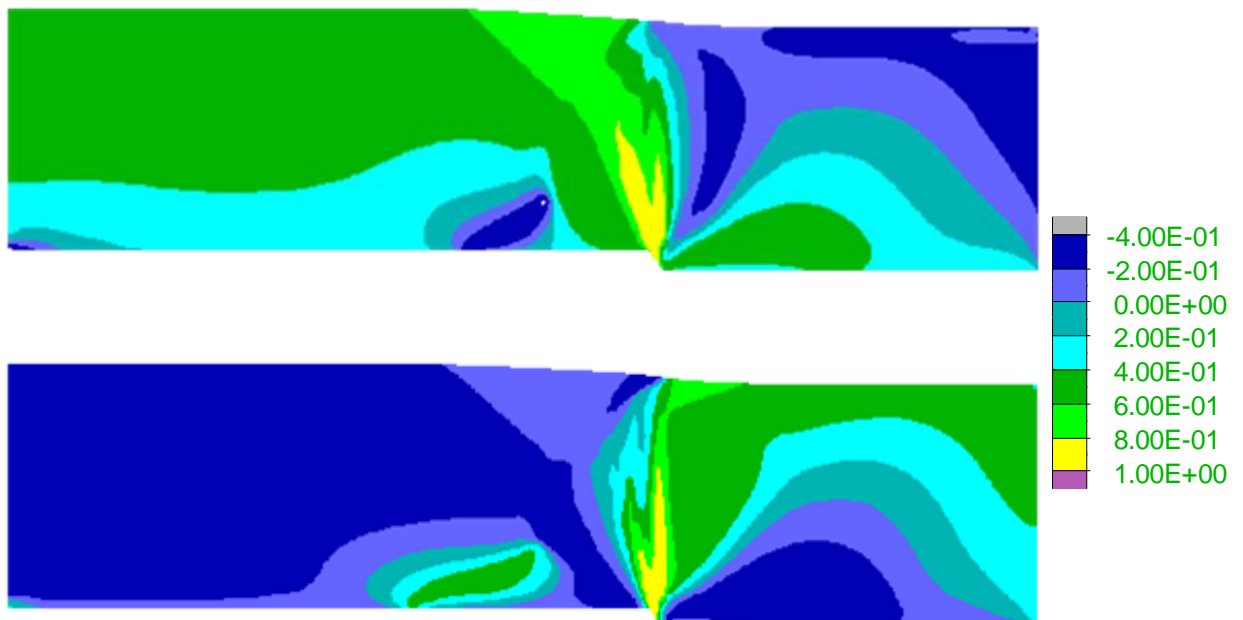
Παράλληλα, τα **Σχήματα 6.14 και 6.15** που ακολουθούν απεικονίζουν την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ και την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , με οριζόντια και κατακόρυφη αντίστοιχα δομή κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγατος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε χαλαρή άμμο για μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$, δηλαδή ένα βήμα μεγαλύτερο απ' ό,τι χρειάζεται για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις μικρο-δομής, η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης δεν έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση, παρά μόνο σε βάθη μεγαλύτερα ή ίσα από 10m, με τις διαφορές λόγω κατεύθυνσης δομής να είναι μικρές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι σε όρους ζ , η επιφάνεια διάτμησης (η περιοχή όπου το ζ είναι πλησίον του 0) είναι κατακόρυφη με μια τάση προς το σταθερό τέμαχος για οριζόντια δομή, ενώ για κατακόρυφη δομή η ίδια επιφάνεια προβλέπεται κατακόρυφη με μια τάση προς το κινούμενο τέμαχος.

Αυτή η αντιστροφή της τάσης στη διεύθυνση της ζώνης διάρρηξης οφείλεται στο γεγονός ότι οριζόντια μικροδομή συνεπάγεται αρχικές τιμές $A > 0$ και < 0 για το σταθερό και το κινούμενο τέμαχος, αντίστοιχα, ενώ τα πρόσημα της παραμέτρου A αντιστρέφονται για κατακόρυφη δομή κόκκων. Συνεπώς, αντίθετα με τα κανονικά και ανάστροφα ρήγματα όπου η αρχική τιμή της παραμέτρου A άλλαζε πρόσημο ανάλογα με τη διεύθυνση της μετακίνησης (προς τα άνω ή κάτω) σε όλη την εδαφική στρώση, εδώ η τιμή της A αλλάζει πρόσημο ανάλογα με το αν βρίσκεται στο κινούμενο ή το σταθερό τέμαχος. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο τασικό πεδίο, που δεν είναι ούτε «εφελκυστικό» (κανονικό ρήγμα) ούτε «θλιπτικό» (ανάστροφο ρήγμα), αλλά μορφής απλής διάτμησης. Συνεπώς, για οριζόντια δομή κόκκων, το σταθερό τέμαχος έχει $A > 0$ και έτσι βρίσκεται πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το τασικό πεδίο «κατακόρυφου» ρήγατος, και λόγω αυτού η τιμή του ζ είναι λιγότερο θετική (άρα πιο κοντά στο $\zeta = 0$) για χαλαρή άμμο. Επομένως, η κατακόρυφη διάρρηξη έχει

για τάση εκτροπής προς το σταθερό τέμαχος, ενώ όλα αυτά αντιστρέφονται για κατακόρυφη δομή κόκκων, χωρίς ωστόσο οι διαφορές αυτές να είναι σημαντικές.



Σχήμα 6.14 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 1.6m$ (Σχήματα A-25 και A-34, Παράρτημα Α).

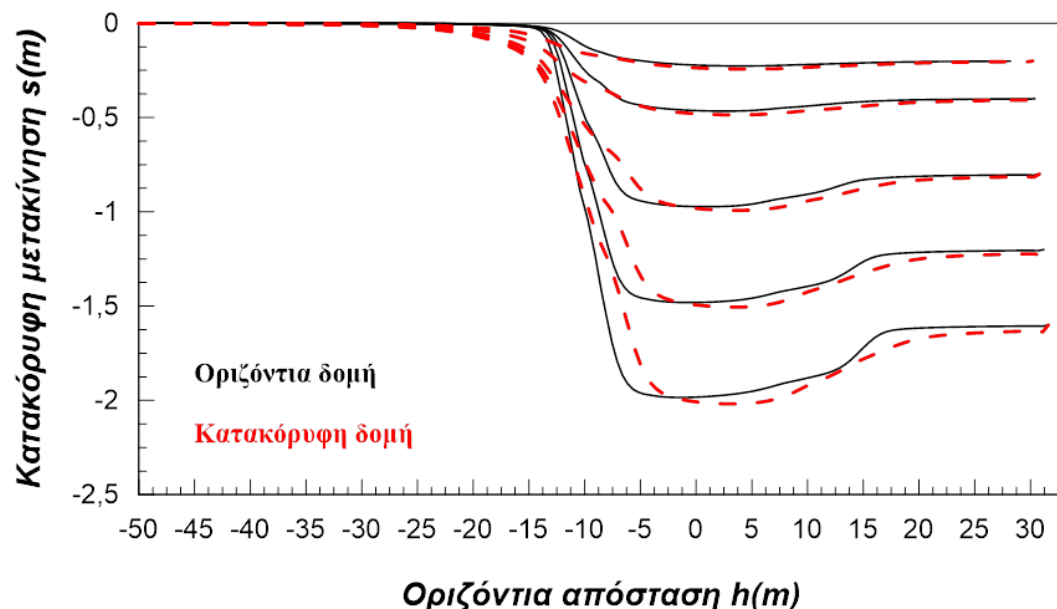


Σχήμα 6.15 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 1.6m$ (Σχήματα A-25 και A-34, Παράρτημα Α).

6.3 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω άμμου μέσης πυκνότητας ($D_r = 50\%$)

6.3.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση κανονικών ρηγμάτων σε μέσης πυκνότητας αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.16** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.



Σχήμα 6.16 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση μέσης σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

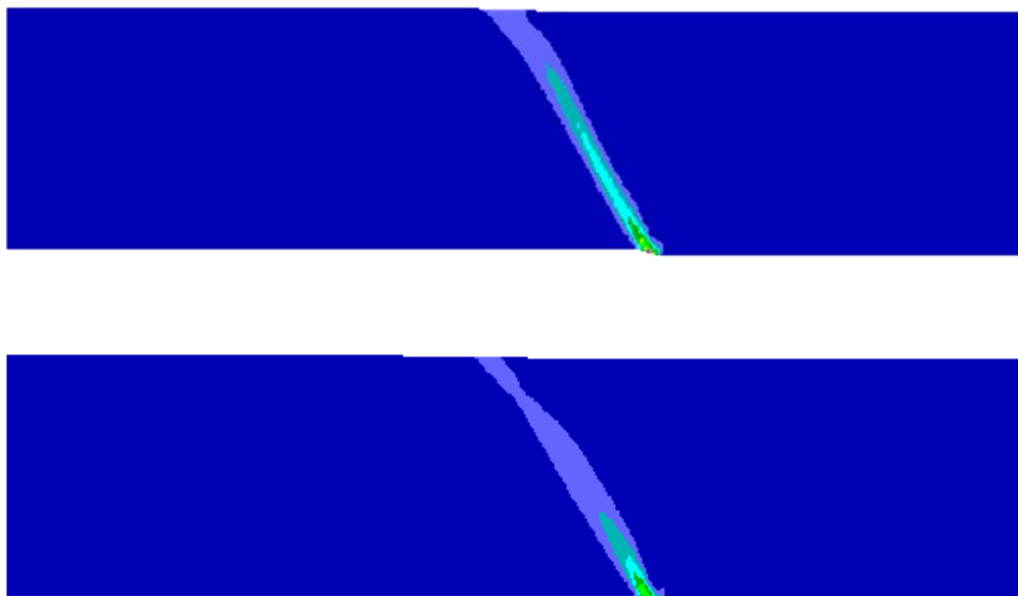
Γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση της μέσης πυκνότητας άμμου, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων διευρύνει περισσότερο την διάρρηξη προς το σταθερό τέμαχος κοντά στην επιφάνεια και δημιουργεί μια πιο ομαλή κλίση σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της οριζόντιας δομής. Επίσης, σε μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος, για $h \geq 0.8\text{m}$, όπου και η απόκλιση στα αποτελέσματα για τις δύο παραδοχές δομής είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να δημιουργείται ελαφρώς πιο βαθύ

κατακρήμνισμα στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων. Συμπεραίνεται δηλαδή, ότι μία μέσης πυκνότητας άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή σχετικά μικρότερης πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι αν και τα συμπεράσματα για την χαλαρή άμμο και την μέσης πυκνότητας άμμο είναι παρόμοια, η επιρροή της κατεύθυνσης της δομής κόκκων είναι εμφανώς πιο έντονη στην χαλαρή άμμο.

Στα **Σχήματα 6.17 και 6.18** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε μέσης πυκνότητας άμμο, με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ και $h=0.4\text{m}$ αντίστοιχα. Τα σχήματα αυτά είναι διπλά, και συγκρίνουν τα σχετικά αποτελέσματα για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη του ρήγματος δεν έχει αναδυθεί πλήρως στην επιφάνεια για $h = 0.2\text{m}$, ενώ έχει πλήρως αναδυθεί για $h = 0.4\text{m}$, και για τις 2 θεωρήσεις αρχικής μικρο-δομής. Λεπτομερής παρατήρηση των σχημάτων υποδεικνύει επίσης ότι οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις είναι σχετικά μεγαλύτερες για θεώρηση οριζόντιας μικρο-δομής, οπότε και η διάρρηξη αναδύεται για συγκριτικά μικρότερη μετατόπιση ρήγματος.



Σχήμα 6.17 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-2 και A-11, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 6.18 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-2 και A-11, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Όλες αυτές οι παρατηρήσεις υπογραμμίζουν το συμπέρασμα ότι μια μέσης πυκνότητας άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή συγκριτικά μικρότερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι και στις δύο παραδοχές διαφαίνεται να ξεκινά δευτερεύουσα διάρρηξη προς το κινούμενο τέμαχος. Ωστόσο μόνο στην περίπτωση της οριζόντιας δομής των κόκκων, όπως φαίνεται και από τα **Σχήματα A-2 και A-11** του Παραρτήματος A, η διάρρηξη αυτή έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου για μετακίνηση $h = 1.6\text{m}$.

Παρακάτω, το **Σχήμα 6.19** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ με μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$, δηλαδή για μετατόπιση ρήγματος λίγο μεγαλύτερη από εκείνη που έφερε την ανάδυση της κύριας διάρρηξης επί τη βάση του **Σχήματος 6.18**. Ομοίως, στο **Σχήμα 6.20** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε μέσης πυκνότητας άμμο για την ίδια μετατόπιση ρήγματος $h=0.8\text{m}$. Υπενθυμίζεται ότι η κρίσιμη κατάσταση κατά την

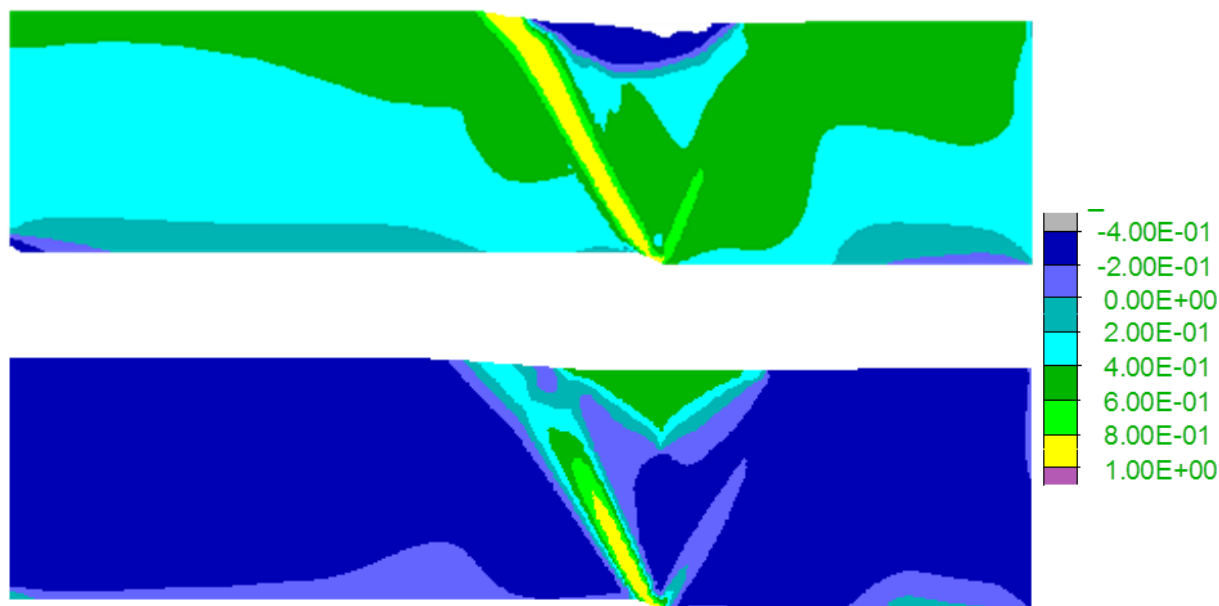
θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που οδηγεί και την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης σε $\zeta=0$). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι παρότι η διάρρηξη δείχνει να έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις μικρο-δομής, η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση μόνο για τη θεώρηση της οριζόντιας μικρο-δομής. Αντιθέτως, για κατακόρυφη μικρο-δομή μόνο στο κάτω μισό της εδαφικής στρώσης (σε βάθη μεγαλύτερα από 10m) η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Επίσης, η άμμος στη ζώνη της δευτερεύουσας διάρρηξης, ανεξαρτήτως δομής, δεν βρίσκεται σε Κρίσιμη Κατάσταση, το οποίο είναι αναμενόμενο αφού αναδύεται στην επιφάνεια μόνο για την οριζόντια δομή και μόνο όταν η μετατόπιση ρήγματος γίνει $h = 1.6\text{m}$.



Σχήμα 6.19 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ (Σχήματα A-20 και A-29, Παράρτημα Α).

Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = 0.5$ και -0.5 , καθώς το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος χαρακτηρίζεται από μείωση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της οριζόντιας μικρο-δομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την κατακόρυφη δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς οριζόντια

μικρο-δομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο ενός κανονικού ρήγματος. Επιπλέον όμως, η αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για κατακόρυφη μικρο-δομή, συνεπάγεται λιγότερο αρνητική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ό,τι για οριζόντια μικρο-δομή, δηλαδή πιο συστολική συμπεριφορά για κατακόρυφη μικρο-δομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος.



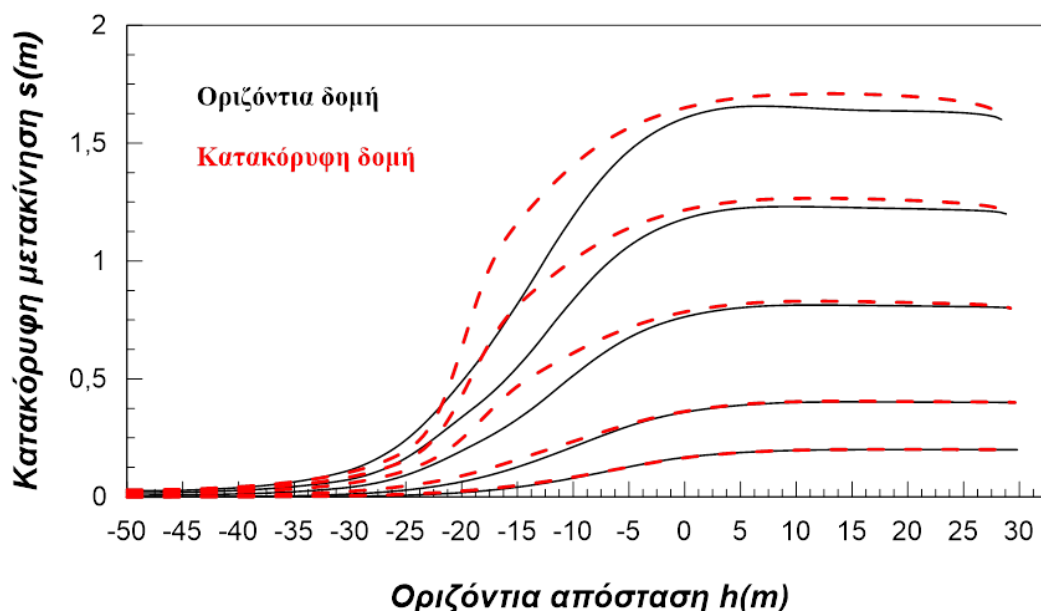
Σχήμα 6.20 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.8\text{m}$ (Σχήματα A-20 και A-29, Παράρτημα A).

6.3.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$)

Εδώ, παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε μέση πυκνότητας αμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο ακόλουθο **Σχήμα 6.21**, απεικονίζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος $\beta=135^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$ και για τις δύο παραδοχές της δομής.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.21** για άμμο πυκνότητας $D_r=50\%$, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων μετατοπίζει προς το σταθερό τέμαχος την διάρρηξη, με την κλίση

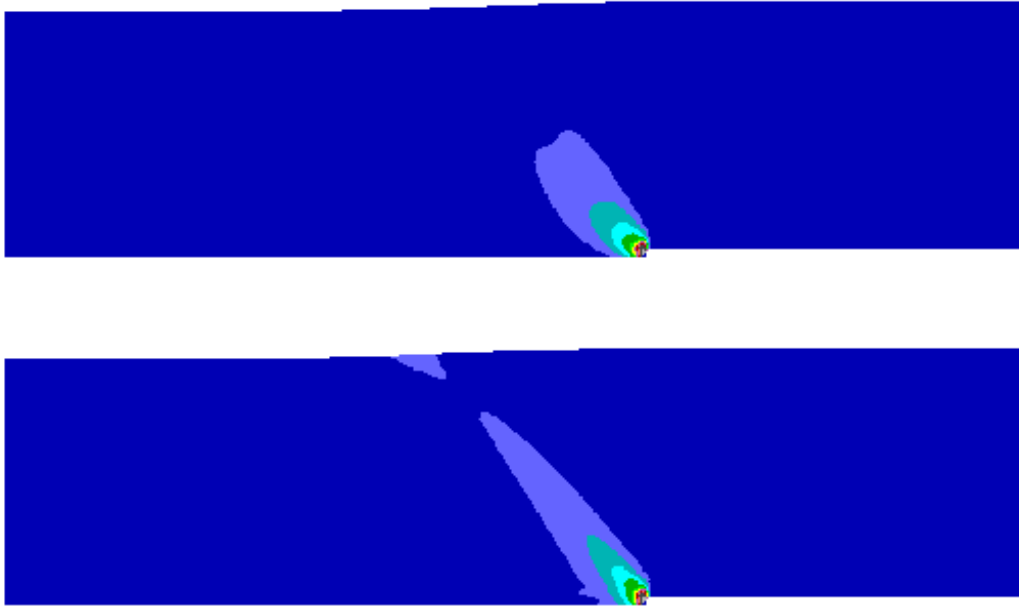
της παραμορφωμένης επιφάνειας να γίνεται σχετικώς πιο έντονη, ειδικά για μεγάλες τιμές μετατόπισης ρήγματος ($h \geq 0.8\text{m}$). Μάλιστα, στα πρώτα στάδια επιβαλλόμενης μετατόπισης δεν διαφαίνεται κάποια ιδιαίτερη διαφορά. Ωστόσο, καθώς η μετατόπιση του ρήματος μεγαλώνει, για $h \geq 0.8\text{m}$, η απόκλιση στα αποτελέσματα για τις δύο κατευθύνσεις δομής γίνεται μεγαλύτερη και διαφαίνεται διόγκωση της επιφάνειας του εδάφους για την περίπτωση κατακόρυφης δομής κόκκων και μάλιστα πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη περίπτωση της χαλαρής άμμου. Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια μέσης πυκνότητας άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.



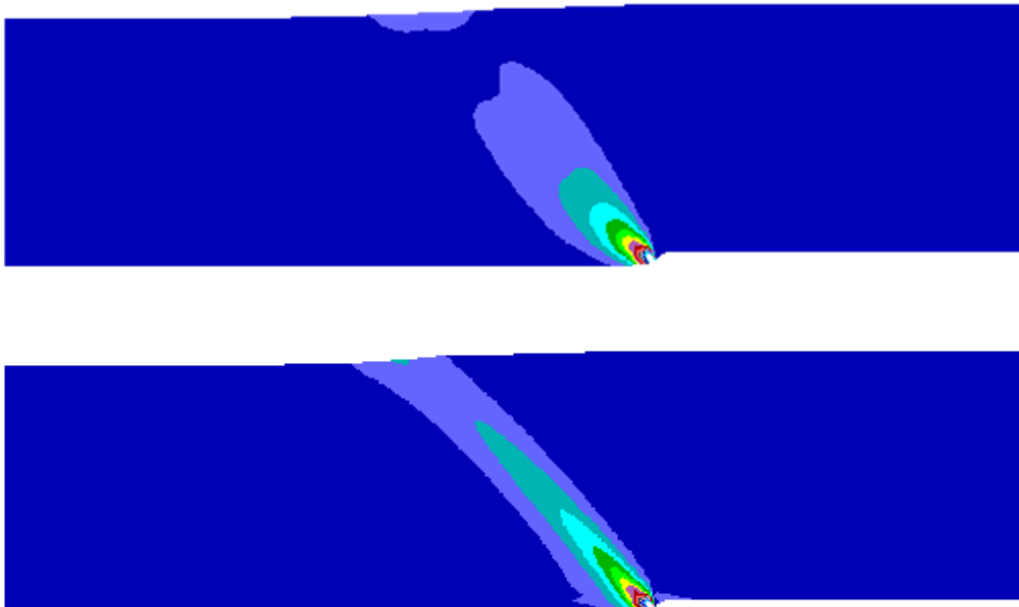
Σχήμα 6.21 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση μέσης σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Στα **Σχήματα 6.22 και 6.23** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε μέσης πυκνότητας άμμο, με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ και $h=1.2\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η

διάρρηξη του ρήγματος αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου για σχετικά μικρότερη μετατόπιση ρήγματος στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων.



Σχήμα 6.22 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-5 και A-14, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



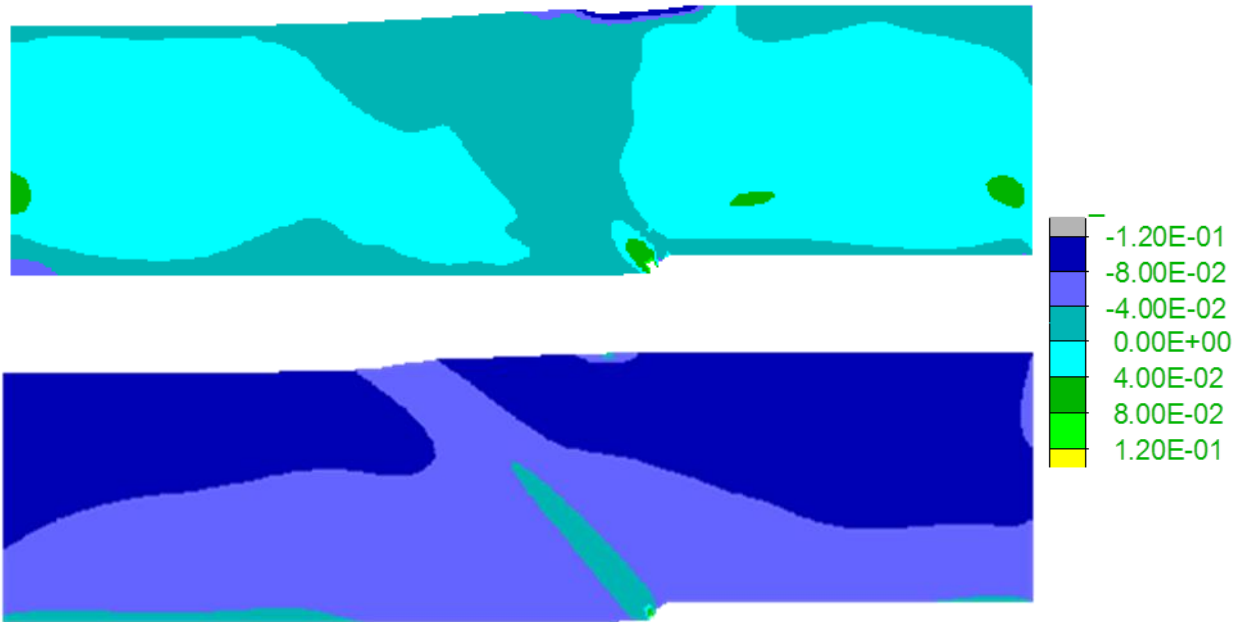
Σχήμα 6.23 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=1.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-5 και A-14, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Συνεπώς προκύπτει ότι μια μέσης πυκνότητας άμμος με κατακόρυφη δομή κόκκων συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή συγκριτικά μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος. Τέλος, επιβεβαιώνεται και από τις αναλύσεις αυτές, ότι σε ανάστροφα ρήγματα δε δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη, και ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε ανάστροφα ρήγματα απαιτεί πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος, συγκριτικά με εκείνη για κανονικά ρήγματα, όπως παρατηρήθηκε και για χαλαρές άμμους (βλ. προηγούμενη παράγραφο).

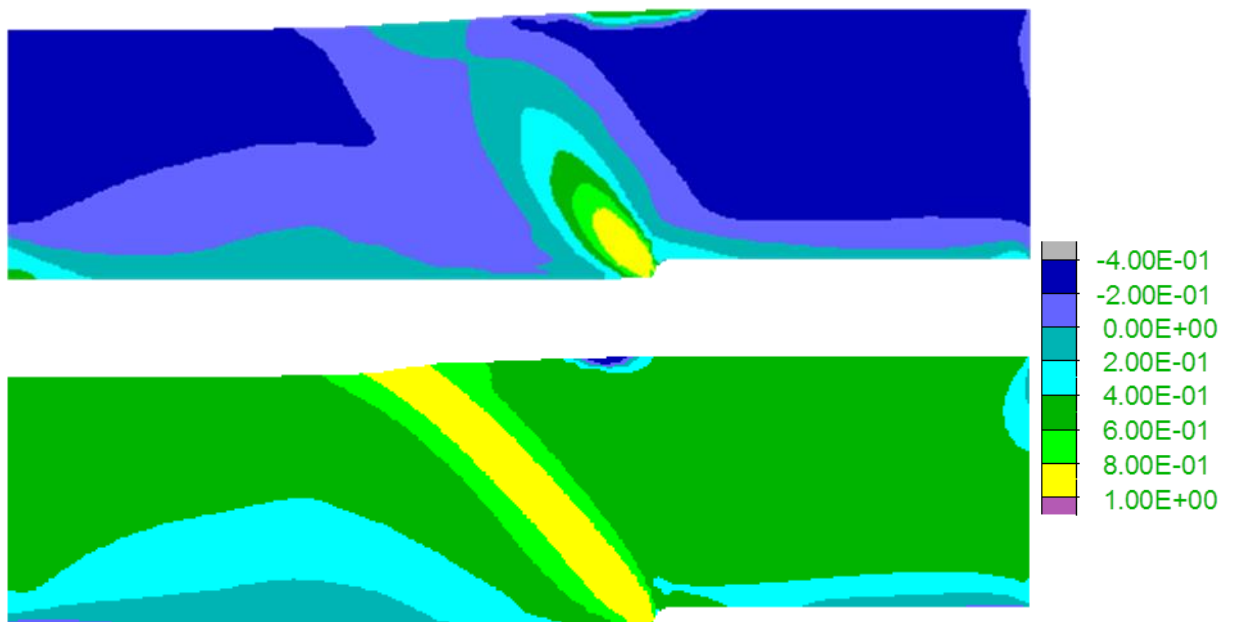
Στη συνέχεια, το **Σχήμα 6.24** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε μέσης πυκνότητας άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.25** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε μέσης πυκνότητας άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012).

Παρατηρείται ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις μικρο-δομής, η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση μόνο για τη θεώρηση της κατακόρυφης μικρο-δομής και σε βάθη μεγαλύτερα από 7m. Αντιθέτως, για οριζόντια μικρο-δομή μόνο σε πολύ μεγάλα βάθη (μεγαλύτερα από 18m) η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Συνεπώς, η Κρίσιμη Κατάσταση στη ζώνη διάτμησης επέρχεται για μικρότερες μετατοπίσεις ρήγματος υπό κατακόρυφη δομή κόκκων, αλλά ακόμη και για $h = 1.6\text{m}$ (πολύ μεγάλη μετατόπιση) δεν αρκεί ώστε όλη η ζώνη διάτμησης να βρεθεί σε Κρίσιμη Κατάσταση.

Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = -0.5$ και $+0.5$, καθώς το «θλιπτικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος χαρακτηρίζεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της κατακόρυφης μικροδομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την οριζόντια δομή).



Σχήμα 6.24 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-23 και A-32, Παράρτημα Α).



Σχήμα 6.25 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-23 και A-32, Παράρτημα Α).

Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς κατακόρυφη μικροδομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «θλιπτικό» τασικό πεδίο ενός ανάστροφου ρήγματος, σε ό,τι αφορά στην τιμή της παραμέτρου A . Επιπλέον όμως, η αρχικώς αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για οριζόντια μικροδομή, συνεπάγεται λιγότερο αρνητική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ό,τι για κατακόρυφη μικροδομή, δηλαδή λιγότερο διαστολική συμπεριφορά για οριζόντια μικροδομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.

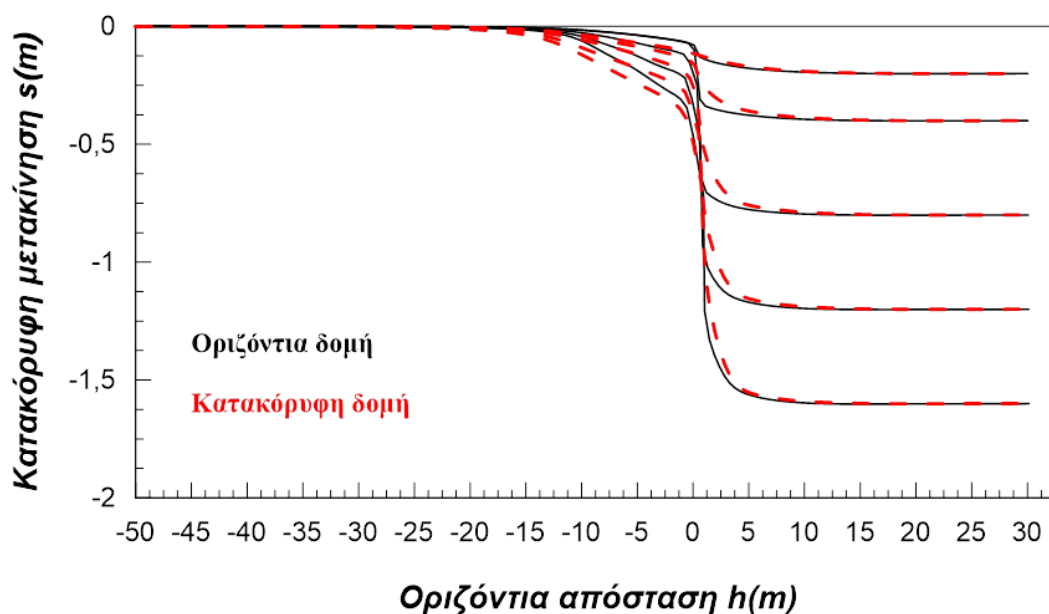
Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι οι τιμές του ζ εντός της ζώνης διάτμησης είναι πλησίον του μηδέν, ενώ στο περιβάλλον έδαφος έχουμε τιμές $\zeta \leq 0$ στην περίπτωση της οριζόντιας δομής κόκκων και $\zeta < 0$ για κατακόρυφη δομή. Υπενθυμίζεται εδώ ότι στην περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων για χαλαρή άμμο, οι τιμές του ζ ήταν παντού θετικές εκτός της ζώνης διάτμησης. Αυτές οι τιμές του ζ πλησίον του 0, υποδηλώνουν αύξηση όγκου κατά μήκος της ζώνης διάτμησης.

Συνολικά προκύπτει ότι η επίδραση της δομής των κόκκων στη διάδοση της διάρρηξης δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά επηρεάζεται από το διαφορετικό τασικό πεδίο για διαρρήξεις κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων, όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και για τις χαλαρές άμμους. Μάλιστα, προκύπτει ότι η δομή των κόκκων επηρεάζει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος που χρειάζεται για την ανάδυση της διάρρηξης, αλλά δεν αλλάζει την βασική παρατήρηση της βιβλιογραφίας, ότι χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυση ανάστροφων ρηγμάτων συγκριτικά με κανονικά ρήγματα ίδιας γωνίας. Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο για τη χαλαρή άμμο, αυτή η μεγάλη διαφορά στην αναγκαία μετατόπιση ρήγματος είναι αντίστοιχη με τη μεγάλη διαφορά στην αναγκαία μετατόπιση τοίχου αντιστήριξης για ενεργητική και παθητική αστοχία κατά Rankine, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

6.3.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$)

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες υποπαραγράφους, εδώ παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση «κατακόρυφων» ρηγμάτων σε μέσης πυκνότητας αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.26** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της κατεύθυνσης

δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.



Σχήμα 6.26 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμόδη στρώση μέσης σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.26** για την μέσης πυκνότητας άμμο, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της παραμορφωμένης επιφάνειας. Μάλιστα, για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος, οι δύο μορφές σχεδόν ταυτίζονται. Ωστόσο, καθώς η διάρρηξη ρήγματος φτάνει σε μεγάλες τιμές ($h \geq 0.8\text{m}$), διαφαίνεται μια μικρή απόκλιση στην παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, με την κατακόρυφη δομή να μετατοπίζει ελαφρώς την καμπύλη διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος και να δημιουργεί μία πιο ομαλή κλίση σε σχέση με εκείνη της οριζόντιας δομής. Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια μέσης πυκνότητας άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή λίγο μικρότερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος, αν και οι διαφορές είναι γενικώς μικρές.



Σχήμα 6.27 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-8 και A-17, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 6.28 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-8 και A-17, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

Στα ανωτέρω **Σχήματα 6.27 και 6.28**, απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε μέση πυκνότητας άμμο, με μετατόπιση ρήγματος $h=0.2\text{m}$ και $h=0.4\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου για λίγο μικρότερη τιμή μετατόπισης ρήγματος όταν η δομή κόκκων είναι οριζόντια, αν και η διαφορά αυτή είναι σαφώς μικρότερη από τις όποιες διαφορές λόγω κατεύθυνσης δομής που παρατηρήθηκαν για μέσης πυκνότητας άμμους σε διάρρηξη από κανονικά και ανάστροφα ρήγματα (βλ. προηγούμενες παραγράφους).

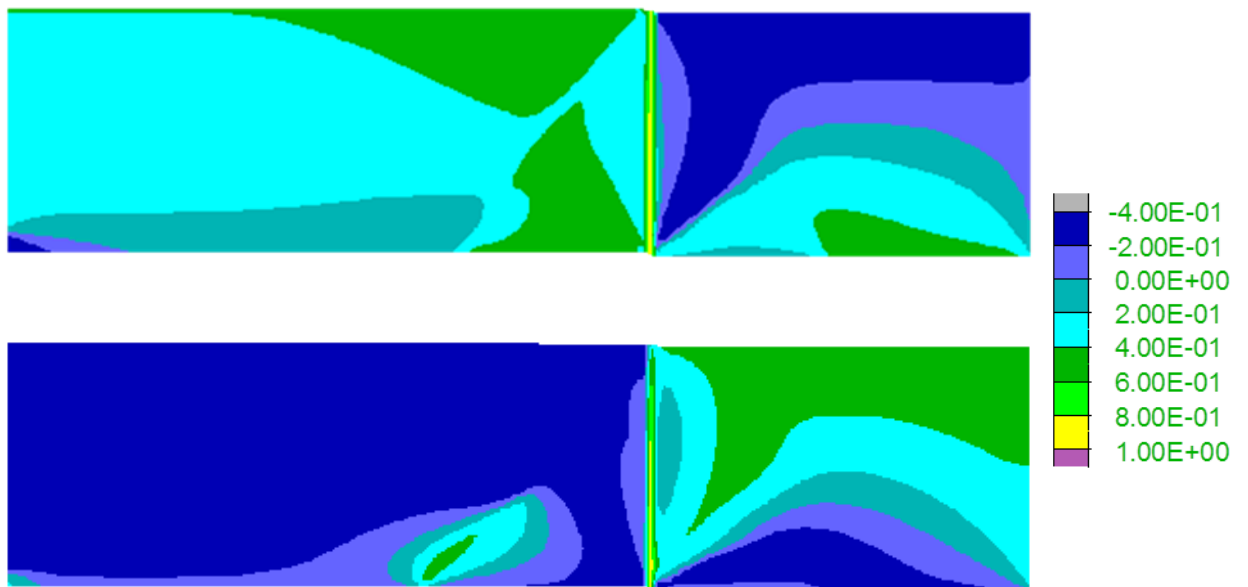
Παρατηρείται επίσης ότι σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της χαλαρής άμμου, η διάρρηξη αναδύεται κατακόρυφα χωρίς αποκλίσεις και οι ζώνες διάτμησης είναι μικρότερου εύρους λόγω της μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας της άμμου. Τέλος, επιβεβαιώνεται ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε κατακόρυφα ρήγματα γίνεται για τιμή μετατόπισης ρήγματος $h = 0.2 - 0.4\text{m}$, δηλαδή μικρότερη απ' ό,τι χρειάζεται για ανάστροφα ρήγματα ($h = 0.8 - 1.2\text{m}$) και παρόμοια με αυτή που απαιτείται για κανονικά ρήγματα, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, και αυτό ανεξαρτήτως κατεύθυνσης δομής κόκκων.

Παράλληλα, τα **Σχήματα 6.29 και 6.30** που ακολουθούν απεικονίζουν την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ και την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A αντίστοιχα, με οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε μέση πυκνότητας άμμο για μετατόπιση $h = 0.4\text{m}$, δηλαδή όταν η διάρρηξη και για τις δύο δομές έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012). Γίνεται φανερό λοιπόν και από αυτά τα σχήματα η ομοιότητα στη διάδοση της διάρρηξης, εφόσον στο ίδιο στάδιο της μετατόπισης του υποβάθρου, η διάρρηξη τόσο με την παραδοχή οριζόντιας δομής όσο και με την παραδοχή κατακόρυφης δομής, έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση, με τις διαφορές λόγω κατεύθυνσης δομής να είναι αμελητέες (αν και η οριζόντια δομή δείχνει να οδηγεί σε ελαφρώς πιο εμπεδωμένη Κρίσιμη Κατάσταση στη ζώνη διάτμησης). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι σε όρους ζ , η επιφάνεια διάτμησης (η περιοχή όπου το ζ είναι πλησίον του 0) είναι κατακόρυφη

ανεξαρτήτως κατεύθυνσης δομής, δηλαδή δεν υπάρχει τάση προς το ένα ή το άλλο τέμαχος, όπως παρουσιάστηκε στη χαλαρή άμμο.



Σχήμα 6.29 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 0.4\text{m}$ (Σχήματα A-26 και A-35, Παράρτημα Α).



Σχήμα 6.30 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 0.4\text{m}$ (Σχήματα A-26 και A-35, Παράρτημα Α).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι η οριζόντια μικροδομή συνεπάγεται αρχικές τιμές $A > 0$ και $A < 0$ για το σταθερό και το κινούμενο τέμαχος, αντίστοιχα, ενώ τα πρόσημα της παραμέτρου A αντιστρέφονται για κατακόρυφη δομή κόκκων. Συνεπώς, αντίθετα με τα κανονικά και ανάστροφα ρήγματα όπου η αρχική τιμή της παραμέτρου A άλλαζε πρόσημο ανάλογα με τη διεύθυνση της μετακίνησης (προς τα άνω ή κάτω) σε όλη την εδαφική στρώση, εδώ η τιμή της A αλλάζει πρόσημο ανάλογα με το αν βρίσκεται στο κινούμενο ή το σταθερό τέμαχος. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο τασικό πεδίο, που δεν είναι ούτε «εφελκυστικό» (κανονικό ρήγμα) ούτε «θλιπτικό» (ανάστροφο ρήγμα), αλλά μορφής απλής διάτμησης. Δεδομένου όμως ότι η ζώνη διάτμησης είναι κατακόρυφη και μικρού εύρους, η επίδραση του αντιθέτου πρόσημου του A στα δύο τεμάχη οδηγεί μόνο σε περισσότερο συστολική συμπεριφορά στο σταθερό τέμαχος για κατακόρυφη δομή κόκκων ($A < 0$) με αποτέλεσμα την πιο ευρεία περιοχή με παραμόρφωση εδάφους στην επιφάνεια (βλ. **Σχήμα 6.26**).

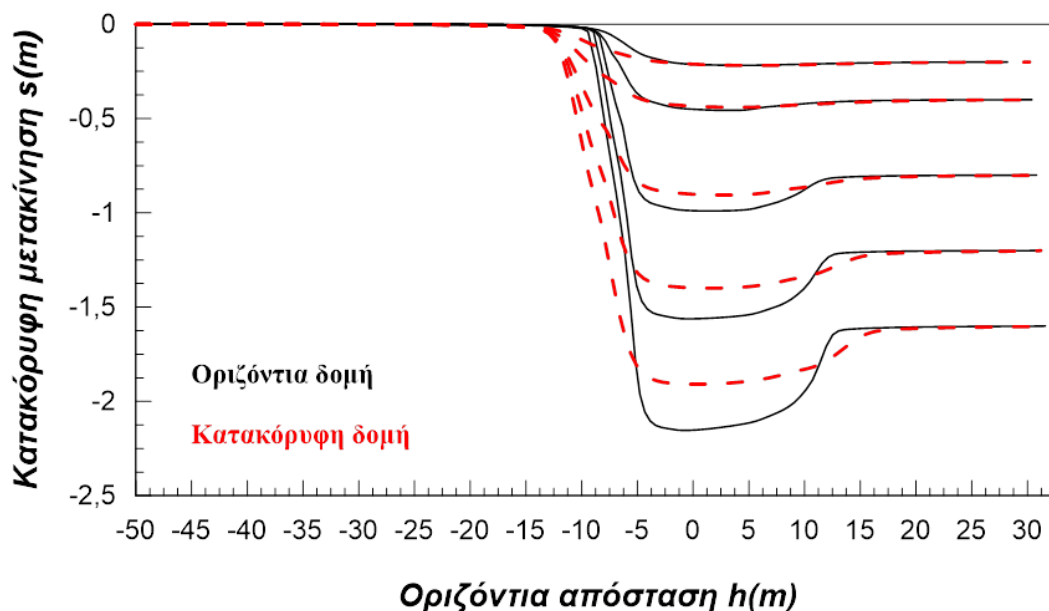
6.4 Διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω πυκνής άμμου ($D_r = 80\%$)

6.4.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος (γωνίας $\beta=45^\circ$)

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση κανονικών ρηγμάτων σε πυκνή αμμώδη στρώση και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.31** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο θεωρήσεις κατεύθυνσης για τη δομή κόκκων, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.

Γίνεται φανερό ότι η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων μετατοπίζει την διάρρηξη προς το σταθερό τέμαχος και δημιουργεί μια συνολικά πιο ομαλή κλίση σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για οριζόντια δομή. Επίσης, για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος (για $h \geq 0.8\text{m}$), όπου και η απόκλιση των δύο παραδοχών είναι μεγαλύτερη, φαίνεται να δημιουργείται πιο ρηχό και πιο ευρύ κατακρήμνισμα στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων. Συμπεραίνεται δηλαδή, ότι μία πυκνή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή σχετικά

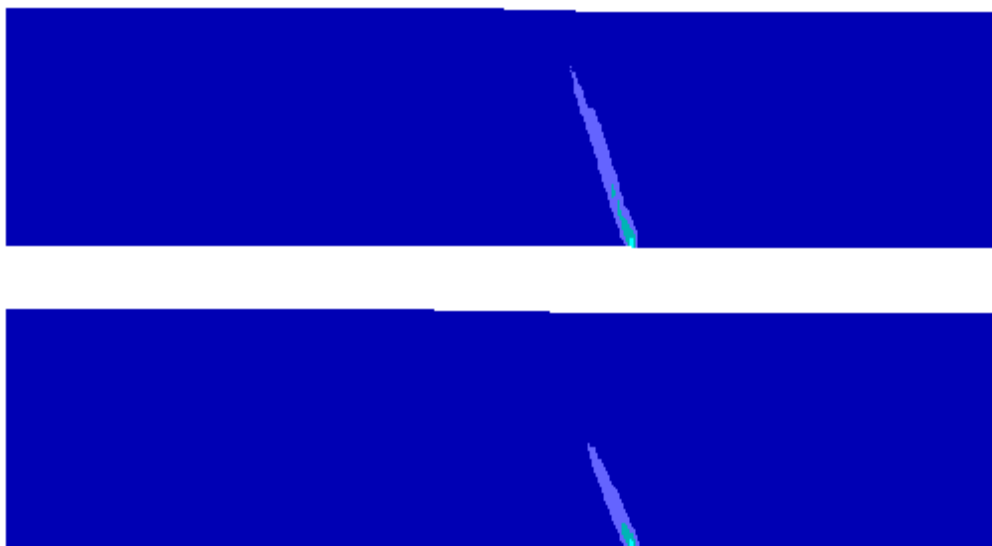
μικρότερης πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος, ακριβώς όπως συμβαίνει και για τις πιο χαλαρές άμμους που εξετάστηκαν σε προηγούμενες παραγράφους.



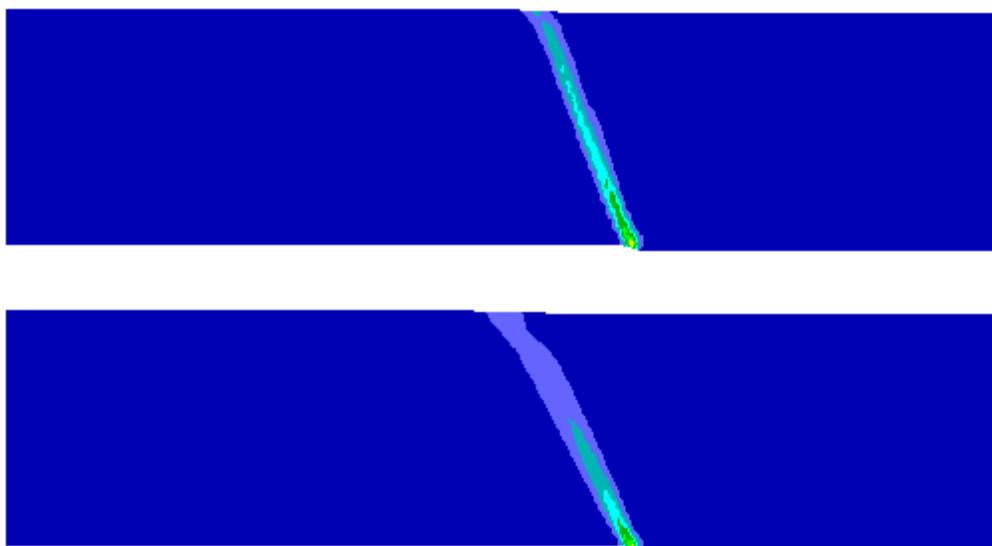
Σχήμα 6.31 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμόδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Χάριν πληρέστερης σύγκρισης, στα **Σχήματα 6.32 και 6.33** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε πυκνή άμμο, με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ και $h=0.8\text{m}$ αντίστοιχα. Τα σχήματα αυτά είναι διπλά, και συγκρίνουν τα σχετικά αποτελέσματα για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη του ρήγματος δεν έχει αναδυθεί πλήρως στην επιφάνεια για $h = 0.4\text{m}$, ενώ έχει πλήρως αναδυθεί για $h = 0.8\text{m}$, και για τις 2 θεωρήσεις αρχικής μικρο-δομής. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η ελαφρά μετατόπιση της διάρρηξης προς το σταθερό τέρμαχος, για τη θεώρηση κατακόρυφης δομής κόκκων. Επισημαίνεται επίσης το ότι και στις δύο παραδοχές εμφανίζεται δευτερεύουσα διάρρηξη προς το μετακινούμενο τέρμαχος, αλλά μόνο στην περίπτωση της οριζόντιας δομής των κόκκων, η διάρρηξη αυτή αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου και μάλιστα για μετατόπιση ρήματος $h = 1.2\text{m}$ (βλ. **Παράρτημα Α**). Σε κάθε περίπτωση, από τα εν λόγω σχήματα προκύπτει επίσης ότι οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις είναι σχετικά μεγαλύτερες για θεώρηση οριζόντιας

μικρο-δομής, γεγονός που οδηγεί και σε ανάδυση της διάρρηξης σε λίγο μικρότερη μετατόπιση ρήγματος για την ίδια θεώρηση. Μακροσκοπικά, όλα τα ανωτέρω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μία πυκνή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή σχετικά μικρότερης πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος.



Σχήμα 6.32 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-3 και A-12, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

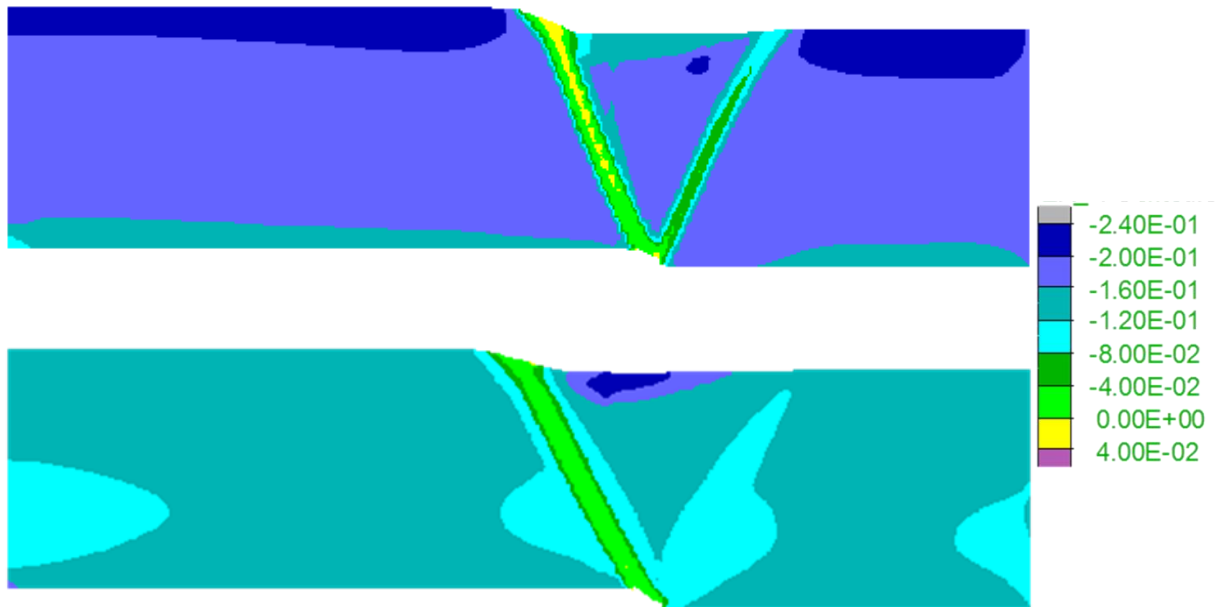


Σχήμα 6.33 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-3 και A-12, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

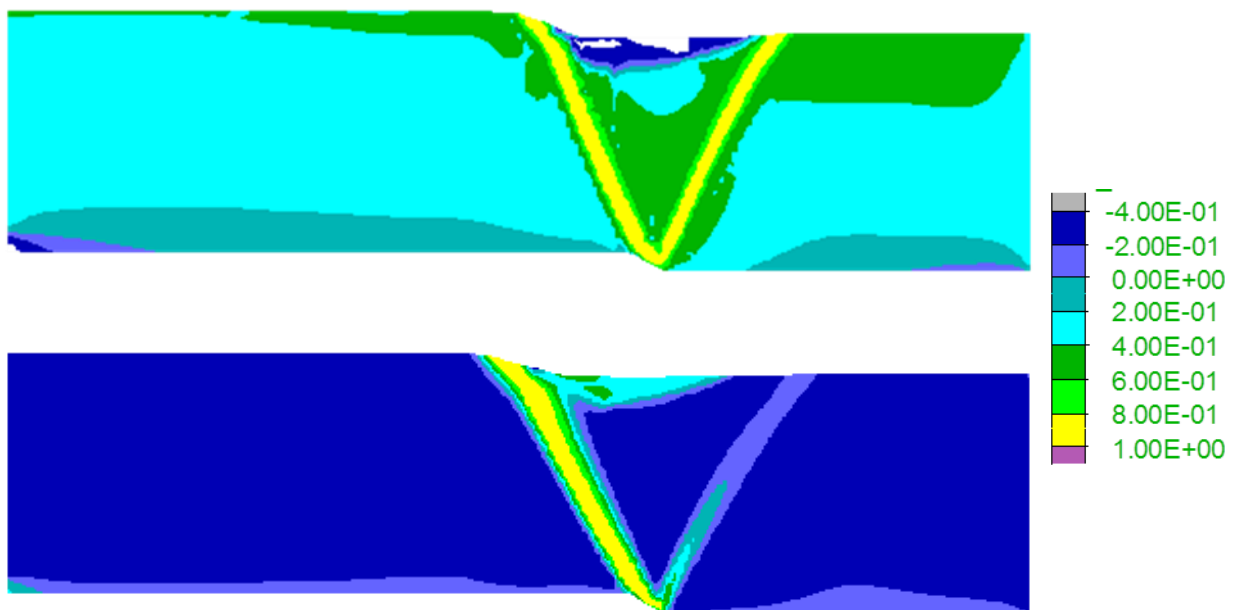
Στη συνέχεια, το **Σχήμα 6.34** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε πυκνή αμμώδη στρώση, για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$, δηλαδή σε διπλάσια μετατόπιση ρήγματος απ' ό τι χρειάζεται για την ανάδυση της κύριας διάρρηξης και για τις 2 θεωρήσεις κατεύθυνσης δομής, επί τη βάση του **Σχήματος 6.33**. Ομοίως, στο **Σχήμα 6.35** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ σε πυκνή άμμο για την ίδια μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Υπενθυμίζεται ότι η κρίσιμη κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που οδηγεί και την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης σε $\zeta=0$). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης και σε όλο το μήκος της έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση και στις δύο περιπτώσεις δομής. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το γεγονός ότι στην περίπτωση της οριζόντιας δομής των κόκκων η ζώνη της δευτερεύουσας διάρρηξης προσεγγίζει και αυτή την Κρίσιμη Κατάσταση για $h = 1.6\text{m}$ σχεδόν σε όλο το μήκος της (συγκεκριμένα για βάθος μεγαλύτερο από 4m), σε αντίθεση με την κατακόρυφη δομή όπου μόνο η αρχή της διάρρηξης (σε βάθη 19m) βρίσκεται σε Κρίσιμη Κατάσταση. Επιπλέον, με βάση τις αποτυπώσεις και των δευτερευουσών διαρρήξεων, προκύπτει σαφώς ότι το κατακρήμνισμα που δημιουργείται είναι πιο ευρύ για κατακόρυφη απ' ό τι για οριζόντια δομή κόκκων.

Όπως και για τις χαλαρότερες άμμους, αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = 0.5$ και -0.5 , καθώς το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος χαρακτηρίζεται από μείωση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμμική με τη διεύθυνση της οριζόντιας μικρο-δομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την κατακόρυφη δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς οριζόντια μικρο-δομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο ενός κανονικού ρήγματος. Επιπλέον όμως, η αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για κατακόρυφη μικρο-δομή, συνεπάγεται λιγότερο αρνητική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ό τι για οριζόντια μικρο-δομή, δηλαδή λιγότερο διαστολική συμπεριφορά για κατακόρυφη μικρο-δομή,

γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικά πιο χαλαρή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος.



Σχήμα 6.34 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-21 και A-30, Παράρτημα Α).

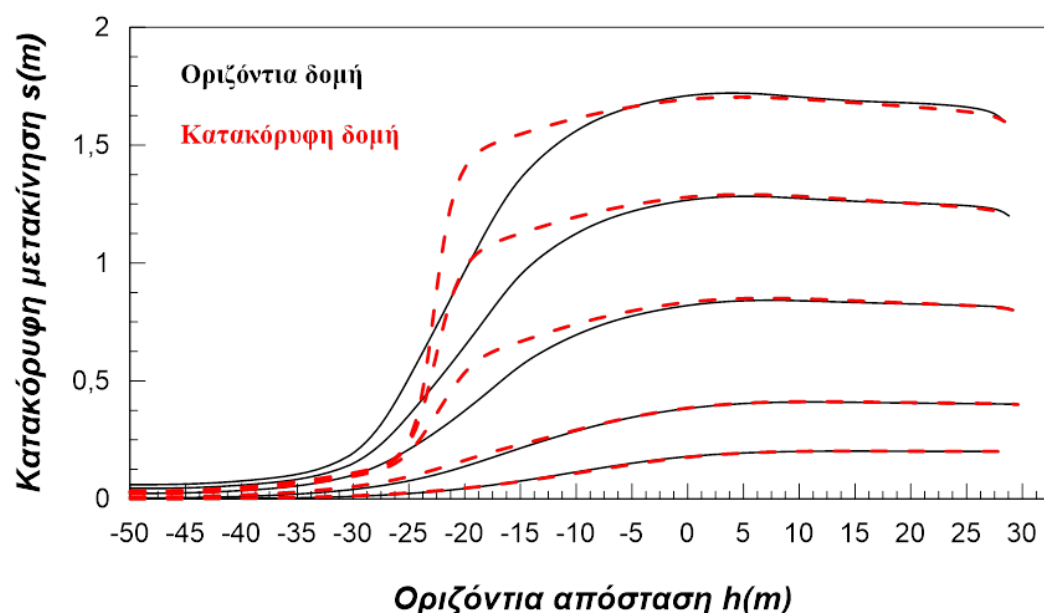


Σχήμα 6.35 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής Α (κάτω) σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-21 και A-30, Παράρτημα Α).

6.4.2 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος (γωνίας $\beta=135^\circ$)

Εδώ παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε πυκνή αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο ακόλουθο **Σχήμα 6.36**, που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$.

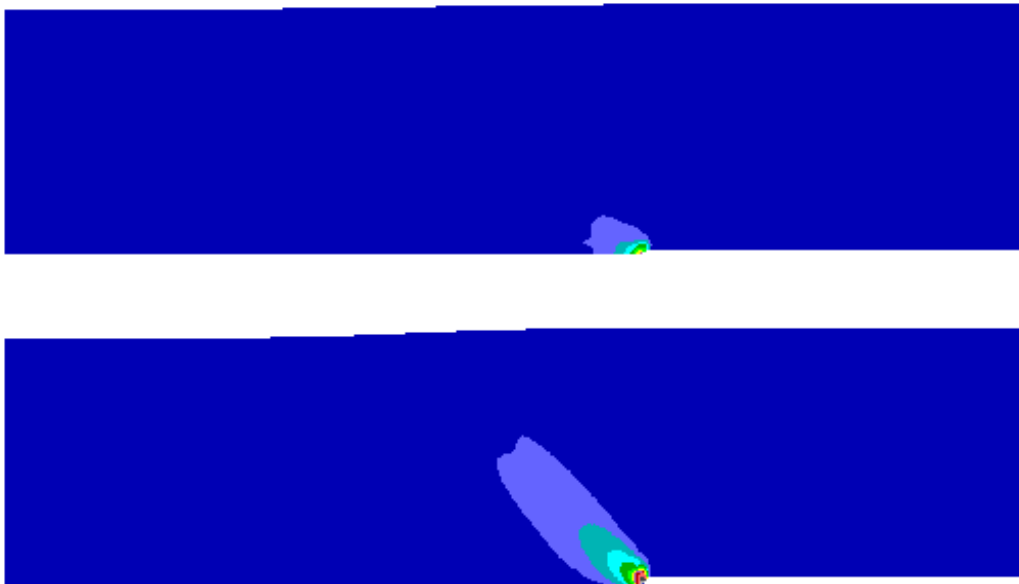
Σύμφωνα με το **Σχήμα 6.36** για την πυκνή άμμο, η παραδοχή κατακόρυφης δομής των κόκκων οδηγεί σε συγκέντρωση της παραμόρφωσης στην επιφάνεια σε στενή περιοχή, όπου αναδύεται και η διάρρηξη, ειδικά για μεγάλες τιμές μετατόπισης ρήγματος ($h \geq 0.8\text{m}$). Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι μια πυκνή άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.



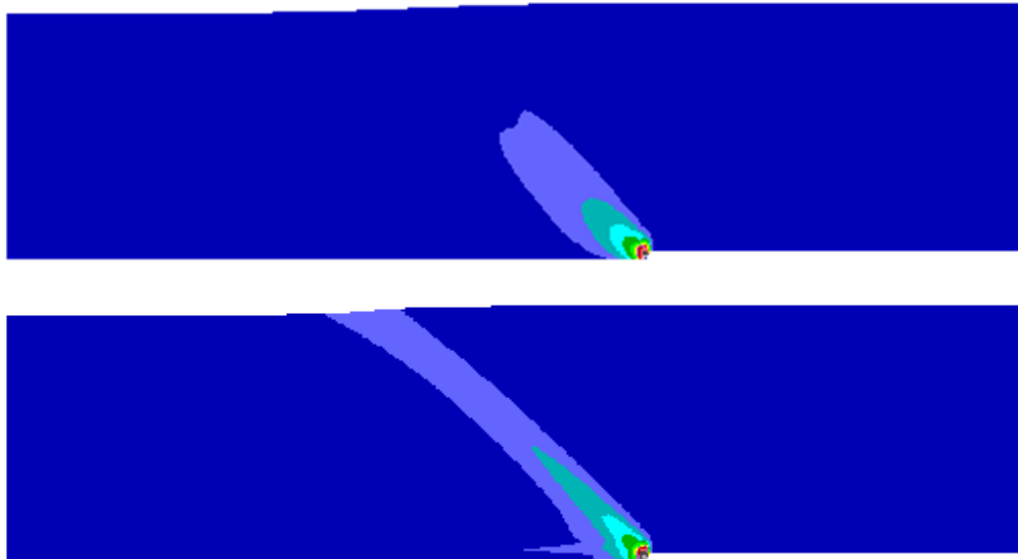
Σχήμα 6.36 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Στα **Σχήματα 6.37 και 6.38** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε πυκνή άμμο, με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ και $h=0.8\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι στην περίπτωση της κατακόρυφης δομής των κόκκων η διάρρηξη του ρήγματος αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου για μικρότερη μετατόπιση ρήγματος. Όλες αυτές οι παρατηρήσεις υπογραμμίζουν το συμπέρασμα ότι μια πυκνή άμμος με κατακόρυφη δομή κόκκων συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή ακόμη μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.

Τέλος, επιβεβαιώνεται από τις αναλύσεις αυτές, ότι σε ανάστροφα ρήγματα δε δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη, και ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε ανάστροφα ρήγματα απαιτεί πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος, συγκριτικά με εκείνη για κανονικά ρήγματα (βλ. προηγούμενη παράγραφο).



Σχήμα 6.37 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-6 και A-15, Παράρτημα Α). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

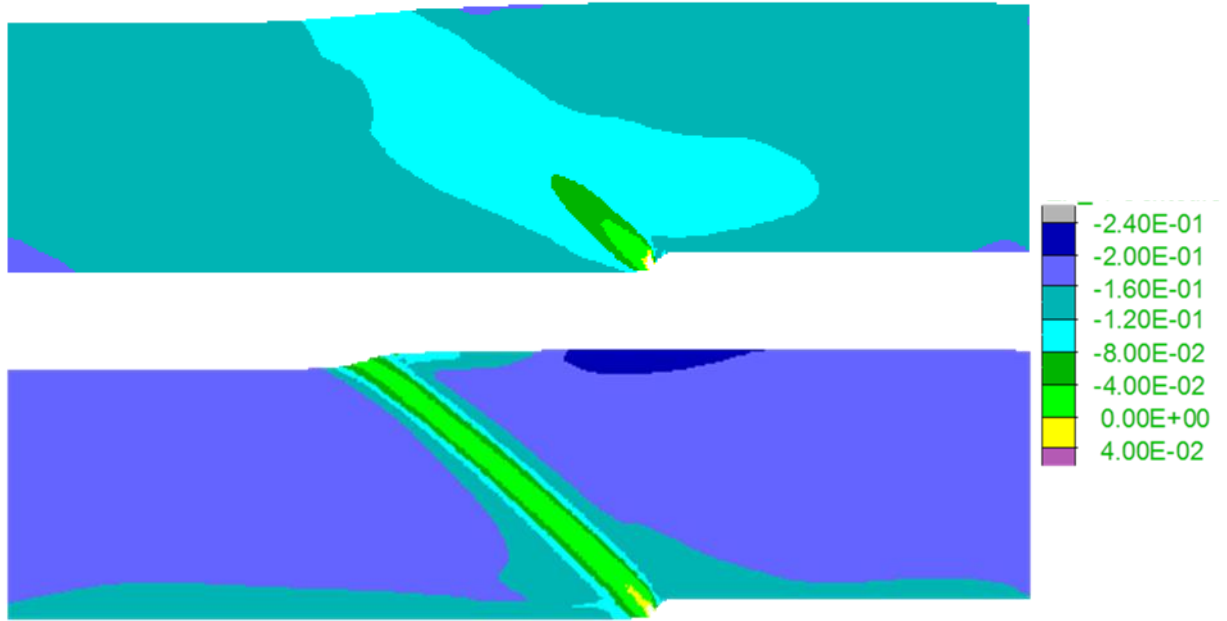


Σχήμα 6.38 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h=0.8\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-6 και A-15, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.

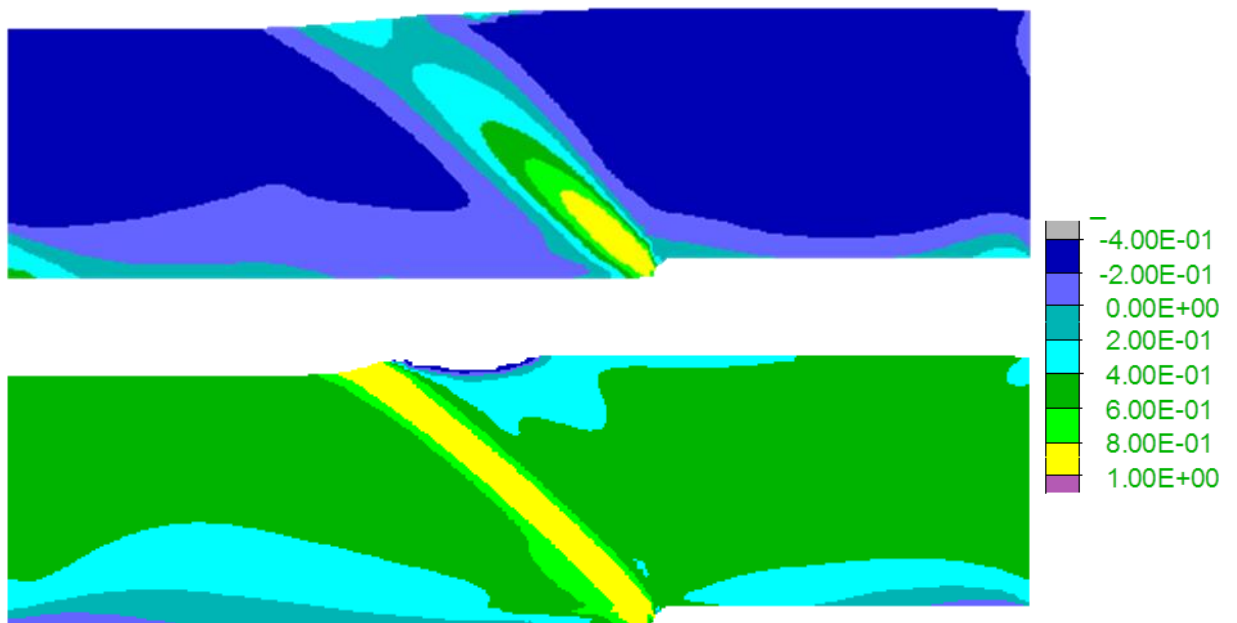
Στη συνέχεια, το **Σχήμα 6.39** απεικονίζει την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε πυκνή άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.40** φαίνεται το διάγραμμα της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή κόκκων (κάτω) για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ σε πυκνή άμμο για μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και για τις 2 περιπτώσεις μικρο-δομής για $h = 1.6\text{m}$, η άμμος σε όλο το εύρος της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση μόνο για τη θεώρηση της κατακόρυφης μικρο-δομής. Αντιθέτως, για οριζόντια μικρο-δομή μόνο σε πολύ μεγάλα βάθη (μεγαλύτερα από 12m) η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Συνεπώς, η Κρίσιμη Κατάσταση στη ζώνη διάτμησης επέρχεται για μικρότερες μετατοπίσεις ρήγματος υπό κατακόρυφη δομή κόκκων, ενώ μετατόπιση ρήγματος $h = 1.6\text{m}$ αρκεί ώστε όλη η ζώνη διάτμησης να βρεθεί σε Κρίσιμη Κατάσταση.

Όπως και για χαλαρότερες άμμους, αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές $A = -0.5$ και $+0.5$, καθώς το «θλιπτικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος χαρακτηρίζεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της κατακόρυφης μικροδομής, οδηγώντας σε θετικές τιμές A (και το αντίθετο για την οριζόντια δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς κατακόρυφη μικροδομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «θλιπτικό» τασικό πεδίο ενός ανάστροφου ρήγματος. Επιπλέον όμως, η αρνητική τιμή του $A = -0.5$ για οριζόντια μικροδομή, συνεπάγεται λιγότερο αρνητική τιμή της παραμέτρου ζ , απ' ό,τι για κατακόρυφη μικροδομή, δηλαδή λιγότερο διαστολική συμπεριφορά για οριζόντια μικροδομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι οι τιμές του ζ εντός της ζώνης διάτμησης είναι πλησίον του μηδέν, ενώ στο περιβάλλον έδαφος έχουμε τιμές $\zeta \ll 0$ (λόγω της θεώρησης πυκνής άμμου). Αυτές οι τιμές του ζ πλησίον του 0, υποδηλώνουν μεγάλη αύξηση όγκου κατά μήκος της ζώνης διάτμησης.

Συνολικά προκύπτει ότι η επίδραση της δομής των κόκκων στη διάδοση της διάρρηξης δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά επηρεάζεται από το διαφορετικό τασικό πεδίο για διαρρηξείς κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων. Μάλιστα, προκύπτει ότι η δομή των κόκκων επηρεάζει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος που χρειάζεται για την ανάδυση της διάρρηξης, αλλά δεν αλλάζει την βασική παρατήρηση της βιβλιογραφίας, δηλαδή ότι χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυση ανάστροφων ρηγμάτων συγκριτικά με κανονικά ρήγματα ίδιας γωνίας. Η ίδια ακριβώς παρατήρηση έγινε και για χαλαρότερες άμμους, και συνεπώς ισχύει ποιοτικά ανεξαρτήτως της αρχικής σχετικής πυκνότητας της άμμου. Ο λόγος είναι ότι η διάδοση της διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων θυμίζει την αντίστοιχη ολίσθηση τοίχων αντιστήριξης που οδηγούν σε ενεργητική αστοχία κατά Rankine (λόγω μείωσης των οριζοντίων τάσεων), η οποία απαιτεί σαφώς μικρότερες τιμές ολίσθησης συγκριτικά με την παθητική αστοχία κατά Rankine (λόγω αύξησης των οριζοντίων τάσεων).



Σχήμα 6.39 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-24 και A-33, Παράρτημα A).

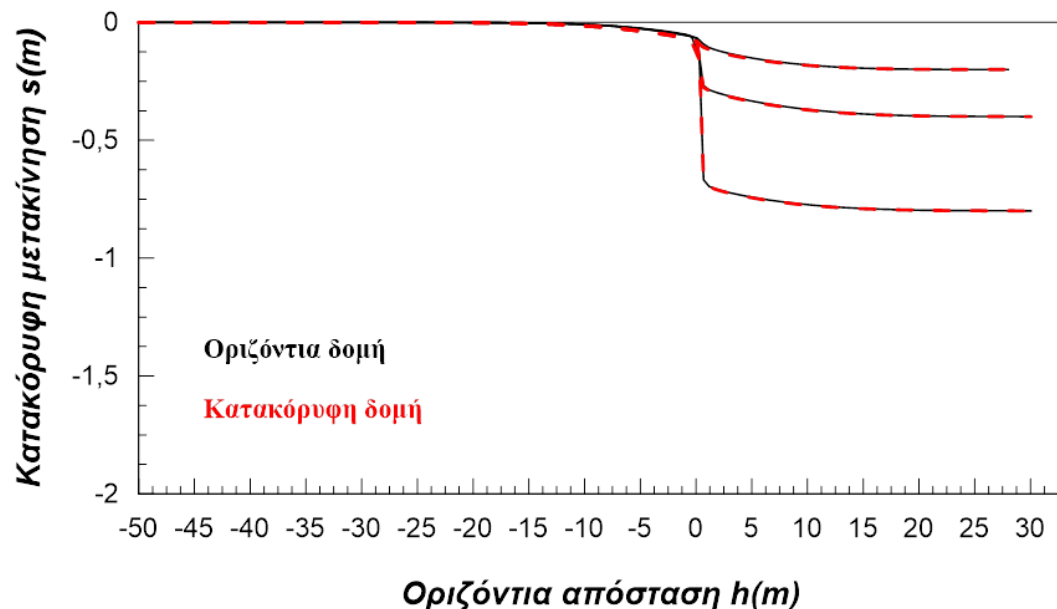


Σχήμα 6.40 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με μετατόπιση $h = 1.6\text{m}$ (Σχήματα A-24 και A-33, Παράρτημα A).

6.4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος (γωνίας $\beta=85^\circ$)

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες υποπαραγράφους, εδώ παρουσιάζονται για πρώτη φορά τα αποτελέσματα της θεώρησης κατακόρυφης δομής κόκκων για διάδοση «κατακόρυφων» ρηγμάτων σε πυκνή αμμώδη στρώση, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για οριζόντια δομή κόκκων από το Κεφάλαιο 5. Στο **Σχήμα 6.41** που ακολουθεί, απεικονίζεται για τις δύο παραδοχές της δομής, η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$, ξεχωριστά για κάθε βήμα μετατόπισης $h=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$ και $h=0.8\text{m}$. Οι αριθμητικές αναλύσεις δε συνεχίστηκαν για $h=1.2\text{m}$ και $h=1.6\text{m}$, καθώς η στρέβλωση του καννάβου που σχετίζεται με την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια ομοιάζε σε ολίσθηση του κινούμενου τεμάχους συγκριτικά με το σταθερό, μια μορφή αστοχίας που δε μπορεί να προσομοιωθεί εύκολα με αναλύσεις συνεχούς μέσου.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το **Σχήμα 6.41** για την πυκνή άμμο, η παραδοχή κατακόρυφης δομής κόκκων δεν φαίνεται να επηρεάζει ουσιαστικά τη μορφή της παραμορφωμένης επιφάνειας.



Σχήμα 6.41 Σχηματική απεικόνιση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης $h = 0.2 - 1.6\text{m}$ και για παραδοχή οριζόντιας και κατακόρυφης δομής.

Στα **Σχήματα 6.42 και 6.43** που ακολουθούν απεικονίζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ και $h=0.4\text{m}$ αντίστοιχα, για οριζόντια (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω). Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η διάρρηξη του ρήγματος αναδύεται στην επιφάνεια της άμμου πρακτικώς για την ίδια μετατόπιση ρήγματος, και για τις δύο παραδοχές της κατεύθυνσης της δομής, ενώ η διάρρηξη έχει πολύ μικρό εύρος και είναι κατακόρυφη. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ότι η ανάδυση της διάρρηξης σε «κατακόρυφα» ρήγματα γίνεται για μετατόπιση ρήγματος $h = 0.2 - 0.4\text{m}$, δηλαδή μικρότερη απ' ό,τι χρειάζεται για ανάστροφα ρήγματα ($h = 0.4 - 0.8\text{m}$) και περίπου ίση με όση χρειάζεται για κανονικά ρήγματα, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, και αυτό ανεξαρτήτως δομής κόκκων.

Παράλληλα, τα **Σχήματα 6.44 και 6.45** που ακολουθούν απεικονίζουν την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ και την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A αντίστοιχα, με οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ σε πυκνή άμμο για μετατόπιση $h = 0.8\text{ m}$, δηλαδή αφού έχει παρατηρηθεί ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Υπενθυμίζεται ότι $A = 1$ (και συνακόλουθα $\zeta = 0$) υποδηλώνει Κρίσιμη Κατάσταση, σύμφωνα με την ACST των Li & Dafalias (2012). Από αυτά τα σχήματα υπογραμμίζεται περαιτέρω η ομοιότητα στην απόκριση για τις δύο παραδοχές δομής, εφόσον για μετατόπιση ρήγματος $h = 0.8\text{m}$, η άμμος εντός της ζώνης διάρρηξης τόσο με την παραδοχή οριζόντιας δομής όσο και με την παραδοχή κατακόρυφης δομής, έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι σε όρους ζ , η επιφάνεια διάτμησης (η περιοχή όπου το ζ είναι πλησίον του 0 ή το A είναι πλησίον του 1) είναι κατακόρυφη και για τις δύο δομές. Ωστόσο, παρατηρείται ότι στην οριζόντια δομή στο σταθερό τέμαχος οι τιμές του ζ είναι περισσότερο αρνητικές από ότι στο κινούμενο, ενώ ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει στη κατακόρυφη δομή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις αρχικές τιμές $A > 0$ και $A < 0$ για το σταθερό και το κινούμενο τέμαχος, αντίστοιχα στην περίπτωση της οριζόντιας δομής, ενώ επισημαίνεται ότι τα πρόσημα της παραμέτρου A αντιστρέφονται στα δύο τεμάχη για κατακόρυφη δομή κόκκων. Αυτές οι παρατηρήσεις σχετίζονται αποκλειστικά με το τασικό πεδίο, και είναι ανεξάρτητες της πυκνότητας.



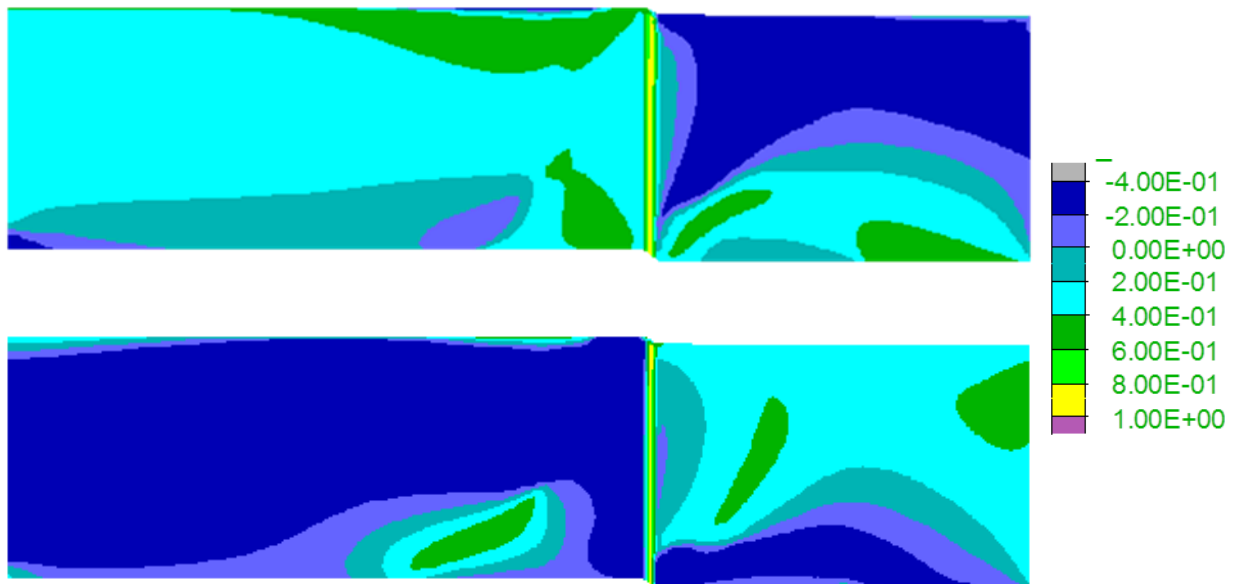
Σχήμα 6.42 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.2\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-9 και A-18, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 6.43 Σχηματική απεικόνιση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h=0.4\text{m}$ για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω) (Σχήματα A-9 και A-18, Παράρτημα A). Οι χρωματισμένες περιοχές αφορούν ζώνες με συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%.



Σχήμα 6.44 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 0.8m$ (Σχήματα A-27 και A-36, Παράρτημα Α).



Σχήμα 6.45 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A (κάτω) σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, για οριζόντια δομή (άνω) και κατακόρυφη δομή (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ για μετατόπιση $h = 0.8m$ (Σχήματα A-27 και A-36, Παράρτημα Α).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Πρώτος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η χρήση ενός νέου σοφιστευμένου ελαστο-πλαστικού προσομοιώματος SANISAND που λαμβάνει υπόψη την εξελισσόμενη ανισοτροπία δομής των κόκκων του εδάφους (Papadimitriou et al. 2015) για την προσομοίωση της διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Για το σκοπό αυτό, στο Κεφάλαιο 3 έγινε σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις ενός πειράματος φυγοκεντρική και έδειξε πολύ ικανοποιητική ακρίβεια.

Στη συνέχεια, έγινε διερεύνηση του κόστους στην ακρίβεια από τη χρήση απλούστερων ελαστο-πλαστικών προσομοιωμάτων (π.χ. Strain Softening, SS) στην προσομοίωση του ίδιου προβλήματος. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4, προέκυψε ότι η επίδραση της (ελαστικής) δυσκαμψίας που θεωρείται στο προσομοίωμα SS είναι μικρής σημασίας για το εν λόγω φυσικό πρόβλημα (ειδικά για μεγάλες μετατόπισεις ρήγματος), ενώ αντιθέτως η χαλάρωση (σε όρους αντοχής) και η μεταβαλλόμενη διαστολικότητα είναι σημαντικές παράμετροι. Παρόλα αυτά, μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, ένα απλούστερο προσομοίωμα SS μπορεί να δώσει ικανοποιητική ακρίβεια. Ωστόσο, τέτοια προσομοιώματα χρειάζονται αναβαθμονόμηση προκειμένου να διατηρηθεί η ακρίβεια για αλλαγή στο πάχος H της στρώσης του εδάφους, ή σε βασικές παραμέτρους του (π.χ. σχετική πυκνότητα). Τέτοιες αναβαθμονομήσεις δεν είναι αναγκαίες για το SANISAND, γεγονός που το καθιστά ελκυστικότερο προς χρήση, πέρα από ακριβέστερο.

Σημαντικός στόχος της εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης, με χρήση του ακριβέστερου προσομοιώματος SANISAND. Έτσι, στο Κεφάλαιο 5 εκτελέστηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την επίδραση της σχετικής πυκνότητας της άμμου, σε διαρρήξεις κανονικών (γωνίας $\beta = 45^\circ$), ανάστροφων (γωνίας $\beta = 135^\circ = 180^\circ - 45^\circ$) και «κατακόρυφων» ρηγμάτων (γωνίας $\beta = 85^\circ$). Με βάση τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία προέκυψε ότι για κατακόρυφα ρήγματα, οι διαρρήξεις διαδίδονται κατακόρυφα, ενώ για κανονικά και ανάστροφα, η διάδοση γίνεται κατά την προβολή του ρήγματος από το υπόβαθρο, με μια εκτροπή προς το κινούμενο και το σταθερό τέμαχος, αντίστοιχα. Επιπλέον, για κανονικά ρήγματα και μόνο είναι δυνατή μια δευτερεύουσα διάρρηξη προς το κινούμενο τέμαχος, που αναδύομενη στην επιφάνεια δημιουργεί κατακρήμνισμα.
- Οι μετατοπίσεις ρήγματος που χρειάζονται για την ανάδυση της διάρρηξης είναι μικρές για κανονικά ρήγματα, μεγάλες για ανάστροφα και ενδιάμεσες για τα κατακόρυφα. Αυτή η μεγάλη διαφορά στη μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια είναι αντίστοιχη με τη μεγάλη διαφορά στη μετατόπιση τοίχου αντιστήριξης για αστοχία κατά Rankine σε ενεργητική και παθητική κατάσταση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Συγκεκριμένα, η ενεργητική αστοχία κατά Rankine επέρχεται από μείωση της οριζόντιας τάσης (όπως στα κανονικά ρήγματα) που προκύπτει για μετατόπιση του τοίχου «προς τα έξω» σημαντικά μικρότερη από την παθητική αστοχία κατά Rankine που επέρχεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης (όπως στα ανάστροφα ρήγματα).
- Όσο μικραίνει η σχετική πυκνότητα της άμμου, τόσο μεγαλώνει η αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια, και τόσο η διάρρηξη μετατοπίζεται προς το σταθερό και το κινούμενο τέμαχος, για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα. Επιπλέον, όσο μικραίνει η σχετική πυκνότητα της άμμου, τόσο ρηχαίνει και γίνεται ευρύτερο το κατακρήμνισμα στα κανονικά ρήγματα. Για μέσης και μεγάλης πυκνότητας άμμους, η επίδραση περαιτέρω αύξησης της σχετικής πυκνότητας είναι μικρή. Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση του τύπου του ρήγματος είναι πιο σημαντική από την επίδραση της σχετικής πυκνότητας.

Όμως, ο πιο σημαντικός στόχος της εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της δομής στη διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης, με χρήση του ακριβέστερου προσομοιώματος SANISAND. Πιο συγκεκριμένα, η έμφαση δόθηκε στην επίδραση της αρχικής μικρο-δομής, θεωρώντας ως «οριζόντια» δομή αυτή που δημιουργείται από τη βαρύτητα, και ως «κατακόρυφη» δομή εκείνη που προκύπτει αν περιστραφεί η «οριζόντια» δομή κατά

90°. Με αυτή την «κατακόρυφη» δομή ως δεδομένη, στο Κεφάλαιο 6 επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 5 (που αφορούσαν «οριζόντια» δομή), και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους, ώστε να διακριβωθεί η σχετική επίδραση στο εν λόγω πρόβλημα. Προφανώς, η θεώρηση «κατακόρυφης» δομής είναι ακραία για φυσικά προβλήματα χωρίς έντονο τεκτονισμό, αλλά η επιλογή της στοχεύει στη διερεύνηση του εύρους πιθανής επίδρασης της αρχικής μικρο-δομής των κόκκων. Υπογραμμίζεται εδώ ότι το σοφιστευμένο προσομοίωμα SANISAND έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της αλλαγής στην απόκριση λόγω μεταβολής της αρχικής μικρο-δομής, χωρίς ανάγκη αναβαθμονόμησης των σταθερών του προσομοιώματος, και για το λόγο αυτό είναι ιδανικό για αυτό το σκοπό. Με βάση τις συγκρίσεις του παρόντος Κεφαλαίου προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Η αρχική μικρο-δομή σχετίζεται με το διαφορετικό τασικό πεδίο που προκαλούν οι διαρρήξεις διαφορετικών τύπων ρηγμάτων. Συγκεκριμένα, το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος χαρακτηρίζεται από μείωση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της οριζόντιας μικρο-δομής, με αποτέλεσμα μια τέτοια μικρο-δομή να είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση. Αντιθέτως, το «θλιπτικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος χαρακτηρίζεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμική με τη διεύθυνση της αρχικώς κατακόρυφης μικροδομής, με αποτέλεσμα αυτή η μικροδομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση. Τέλος, στα κατακόρυφα ρήγματα, το τασικό πεδίο δεν είναι ούτε «εφελκυστικό» (κανονικό ρήγμα) ούτε «θλιπτικό» (ανάστροφο ρήγμα), αλλά μορφής απλής διάτμησης. Συνεπώς, οριζόντια και κατακόρυφη μικρο-δομή βρίσκονται το ίδιο κοντά (ή μακριά) από την Κρίσιμη Κατάσταση.
- Η κατεύθυνση της αρχικής μικρο-δομής σε σχέση με την κατεύθυνση της επιβαλλόμενης φόρτισης επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της άμμου, και συνεπώς οδηγεί σε διαφοροποιήσεις στη διάδοση της διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, η διάρρηξη ενός κανονικού ρήγματος χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση στο υπόβαθρο για να αναδυθεί στην επιφάνεια μιας άμμου με κατακόρυφη δομή, συγκριτικά με ό,τι χρειάζεται μια άμμος με οριζόντια δομή. Το αντίθετο συμβαίνει για τη διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος, ενώ σε

κατακόρυφα ρήγματα η θεώρηση οριζόντιας ή κατακόρυφης δομής δεν επηρεάζει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης.

- Ποιοτικά, μία άμμος με κατακόρυφη δομή συμπεριφέρεται σαν μια άμμο με οριζόντια δομή σχετικά μικρότερης πυκνότητας, όταν υπόκειται σε συνθήκες διάρρηξης κανονικού ρήγματος, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για συνθήκες διάρρηξης αναστροφου ρήγματος. Για κατακόρυφα ρήγματα, η θεώρηση οριζόντιας ή κατακόρυφης δομής δεν αλλάζει τη μορφή της διάρρηξης, ουσιαστικά. Ποσοτικά, η επίδραση αυτή είναι πρακτικώς ισοδύναμη με μεταβολή της σχετικής πυκνότητας κατά $\pm (20-30)\%$, για την ακραία μεταβολή της κατεύθυνσης της μικρο-δομής που θεωρήθηκε, και άρα μικρότερη για πιο φυσιολογικές μεταβολές της μικρο-δομής.
- Η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια (που ορίστηκε «αυθαίρετα» εδώ ως συσσώρευση διατμητικών παραμορφώσεων $> 5\%$ μέχρι την επιφάνεια), δε συνεπάγεται Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος της διάρρηξης. Το να επιτευχθεί Κρίσιμη Κατάσταση σε ολόκληρο το μήκος της διάρρηξης χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος. Στην πράξη, ακόμη και όταν η διάρρηξη έχει αναδυθεί σε κανονικά ρήγματα, πρώτα φθάνει σε Κρίσιμη Κατάσταση ολόκληρη η διάρρηξη αν έχει αρχικώς οριζόντια δομή και σε αρκετά μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος αν έχει αρχικώς κατακόρυφη δομή.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το αντικείμενο της διάδοσης διάρρηξης ρηγμάτων μέσω ανισοτροπικού εδάφους είναι πολυεπίπεδο και χρήζει περαιτέρω έρευνας. Άλλωστε η διεθνής βιβλιογραφία, μόλις τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να χρησιμοποιεί και σοφιστευμένα προσομοιώματα για την ανάλυση του. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται:

- Η διερεύνηση της επίδρασης του πάχους H της εδαφικής στρώσης σε αναλύσεις με σοφιστευμένα προσομοιώματα με θεώρηση ανισοτροπικού εδάφους, καθώς είναι γνωστή η επίδραση της ενεργού τάσης όχι μόνο στη μέγιστη αντοχή, αλλά

και στη χαλάρωση και τη μεταβαλλόμενη διαστολικότητα με την παραμόρφωση.

- Η προσθήκη κατασκευής ή επιφανειακού θεμελίου στην επιφάνεια του εξεταζόμενου εδάφους, ώστε να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση ρήγματος-εδάφους-θεμελίου, με θεώρηση ανισοτροπικού εδάφους και με χρήση σοφιστευμένου προσομοιώματος. Αυτό θα μπορούσε να γίνει αρχικώς για άκαμπτες και τραχείες κατασκευές ή θεμέλια, και στη συνέχεια για εύκαμπτες, με δυνατότητα αποκόλλησης ή/και ολίσθησης.

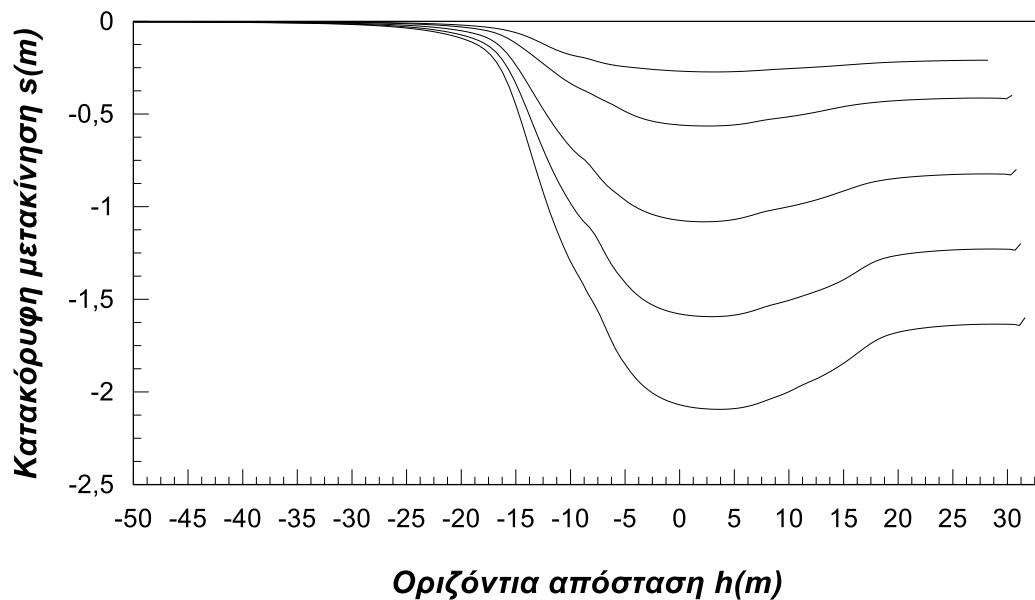
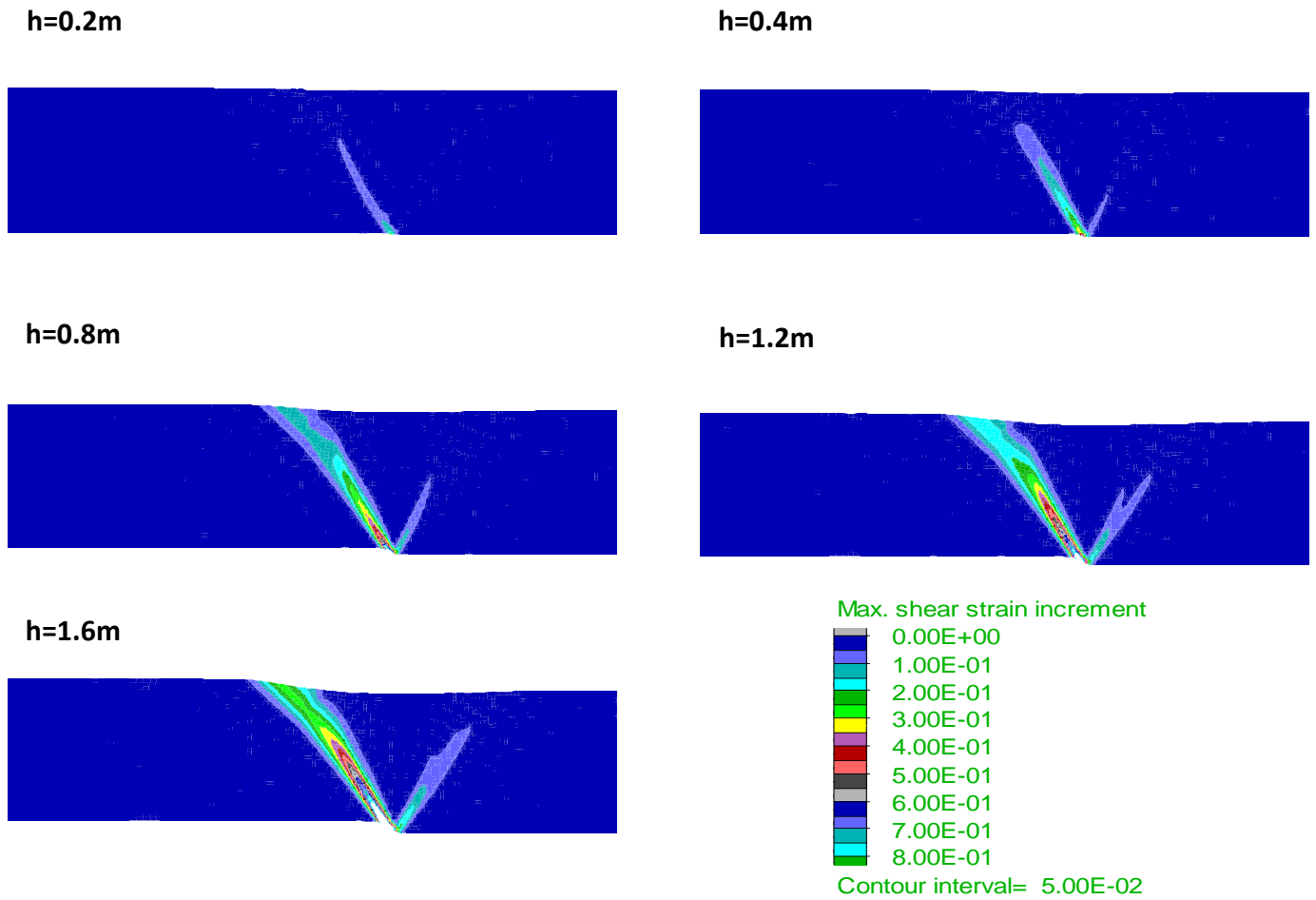
Κλείνοντας, έχει καταστεί σαφές ότι οι παράγοντες που επιδρούν στο πρόβλημα της διάδοσης διάρρηξης μέσω ανισοτροπικού εδάφους είναι πολλοί και οι μεταξύ τους συνδυασμοί ακόμα περισσότεροι. Έτσι λοιπόν, είναι στην ευχέρεια του μελλοντικού ερευνητή ποιους παράγοντες επιθυμεί να μελετήσει πρώτα και με ποιόν συνδυασμό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and El Nahas, A. 2007. Fault rupture propagation through sand: Finite element analysis and validation through centrifuge experiments. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(8), 943–958.
- Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and El Nahas, A. 2009. Normal fault rupture interaction with strip foundations. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(3), 359–370.
- Been, K. & Jefferies, M.G. 1985. A state parameter for sands. *Geotechnique* 35(2):99–112
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and El Nahas, A. (2008a). “Centrifuge modeling of normal fault-foundation interaction.” *Bull. Earthquake Eng.*, 6(4), 585–605.
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., El Nahas, A., and Nagaoka, S. (2008b). “Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction.” *Bull. Earthquake Eng.*, 6(4), 607–628.
- Bray, J. D. (2001). “Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture.” *Seismic Fault-Induced Failures—Possible Remedies for Damage to Urban Facilities*, Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo, 55–79.
- Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S., and Seed, H. B. 1994a. “Earthquake fault rupture propagation through soil.” *J. Geotech. Engrg.*, 120_3_, 543–561.
- Bray, J. D., Seed, R. B., and Seed, H. B. 1994b. “Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil.” *J. Geotech. Engrg.*, 120_3_, 562–580.
- Cai Q.P., C. W. W. Ng, F. ASCE (2016). “Centrifuge Modeling of Pile-Sand Interaction Induced by Normal Faulting”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 04016046.
- Cole, D. A., Jr., and Lade, P. V. (1984). “Influence zones in alluvium over dip-slip faults.” *J. Geotech. Eng.*, 110(5), 599–615.
- Lade, P. V., and Ibsen, L. B. (1997). “A study of the phase transformation and the characteristic lines of sand behavior.” *Soil Mechanics Paper No. 12, Proc., Int. Symp. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Geotechnical Engineering Group, Univ. Denmark, Aalborg, Denmark.
- Lee J.W., Hamada M., Tabuchi G. and Suzuki K. (2004). “Prediction of fault rupture propagation based on physical model tests in sandy soil deposit.” *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 119
- Li, X.S. & Dafalias, Y.F. 2012. Anisotropic critical state theory: Role of fabric. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 138(3): 263–275

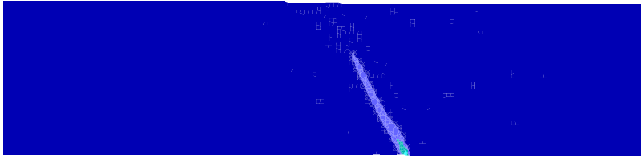
- Li, X.S. & Dafalias, Y.F. 2000. Dilatancy for cohesionless soils. *Geotechnique* 50(4): 449–460
- Loukidis, D., Bouckovalas, G. D., and Papadimitriou, A. G. (2009). “Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover.” *Soil. Dyn. Earthquake Eng.*, 29(11–12), 1389–1404.
- Loukidis, D. _1999_. “*Active fault propagation through soil.*” Thesis, School of Civil Engineering, National Technical Univ., Athens, Greece.
- Manzari, M.T. & Dafalias, Y.F. 1997. A critical state two-surface plasticity model for sands. *Géotechnique* 47(2): 255–272
- Oettle N. K., ASCE S.M., Bray J.D., ASCE F. (2013). “Fault Rupture Propagation through Previously Ruptured Soil.”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139:1637-1647.
- Oettle N. K., ASCE S.M., Bray J.D., ASCE F. (2016). “Numerical Procedures for Simulation Earthquake Fault Rupture Propagation.” *Int. J. Geomech.*, 04016025.
- Papadimitriou A. G., Dafalias Y. F., Li X. S. (2015) “*Sand model within anisotropic critical state theory with evolving fabric*”, Proceedings, International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, 2, p. 627-632, Cambridge 2014.
- Roth W.H., Scott R.F. and Austin I. (1984). “Centrifuge Modeling of Fault Propagation Through Alluvian Soils.”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 8, No. 6, pp. 561-564.
- Roth W.H., Sweet J., Goodman R.E. (1982). “Numerical and physical modeling of flexural slip phenomena and potential for fault movement.” *Rock Mech* (Suppl. 12):27-46
- 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* 38(3): 177–186

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

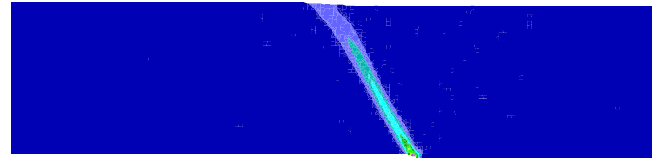


Σχήμα Α-1: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

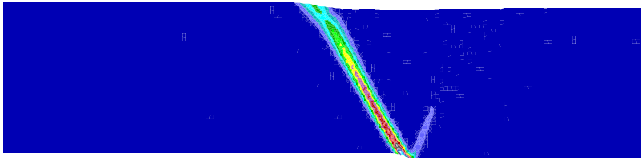
h=0.2m



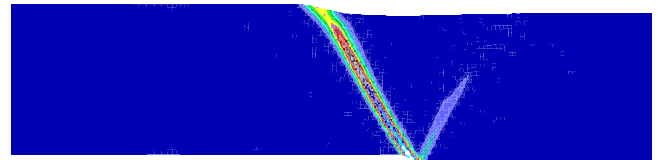
h=0.4m



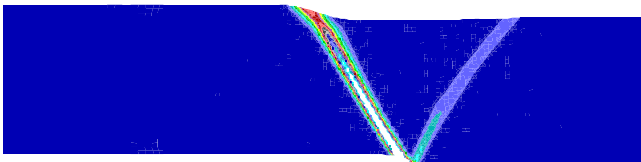
h=0.8m



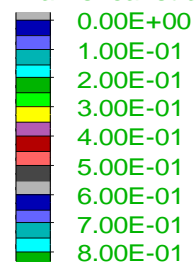
h=1.2m



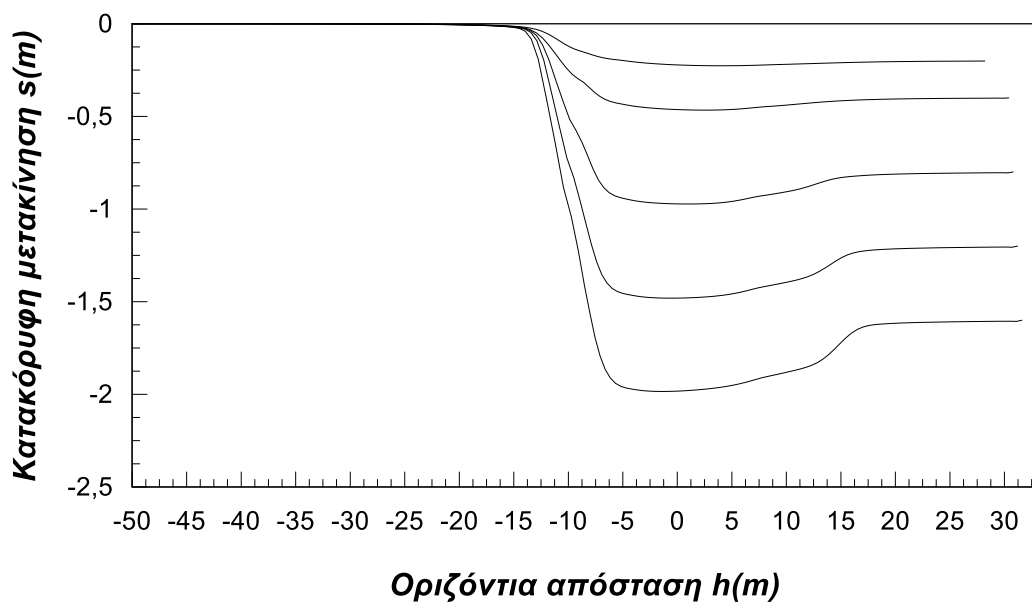
h=1.6m



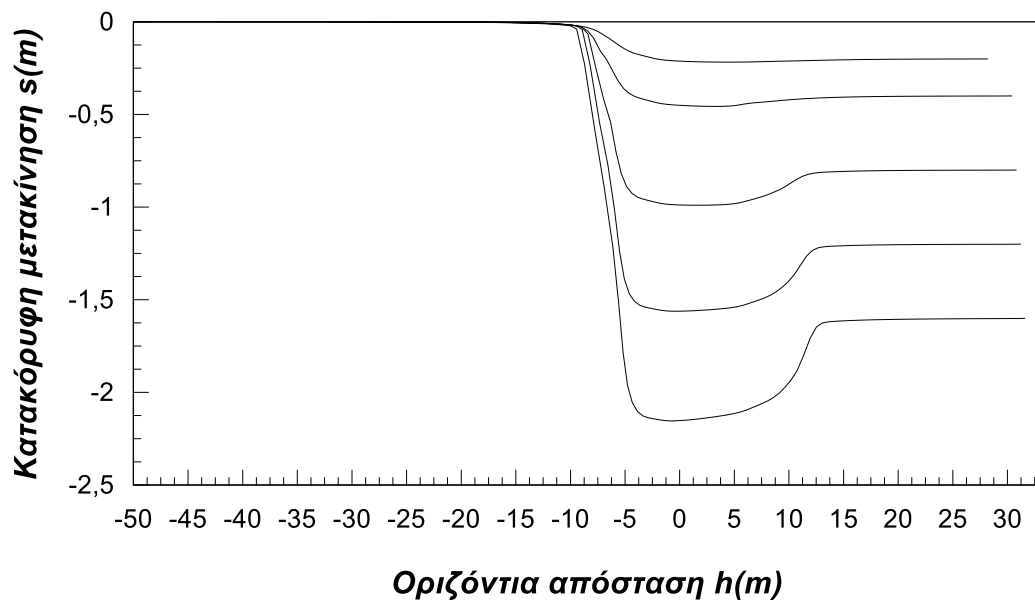
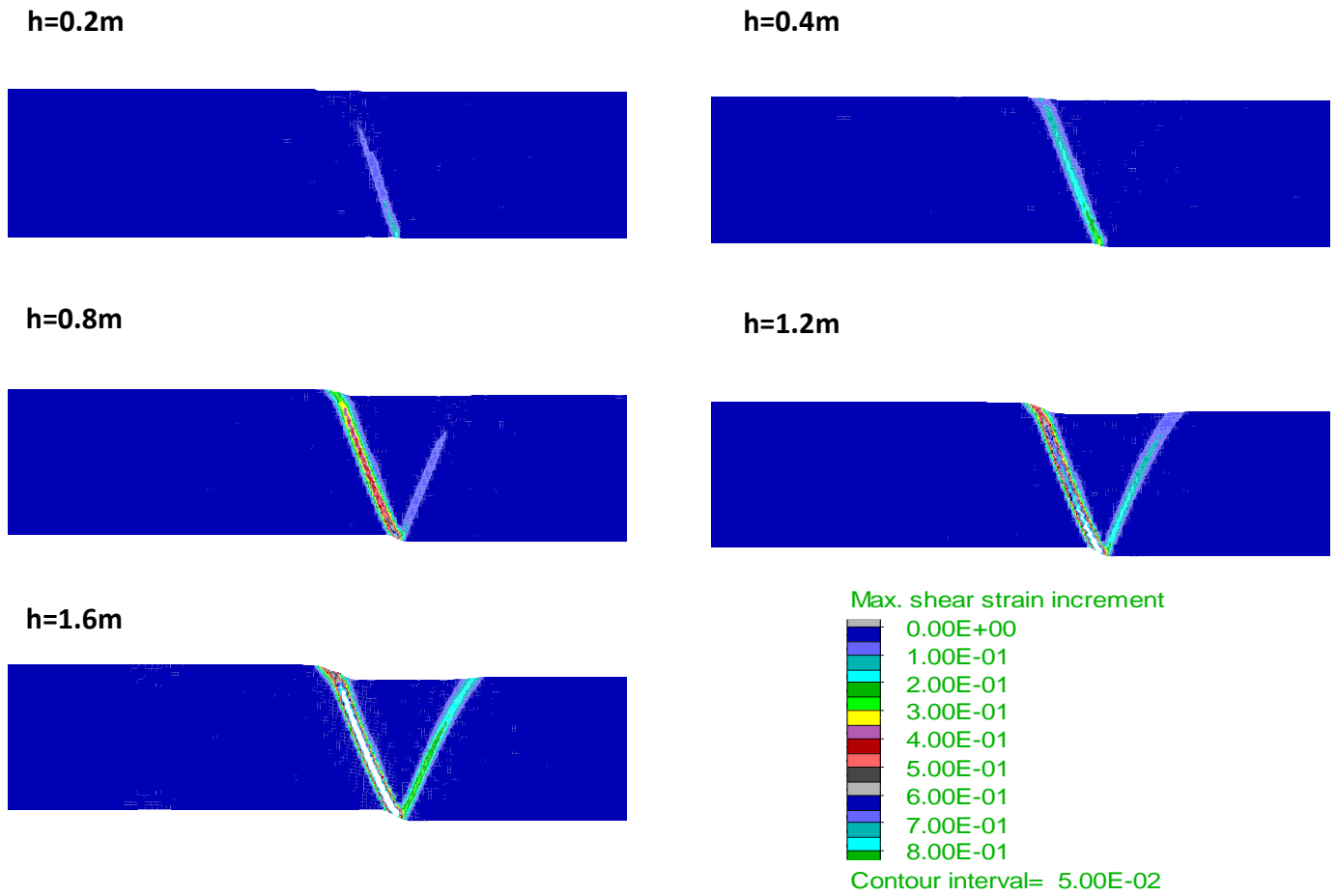
Max. shear strain increment



Contour interval= 5.00E-02

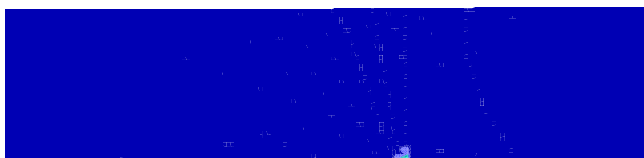


Σχήμα A-2: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

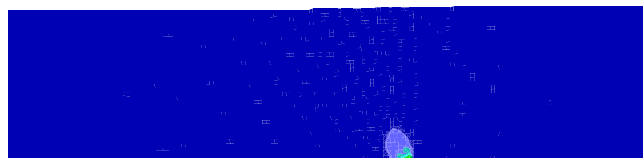


Σχήμα Α-3: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

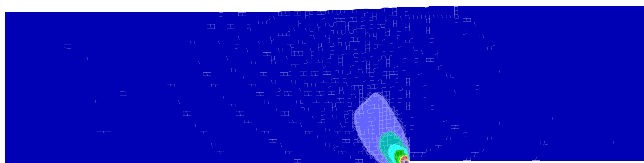
h=0.2m



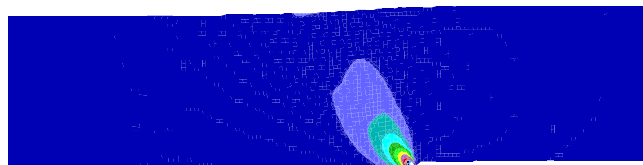
h=0.4m



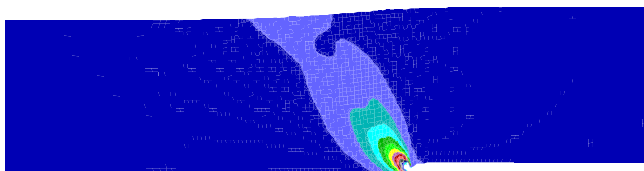
h=0.8m



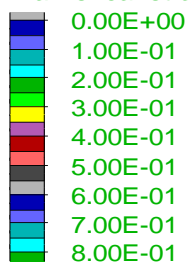
h=1.2m



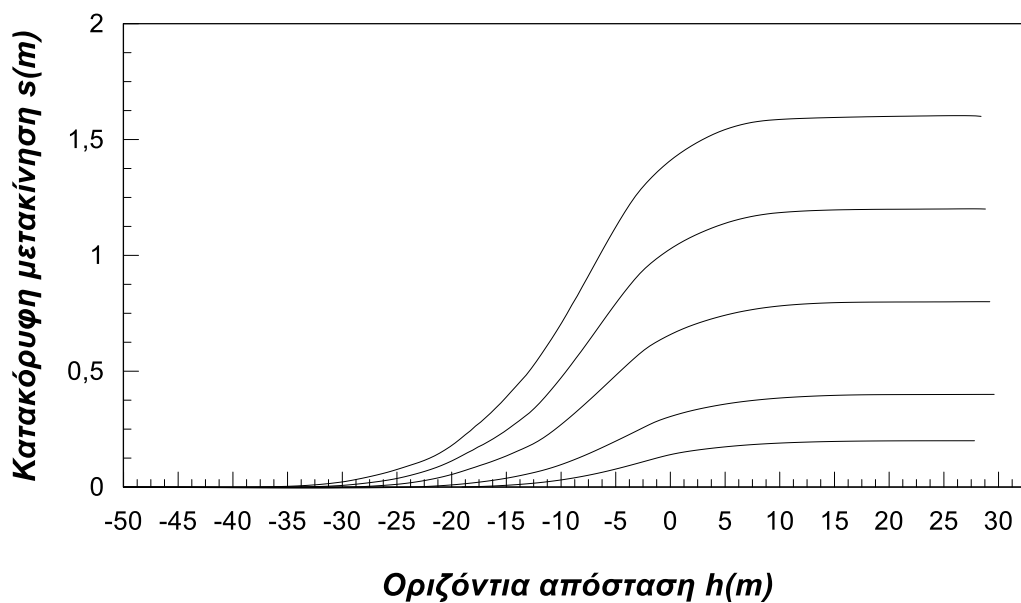
h=1.6m



Max. shear strain increment

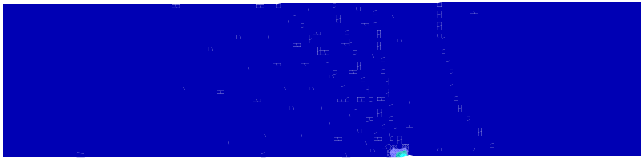


Contour interval= 5.00E-02

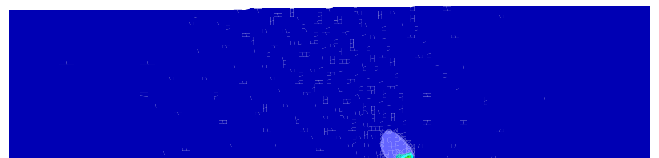


Σχήμα Α-4: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

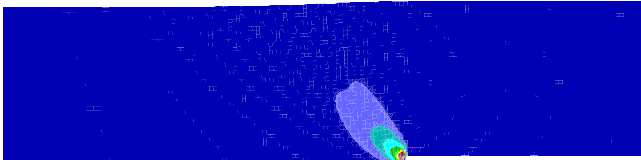
h=0.2m



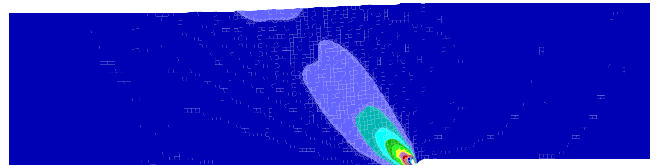
h=0.4m



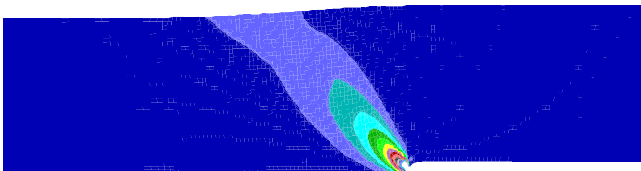
h=0.8m



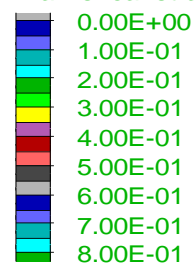
h=1.2m



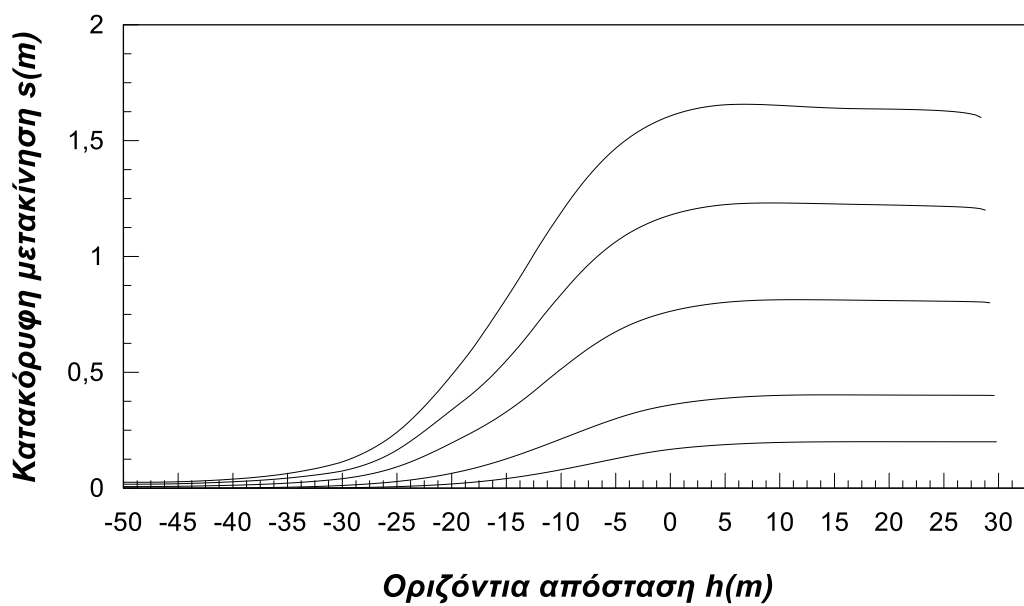
h=1.6m



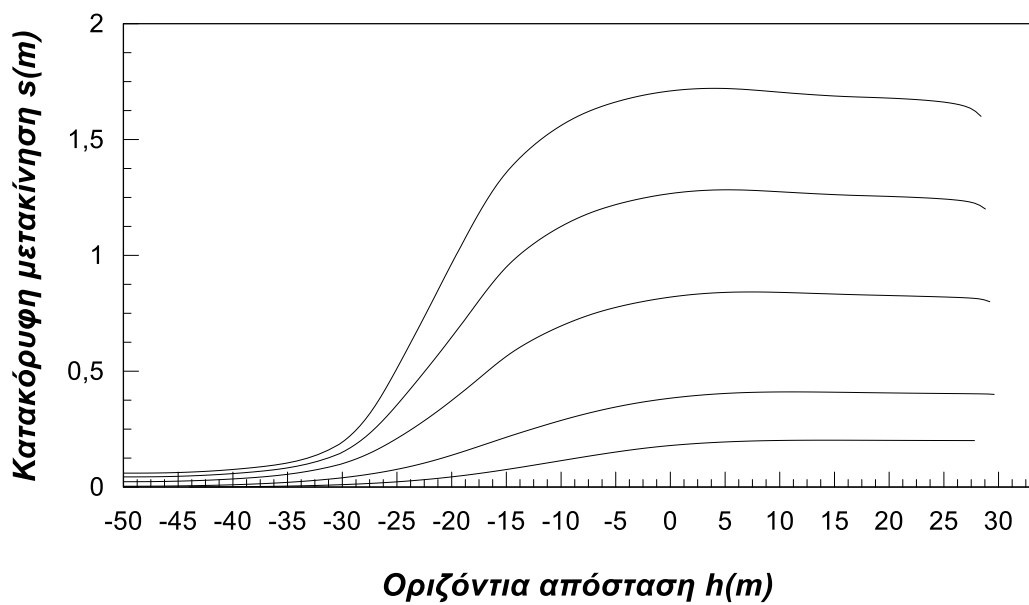
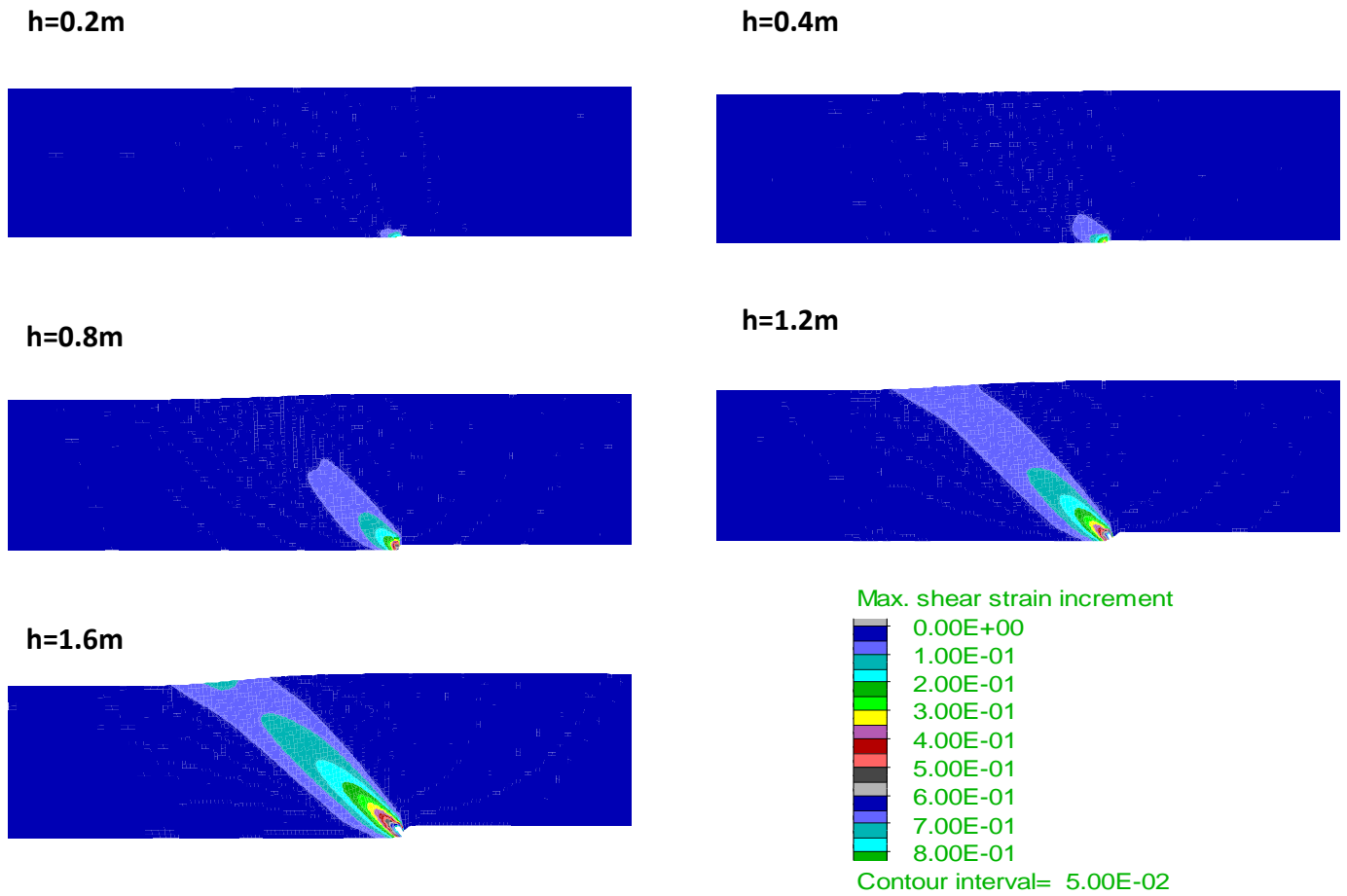
Max. shear strain increment



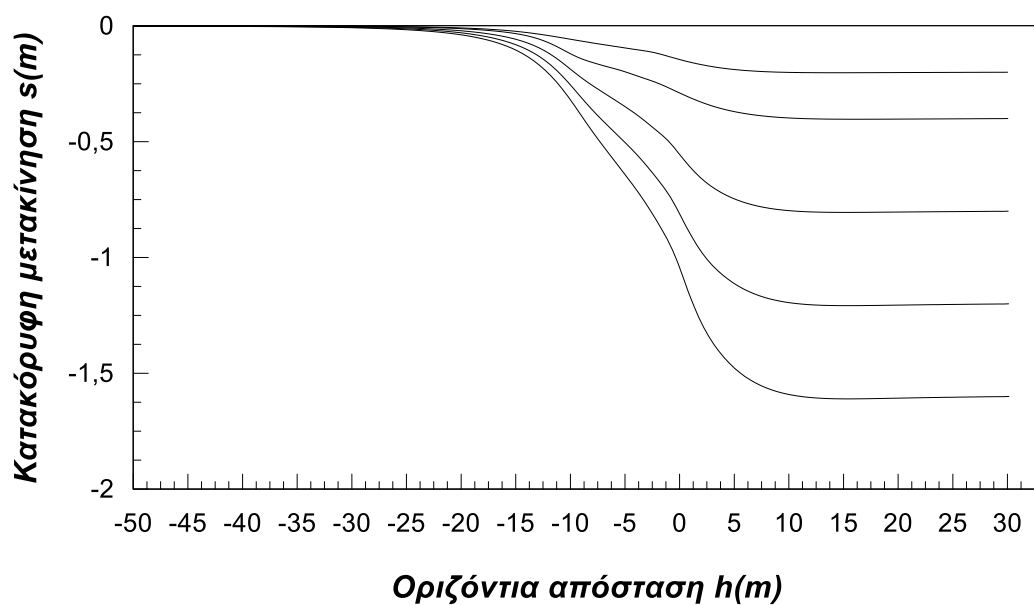
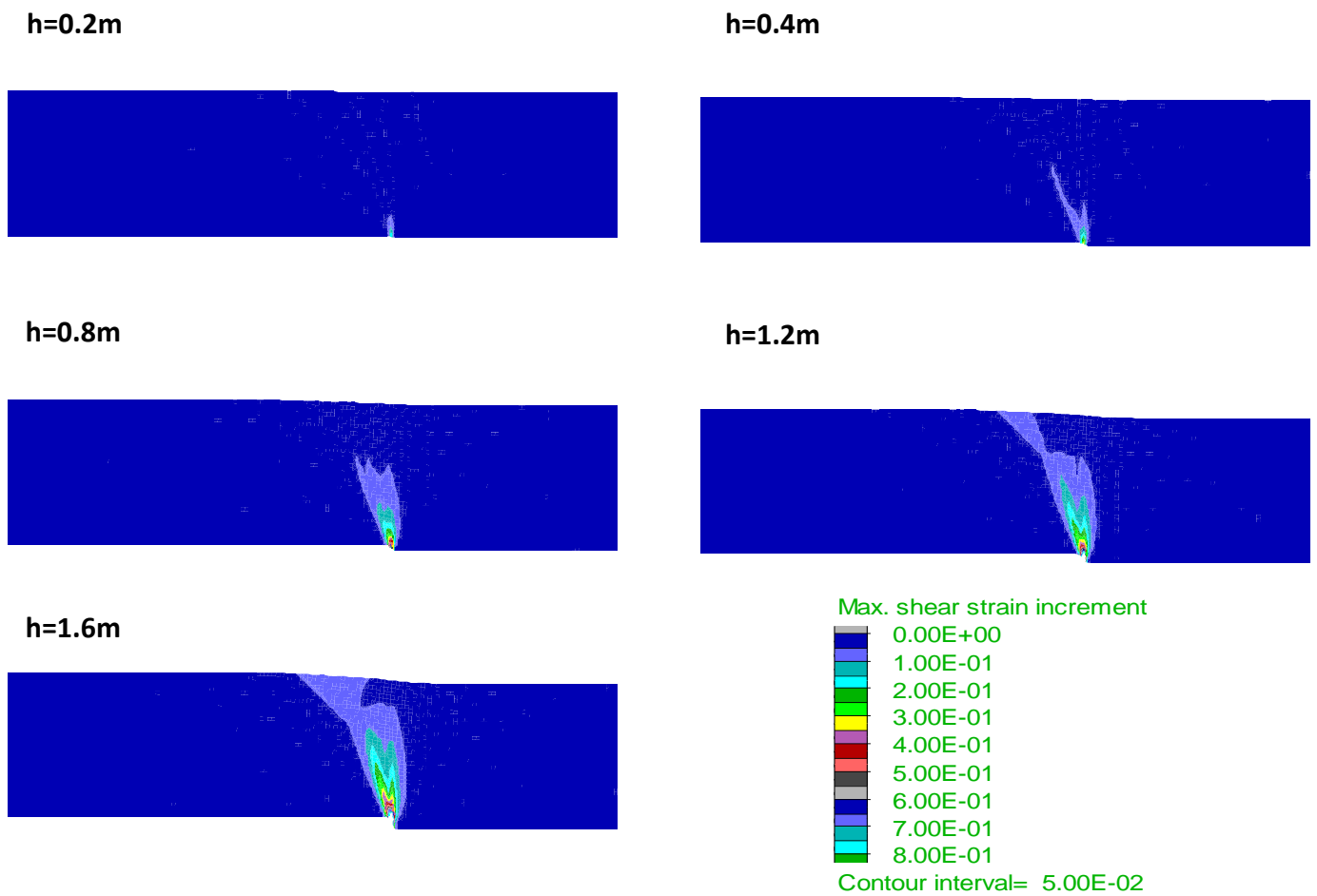
Contour interval= 5.00E-02



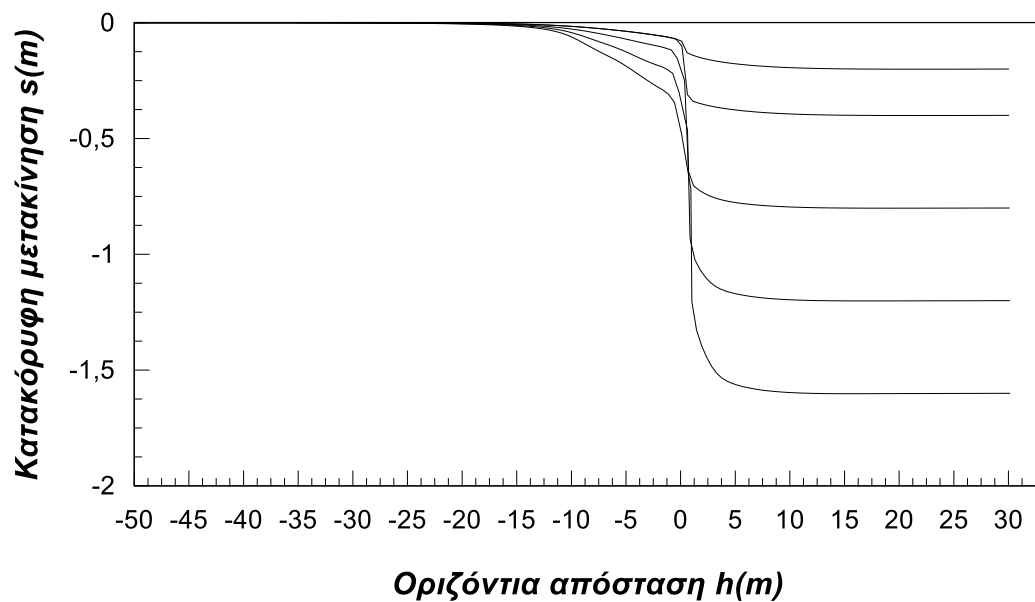
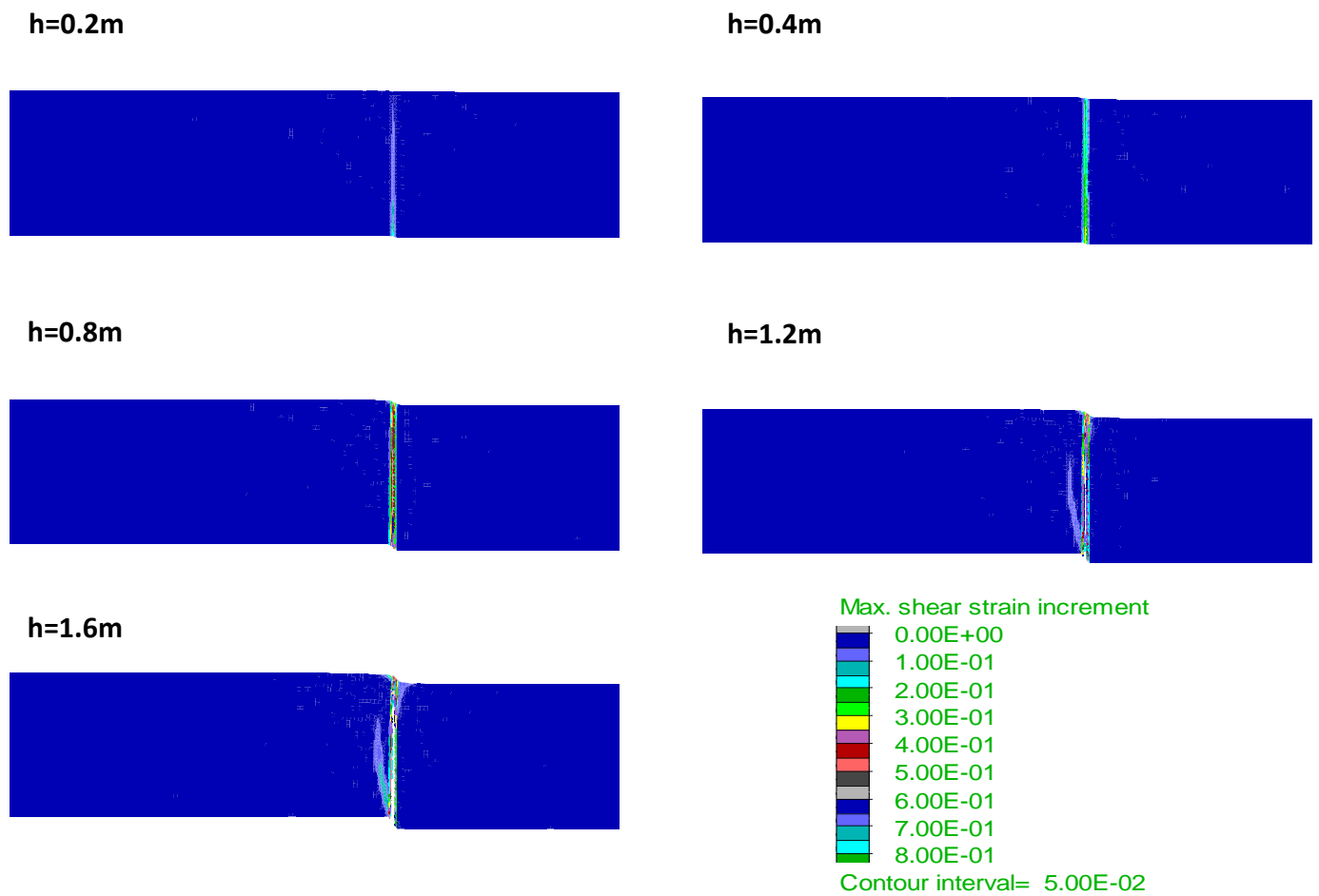
Σχήμα Α-5: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.



Σχήμα Α-6: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

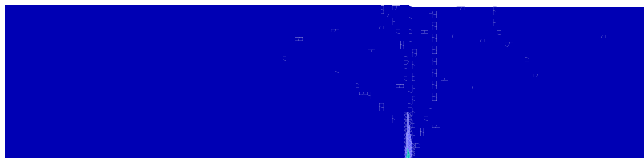


Σχήμα A-7: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

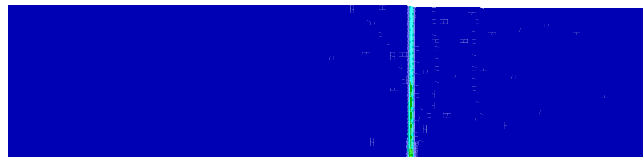


Σχήμα Α-8: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμόδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

h=0.2m



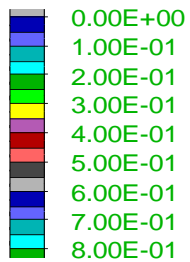
h=0.4m



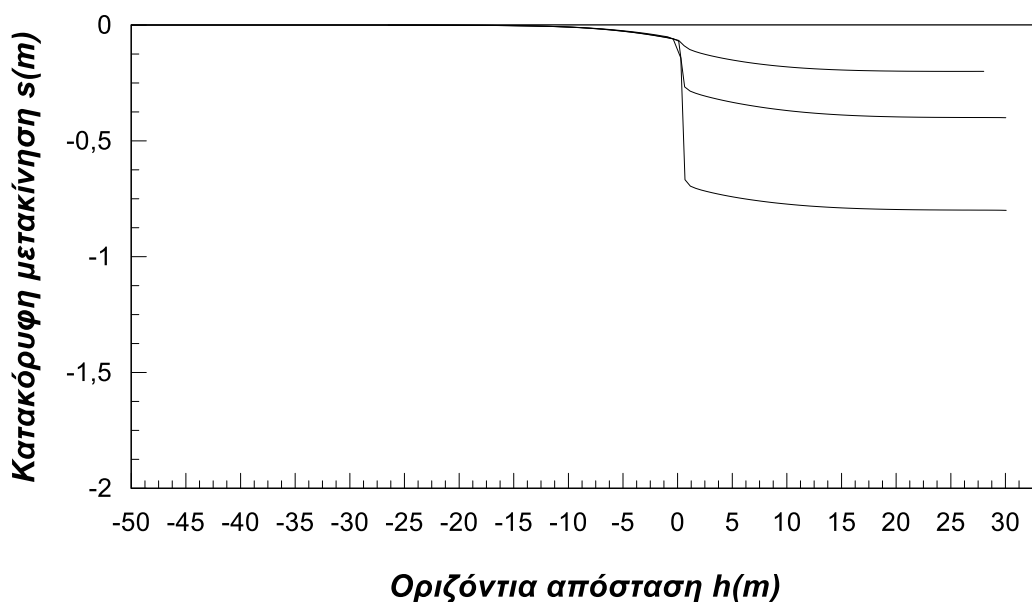
h=0.8m



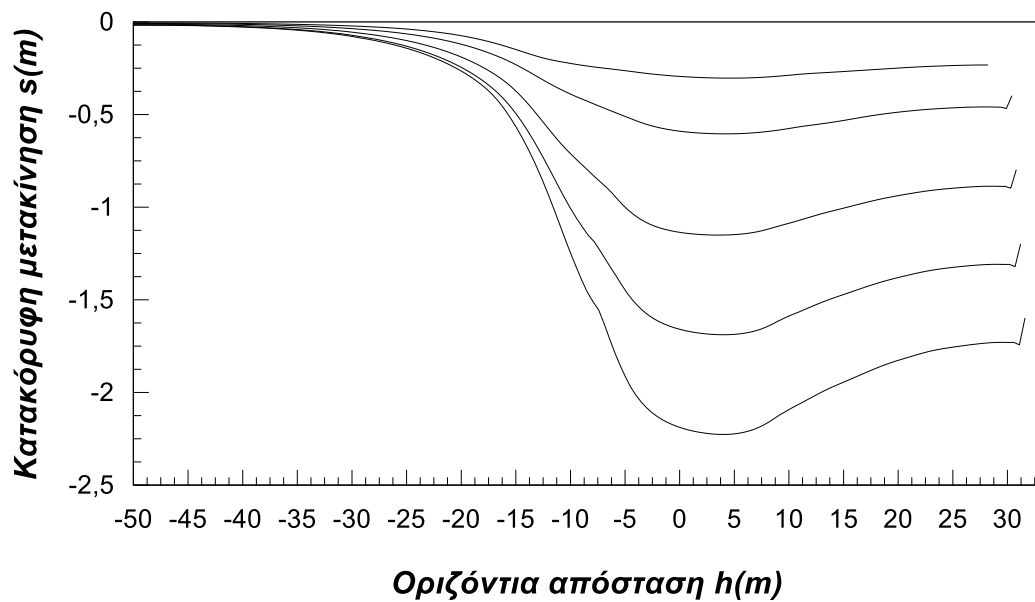
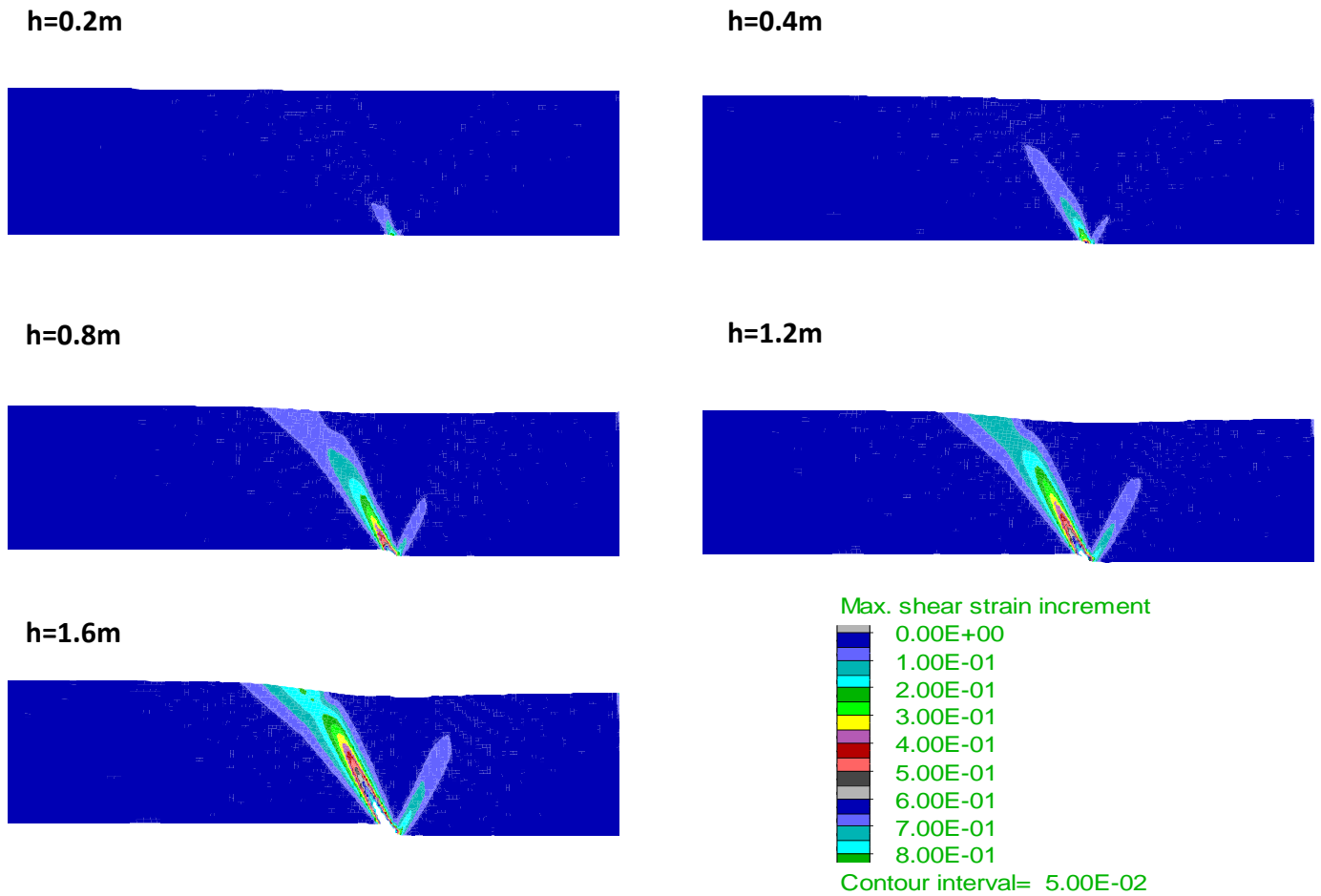
Max. shear strain increment



Contour interval= 5.00E-02

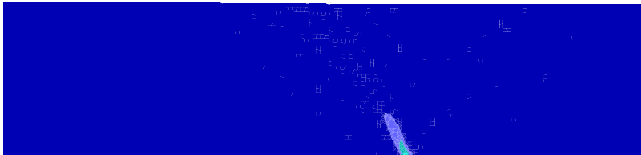


Σχήμα A-9: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

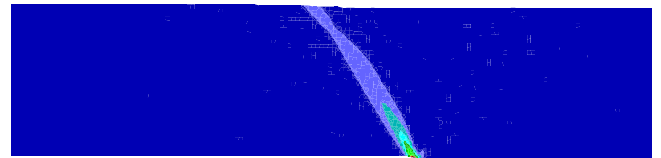


Σχήμα A-10: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

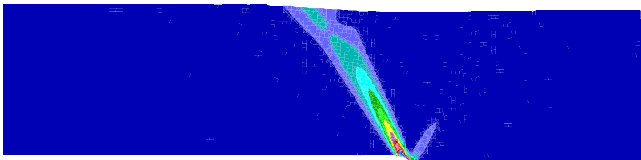
h=0.2m



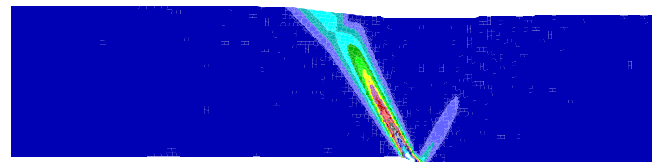
h=0.4m



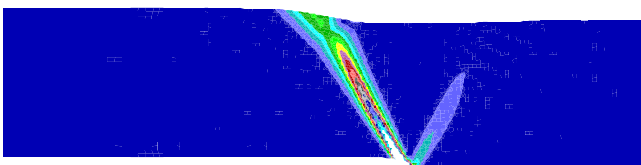
h=0.8m



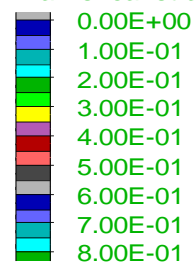
h=1.2m



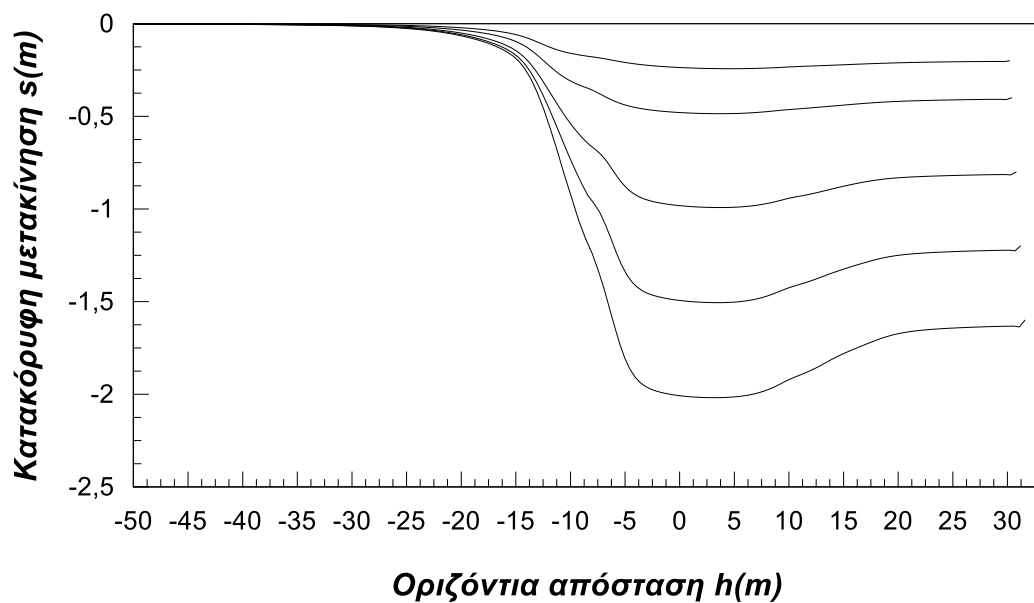
h=1.6m



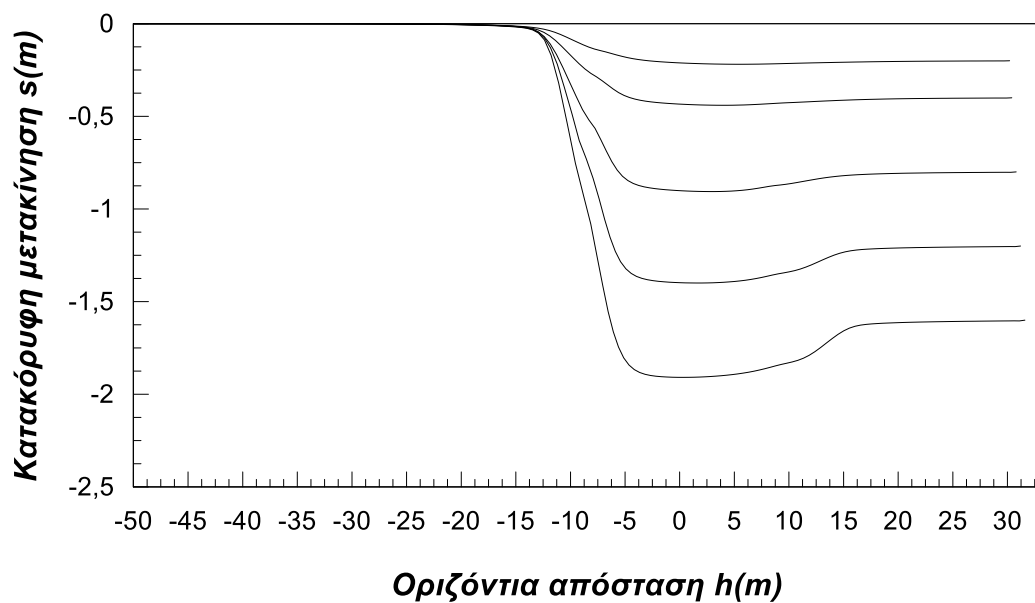
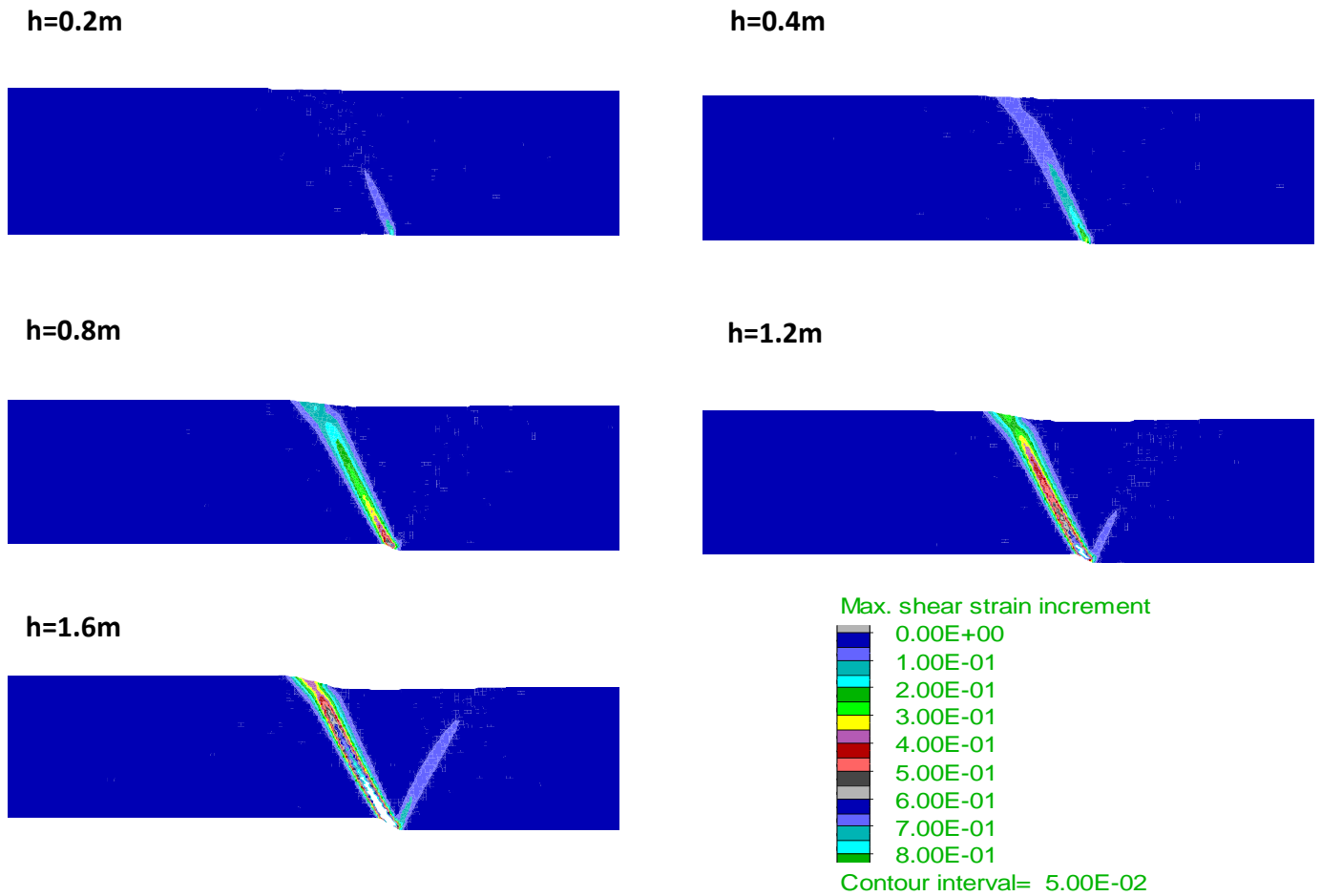
Max. shear strain increment



Contour interval= 5.00E-02

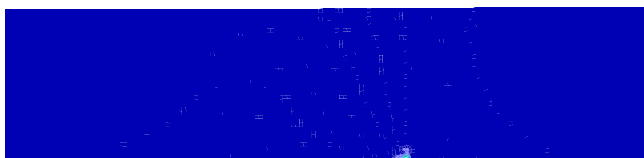


Σχήμα A-11: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

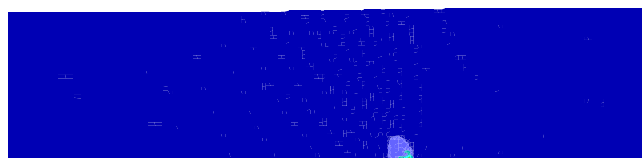


Σχήμα A-12: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

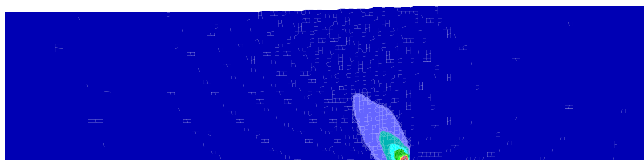
h=0.2m



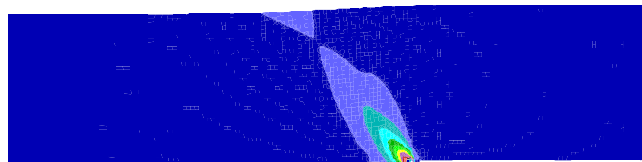
h=0.4m



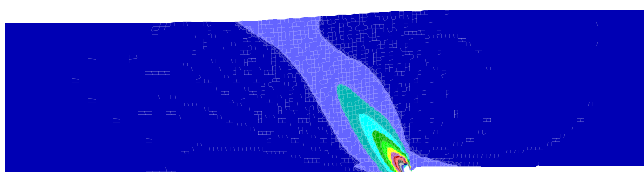
h=0.8m



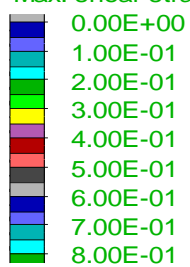
h=1.2m



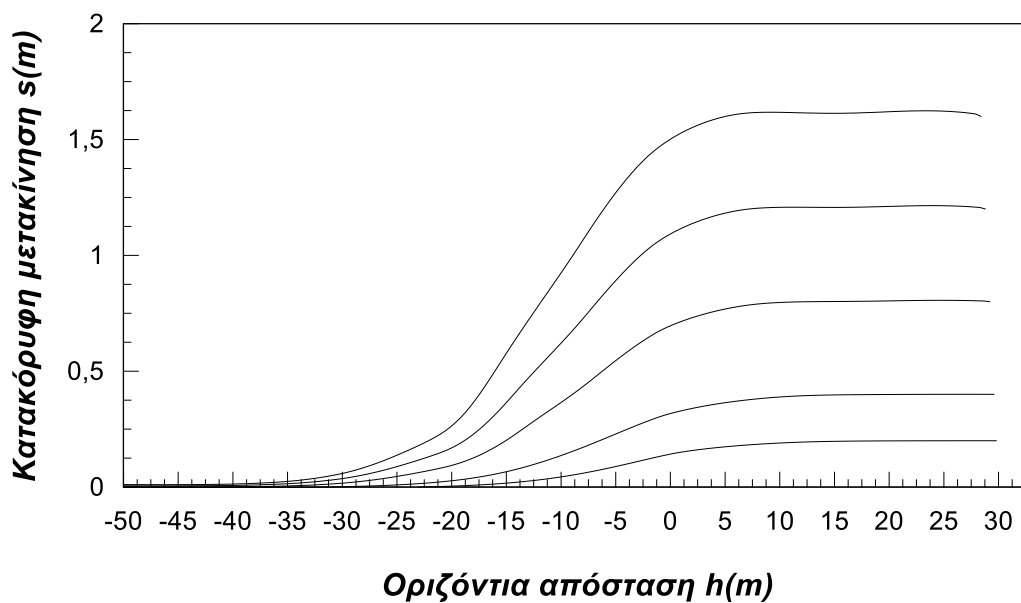
h=1.6m



Max. shear strain increment

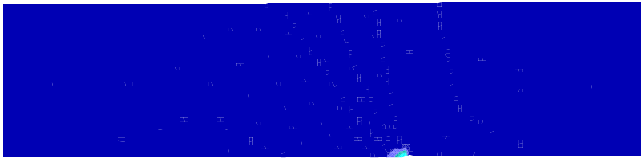


Contour interval= 5.00E-02

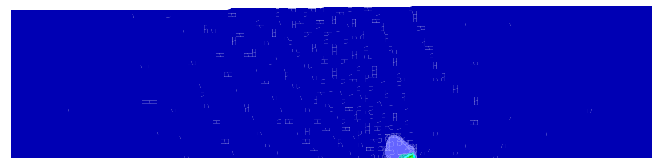


Σχήμα A-13: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

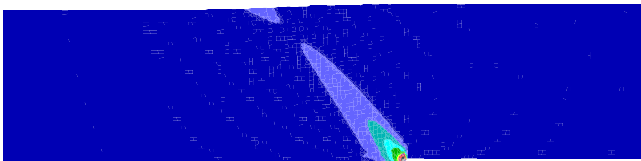
h=0.2m



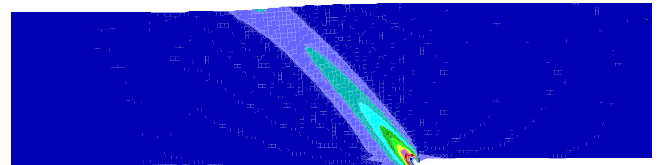
h=0.4m



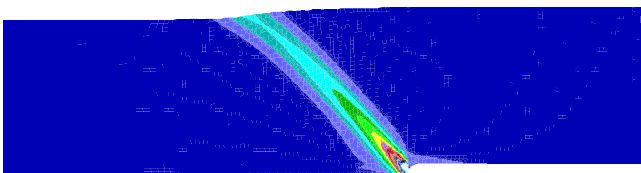
h=0.8m



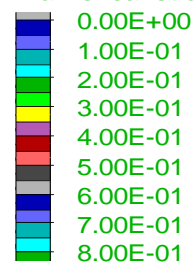
h=1.2m



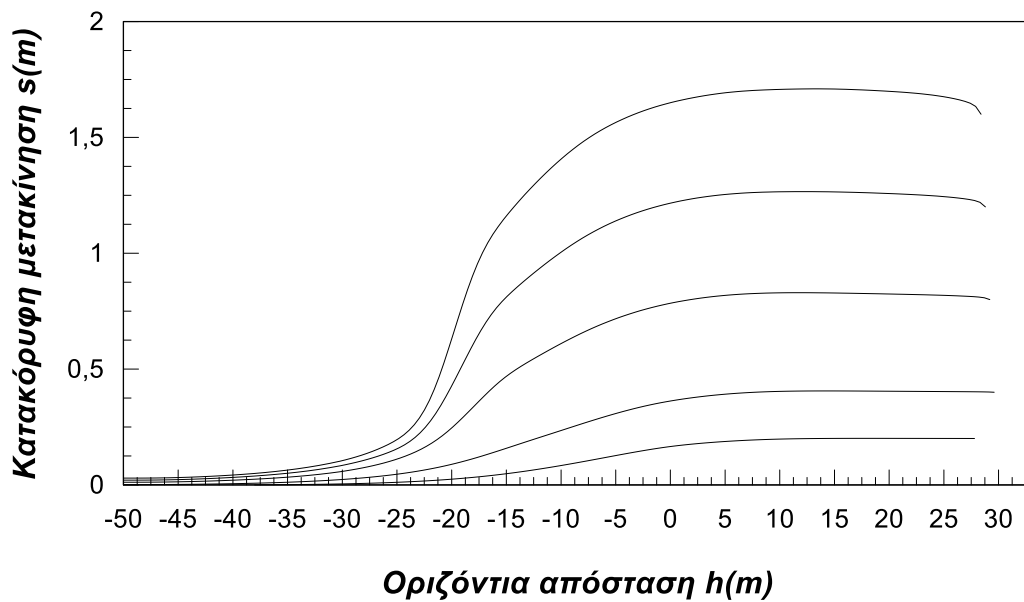
h=1.6m



Max. shear strain increment

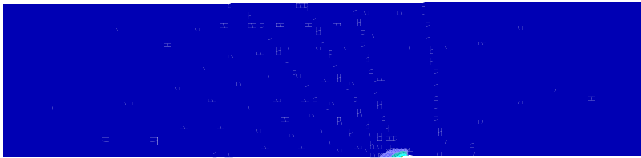


Contour interval= 5.00E-02

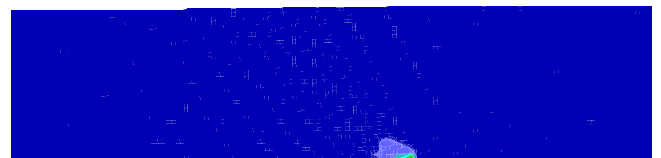


Σχήμα A-14: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

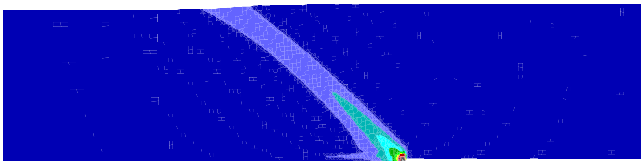
h=0.2m



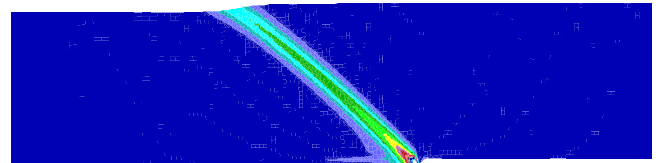
h=0.4m



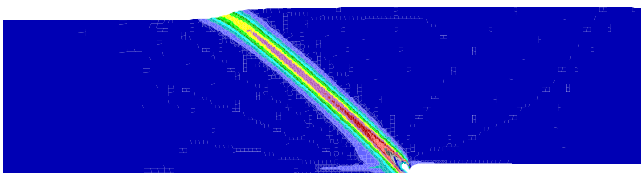
h=0.8m



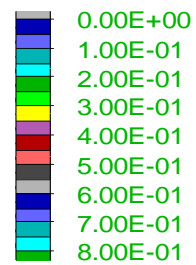
h=1.2m



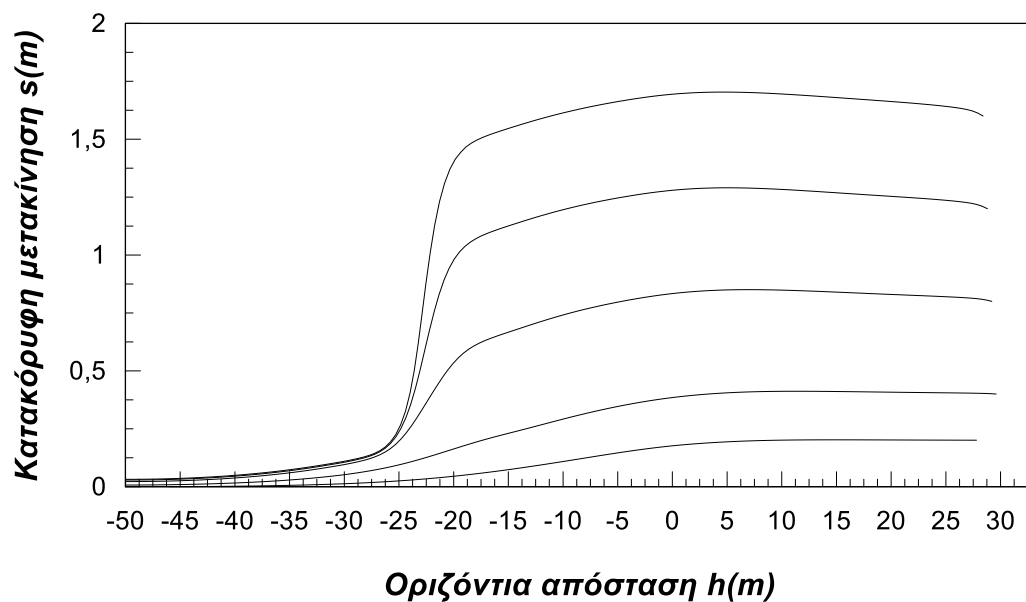
h=1.6m



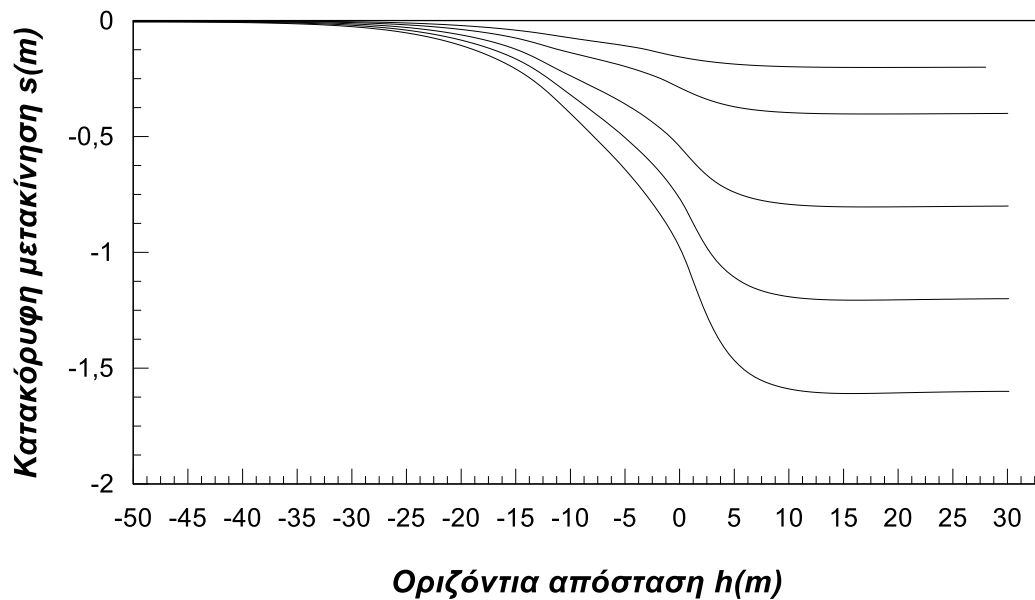
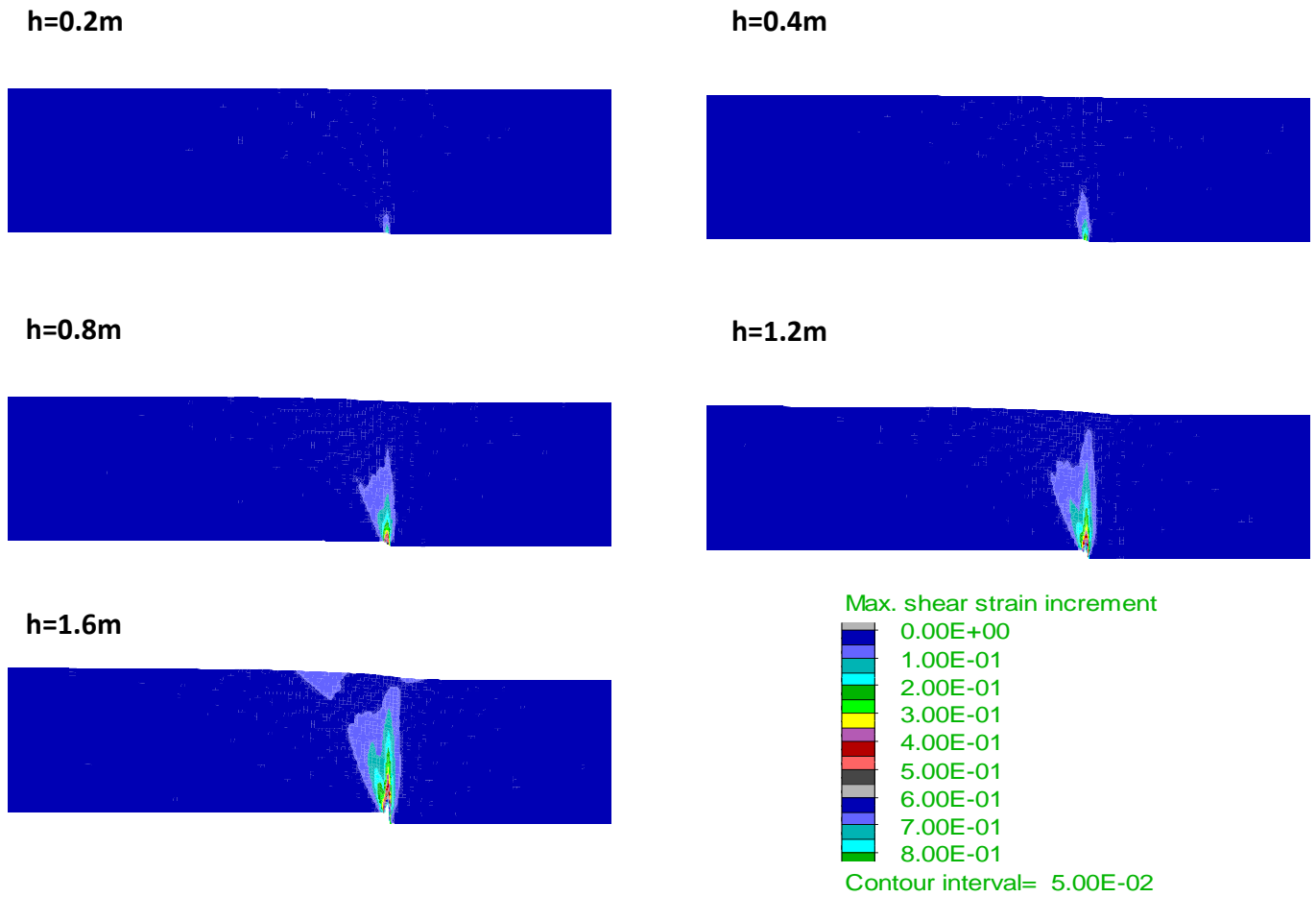
Max. shear strain increment



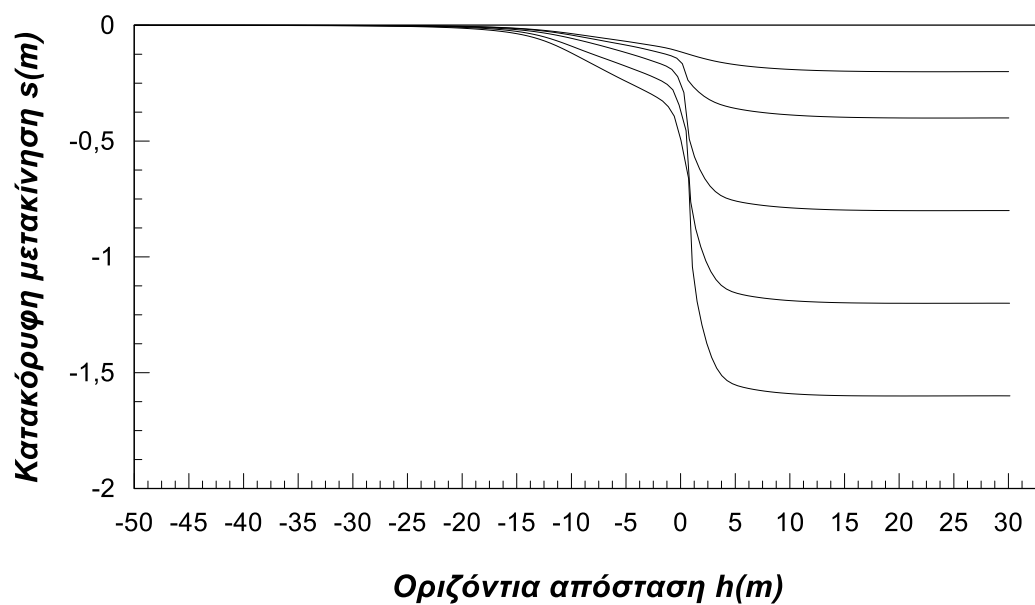
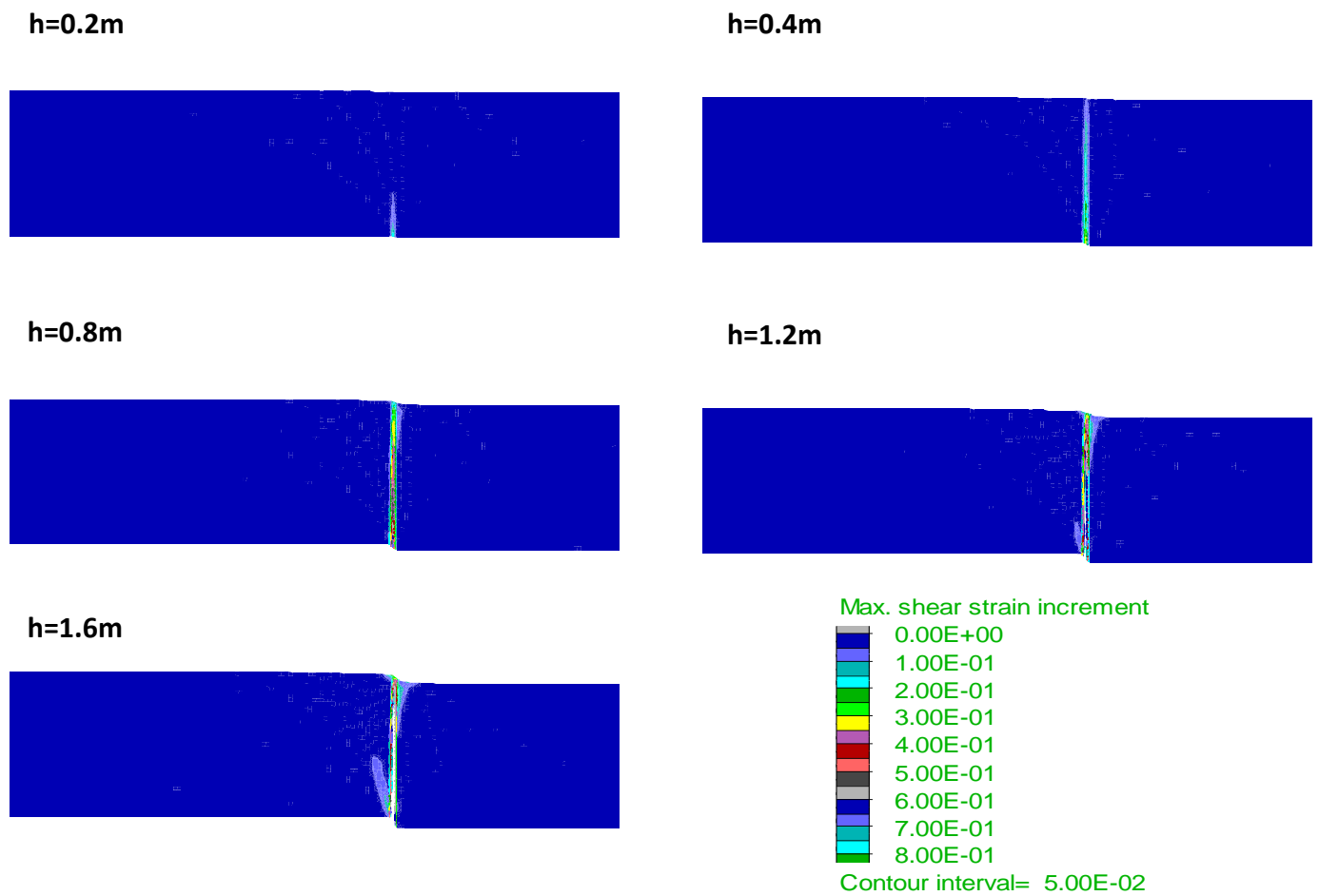
Contour interval= 5.00E-02



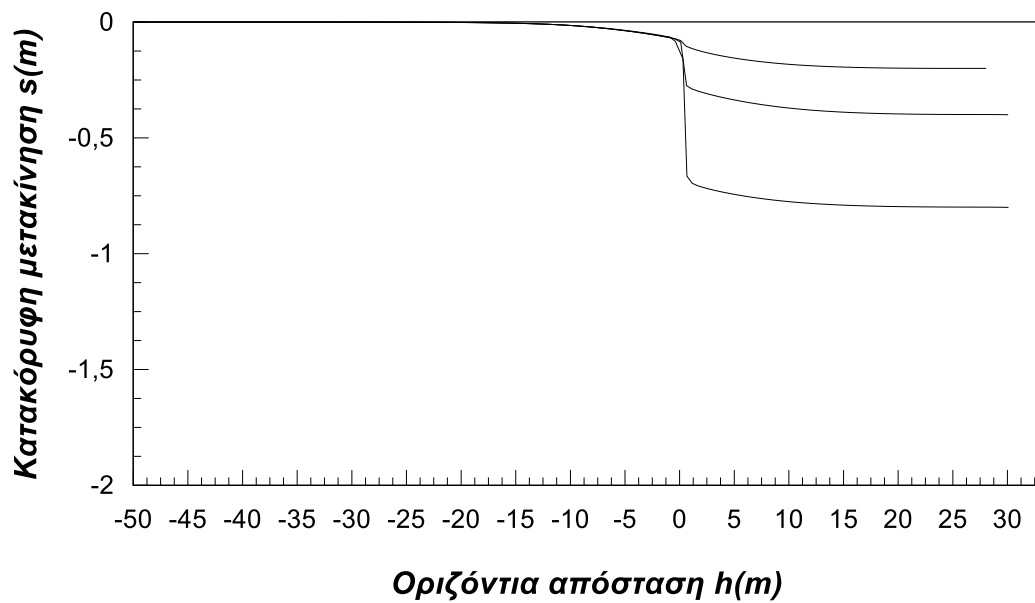
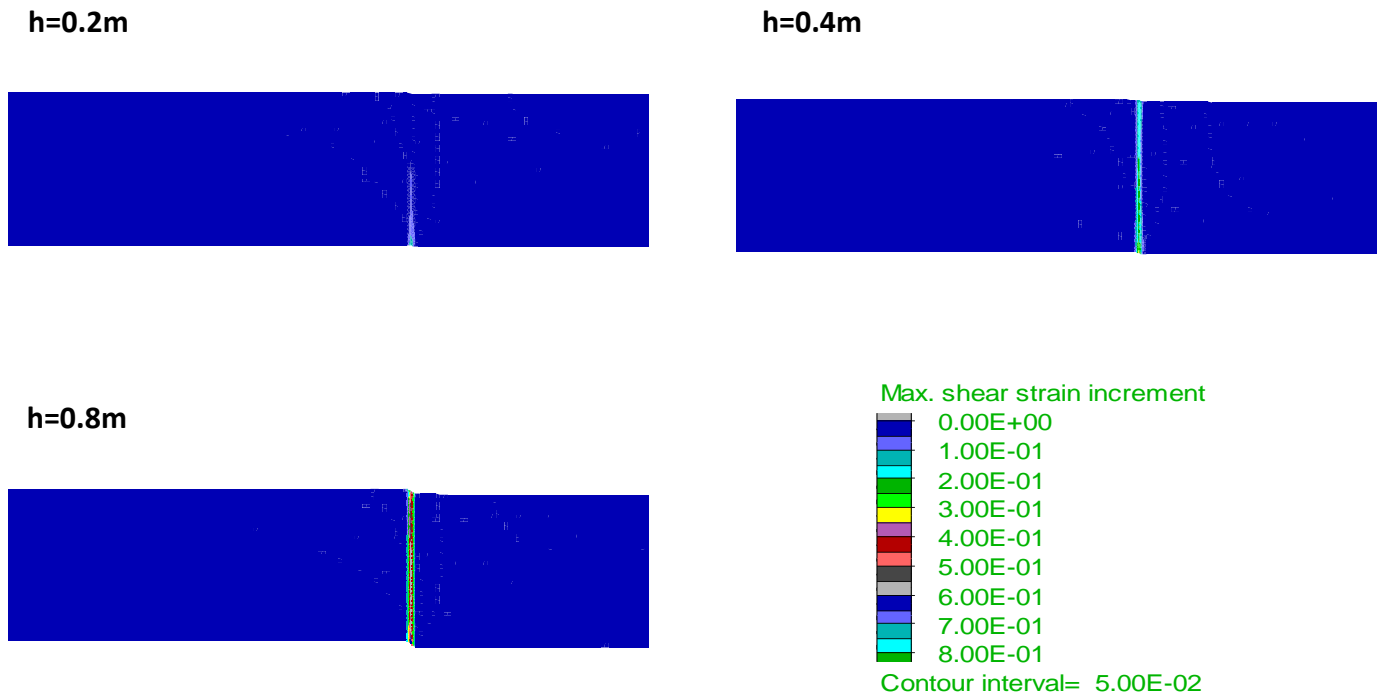
Σχήμα A-15: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.



Σχήμα A-16: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

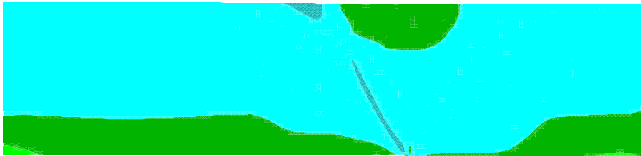


Σχήμα Α-17: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

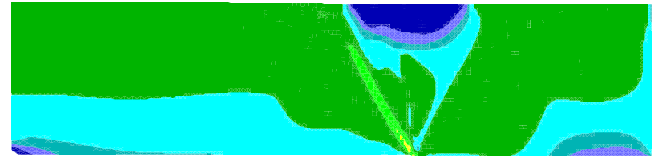


Σχήμα Α-18: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

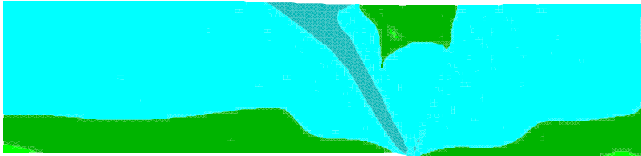
h=0.2m



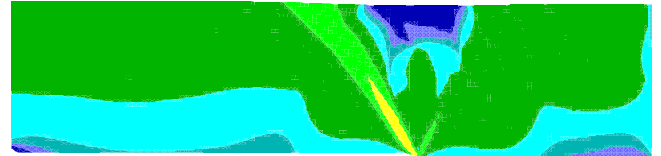
h=0.2m



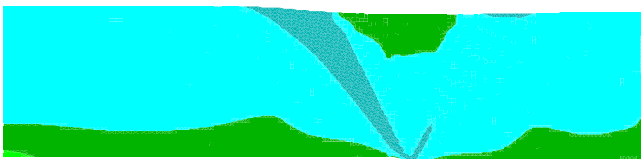
h=0.4m



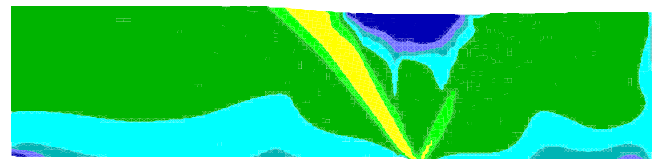
h=0.4m



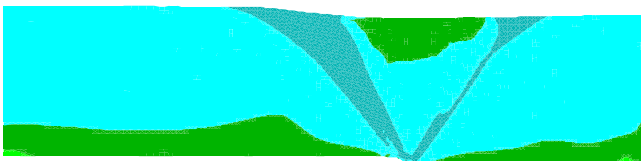
h=0.8m



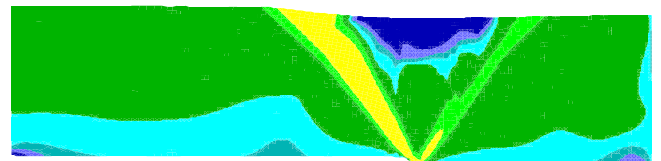
h=0.8m



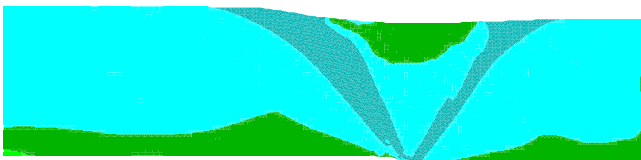
h=1.2m



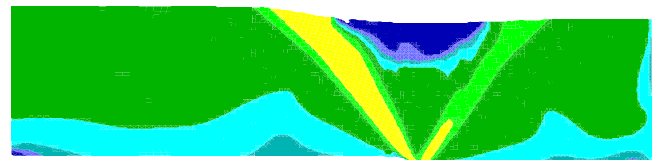
h=1.2m



h=1.6m

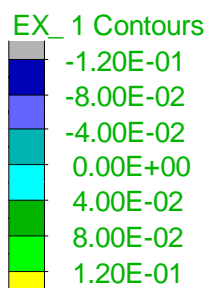


h=1.6m

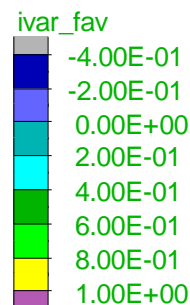


Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A (FAV)



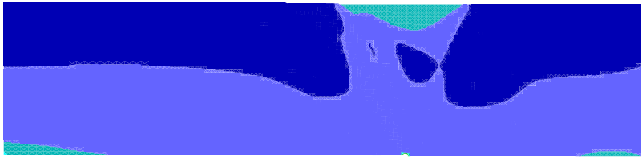
Contour interval= 4.00E-02



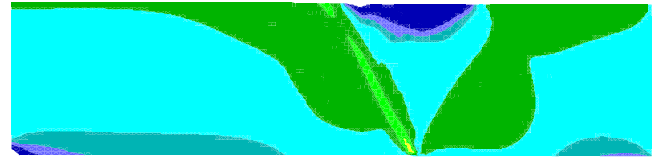
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-19: Παράμετροι ανισοτροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

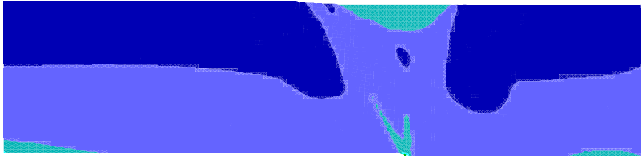
h=0.2m



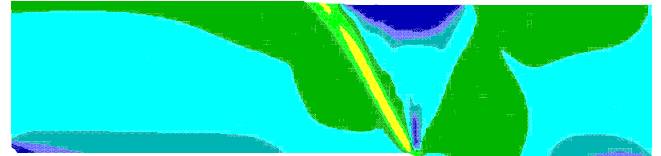
h=0.2m



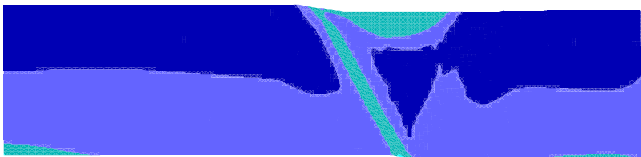
h=0.4m



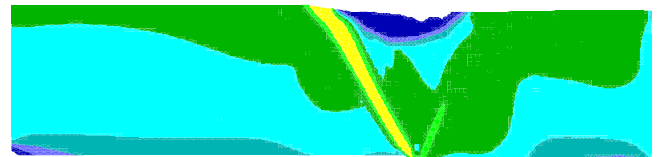
h=0.4m



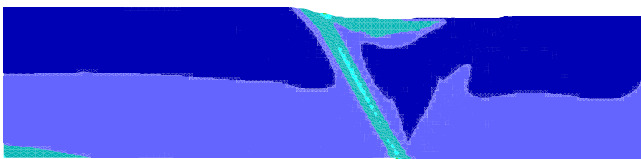
h=0.8m



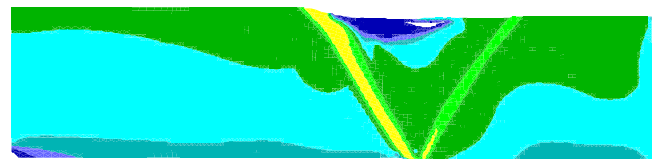
h=0.8m



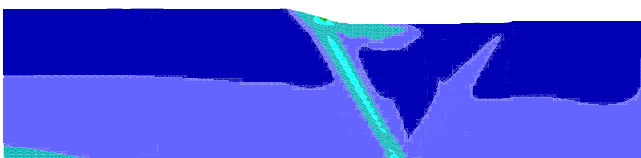
h=1.2m



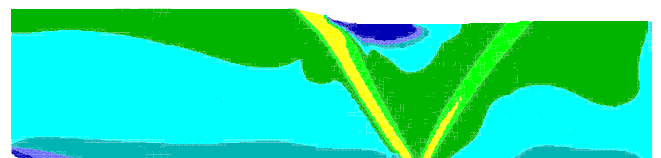
h=1.2m



h=1.6m

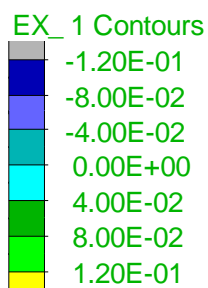


h=1.6m

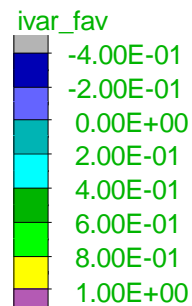


Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής Α (FAV)



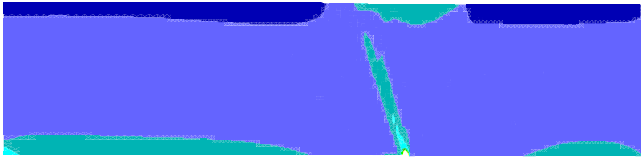
Contour interval= 4.00E-02



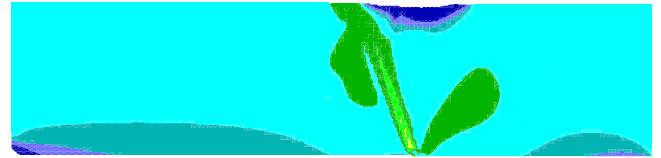
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-20: Παράμετροι ανισοτροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $Dr=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

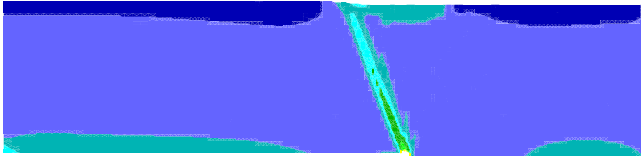
h=0.2m



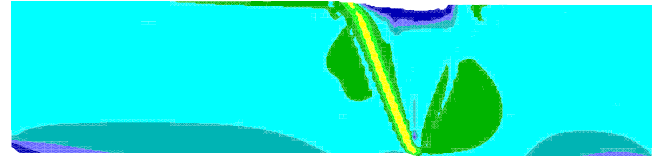
h=0.2m



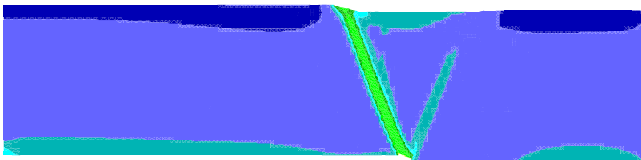
h=0.4m



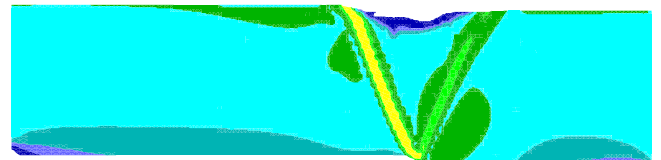
h=0.4m



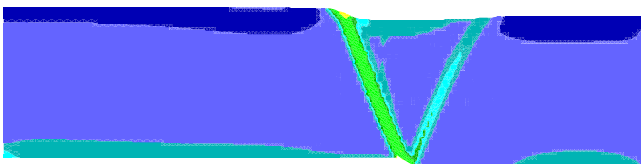
h=0.8m



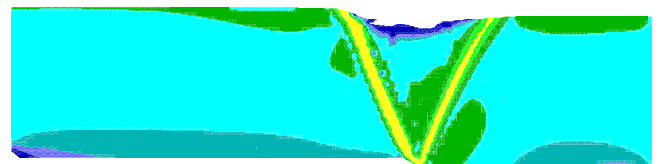
h=0.8m



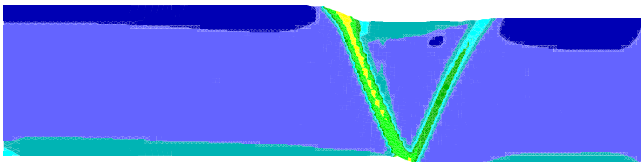
h=1.2m



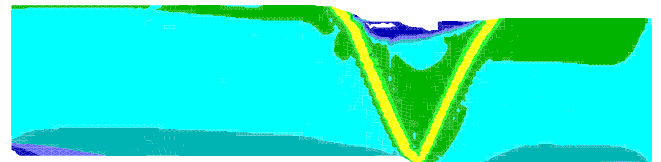
h=1.2m



h=1.6m

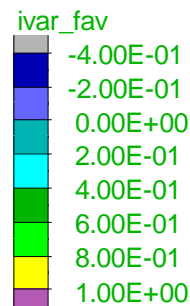
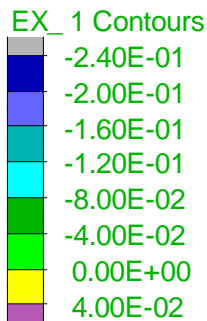


h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

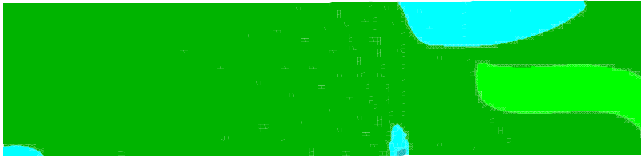


Contour interval= 4.00E-02

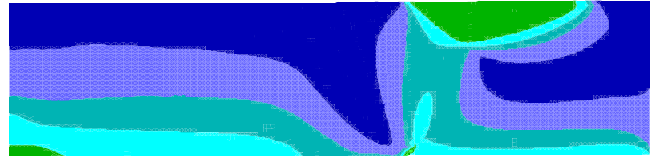
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-21: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $Dr=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

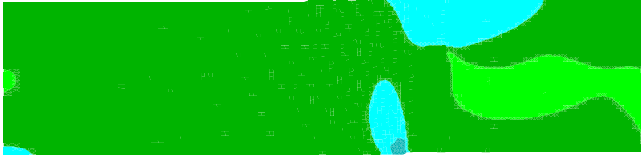
h=0.2m



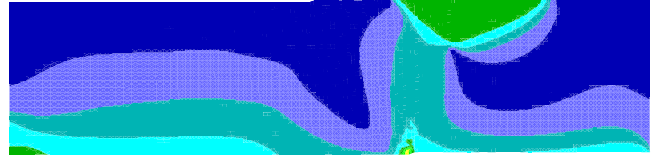
h=0.2m



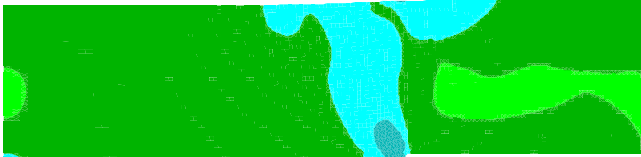
h=0.4m



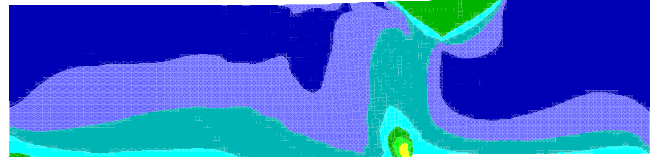
h=0.4m



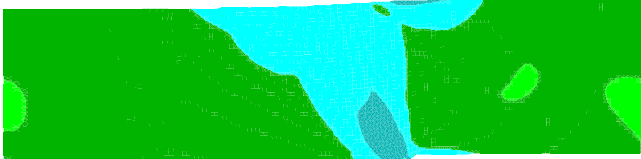
h=0.8m



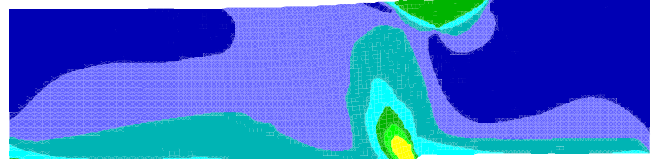
h=0.8m



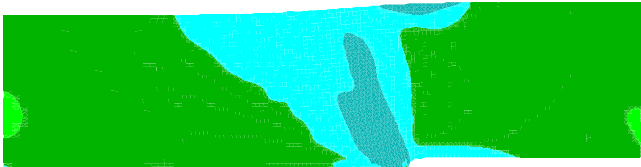
h=1.2m



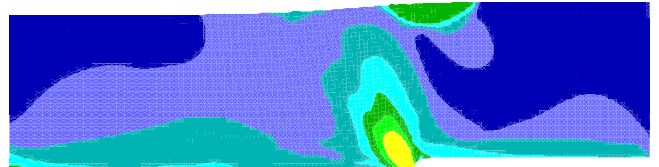
h=1.2m



h=1.6m

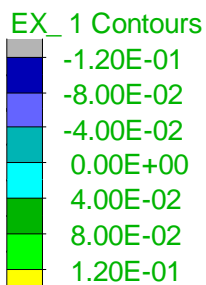


h=1.6m

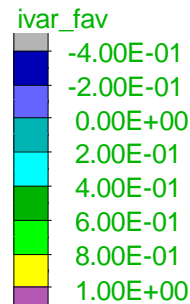


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



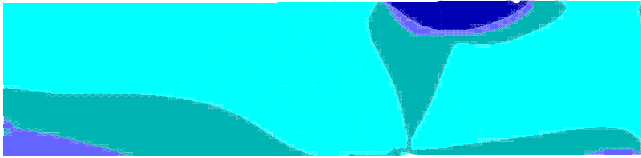
Contour interval= 4.00E-02



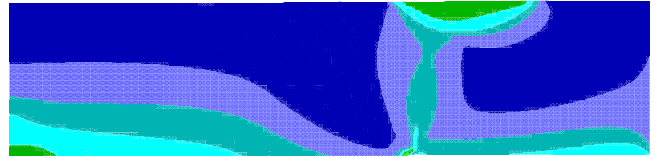
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-22: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

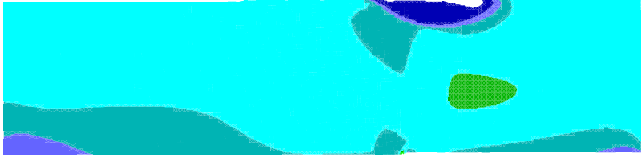
h=0.2m



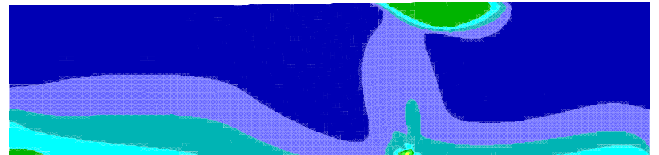
h=0.2m



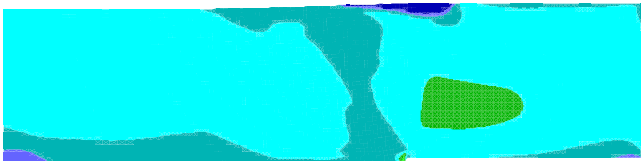
h=0.4m



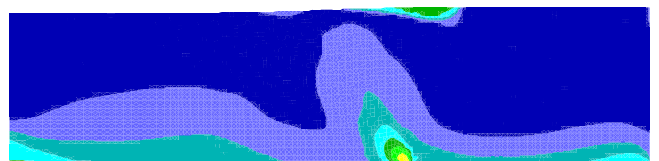
h=0.4m



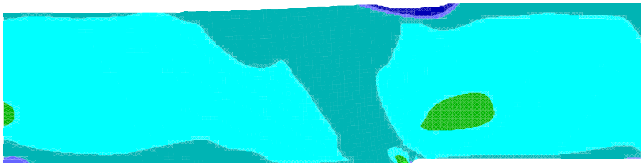
h=0.8m



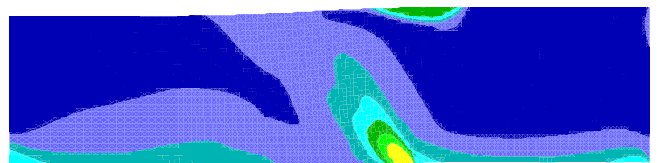
h=0.8m



h=1.2m



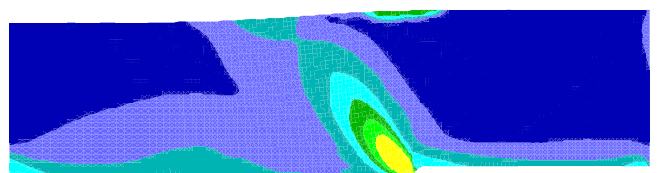
h=1.2m



h=1.6m



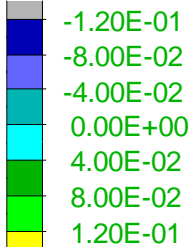
h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

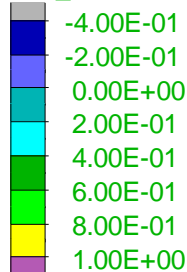
Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

EX_1 Contours



Contour interval= 4.00E-02

ivar_fav



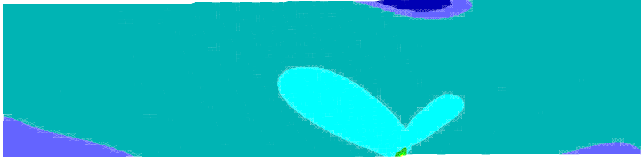
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-23: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

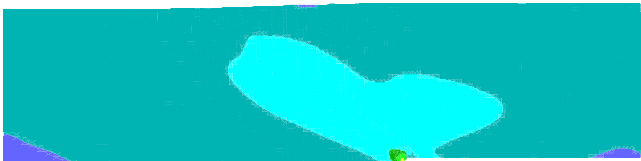
h=0.2m



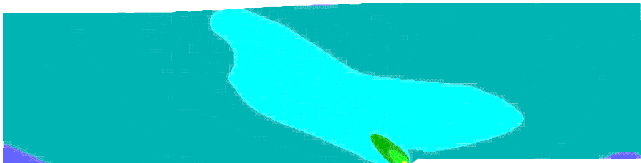
h=0.4m



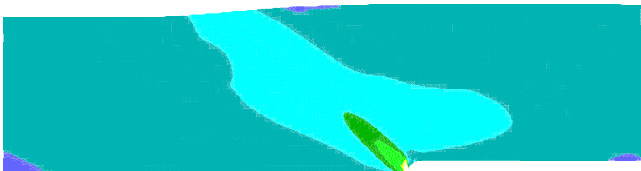
h=0.8m



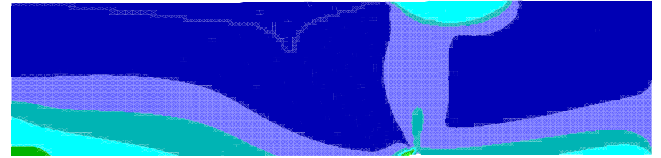
h=1.2m



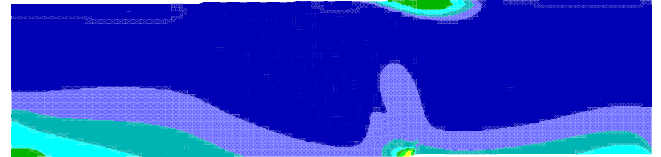
h=1.6m



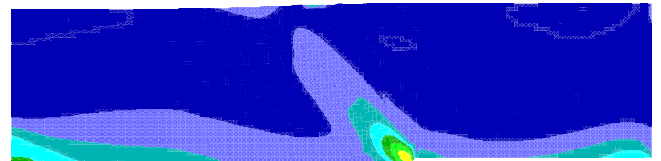
h=0.2m



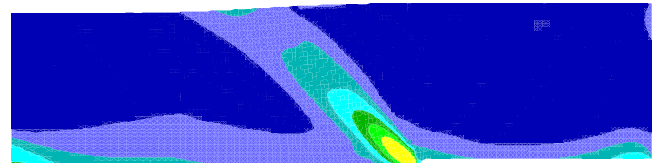
h=0.4m



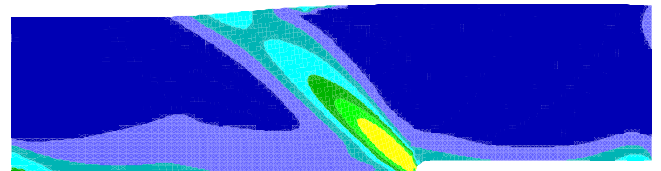
h=0.8m



h=1.2m

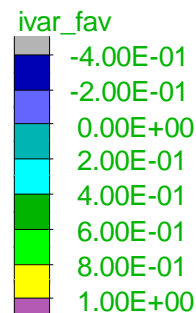
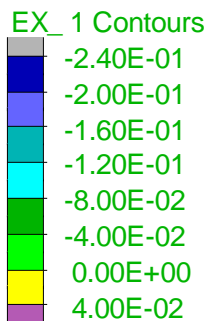


h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



Contour interval= 4.00E-02

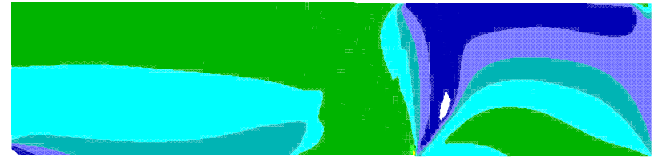
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-24: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

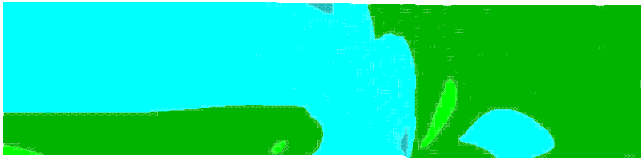
h=0.2m



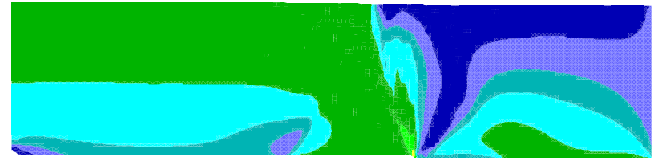
h=0.2m



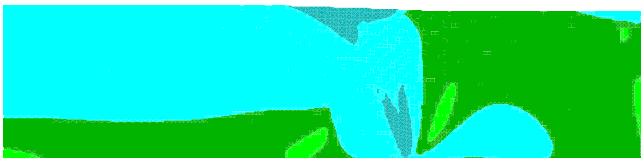
h=0.4m



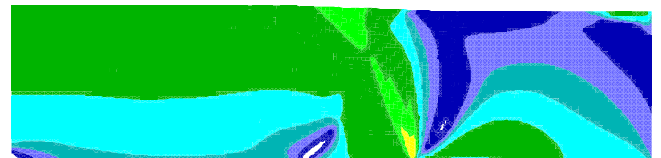
h=0.4m



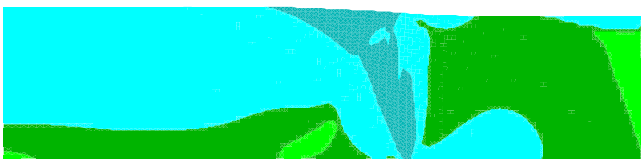
h=0.8m



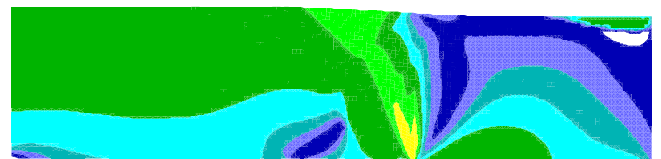
h=0.8m



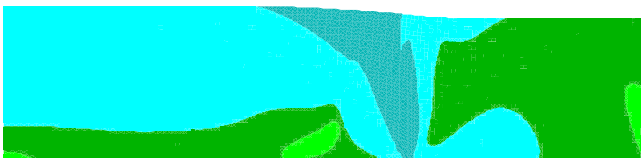
h=1.2m



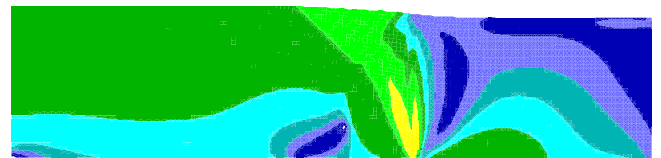
h=1.2m



h=1.6m



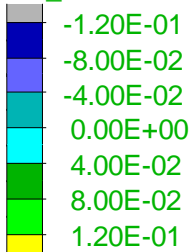
h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

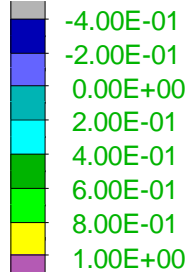
Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

EX_1 Contours



Contour interval= 4.00E-02

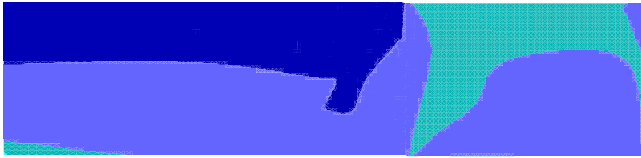
ivar_fav



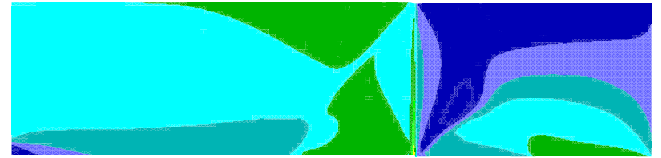
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-25: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

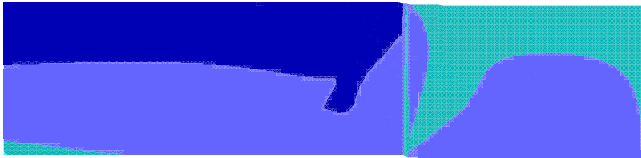
h=0.2m



h=0.2m



h=0.4m



h=0.4m



h=0.8m



h=0.8m



h=1.2m



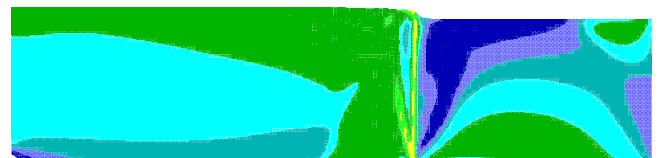
h=1.2m



h=1.6m



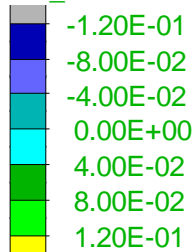
h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

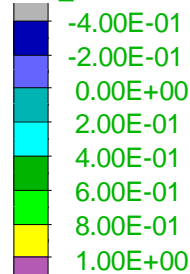
Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

EX_1 Contours



Contour interval= 4.00E-02

ivar_fav



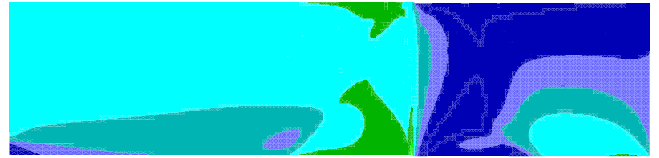
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-26: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

h=0.2m



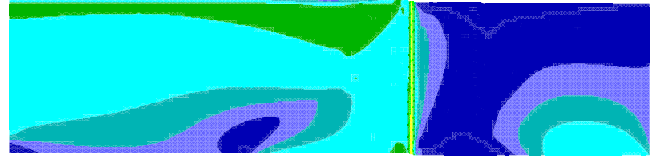
h=0.2m



h=0.4m



h=0.4m



h=0.8m

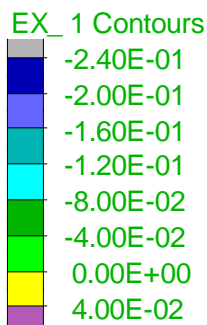


h=0.8m

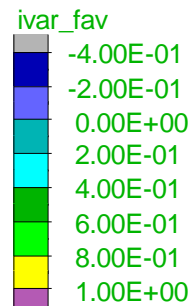


Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A (FAV)



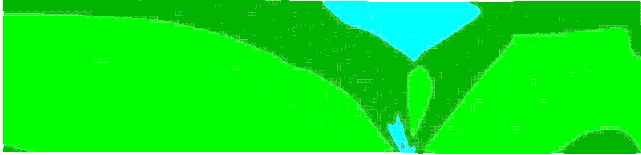
Contour interval= 4.00E-02



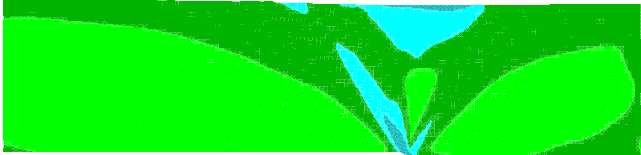
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-27: Παράμετροι ανισοτροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με οριζόντια δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

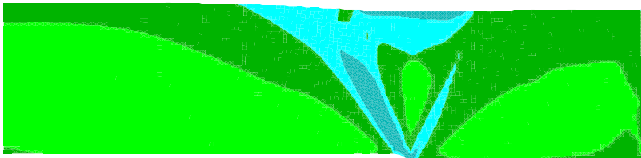
h=0.2m



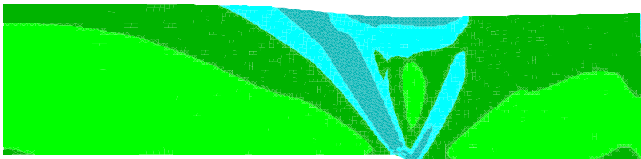
h=0.4m



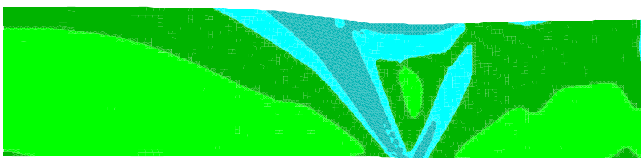
h=0.8m



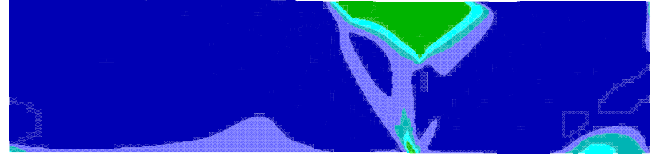
h=1.2m



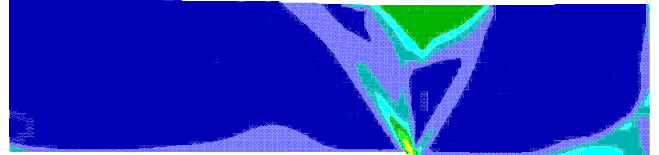
h=1.6m



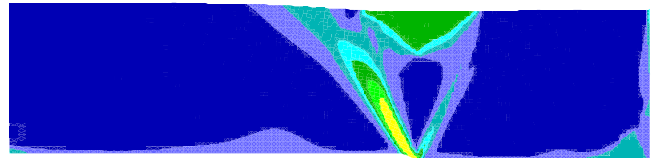
h=0.2m



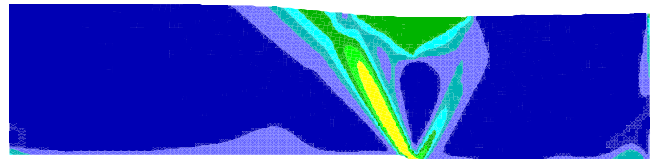
h=0.4m



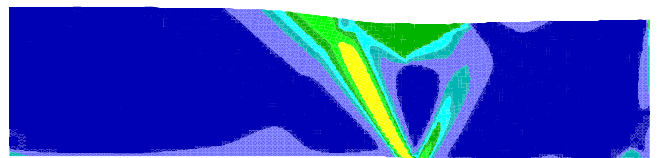
h=0.8m



h=1.2m

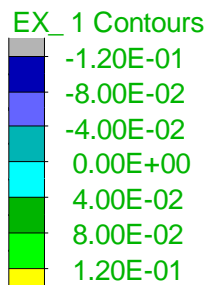


h=1.6m

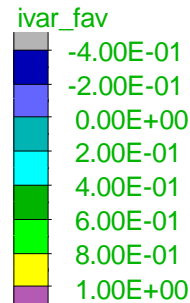


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



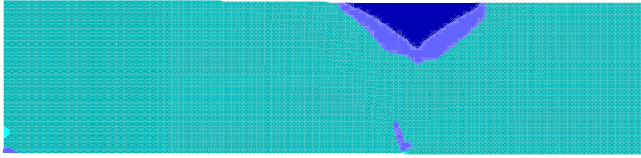
Contour interval= 4.00E-02



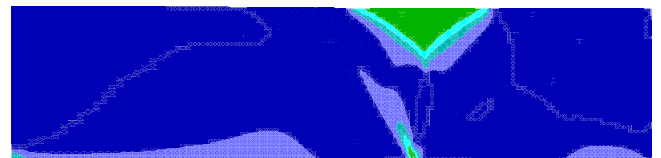
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-28: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

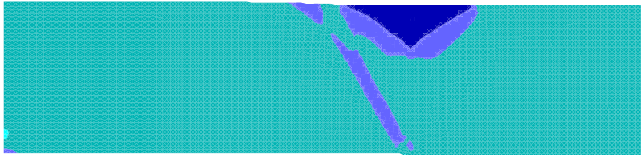
h=0.2m



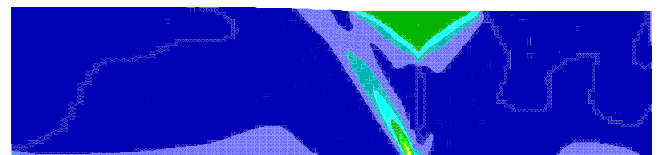
h=0.2m



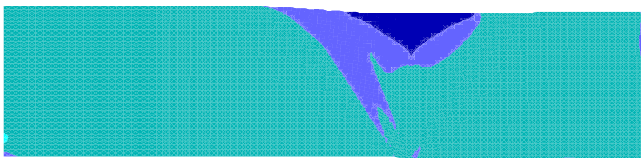
h=0.4m



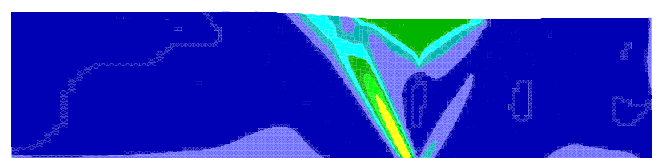
h=0.4m



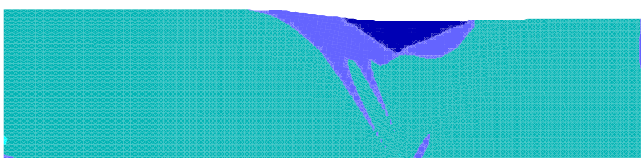
h=0.8m



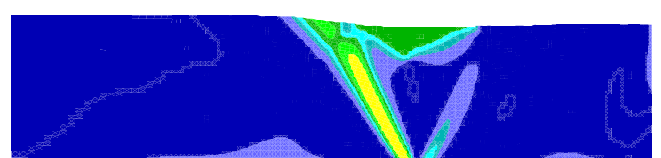
h=0.8m



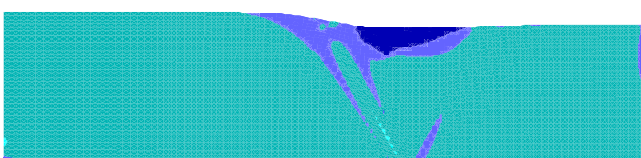
h=1.2m



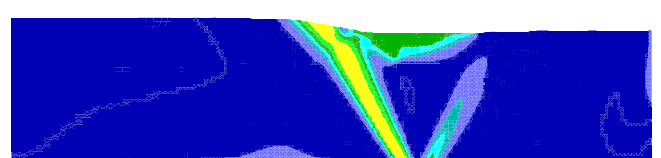
h=1.2m



h=1.6m

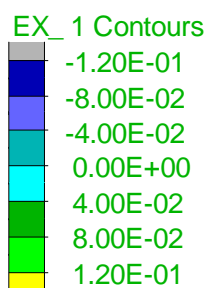


h=1.6m

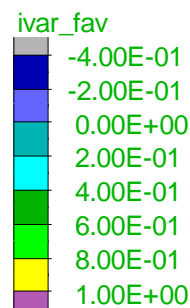


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



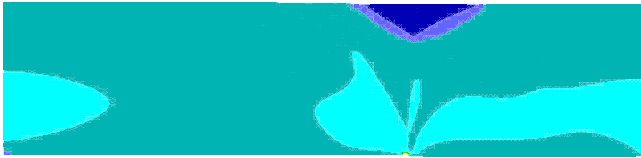
Contour interval= 4.00E-02



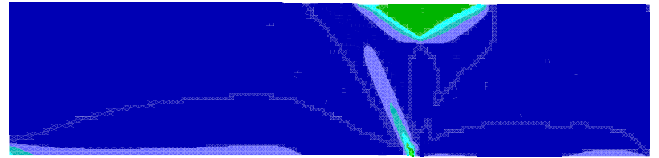
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-29: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

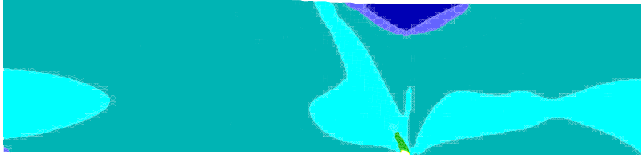
h=0.2m



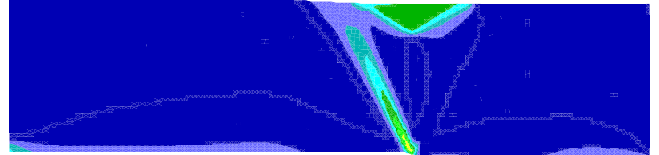
h=0.2m



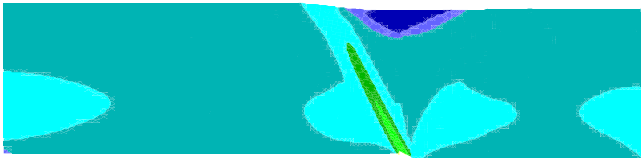
h=0.4m



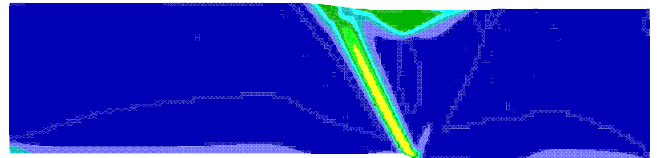
h=0.4m



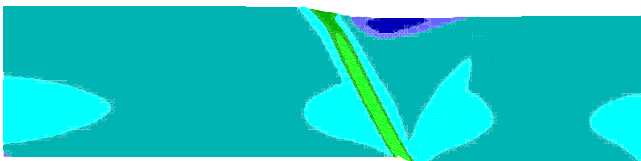
h=0.8m



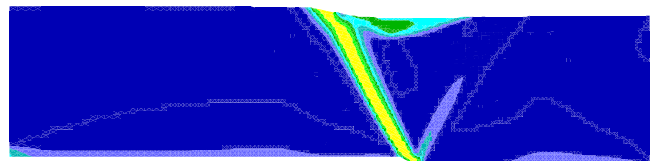
h=0.8m



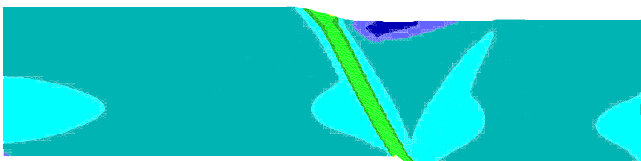
h=1.2m



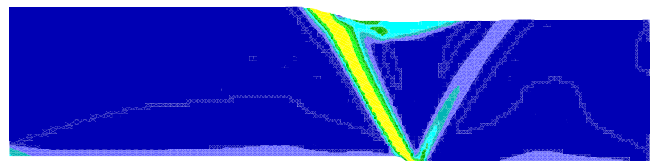
h=1.2m



h=1.6m

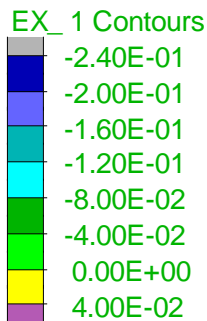


h=1.6m

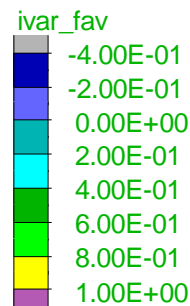


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



Contour interval= 4.00E-02



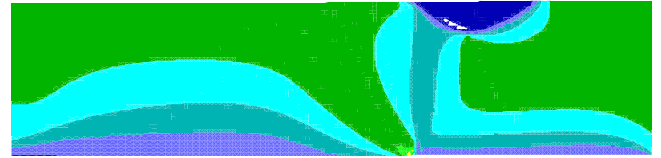
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-30: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

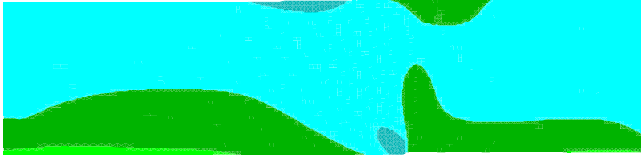
h=0.2m



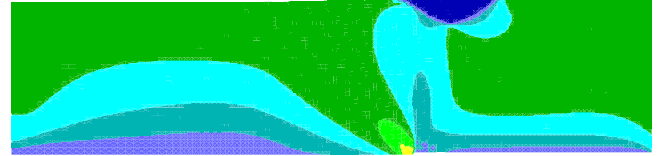
h=0.2m



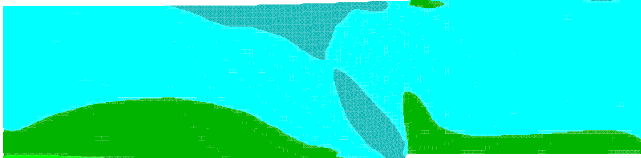
h=0.4m



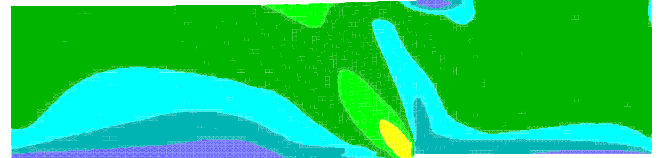
h=0.4m



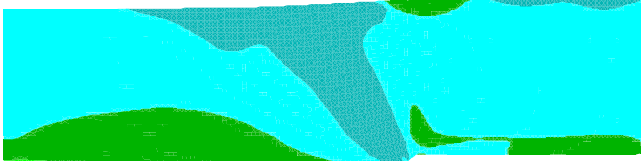
h=0.8m



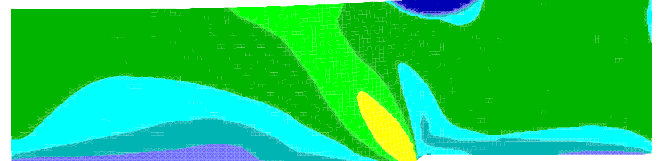
h=0.8m



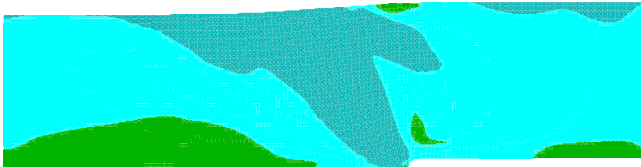
h=1.2m



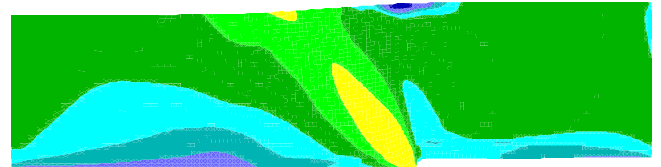
h=1.2m



h=1.6m

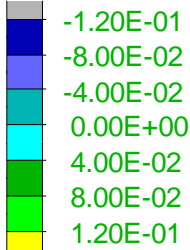


h=1.6m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

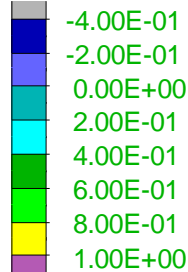
EX_1 Contours



Contour interval= 4.00E-02

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

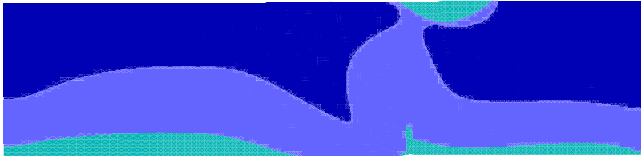
ivar_fav



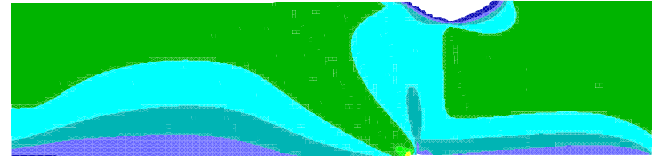
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-31: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

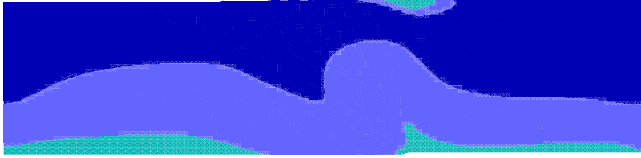
h=0.2m



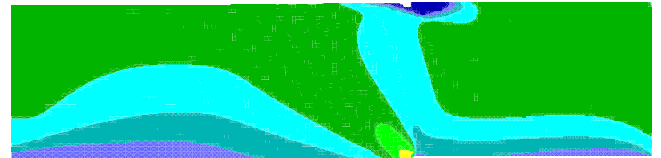
h=0.2m



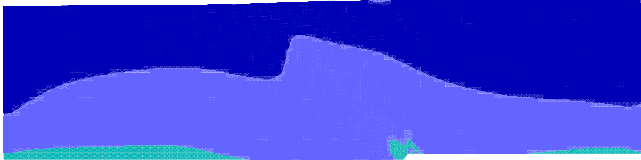
h=0.4m



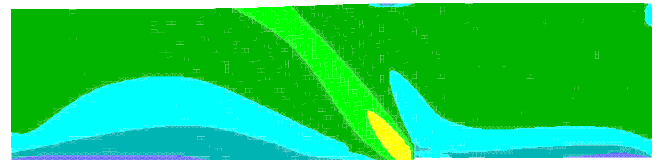
h=0.4m



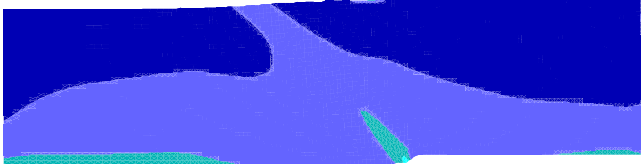
h=0.8m



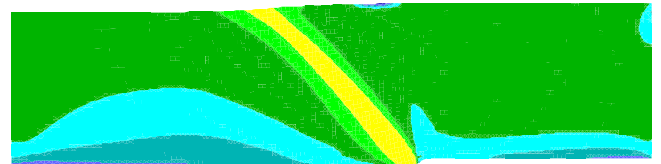
h=0.8m



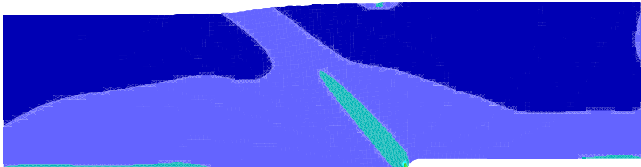
h=1.2m



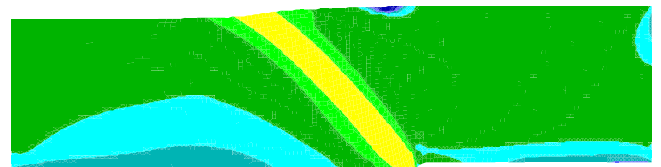
h=1.2m



h=1.6m

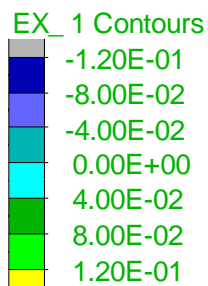


h=1.6m

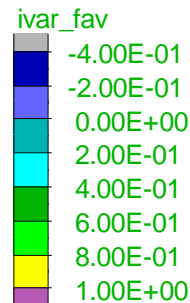


Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A (FAV)

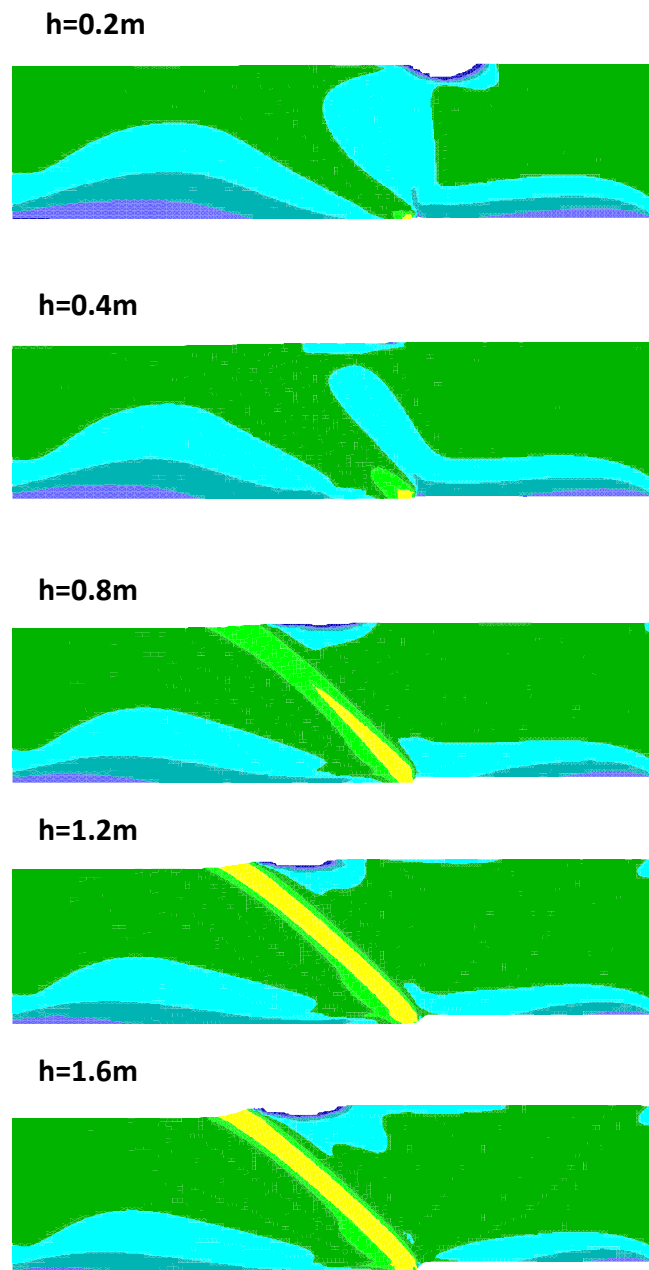
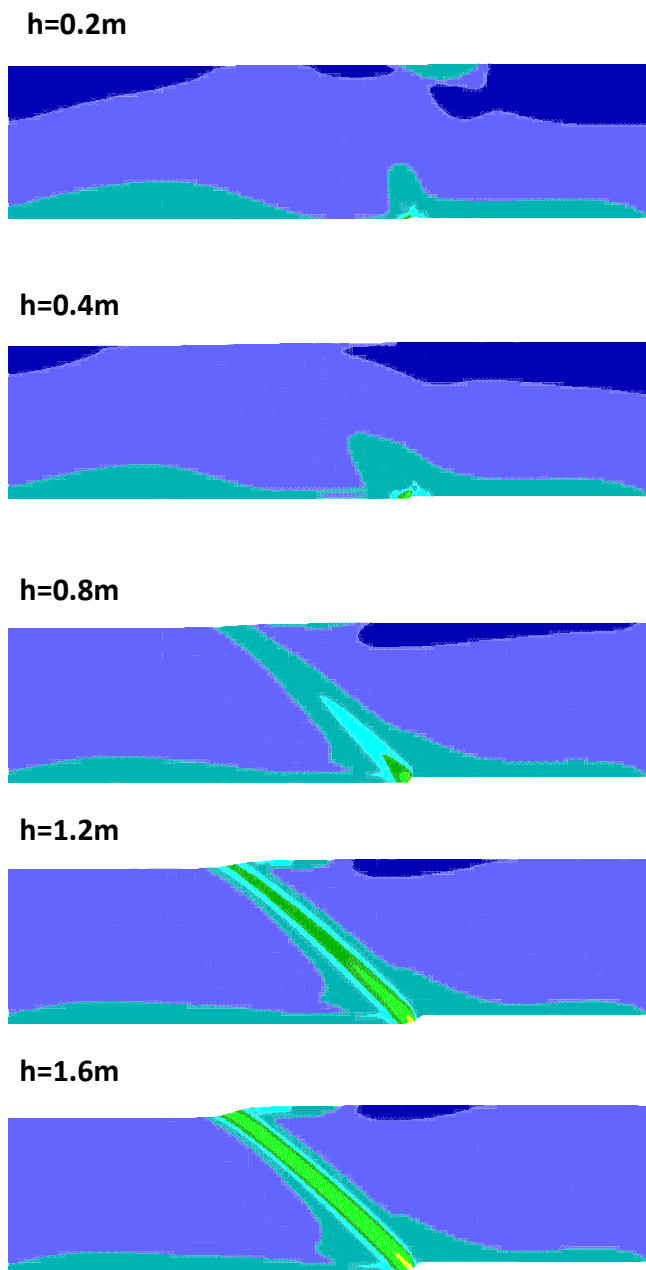


Contour interval= 4.00E-02



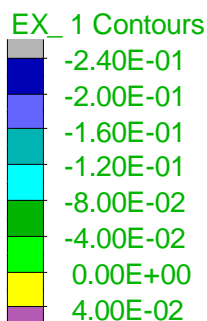
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-32: Παράμετροι ανισοτροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

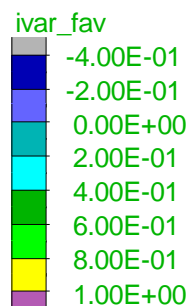


Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A (FAV)

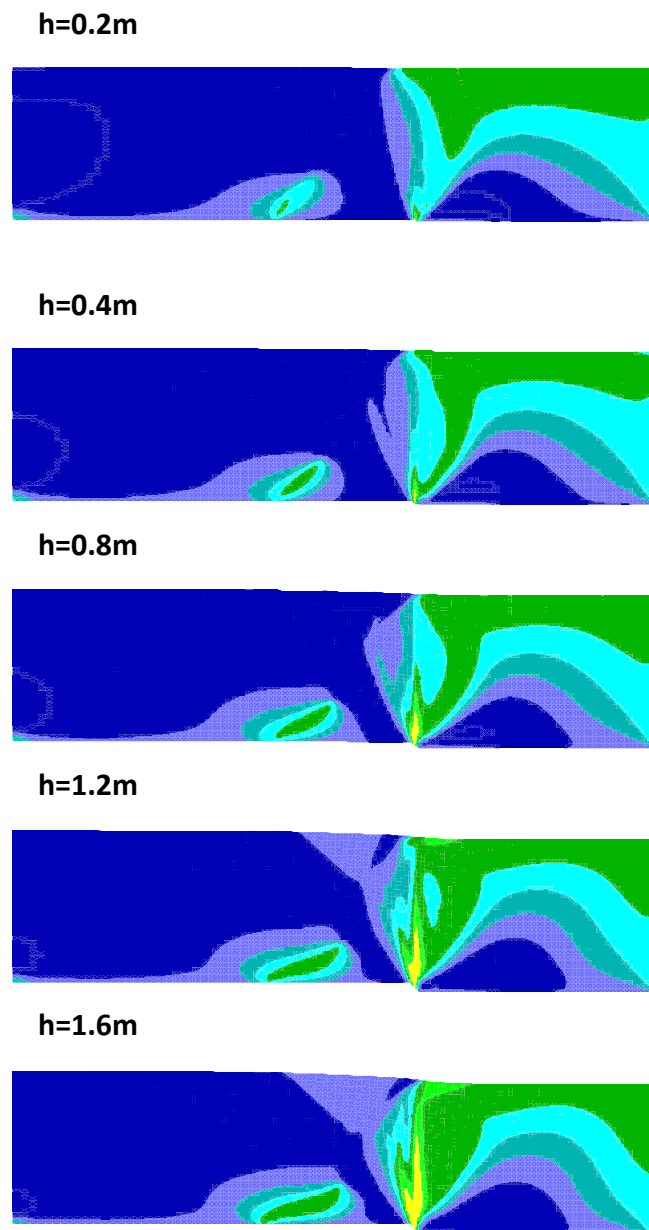
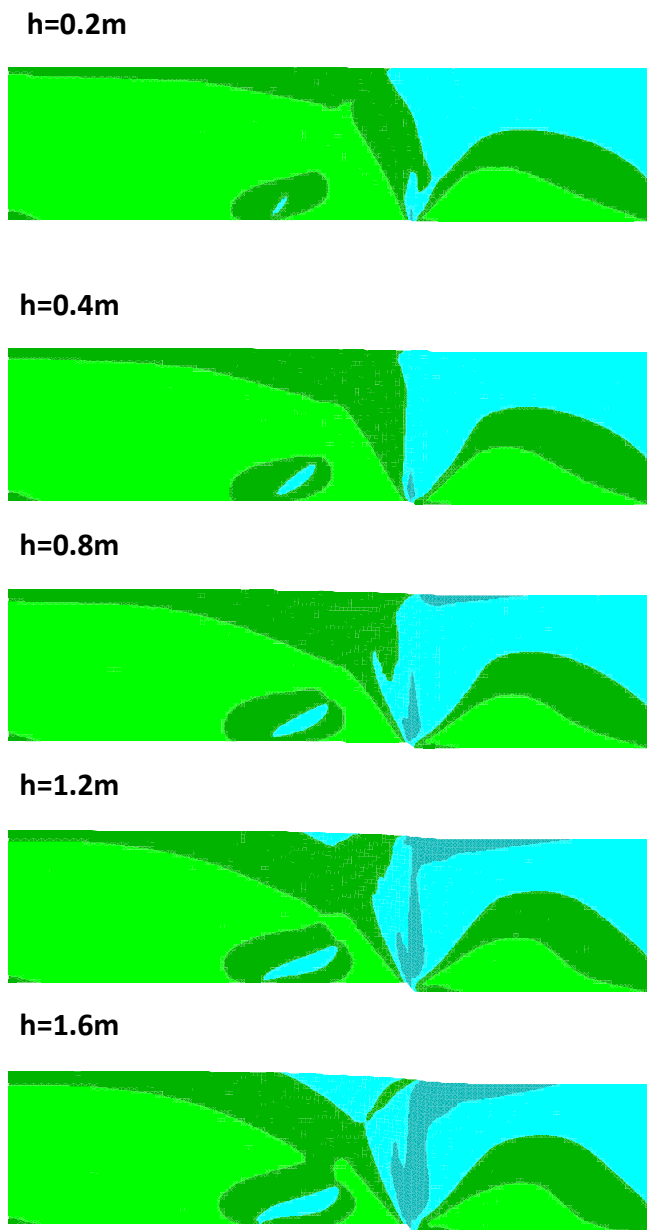


Contour interval= 4.00E-02

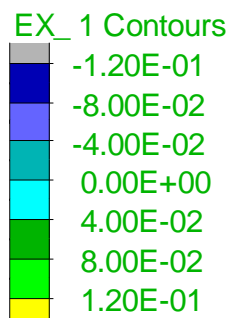


Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα A-33: Παράμετροι ανισοτροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

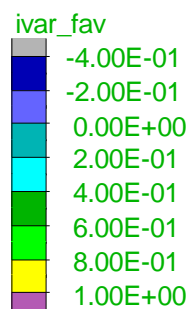


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)



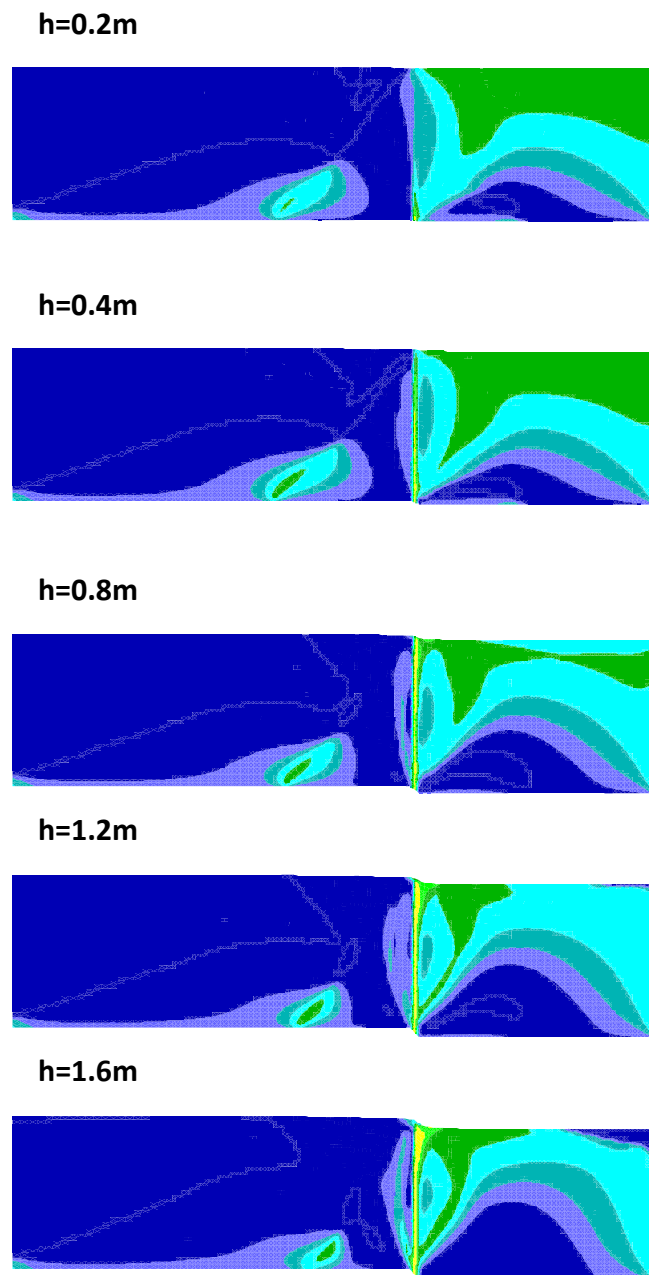
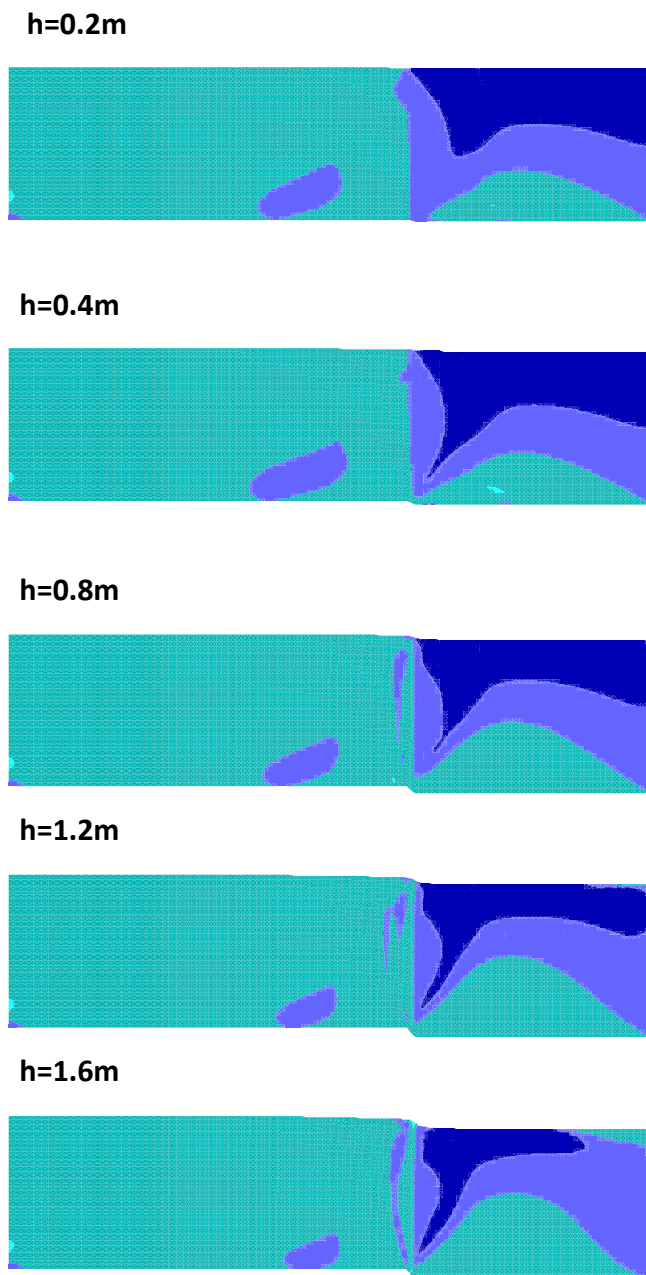
Contour interval= 4.00E-02

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



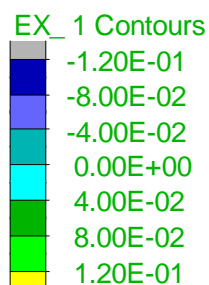
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-34: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=20\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6m$.

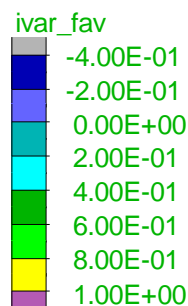


Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)



Contour interval= 4.00E-02



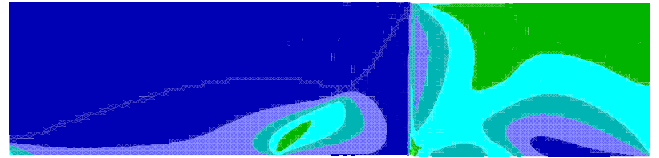
Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-35: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

h=0.2m



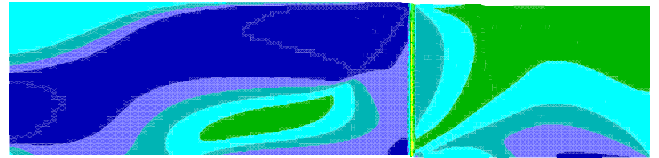
h=0.2m



h=0.4m



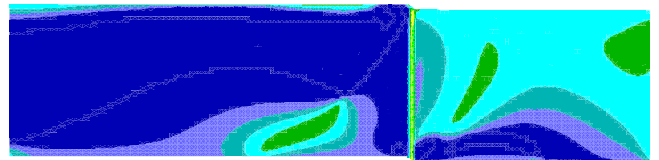
h=0.4m



h=0.8m



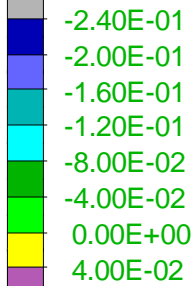
h=0.8m



Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ (zeta)

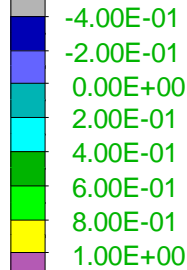
Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A (FAV)

EX_1 Contours



Contour interval= 4.00E-02

ivar_fav



Contour interval= 2.00E-01

Σχήμα Α-36: Παράμετροι ανιστροπίας δομής σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, με κατακόρυφη δομή κόκκων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ με μετατόπιση $h = 0.2 - 1.6\text{m}$.

