



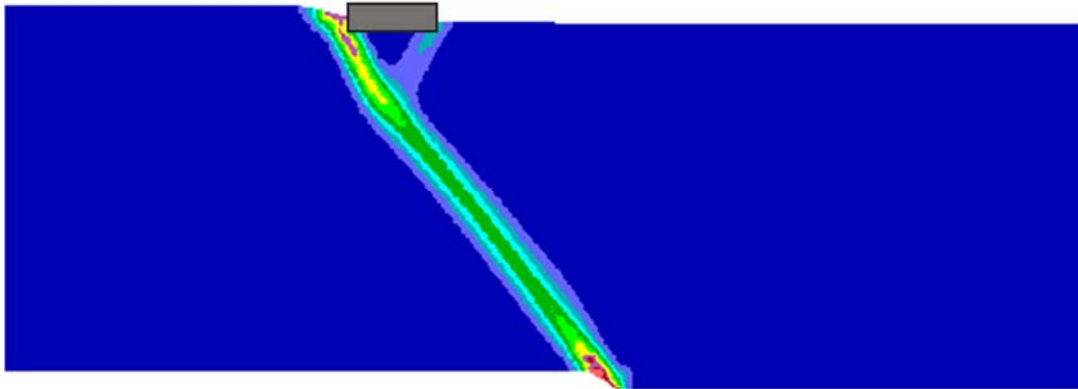
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-
ΘΕΜΕΛΙΟΥ ΣΕ ΚΟΚΚΩΔΗ ΕΛΑΦΗ**

ΜΑΡΙΑ ΔΗΜΟΥΛΑ

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



Diploma Thesis

**ON THE SIMULATION ACCURACY OF FAULT
RUPTURE-FOUNDATION INTERACTION IN
GRANULAR SOILS**

MARIA DIMOULA

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

MΑΡΤΙΟΣ/MARCH 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί και την περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών ως Πολιτικός Μηχανικός. Φυσικά, αυτό δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την συμβολή κάποιων ανθρώπων, στους οποίους αισθάνομαι την ανάγκη να αναφερθώ ιδιαίτερα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Αχιλλέα Παπαδημητρίου, για την καθοδήγησή του και την αμέριστη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η βαθιά γνώση της επιστήμης του Πολιτικού μηχανικού, σε συνδυασμό με την εξαιρετική μεταδοτικότητα του συντέλεσαν στο να κατανοήσω σύνθετα θέματα του κλάδου και να ολοκληρώσω μία εργασία για την οποία τολμώ να πω πως είμαι περήφανη. Και βέβαια, δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην κατανόηση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε πιεστικές περιόδους, στις οποίες μου ήταν δύσκολο να επικεντρωθώ στην εκπόνηση της διπλωματικής μου, με αποτέλεσμα να συνδέσω την συνολική εμπειρία μόνο με θετικά συναισθήματα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδάκτορα Γιάννη Τσιάπα, για την βοήθεια του στην εξοικείωση με την χρήση των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και την προθυμία του να βοηθήσει σε όσες περιπτώσεις το χρειάστηκα.

Σε προσωπικό επίπεδο, ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου τους γονείς μου, Κώστα και Αθηνά για την αμέριστη στήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και την «μαγική» ικανότητα τους να βρίσκουν τον χρόνο και την δύναμη να με βοηθάνε όποτε το έχω ανάγκη. Τον αδερφό μου, Θάνο, που πιστεύει σε εμένα, υποστηρίζει τις όποιες επιλογές μου και με βοηθάει στο να αφοσιωθώ σε όσα με κάνουν χαρούμενη.

Μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου, «εντός» και «εκτός» Πολυτεχνείου, για την υποστήριξη τους και την προσπάθεια τους να απαλύνουν το άγχος μου στις πιεστικές περιόδους της σχολής. Παρά τις άπειρες φορές που έχω ακυρώσει εξόδους μας λόγω των υποχρεώσεων της σχολής, εξακολουθούσαν να είναι δίπλα μου και να δείχνουν κατανόηση μέχρι και την τελευταία στιγμή.

Τέλος, θα ήταν παράλειψη μου να μην ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της συντονιστικής ομάδας του φοιτητικού φόρουμ της σχολής, mQN.gr, που μου έδειξαν στην πράξη το πόσο αποδοτικότερη είναι η συνεργασία μεταξύ των ανθρώπων, έναντι του ανταγωνισμού.

Μαρία Δημουλά,
Μάρτιος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την ακρίβεια της αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης (ενεργού) ρήγματος-κατασκευής, όταν η διάρρηξη διαδίδεται μέσω αμμώδους στρώσης. Η έμφαση δίνεται στην ακρίβεια του καταστατικού προσομοιώματος για το έδαφος. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιούνται αναλύσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε 2 διαστάσεις (επίπεδη παραμόρφωση) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα ενός σοφιστευμένου ανισοτροπικού προσομοιώματος (SANISAND-FR ή S-FR, Papadimitriou et al. 2019) με εκείνα που προκύπτουν από χρήση δύο απλούστερων προσομοιωμάτων: του απλουστευμένου ιστροπικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb με χαλάρωση (Strain-Softening, ή SS) και ενός πολύπλοκου προσομοιώματος της οικογένειας SANISAND χωρίς επίδραση της δομής (SANISAND-R ή S-R). Στη συνέχεια, διερευνάται η μέγιστη πιθανή επίδραση της αρχικής δομής μιας άμμου στο ίδιο πρόβλημα, με χρήση του προσομοιώματος S-FR καθώς είναι το μόνο που δε χρειάζεται ανα-βαθμονόμηση για το σκοπό αυτό.

Αρχικά, τα προσομοιώματα SS και S-R βαθμονομήθηκαν ώστε να δίνουν «ταυτόσημη» απόκριση με το κατά τεκμήριο ορθότερο S-FR σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης (TC). Η βαθμονόμηση έγινε για άμμο Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$, η οποία αποτέλεσε και το εδαφικό υλικό για την παρούσα εργασία. Παρά την ως άνω βαθμονόμηση, στη προσομοίωση δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού (TE) για την ίδια άμμο, διαπιστώθηκε υπερεκτίμηση της διαστολικότητας εκ μέρους των S-R και SS και υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της μέγιστης αντοχής από το S-R και το SS, αντίστοιχα. Ωστόσο, η προσομοίωση της διάδοσης κανονικού ρήγματος γωνίας 70° μέσω στρώσης 20m της άμμου αυτής σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου και η σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις του πειράματος φυγοκεντριστή των Cai et al.(2016) έδειξε ικανοποιητική ακρίβεια και των τριών προσομοιωμάτων. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού της άμμου σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου μέσω της προσομοίωσης δοκιμών TC και TE. Εξετάστηκαν 4 επίπεδα τάσεων και 2 έντονα διαφορετικές αρχικές μικροδομές: μια συνήθη που προκύπτει από απόθεση μέσω βαρύτητας και ονομάζεται «οριζόντια» δομή ($\delta=0^\circ$, όπου δ η γωνία του επιπέδου απόθεσης σε σχέση με την οριζόντια διεύθυνση) και μια ακραία που προκύπτει από περιστροφή της «οριζόντιας» δομής κατά 90° («κατακόρυφη» δομή, $\delta=90^\circ$). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι σε φόρτιση υπό TC, η απόκριση για $\delta=90^\circ$ (όπου η σ₁ είναι κατακόρυφη) ομοιάζει σαν η άμμος να είναι «χαλαρότερη» απ' ό,τι για $\delta=0^\circ$, ενώ το αντίθετο ισχύει για φόρτιση υπό TE (όπου η σ₁ είναι οριζόντια).

Διερευνώντας περαιτέρω την ακρίβεια των ως άνω βαθμονομημένων προσομοιωμάτων στο πρόβλημα της διάδοσης της διάρρηξης ρήγματος μέσω στρώσης άμμου (Toyouga με $D_r=65\%$) πάχους 20m, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για 3 διαφορετικές γωνίες ρήγματος: κανονικό με γωνία $\beta = 45^\circ$, κανονικό με γωνία $\beta = 85^\circ$ («κατακόρυφο») και ανάστροφο με γωνία $\beta = 135^\circ (= 180 - 45^\circ)$. Οι διαρρήξεις των ρηγμάτων διερευνήθηκαν για συνθήκες ελευθέρου πεδίου και έπειτα με ύπαρξη επιφανειακού και άκαμπτου θεμελίου πλάτους $B = 4m$ που φέρει ομοιόμορφο φορτίο $q (=100kPa$ και $185kPa)$. Υπογραμμίζεται πως το θεμέλιο είχε τη δυνατότητα ολίσθησης ή ανασηκώματος και πως προκειμένου να διερευνηθεί η μέγιστη επίδραση του τοποθετήθηκε σε διαφορετική θέση ανά είδος ρήγματος, ώστε να βρίσκεται στην

περιοχή ανάδυσης της κάθε διάρρηξης για συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, διαπιστώθηκε ικανοποιητική ακρίβεια των απλούστερων προσομοιωμάτων για χρήση τους σε προσομοίωση διάρρηξεων επί ελευθέρου πεδίου. Αντίθετα παρατηρήθηκαν πολύ σημαντικές αποκλίσεις στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, τόσο στην απόκριση του εδάφους (π.χ. εκτροπή της διάρρηξης προς διαφορετική κατεύθυνση) όσο και στην εκτίμηση των μεγεθών ενδιαφέροντος για την κατασκευή (στροφή, καθίζηση). Ποσοτικά η απόκριση πλησίον της κατασκευής καθορίζεται από τη φέρουσα ικανότητα, η οποία είναι ελάχιστη για το προσομοίωμα SS και μέγιστη για το προσομοίωμα S-R. Συνεπώς, η κατασκευή εμφανίζει τις μέγιστες και ελάχιστες καθιζήσεις για τα SS και S-R, ενώ το S-FR δίνει τη μέση, μεταξύ των δύο, απόκριση. Ως εκ τούτου, η χρήση προσομοιωμάτων απλούστερων του S-FR κρίθηκε ως ακατάλληλη για το πρόβλημα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, ακόμη κι αν έχουν βαθμονομηθεί στις συνήθως διαθέσιμες δοκιμές TC.

Ακολούθως, με χρήση του S-FR, διερευνήθηκε η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της μικροδομής στο πρόβλημα της διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω άμμου (Toyoura με $D_r=65\%$) πάχους 20m. Η διερεύνηση αφορούσε και τις 3 γωνίες ρήγματος ($\beta = 45^\circ, 85^\circ, 135^\circ$), υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου και με θεμέλιο με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, ενώ συγκρίθηκε η απόκριση για τις 2 έντονα διαφορετικές αρχικές μικροδομές, δηλαδή της συνήθους «οριζόντιας» δομής ($\delta=0^\circ$) και της ακραίας «κατακόρυφης» δομής ($\delta=90^\circ$). Προκύπτει ότι υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου, η διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος είναι μορφής απλής διάτμησης (με την σ_1 υπό γωνία διάφορη των 0° και 90°), είναι ουσιαστικά ίδια για $\delta=0^\circ$ και $\delta=90^\circ$. Ωστόσο, σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου (όπου σ_1 παραμένει κατακόρυφη με τη μείωση των οριζοντίων τάσεων), η άμμος με $\delta=90^\circ$ συμπεριφέρεται μακροσκοπικά ως «χαλαρότερη», με το αντίθετο να παρατηρείται σε διάρρηξη αναστροφου ρήγματος (όπου η σ_1 γίνεται οριζόντια λόγω αύξησης των οριζοντίων τάσεων). Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά απόκρισης εξακολουθούν να ισχύουν για τις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, αλλά μόνο μακριά από την κατασκευή. Στην περιοχή της κατασκευής, η απόκριση καθορίζεται και από τη διαφορετική φέρουσα ικανότητα των θεμελίων, δηλαδή από τη συγκριτικά μειωμένη φέρουσα ικανότητα για $\delta=90^\circ$ (Chaloulos et al.2019). Οι διαφορές λόγω φέρουσας ικανότητας αποδεικνύονται συγκριτικά πιο σημαντικές για διάρρηξη κανονικού ρήγματος, λόγω της μείωσης των οριζοντίων τάσεων που αυτή προκαλεί.

ABSTRACT

This thesis investigates the accuracy of the numerical simulation of the fault-structure interaction problem, when the rupture propagates through a layer of sand. The emphasis is set on the accuracy of the employed soil constitutive model. In that context, analyses are performed with the finite difference method in 2 dimensions (plain strain) and the results occurring from the use of a sophisticated anisotropic model (SANISAND-FR or S-FR, Papadimitriou et al. 2019) are compared with those that occur from the use of two constitutive models of lesser complexity: a simplified isotropic Mohr-Coulomb with strain softening (Strain-Softening or SS) and a more complex SANISAND model that does not account for fabric effects. Furthermore, the maximum effect that the (initial) sand fabric has on the same problem is investigated with the S-FR model, as it is the only of these models that does not require recalibration for that purpose.

Initially, the SS and S-R models were calibrated to attain identical simulations for triaxial compression tests (TC) with the more accurate S-FR model. The calibration was performed for Toyoura sand of relative density $D_r=65\%$, which is the soil material used in this work. Despite this calibration, the simulation of triaxial extension (TE) tests on the same sand revealed overestimation of the dilatancy from both the SS and S-R models and over-prediction and under-prediction of the peak strength from the SS and S-R models, respectively. Nevertheless, the simulation of the rupture propagation of a normal fault with a dip angle $\beta=70^\circ$ through a 20m thick sand layer under free field conditions and the comparison with the experimental results of the respective centrifuge test from Cai et al. (2016) indicated fair accuracy with all 3 models. Subsequently, the effect of (initial) sand fabric orientation at soil element level was investigated by simulating TC and TE tests. The tests initiated from 4 different stress levels and 2 widely different initial sand fabric orientations: the usual fabric that results from gravitational deposition, i.e. a “horizontal” fabric ($\delta=0^\circ$, with δ depicting the angle between the deposition plane and the horizontal direction) and an extreme fabric that results via a rotation of the “horizontal” fabric by 90° (“vertical” fabric, $\delta=90^\circ$). The results indicate that during TC loading (when σ_1 is vertical) the sand having a fabric with $\delta=90^\circ$ behaves as a sand that is “looser” than when the fabric is characterized by $\delta=0^\circ$. The opposite applies for TE loading, when the σ_1 is horizontal.

In order to investigate further the accuracy of the thus-calibrated models on the simulation of the propagation of a fault rupture through a 20m sand layer (Toyourea sand with $D_r=65\%$), analyses were performed for 3 different fault types: a normal fault with an angle $\beta=45^\circ$, a normal fault with $\beta=85^\circ$ (“vertical” fault) and a reverse fault with an angle of $\beta=135^\circ (= 180 - 45^\circ)$. The propagation of the ruptures was firstly investigated under free field conditions and then with the simultaneous existence of a shallow and rigid strip footing of width $B=4\text{m}$ that carries a uniform load $q (=100\text{kPa or }185\text{kPa})$. It is underlined here that the footing was allowed to uplift and slip and that in order to examine the maximum interaction effect due to its existence, its location was different for each fault type, i.e. it was placed where each fault rupture surfaces under free field conditions. In agreement with the related published literature, satisfactory accuracy was obtained from the use of models of less complexity for the simulation of fault rupture propagation under free field conditions. However, very significant differences were observed in the simulations of the fault-structure interaction problem, including both

the response of the soil (e.g. diversion of the rupture towards different directions) and of the structure (rotation, settlement). Quantitatively, the response due to fault rupturing in the vicinity of the structure is governed from its bearing capacity, which is underpredicted and overpredicted by the SS and S-R models, respectively. Consequently, the settlement of the structure in the fault rupturing process is overpredicted and underpredicted by the SS and S-R models. As a result, the usage of constitutive models simpler than the S-FR is found unsuitable for the fault-structure interaction problem, even if these are calibrated on TC test data, i.e. the most common tests in geotechnical engineering practice.

Afterwards, the S-FR model was used to investigate the effect of the evolving sand fabric anisotropy on the process of fault rupture propagation through a sand layer (Toyoura of $D_r=65\%$) of 20m depth. The investigation included all 3 fault types ($\beta = 45^\circ, 85^\circ, 135^\circ$), under free field conditions and under the interaction effects with the structure having the previously mentioned characteristics. A comparison was performed of the predicted response for the aforementioned 2 widely different initial sand fabrics, i.e. the usual “horizontal” fabric ($\delta=0^\circ$) and the extreme “vertical” fabric ($\delta=90^\circ$). It is shown that under free field conditions the “vertical” fault rupture propagation imposes loading reminiscent of simple shear (with σ_1 being at an angle different from 0° and 90°), and hence the response is practically the same for both $\delta=0^\circ$ and $\delta=90^\circ$. However, during the propagation of a normal fault rupture under free field conditions (when σ_1 remains vertical due to the decrease of horizontal stresses), the sand with $\delta=90^\circ$ macroscopically behaves as a “looser” sand, while the opposite is true during the reverse fault rupture propagation (at which σ_1 becomes horizontal due to the increase of horizontal stresses). The aforementioned response differences also apply for the fault-structure interaction cases, but only in the regions far from the structure. In the vicinity of the structure, the response during fault rupturing is again governed from its bearing capacity, i.e. from the comparatively smaller bearing capacity in sand with $\delta=90^\circ$ (Chaloulos et al.2019). Note that the response deviations that result from the different bearing capacity are more significant during normal fault rupturing, due to the decrease of horizontal stresses that this rupture causes.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 8 |
| 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ..... | 8 |
| 1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 8 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ | 10 |
| 2.1. ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ..... | 10 |
| 2.2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ..... | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ..23 | |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 23 |
| 3.2 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ | 24 |
| 3.3 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ..... | 28 |
| 3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .. | 32 |
| 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 36 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ | 37 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 38 |
| 4.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ..... | 39 |
| 4.2.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος..... | 39 |
| 4.2.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος..... | 42 |
| 4.2.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος..... | 44 |
| 4.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ... | 47 |
| 4.3.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος..... | 47 |
| 4.3.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος..... | 51 |
| 4.3.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος..... | 55 |
| 4.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ | 58 |
| 4.4.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος..... | 58 |
| 4.4.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος..... | 62 |
| 4.4.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος..... | 66 |
| 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 69 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ | 71 |
| 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 72 |
| 5.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ..... | 73 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής | 73 |
| 5.2.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος | 74 |
| 5.2.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος | 77 |
| 5.2.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος | 81 |
| 5.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ | 84 |
| 5.3.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής | 84 |
| 5.3.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος | 86 |
| 5.3.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος | 92 |
| 5.3.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος | 97 |
| 5.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ | 102 |
| 5.4.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής | 102 |
| 5.4.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος | 104 |
| 5.4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος | 109 |
| 5.4.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος | 113 |
| 5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 118 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 121 |
| 6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 122 |
| 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ..... | 125 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΑΝΑΣΗΚΩΜΑ ΤΟΥ ΘΕΜΕΛΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ..... | 127 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 138 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Μέχρι σήμερα, η δόμηση στην γειτονιά ενεργού ρήγματος κρίνεται ως μη επιθυμητή και -σε περίπτωση που είναι αναπόφευκτη- επιτρέπεται μόνο έπειτα από ειδική γεωτεχνική-σεισμική μελέτη. Για την εκπόνηση της, το συντριπτικό πλεονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων σε κόστος και ταχύτητα, σε συνδυασμό με την ικανότητα εφαρμογής τους ακόμα και σε επίπεδο προσωπικού υπολογιστή, καθιστά την επιλογή τους ως την ελκυστικότερη έναντι των όποιων εναλλακτικών. Άλλωστε, προηγούμενη έρευνα (π.χ. Bray et al. 1994, Anastasopoulos et al. 2007) έχει αναδείξει την ικανότητα της ικανοποιητικής προσομοίωσης της διάρρηξης ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, ακόμα και με χρήση απλουστευμένων καταστατικών προσομοιωμάτων και παρά το γεγονός ότι δεν περιγράφουν με ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Έτσι, το ερώτημα που εγείρεται είναι αν το κόστος σε ακρίβεια από τη χρήση απλουστευμένων προσομοιωμάτων παραμένει μικρό και στο πολυπλοκότερο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, που είναι και το κύριο σημείο ενδιαφέροντος της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού.

Η ανάγκη διερεύνησης του σχετικού λάθους στην ακρίβεια προσομοίωσης ενισχύεται από την αδυναμία των χρησιμοποιούμενων στην πράξη προσομοιωμάτων για προσομοίωση της ανισοτροπίας του εδάφους, και κατ' επέκταση των επιπτώσεων που αυτή επιφέρει στην πρόβλεψη της αντοχής και της διαστολικότητάς του. Για τον σκοπό αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συγκρίνονται τα αποτελέσματα της χρήσης ενός σοφιστευμένου ανισοτροπικού προσομοιώματος (SANISAND-FR, ή S-FR για συντομία, Papadimitriou et al. 2019) στην αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής εντός αμμώδους στρώσης, με εκείνα που προκύπτουν με χρήση δύο απλούστερων προσομοιωμάτων: του απλουστευμένου ιστροπικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb με χαλάρωση (Strain Softening, ή SS για συντομία) και ενός πολύπλοκου προσομοιώματος της οικογένειας SANISAND χωρίς επίδραση της δομής (S-R). Στη συνέχεια, διερευνάται η μέγιστη πιθανή επίδραση της αρχικής δομής μιας άμμου στην αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής, με χρήση του προσομοιώματος S-FR. Για το σκοπό αυτό οι αναλύσεις που έχουν γίνει θεωρώντας οριζόντιο επίπεδο απόθεσης της άμμου («οριζόντια» δομή, δηλαδή με γωνία $\delta=0^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο λόγω της συνήθους εναπόθεσης μέσω βαρύτητας) επαναλαμβάνονται μετά από περιστροφή του επιπέδου απόθεσης κατά 90° («κατακόρυφη» δομή, με $\delta=90^\circ$).

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται επιλεγμένες βιβλιογραφικές διερευνήσεις που αφορούν στη διάδοση ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε αριθμητικές μελέτες που διερευνούν τη διάδοση ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης

υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εργασίες που διερευνούν το πιο πολύπλοκο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής είτε μέσω εκτέλεσης πειραμάτων, ή με χρήση αριθμητικών, ή ακόμη και αναλυτικών μεθόδων.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται αναφορά στις αρχές των 3 καταστατικών προσομοιωμάτων (SS, S-R και S-FR) που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Δεδομένης της ακριβέστερης προσομοίωσης της εδαφικής συμπεριφοράς από το προσομοίωμα S-FR (Papadimitriou et al. 2019), η βαθμονόμησή των άλλων γίνεται ώστε να δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης (TC), δηλαδή την πλέον συνήθη δοκιμή στο εργαστήριο. Επιπλέον, διερευνάται η χρήση των 3 βαθμονομημένων προσομοιωμάτων σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, αλλά και στο πρόβλημα της διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμή φυγοκεντριστή.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται χρήση των 3 καταστατικών προσομοιωμάτων του Κεφαλαίου 3 για την αριθμητική προσομοίωση της διάρρηξης ρήγματος εντός αμμώδους στρώσης. Διερευνώνται 3 είδη ρήγματος (κανονικό, «κατακόρυφο», ανάστροφο) και αποτυπώνεται η απώλεια ακρίβειας στην προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης για συνθήκες ελευθέρου πεδίου, όσο και με παρουσία επιφανειακού θεμελίου (μορφής θεμελιο-λωρίδας) τοποθετημένου στη θέση όπου αναμένεται η μέγιστη, κάθε φορά, επίδραση στη διάρρηξη. Μάλιστα διερευνάται και η επίδραση του φορτίου της κατασκευής στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.

Στο **Κεφάλαιο 5** μελετάται η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της άμμου στη διάρρηξη των 3 ρηγμάτων (κανονικού, «κατακόρυφου», ανάστροφου) υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου και στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης τους με το επιφανειακό θεμέλιο για τους συνδυασμούς φορτίων και θέσης που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μόνο το σοφιστευμένο προσομοίωμα S-FR και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για δύο έντονα διαφορετικές αρχικές δομές άμμου, δηλαδή για γωνίες του επιπέδου απόθεσης κόκκων ίσες με $\delta = 0^\circ$ και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διερεύνηση και δίνονται οι κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1. ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το φαινόμενο της διάδοσης ενεργού ρήγματος και των πιθανών επιδράσεων του στις κατασκευές έχει απασχολήσει εντόνως τους ερευνητές διεθνώς, οι οποίοι προέβησαν στην διερεύνηση του εφαρμόζοντας ποικίλες μεθόδους συμπεριλαμβανομένων μελετών πεδίου, εκτέλεσης πειραμάτων και αναλυτικών λύσεων. Ωστόσο, η τεχνολογική εξέλιξη σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των μελετών σε ακρίβεια, χαμηλό κόστος και ταχύτητα εκπόνησης οδήγησαν στην προσπάθεια επίλυσης του συγκεκριμένου γεωτεχνικού προβλήματος με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Είναι εμφανές πως σε αυτές τις μεθόδους το χρησιμοποιούμενο καταστατικό προσομοίωμα είναι αυτό που σε μεγάλο βαθμό καθορίζει την επιτυχή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους και κατ' επέκταση την ασφάλεια της προτεινόμενης από τον μηχανικό λύσης. Έτσι, έχοντας ως στόχο την διαμόρφωση αποτελεσματικού ισοζυγίου μεταξύ χρησιμότητας και ακριβούς απόδοσης, ερευνητές έχουν κατά καιρούς πραγματοποιήσει αναλύσεις με διαφορετικά καταστατικά προσομοιώματα, η πολυπλοκότητα και ταυτόχρονα η ακρίβεια των οποίων τείνει να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

Από τις πρώτες μελέτες σε αυτό το αντικείμενο είναι εκείνη των Bray et al. (1994), οι οποίοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα διάδοσης διάρρηξης ρήγματος εντός κορεσμένης μη προστερεοποιημένης αργιλώδους στρώσης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η διάδοση κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων τριών (3) γωνιών 45°, 60° και 90° σε πάχος στρώσης 24m και 91m, ενώ για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Όσον αφορά στην συμπεριφορά της αργίλου, επιλέχθηκε να περιγράφεται από το υπερβολικό προσομοίωμα των Duncan et al. (1980), ενώ για αύξηση της ακρίβειας των αναλύσεων έγινε η παραδοχή πως τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της ακολουθούσαν γραμμική αύξηση με το βάθος. Η δυνατότητα του καταστατικού προσομοιώματος να προβλέψει ικανοποιητικά την παραμόρφωση αστοχίας της αργίλου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ακριβέστερη περιγραφή του προβλήματος, καθώς εκείνη φάνηκε να αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες στην εξέλιξη διάδοσης της διάρρηξης. Από τις αναλύσεις προέκυψε η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του κανονικοποιημένου (ως προς την κατακόρυφη μετακίνηση της βάσης) ύψους διάδοσης της διάρρηξης και της αξονικής παραμόρφωσης αστοχίας της αργίλου. Άλλα χαρακτηριστικά της αργίλου που επηρέασαν την πορεία της διάρρηξης ήταν η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και η στιβαρότητά της, με την επίδραση τους όμως να κρίνεται ως μικρότερης σημασίας.

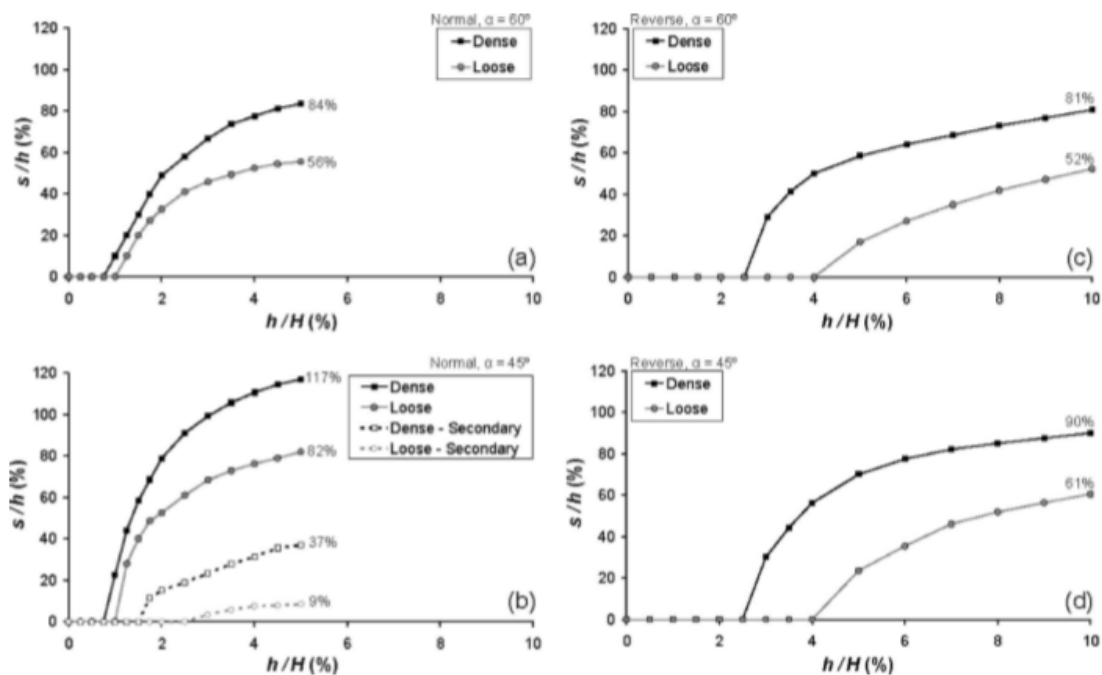
Οι Anastasopoulos et al. (2007) μελέτησαν την διάδοση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος εντός αμμώδους στρώσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα κάνοντας χρήση του λογισμικού ABAQUS. Λαμβάνοντας υπόψιν τους την ανακρίβεια προηγούμενων μελετών που έκαναν χρήση απολύτως πλαστικών προσομοιωμάτων (π.χ. Scott and Schoustra 1974) εισήγαγαν στις αναλύσεις τους το

προσομοίωμα Mohr-Coulomb με ιστροπική χαλάρωση, ήτοι με τις γωνίες διαστολικότητας ψ και τριβής φ να μειώνονται με την αύξηση της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\varphi_{mob} = \begin{cases} \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma_f} * \gamma_{oct}^p & for\ 0 \leq \gamma_{oct}^p < \gamma_f^p \\ \varphi_{res} & for\ \gamma_{oct}^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_{mob} = \begin{cases} \psi_p * \left(1 - \frac{\gamma_{oct}^p}{\gamma_f^p}\right) & for\ 0 \leq \gamma_{oct}^p < \gamma_f^p \\ \psi_{res} & for\ \gamma_{oct}^p \geq \gamma_f^p \end{cases} \quad (2)$$

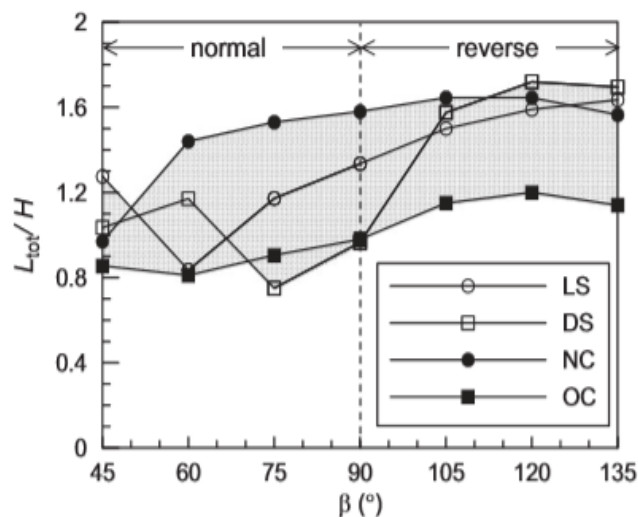
όπου φ_p και φ_{res} είναι η μέγιστη και παραμένουσα (ή κρίσιμη) γωνία τριβής αντίστοιχα, ψ_p η μέγιστη γωνία διαστολικότητας και γ_f^p η πλαστική οκταεδρική διατμητική τάση που είναι αναγκαία για την απόκριση των παραμενουσών τιμών των γωνιών τριβής και διαστολικότητας. Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έγινε με βάση δοκιμές άμεσης διάτμησης, στο σκεπτικό ότι αποτελεί το κυρίαρχο είδος φόρτισης του εδάφους εντός της ζώνης διάρρηξης. Για επαλήθευση της ακρίβειας του προσομοιώματος στην μελέτη του προβλήματος, τα αποτελέσματα τεσσάρων πειραμάτων φυγοκεντριστή για διάρρηξη κανονικού και ανάστροφου ρήγματος γωνίας 60° εντός στρώσης άμμου Fontainebleau μέσης-πυκνής ($D_r=80\%$) και μέσης-χαλαρής πυκνότητας ($D_r=60\%$) συγκρίθηκαν με εκείνα των αντίστοιχων αριθμητικών αναλύσεων. Με βάση την ικανοποιητική συμφωνία που προέκυψε μεταξύ των προαναφερθέντων αναλύσεων, πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια παραμετρική διερεύνηση της διάδοσης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων εντός άμμου για γωνίες 45° και 60° . Από τις αναλύσεις προέκυψε, μεταξύ άλλων, αύξηση της γωνίας της διαδιδόμενης διάρρηξης με την προσέγγιση της στην επιφάνεια για την περίπτωση των κανονικών ρηγμάτων, και το ακριβώς αντίθετο για την περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων. Η αύξηση της τιμής των γωνιών (φ_p , ψ_p) του εδάφους προκαλεί περαιτέρω αύξηση και μείωση της γωνίας διάδοσης της διάρρηξης, αντίστοιχα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι ο λόγος κατακόρυφης μετακίνησης του κινούμενου τεμάχους που απαιτείται για την πλήρη διάδοση της διάρρηξης ως προς το ύψος της στρώσης (h/H) αυξάνεται με τη μείωση της πυκνότητας της άμμου, και ότι τα ανάστροφα ρήγματα απαιτούν χονδρικά τριπλάσιες μετακινήσεις συγκριτικά με εκείνες των κανονικών ρηγμάτων για την ανάδυση τους στην επιφάνεια της ίδιας εδαφικής στρώσης. Το δε κανονικοποιημένο ως προς την κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος στο υπόβαθρο ύψος κατακρημνίσματος (s/h) αποτελεί συνάρτηση του λόγου h/H και τείνει σε κάθε περίπτωση να σταθεροποιηθεί με την αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης, με την τιμή που αντιστοιχεί στην πυκνή άμμο να είναι μεγαλύτερη, ανεξαιρέτως του είδους ρήγματος ή της γωνίας διάδοσης του.



Σχήμα 2.1: Κανονικοποιημένο ύψος κατακρημνίσματος s/h συναρτήσει της κανονικοποιημένης κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος h/H για διάρρηξη ρήγματος εντός άμμώδους στρώσης διαφορετικών ιδιοτήτων (πυκνή άμμος: $\phi=45^\circ$, $\psi=18^\circ$ και $\gamma_s=1.5\%$; χαλαρή άμμος: $\phi=32^\circ$, $\psi=3^\circ$ και $\gamma_s=3\%$): (a) κανονικό ρήγμα γωνίας $\alpha=60^\circ$; (b) κανονικό ρήγμα γωνίας $\alpha=45^\circ$; (c) ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\alpha=60^\circ$; (d) ανάστροφο ρήγμα γωνίας $\alpha=45^\circ$ (Anastasopoulos et al. 2007)

Λίγο αργότερα, οι Loukidis et al. (2009) εκμεταλλευόμενοι την ακρίβεια του ελαστοπλαστικού Mohr-Coulomb με χαλάρωση στην αριθμητική μελέτη του προβλήματος, πραγματοποίησαν αναλύσεις διάρρηξης ρήγματος με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC. Βασικός σκοπός της διερεύνησης ήταν η ακριβής εκτίμηση της ζώνης διάρρηξης και της επηρεαζόμενης από αυτήν επιφάνεια για διάδοση της εντός ομοιόμορφης στρώσης εδάφους, ενώ έγινε παραμετρική διερεύνηση τόσο ως προς την φύση των εδαφικών υλικών όσο και για την επίδραση του πάχους της στρώσης. Προκειμένου να γίνει αυτό εφικτό πραγματοποίησαν αναλύσεις για διαφορετικές γωνίες ρηγμάτων: τριών (3) κανονικών γωνίας $\beta=45^\circ$, 60° και 75° , τριών (3) ανάστροφων γωνίας $\beta=105^\circ$, 120° και 135° , όπως επίσης και ενός (1) κατακόρυφου γωνίας $\beta=90^\circ$. Όσον αφορά στα εδαφικά υλικά, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μίας πυκνής και μίας χαλαρής άμμου, καθώς επίσης και μίας κανονικά προστερεοποιημένης και μίας υπερστερεοποιημένης αργίλου. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι ο λόγος d/H (όπου d η απαιτούμενη μετακίνηση του ρήγματος για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια μιας στρώσης πάχους H) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.2-0.4% για τα κανονικά ρήγματα και μεταξύ 0.2-0.6% για τα κατακόρυφα, με το εύρος αυτό να είναι ανεξάρτητο της γωνίας του ρήγματος και των χαρακτηριστικών του εδάφους. Αντίθετα, τα ανάστροφα ρήγματα χρειάζονται μεγαλύτερες τιμές του λόγου d/H (σε ποιοτική συμφωνία με τους Anastasopoulos et al. 2007), και συγκεκριμένα τιμές εντός του εύρους 1.0-2.4%, με τις μικρότερες τιμές να αντιστοιχούν στα αργιλικά εδάφη. Όσον αφορά στον λόγο L_{tot}/H , όπου L_{tot} το συνολικό εύρος της επιφάνειας που η κλίση του εδάφους ξεπέρασε την τιμή 0.2% (που αντιστοιχεί σε διαφορεική καθίζηση 1/500), η τιμή του αυξάνεται με την αύξηση της

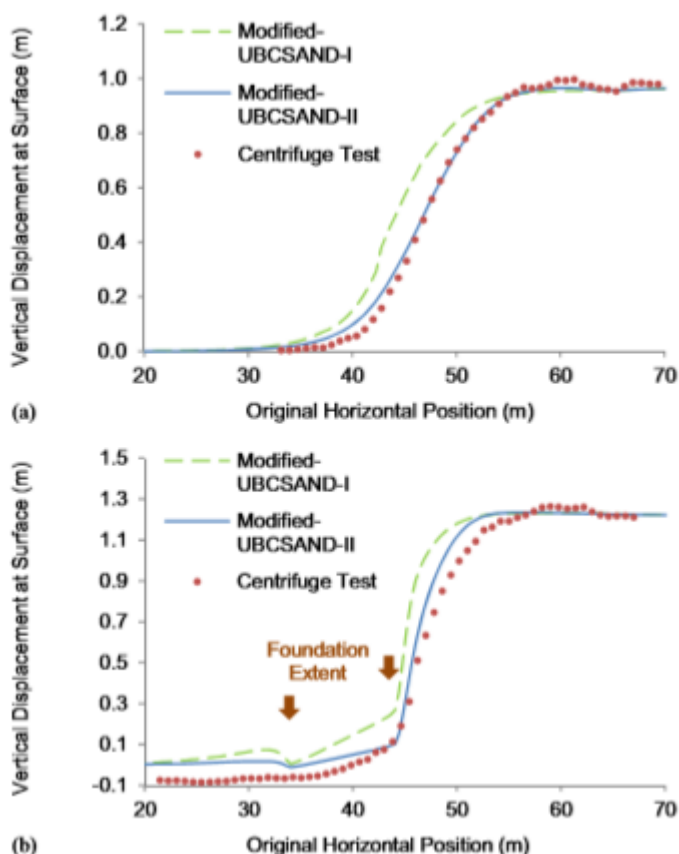
γωνίας του ρήγματος στο υπόβαθρο αν και η διαφορά που προκύπτει συγκρίνοντας τα ανάστροφα με τα κανονικά ρήγματα είναι μικρότερη από εκείνη για τον λόγο d/H . Το κέντρο C του εύρους L_{tot} βρίσκεται για τις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ της κατακόρυφης προβολής του ίχνους στο υπόβαθρο και της θέσης ανάδυσης στην επιφάνεια, το οποίο πρακτικά σημαίνει πως το κινούμενο τέμαχος είναι αυτό που επηρεάζεται περισσότερο από τη διάρρηξη. Τέλος, το πάχος της στρώσης H δεν φάνηκε να επηρεάζει την τιμή των προαναφερθέντων λόγων στα αργιλικά εδάφη, χωρίς αυτό να ισχύει και για τις άμμους. Στις τελευταίες η αύξηση του H οδήγησε σε μη γραμμική αύξηση της τιμής των d/H και L_{tot}/H .



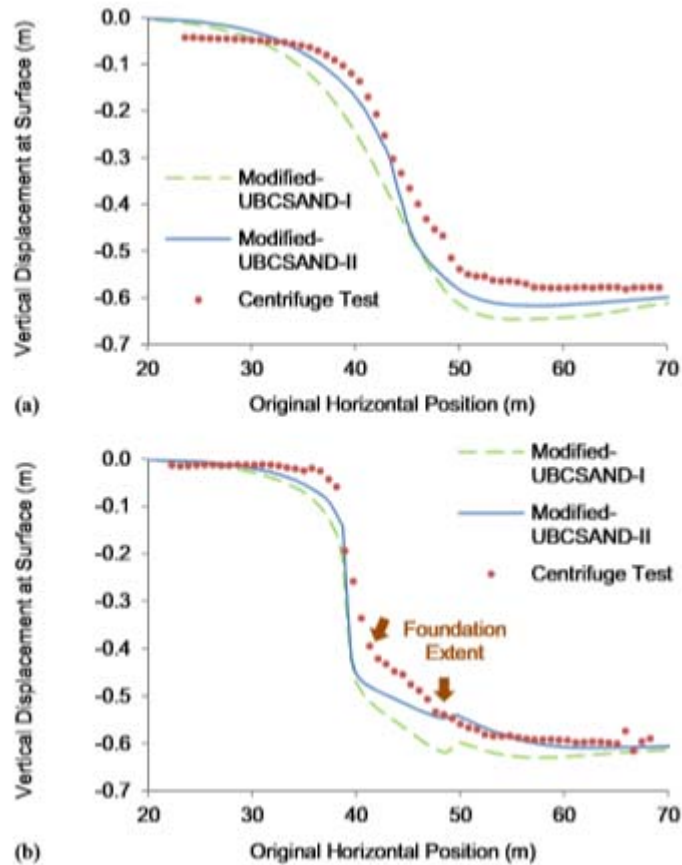
Σχήμα 2.2: Κανονικοποιημένο μήκος της επιφάνειας του εδάφους στο οποίο η κλίση ξεπέρασε την τιμή 0.2% συναρτήσει του είδους του εδάφους και της γωνίας διάρρηξης β .

Αρκετά πρόσφατα, οι Oettle and Bray (2013, 2016) βελτίωσαν το -σε πρώτη φάση προταθέν για την επίλυση προβλημάτων ρευστοποίησης- προσομοίωμα UBCSAND των Byrne et al. (2004) προκειμένου να προσομοιώνει ακριβέστερα το πρόβλημα της διάδοσης ρήγματος σε αμμόδεις στρώσεις. Υπογραμμίζεται πως οι εν λόγω εργασίες αποτελούν ίσως τις ακριβέστερες προσεγγίσεις στο πρόβλημα διάδοσης διάρρηξης ρηγμάτων της βιβλιογραφίας, καθώς χρησιμοποιούν το πλέον σοφιστευμένο προσομοίωμα για τη συμπεριφορά άμμων. Συγκεκριμένα, ακόμη και η αρχική μορφή του προσομοιώματος ήδη περιέγραφε ικανοποιητικά τη μη-γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, την εξάρτηση της απόκρισης από το επίπεδο της μέσης τάσης και την ογκομετρική απόκριση του εδάφους. Η βελτίωση της ακρίβειας συνίσταται στην προσθήκη μη-γραμμικής και εξαρτώμενης από την τάση επιφάνειας αστοχίας, αλλά και ακριβέστερης περιγραφής της χαλάρωσης του εδάφους μετά την μέγιστη αντοχή και μέχρι την Κρίσιμη Κατάσταση. Δημιουργήθηκε ως εκ τούτου το προσομοίωμα UBCSAND-I, η ακρίβεια του οποίου διερευνήθηκε αρχικά συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων (σε λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC) με αντίστοιχα πειράματα φυγοκεντριστή, για την διάδοση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος γωνίας 60° εντός αμμόδους στρώσης πάχους 15m. Τα αποτελέσματα συνέκλιναν αρκετά ικανοποιητικά για το κανονικό ρήγμα, αλλά λιγότερο για το ανάστροφο. Συγκεκριμένα, η κλίση της διάρρηξης από το υπόβαθρο μέχρι την επιφάνεια του εδάφους προβλέφθηκε με ακρίβεια και στις δύο περιπτώσεις ρηγμάτων. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και για την διαστολικότητα της άμμου στην

περίπτωση του κανονικού ρήγματος χωρίς όμως αυτό να επιτυγχάνεται εξίσου για το ανάστροφο ρήγμα. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε μικρή αλλά συστηματική διαφορά στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια της άμμου μεταξύ πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων. Το πρώτο πρόβλημα διορθώθηκε μέσω της βελτίωσης της απόκρισης του εδάφους αφού φτάσει στην αντοχή του, ήτοι μέσω της πιο γρήγορης (σε όρους συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης) μετάβασης στην κατάσταση Κρίσιμης Κατάστασης. Για την επίλυση του δεύτερου προβλήματος και λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη επίδραση της διαστολικότητας στο εν λόγω πρόβλημα, ο νόμος ροής του προσομοιώματος βελτιώθηκε μέσω της μείωσης του λόγου τάσεων (stress ratio) στον οποίο η ογκομετρική παραμόρφωση του εδάφους εμπίπτει από συστολική σε διαστολική. Δημιουργήθηκε επομένως μέσω των παραπάνω προσθηκών το προσομοίωμα UBCSAND-II, η ακρίβεια του οποίου επιβεβαιώθηκε τόσο για τις προαναφερθείσες αναλύσεις ελεύθερου πεδίου, όσο και για αριθμητικές αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής, με την σύγκριση να γίνεται με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών φυγοκεντριστή των Bransby et al. (2008a, 2008b) που εκεταμένα παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.2. Οι αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής πραγματοποιήθηκαν επίσης και με το UBCSAND-I, ενώ βασικό συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι συγγραφείς είναι η ικανοποιητική ακρίβεια των δύο βελτιωμένων προσομοιωμάτων για πρακτική εκτίμηση του προβλήματος.



Σχήμα 2.3: Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάδοση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=60^\circ$ (a) υπό ελεύθερο πεδίο (b) με ταυτόχρονη ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους $B=10\text{m}$, φορτίου $q=91\text{kPa}$ και απόστασης του άκρου της από την θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο $s=5.9\text{m}$: σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων (Oettle and Bray 2016).



Σχήμα 2.4: Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάδοση διάρρηξης κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=60^\circ$ (a) υπό ελεύθερο πεδίο (b) με ταυτόχρονη ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους $B=10\text{m}$, φορτίου $q=91\text{kPa}$ και απόστασης του άκρου της από την θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο $s=3.0\text{m}$: σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων (Oettle and Bray 2016).

Υπογραμμίζεται, παρόλα αυτά, ότι ενώ οι εργασίες των Oettle and Bray (2013, 2016) χρησιμοποιούν σοφιστευμένα ελαστο-πλαστικά προσομοιώματα Κρίσιμης Κατάστασης, αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη τους την ανισοτροπία του εδάφους. Η σημασία αυτής της παράβλεψης φάνηκε από την αδυναμία των αναλύσεων για ακριβή πρόβλεψη της χαλάρωσης και διαστολικότητας της άμμου και εν μέρει λήφθηκε υπόψιν στο UBCSAND-II μέσω της διαφορετικής βαθμονόμησης του στην περίπτωση ανάστροφου και κανονικού ρήγματος.

2.2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

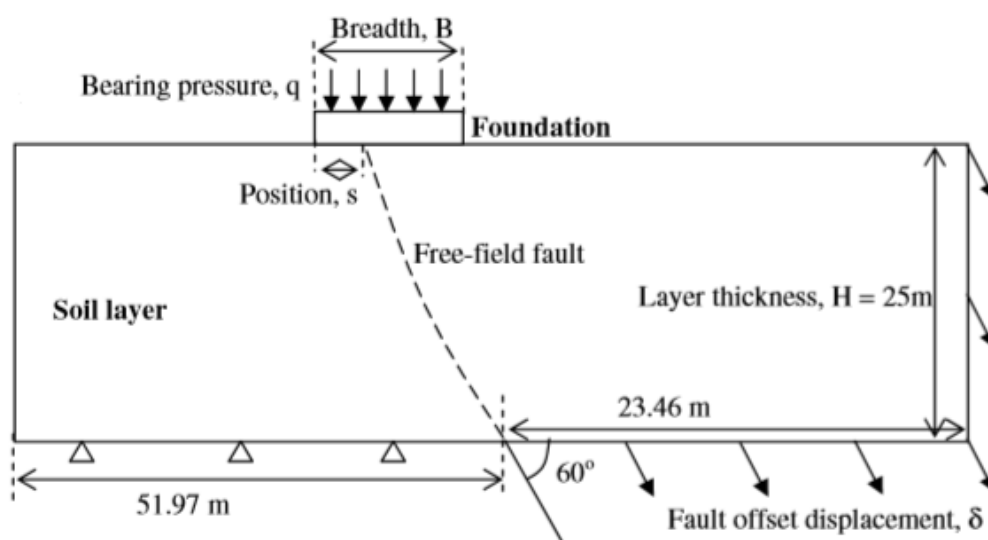
Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε αδρή παρουσίαση επιλεγμένων αριθμητικών μελετών που αφορούν στη διάρρηξη ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει απασχολήσει τους Πολιτικούς Μηχανικούς, κυρίως όσον αφορά στον καθορισμό της ζώνης διάρρηξης και του εύρους της επιφάνειας του εδάφους που αυτή επηρεάζει, με απώτερο στόχο την αποφυγή δόμησης σε περιοχές εντός της. Ωστόσο, οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για χρήση γης, σε συνδυασμό με την δυσκολία της ακριβούς γνώσης της θέσης όλων των πιθανών ρηγμάτων (ειδικά αν καλύπτονται από εδαφικές στρώσεις) καθιστούν αναγκαία όχι μόνο την μελέτη της

διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο αλλά και με την ύπαρξη γειτονικών κατασκευών. Η ανάγκη αυτή ενισχύεται πέραν των άλλων και από την επίδραση της ίδιας της κατασκευής στο πρόβλημα, καθώς η παρουσία της επηρεάζει την ευκολία ή και τη θέση ανάδυσής της. Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην διερεύνηση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής και επιλεγμένες από τις μελέτες της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Από τις πρώτες μελέτες στις οποίες εξετάστηκε το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης επιφανειακής κατασκευής-ρήγματος ήταν εκείνη του Berrill (1983). Στόχος της διερεύνησης ήταν ο προσδιορισμός μέσω κλειστών αναλυτικών σχέσεων των συνθηκών κάτω από τις οποίες η ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια ομοιόμορφης στρώσης εκτρέπει την διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης. Για την εύρεση τους έγινε υπόθεση σταθερής θέσης της κατασκευής ακριβώς πάνω από το ίχνος του ρήγματος στο βραχώδες υπόβαθρο, ενώ έγιναν δύο σημαντικές απλοποιητικές παραδοχές: η διάσταση της κατασκευής που βρίσκεται παράλληλα στο ρήγμα λήφθηκε ως απειρομήκης και η ορθή τάση εντός των επιφανειών αστοχίας λήφθηκε ίση με την γεωστατική τάση προσαυξημένη με την μέση πίεση που προκαλεί το φορτίο της κατασκευής. Θεωρώντας αντοχή θεμελίου επαρκή ώστε να μην μπορεί να διέλθει η διάρρηξη εντός του, έγινε υπόθεση τριών (3) μηχανισμών αστοχίας με την εμφάνιση καθενός από αυτούς να υπολογίζεται τελικά συναρτήσει των χαρακτηριστικών του θεμελίου (πλάτους, φορτίου) και του εδάφους (συνοχή, ειδικό βάρος, γωνία τριβής, πάχος στρώσης). Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια επαλήθευσης των αναλυτικών σχέσεων μέσω μιας σειράς απλών πειραμάτων 1g με χρήση κουτιού άμμου. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι πως τόσο σε συνεκτικά όσο και μη συνεκτικά εδάφη, μια κατασκευή επαρκούς φορτίου μπορεί να εκτρέψει την αρχική πορεία της διάρρηξης, υπό την προϋπόθεση μιας σχετικά βαθιάς υποκείμενης στρώσης. Μάλιστα για μηδενική συνοχή εδάφους (π.χ. άμμος) η τιμή του φορτίου q' που απαιτείται για εκτροπή υπολογίστηκε αναλυτικώς να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $(0.2 - 0.4) \rho g b$ όπου b το ημιπλάτος του πεδύλου και ρg το ειδικό βάρος του υποκείμενου εδάφους. Ωστόσο, τα πειράματα επαλήθευσης έδειξαν πως η τιμή του φορτίου που απαιτείται στην πράξη προκύπτει περίπου διπλάσια από εκείνη που προβλέπουν οι αναλυτικές σχέσεις, υποδεικνύοντας το μη συντηρητικό των εκτιμήσεων τους και την ανάγκη περαιτέρω έρευνας στο αντικείμενο.

Αρκετά αργότερα, οι Bransby et al. (2008a, 2008b) εκτέλεσαν πειράματα φυγοκεντριστή για την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης επιφανειακής κατασκευής-ρήγματος. Αφενός, στόχος της έρευνας ήταν η εκτίμηση της επίδρασης που έχει η τοποθέτηση κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης στη διάδοση της διάρρηξης του ρήγματος και αφετέρου η παραμετρική διερεύνηση των χαρακτηριστικών της κατασκευής που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του προβλήματος. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ρήγματος, ένα κανονικό (2008a) και ένα ανάστροφο (2008b) με την γωνία διάδοσης στο υπόβαθρο να είναι και στα δύο ρήγματα ίση με 60° , ενώ σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε άμμος Fontainebleau σχετικής πυκνότητας κοντά στην τιμή $D_r = 60\%$. Η χρήση φυγοκεντριστή επέτρεψε την πραγματική αντιστοιχία της άμμου σε πάχος στρώσης $H = 25\text{m}$ για το κανονικό ρήγμα και $H = 15\text{m}$ για το ανάστροφο. Για κάθε περίπτωση ρήγματος πραγματοποιήθηκαν έξι (6) πειράματα με το πρώτο εξ αυτών να αφορά τη διάδοση του υπό συνθήκες ελευθέρου

πεδίου και τα υπόλοιπα την αλληλεπίδραση με επιφανειακή κατασκευή μεταβλητού φορτίου, πλάτους, θέσης και δυσκαμψίας ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών στο πρόβλημα. Σημειώνεται πως στις περιπτώσεις που τοποθετήθηκε κατασκευή εκείνη είχε τραχεία βάση, ενώ προκειμένου να εξασφαλιστούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης καταλάμβανε όλο το μήκος της στρώσης. Παρακάτω, στο **Σχήμα 2.5** φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος για την περίπτωση της διάρρηξης κανονικού ρήγματος (με την μοναδική διαφορά του συγκριτικά με το ανάστροφο να είναι στο πάχος της στρώσης), ενώ στον **Πίνακα 2.1** δίνονται τα δεδομένα όλων των εκτελεσθέντων πειραμάτων.



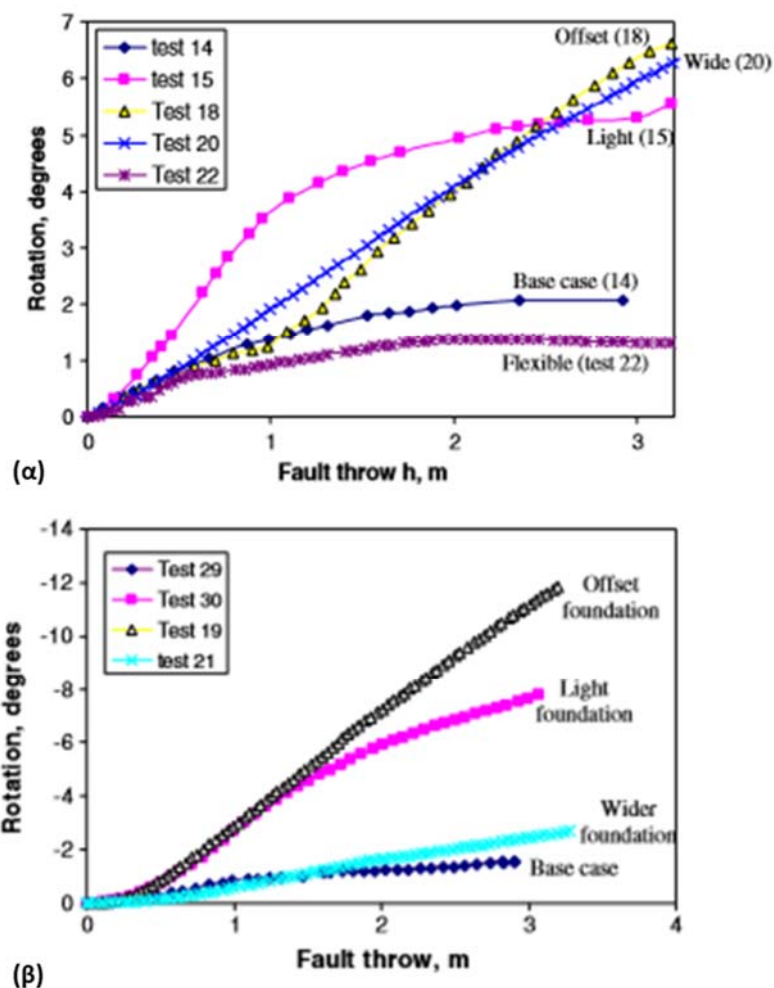
Σχήμα 2.5: Γεωμετρία του πειράματος προσομοίωσης της διάδοσης κανονικού ρήγματος υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής (Bransby et al. 2008a).

| Test identifier | Footing breadth (m) | Bearing pressure (kPa) | Fault position [s (s/B)] | Test identifier | Footing breadth (m) | Bearing pressure (kPa) | Fault position, s (s/B) |
|-----------------|---------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
| 12 | – | – | – | 28 | – | – | – |
| 14 | 10 | 91 | 3.0m(0.3) | 29 | 10 | 91 | 5.9m (0.59) |
| 15 | 10 | 37 | 3.1m(0.31) | 30 | 10 | 37 | 5.9m (0.59) |
| 18 | 10 | 91 | 8.5m(0.85) | 19 | 10 | 91 | 0.8m (0.08) |
| 20 | 25 | 91 | 10.9m(0.44) | 21 | 15 | 91 | 8.28m (0.55) |
| 22 | 9.43 (flexible) | 91 | 3.2m(0.34) | 23 | 9.43 (flexible) | 91 | 5.9m (0.59) |

Πίνακας 2.1: Δεδομένα των πειραμάτων προσομοίωσης διάρρηξης (α) κανονικού ρήγματος και (β) ανάστροφου ρήγματος υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής (Bransby et al. 2008a, 2008b).

Το βασικό συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν πως σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει εκτροπή της θέσης και της μορφής της διάρρηξης, αλλά και να επηρεάσει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυσή της. Η δυσκαμψία της κατασκευής δεν επηρέασε τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος κάτι το οποίο όμως δεν ίσχυε και για την περίπτωση του ανάστροφου. Και στις δύο περιπτώσεις, το πλάτος, το

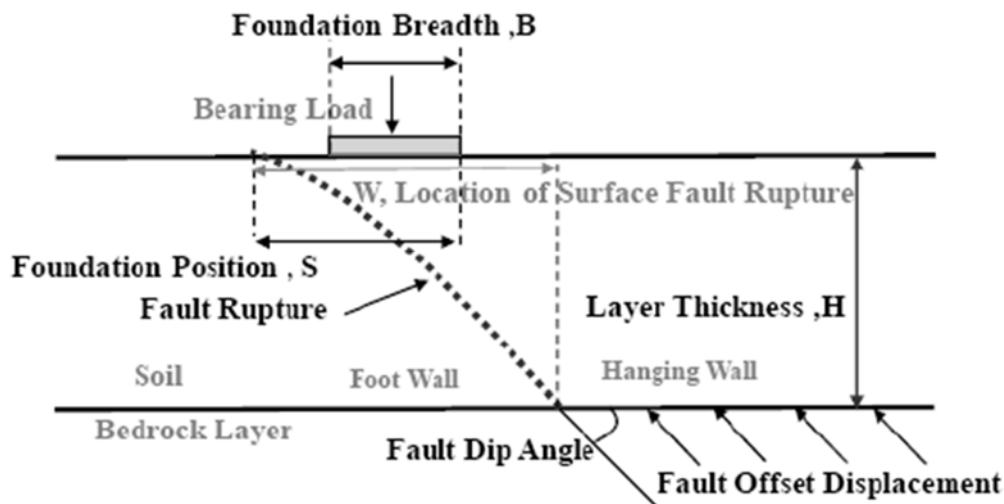
φορτίο και η θέση της κατασκευής αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους για την πορεία της διάρρηξης και την απόκριση της ίδιας της κατασκευής. Συγκεκριμένα, στο κανονικό ρήγμα η αύξηση του πλάτους οδήγησε σε αύξηση της στροφής της κατασκευής ακόμα και σε μετακινήσεις ρήγματος που η στροφή κατασκευής μικρότερου πλάτους είχε σταθεροποιηθεί, ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε η απαιτούμενη κατακόρυφη μετακίνηση του κινούμενου τεμάχους για την ανάδυση της διάρρηξης στη επιφάνεια. Αντίθετα, στο ανάστροφο ρήγμα, η αύξηση του πλάτους οδήγησε σε μικρότερες στροφές της κατασκευής για μικρές μετακινήσεις ρήγματος, εικόνα η οποία αντιστράφηκε για τις μεγάλες μετακινήσεις. Επίσης, η μείωση του φορτίου στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες στροφές της κατασκευής, ενώ για το ανάστροφο δεν μπόρεσε καν να εκτρέψει επαρκώς την διάρρηξη ώστε να μην αναδύεται στο έδαφος από κάτω της. Τέλος, η κρίσιμη επίδραση της θέσης της κατασκευής οδήγησε τους συγγραφείς στην πεποίθηση πως η ασφάλεια στον σχεδιασμό της κοντά σε ρήγμα που το ίχνος του δεν εντοπίζεται με ακρίβεια στο υπόβαθρο καθιστά αναγκαία την διερεύνηση όλων των πιθανών περιπτώσεων.



Σχήμα 2.6: Εξέλιξη της στροφής των θεμελιών που εξετάστηκαν για την περίπτωση αλληλεπίδρασης με διάρρηξη (α) κανονικού ρήγματος και (β) ανάστροφου ρήγματος συναρτήσεως της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος. (Bransby et al. 2008a, 2008b).

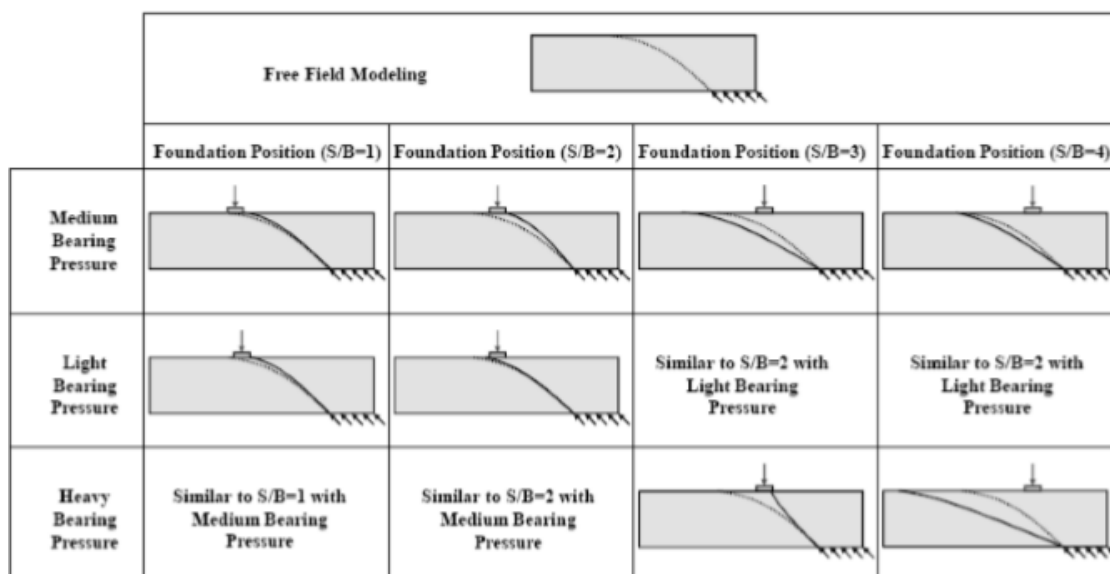
Κατανοώντας την αυξανόμενη ανάγκη για αριθμητική επίλυση του προβλήματος, οι Baziar et al. (2014) προσπάθησαν να προσομοιώσουν την περίπτωση που πειραματικώς μελέτησαν οι Bransby et al. (2008a, 2008b) με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Για την καταστατική προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό ιστροπικό Mohr-Coulomb με χαλάρωση των Anastasopoulos and Gazetas (2007a, 2007b), βλέπε παράγραφο 2.1 ανωτέρω, ενώ η τοποθετούμενη κατασκευή λήφθηκε ως άκαμπτη πάχους ενός μέτρου, με γραμμικώς ελαστική απόκριση και δυνατότητα ανασηκώματος από την επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση, συγκρίνοντας προσέγγισαν ικανοποιητικά εκείνα των πειραματικών μετρήσεων, σε ό,τι αφορά στην προκύπτουσα ζώνη διάρρηξης όσο και στην στροφή του θεμελίου. Ωστόσο, υπογραμμίστηκε ότι σε ορισμένες αριθμητικές προσεγγίσεις και συγκεκριμένα σε εκείνες που η μετατόπιση του εδάφους είχε την μορφή ρηγματώσεων παρατηρήθηκε αύξηση της απόκλισης των αποτελεσμάτων με την αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος, η παρατήρηση αυτή όμως αποδόθηκε στην μεγάλη πυκνότητα των στοιχείων διακριτοποίησης και όχι στο καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε. Εκτός από τα παραπάνω συμπεράσματα, επιβεβαιώθηκε η ήδη παρατηρηθείσα από τους Bransby et al. (2008a, 2008b) επίδραση του φορτίου, της θέσης και του πλάτους της κατασκευής, ενώ έγινε η επιπρόσθετη παρατήρηση της αποκόλλησης της κατασκευής στις πραγματοποιηθείσες αναλύσεις διάρρηξης κανονικού ρήγματος, γεγονός το οποίο δεν αναφέρεται από τους προηγούμενους ερευνητές.

Οι Moosavi et al. (2010) εκτέλεσαν πειράματα υπό συνθήκες 1g για τη διερεύνηση της αλληλεπίδραση ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση ενός ανάστροφου ρήγματος γωνίας 45° εντός ξηρής στρώσης άμμου Firoozkooh σχετικής πυκνότητας $D_r=85\%$ και πάχους $H=20\text{cm}$, ενώ η γεωμετρία της προσομοίωσης αποτυπώνεται γραφικά στο **Σχήμα 2.7**.



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία του πειράματος προσομοίωσης της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος κλίσης $\beta=135^\circ$ υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους $B=5\text{cm}$ (Moosavi et al 2010).

Το πρώτο πείραμα έγινε υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου ενώ για τα υπόλοιπα ένα άκαμπτο θεμέλιο πλάτους $B=5\text{cm}$ τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους για την προσομοίωση εδαφικής κατασκευής. Σε κάθε ένα από τα πειράματα αλληλεπίδρασης εξετάστηκε αφενός η επίδραση του φορτίου της ανωδομής του θεμελίου, με το μέγεθός του να λαμβάνει τις τιμές $q=1.25\text{kPa}$, $q=3.75\text{kPa}$ και $q=8.75\text{kPa}$ και αφετέρου η επίδραση της θέσης τοποθέτησης του, με τον λόγο s/B να λαμβάνεται ίσος με $s/B = 1, 2, 3$ και 4 . Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε το αδρό συμπέρασμα πως τόσο η θέση όσο και το φορτίο που η κατασκευή επιβάλλει στο έδαφος αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την εξέλιξη του φαινομένου. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε πως ανεξαρτήτως φορτίου τα θεμέλια που τοποθετήθηκαν κοντά στο σταθερό τέμαχος ($s/B=1$), όπως αυτό προέκυψε με βάση τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου, δεν επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό. Το ίδιο συνέβη και σε όσα βρέθηκαν αρχικά στο κινούμενο τέμαχος, αλλά σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την θέση ανάδυσης της διάρρηξης ($s/B=4$). Όσον αφορά στο μέγεθος του φορτίου, η μείωση του οδήγησε σε συγκριτικά δυσμενέστερα αποτελέσματα (τελική θέση κατασκευής στο κινούμενο τέμαχος και μεγαλύτερες στροφές), ενώ το αντίθετο συνέβη με την αύξησή του. Σημειώνεται πάντως πως λόγω σχετικά μικρής τιμής του λόγου B/H ($=4$) δεν εμφανίστηκε η περίπτωση ανάδυσης της διάρρηξης ακριβώς κάτω από το θεμέλιο, η οποία και έχει παρατηρηθεί αρκετές φορές τόσο σε αντίστοιχες μελέτες όσο και στο πεδίο.



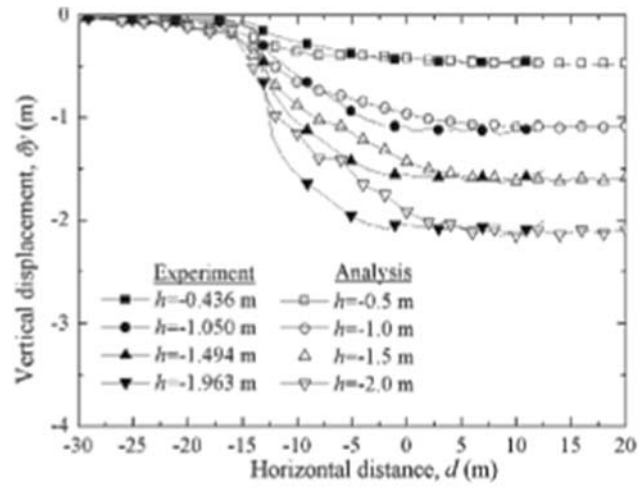
Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της τελικής θέσης της διάρρηξης για αλληλεπίδραση ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ με επιφανειακή κατασκευή πλάτους $B=5\text{cm}$ και όλους τους συνδιασμούς φορτίου ($q=1.25\text{kPa}$, 3.75kPa και $q=8.75$) και σχετικής θέσης ($s/B=1,2,3$ και 4) της κατασκευής (Moosavi et al 2010).

Πρόσφατα, οι Rokonzaman et al. (2014) προσπάθησαν να προσεγγίσουν το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής αριθμητικώς, μέσω της δημιουργίας ενός σοφιστευμένου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος κατάλληλο για χρήση σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το εν λόγω προσομοίωμα ακολουθεί μη συσχετισμένο νόμο ροής ενώ λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τάσης και της

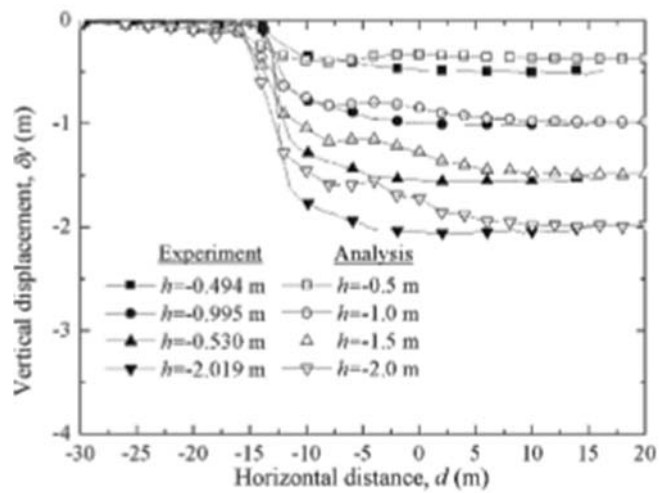
κατεύθυνσης φόρτισης (γωνίας Lode) στην αντοχή και διαστολικότητα του εδάφους. Ταυτόχρονα, προσπαθεί να μειώσει την επίδραση της πυκνότητας της διακριτοποίησης στο πρόβλημα, εισάγοντας μια νέα παράμετρο $S=F_b/F_e$ (όπου σε κάθε στοιχείο F_b είναι η επιφάνεια που υφίσταται διατμητικές παραμορφώσεις και F_e η συνολική του επιφάνεια) για τον υπολογισμό της συνολικής επαυξητικής παραμόρφωσης. Προκειμένου να γίνει χρήση του νέου προσομοιώματος, έγινε βαθμονόμηση σε άμμο Fontainebleau σχετικής πυκνότητας $D_r=63\%$ ώστε η απόκριση του εδάφους σε δοκιμή άμεσης διάτμησης μέσω της αριθμητικής προσέγγισης να ταυτίζεται με εκείνη των αντίστοιχων πειραμάτων. Έχοντας αυτή την βαθμονόμηση της άμμου ως δεδομένη, έγινε σύγκριση των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων για το συνοριακό πρόβλημα της διάρρηξης κανονικού ρήγματος γωνίας 60° . Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση της διάρρηξης χωρίς την ύπαρξη κατασκευής (Test 12_R2) και στη συνέχεια η αλληλεπίδραση κατασκευής-ρήγματος μέσω της τοποθέτησης άκαμπτου επιφανειακού θεμελίου ακριβώς πάνω στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Υπογραμμίζεται πως δεν διερευνήθηκε η επίδραση του πλάτους και της θέσης της κατασκευής στο πρόβλημα, παρά μόνο εξετάστηκαν δύο διαφορετικά φορτία τιμής 37kPa (Test 15) και 91kPa (Test_14R) αντίστοιχα. Η σύγκριση σε όρους καθίζησης της επιφάνειας της στρώσης, απαιτούμενης κατακόρυφης μετακίνησης ρήγματος για ανάδυση της κύριας διάρρηξης στην επιφάνεια, μέσης γωνίας διάδοσης της διάρρηξης και οριζόντιας έκτασης της επιφάνειας του εδάφους που έχει παραμορφωθεί λόγω της διάρρηξης έδωσε καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικής ανάλυσης και πειραμάτων. Επίσης, προέκυψε ότι η απαιτούμενη μετακίνηση του ρήγματος που χρειάζεται για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη της κατασκευής. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη της μπορεί να οδηγήσει σε εκτροπή της διάρρηξης και ταυτόχρονα η ίδια η κατασκευή να καταπονηθεί από μεγάλη γωνία στροφής, το μέγεθος της οποίας μειώνεται με την αύξηση του φορτίου και σε κάθε περίπτωση μόλις η κύρια διάρρηξη φτάσει στην επιφάνεια. Τονίζεται ωστόσο από τους ίδιους τους συγγραφείς η ανάγκη περαιτέρω επαλήθευσης της ακρίβειας του νέου προσομοιώματος μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα περισσότερων πειραμάτων αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.

| Test name | h/m | | Δ^p | |
|------------|-------|------|------------|------|
| | Exp. | FEM | Exp. | FEM |
| Test 12_R2 | -1.04 | -1.1 | 65 | 61 |
| Test 15 | -1.0 | -1.1 | 63 | 57.8 |
| Test 14_R | -0.98 | -1.1 | 62.8 | 57.3 |

Πίνακας 2.2: Κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος και μέση γωνία διάδοσης της διάρρηξης τη χρονική στιγμή ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους :σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων (Rokonuzzaman et al. 2014)



(a)



(b)

Σχήμα 2.9: Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για αλληλεπίδραση ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=60^\circ$ με κατασκευή πλάτους $B=87\text{mm}$ τοποθετημένη στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο και φορτίου (a) $q=37\text{kPa}$ και (b) $q=91\text{kPa}$:σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων (Rokonuzzaman et al. 2014)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τρία (3) καταστατικά προσομοιώματα που θα χρησιμοποιηθούν, η βαθμονόμησή τους και τα αποτελέσματα χρήσης τους τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και στο φυσικό πρόβλημα της διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι μπαίνει το υπόβαθρο για τη μετέπειτα παραμετρική χρήση τους στο πιο σύνθετο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος – κατασκευής.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται 3 προσομοιώματα:

- το απλό προσομοίωμα **STRAIN SOFTENING (SS)**, που είναι ένα ιστροπικό ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, με τη διαφορά ότι οι γωνίες τριβής και διαστολικότητας είναι συνάρτηση της συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης, αλλά όχι της κατεύθυνσης φόρτισης (γωνία Lode). Για αλλαγή στο επίπεδο της τάσης και του δείκτη πόρων χρειάζεται ανα-βαθμονόμηση των 7 σταθερών του.
- το πολύπλοκο προσομοίωμα **SANISAND-R (S-R)**, που είναι ένα ιστροπικό ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα της οικογένειας SANISAND, που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τάσης και του δείκτη πόρων (μέσω της παραμέτρου κατάστασης ψ) και της κατεύθυνσης φόρτισης (γωνία Lode) στην αντοχή και τη διαστολικότητα, χωρίς ανάγκη ανα-βαθμονόμησης των 12 σταθερών του.
- το σοφιστευμένο προσομοίωμα **SANISAND-FR (S-FR)**, που είναι ένα ανιστροπικό ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα της οικογένειας SANISAND, που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τάσης, του δείκτη πόρων, της γωνίας Lode, αλλά και της εξελισσόμενης δομής των κόκκων στην αντοχή και τη διαστολικότητα, χωρίς ανάγκη ανα-βαθμονόμησης των 16 σταθερών του (Papadimitriou et al. 2019).

Υπογραμμίζεται ότι το προσομοίωμα **S-R** προκύπτει από το **S-FR**, μηδενίζοντας την επίδραση της εξελισσόμενης δομής των κόκκων (μηδενίζοντας 4 από τις 16 σταθερές), αλλά για να δίνει την ίδια απόκριση χρειάζεται ανα-βαθμονόμηση κάποιων εκ των υπόλοιπων 12 παραμέτρων του. Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία θεωρούνται ως δύο εντελώς διαφορετικά προσομοιώματα, ώστε να γίνει κριτική επί της ακρίβειάς τους, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες τους.

Πιο συγκεκριμένα, στην παράγραφο 3.2 γίνεται η διερεύνηση της επίδρασης της πολυπλοκότητας του καταστατικού προσομοιώματος σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου (τριαξονικές δοκιμές). Στη συνέχεια, στην παράγραφο 3.3 γίνεται το ίδιο σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών, δηλαδή σε σύγκριση με δοκιμή φυγοκεντρική για διάρρηξη κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Από εκεί και πέρα, στην παράγραφο 3.4 χρησιμοποιείται μόνο το σοφιστευμένο προσομοίωμα (δηλαδή διατηρείται σταθερό το επίπεδο της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος), και

διερευνάται η επίδραση της δομής της άμμου, συγκρίνοντας την απόκριση για τη συνήθη «**οριζόντια δομή**» κόκκων (όπως προκύπτει από την απόθεση λόγω βαρύτητας, δηλαδή έχοντας μια εγκάρσια ισότροπη δομή με επίπεδο απόθεσης γωνίας $\delta = 0^\circ$ ως προς την οριζόντια) και μια ακραία «**κατακόρυφη δομή**» κόκκων (όπως προκύπτει από τη στροφή κατά 90° ενός δοκιμίου που είχε αποτεθεί κανονικά μέσω βαρύτητας, ήτοι επίπεδο απόθεσης $\delta = 90^\circ$). Εδώ η διερεύνηση γίνεται σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου (τριαξονικές δοκιμές), καθώς σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών διερευνάται σε ξεχωριστό κεφάλαιο, και το κεφάλαιο κλείνει με κάποια πρώτα βασικά συμπεράσματα στην παράγραφο 3.5.

3.2 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Αρχικώς, και τα 3 προσομοιώματα βαθμονομήθηκαν να δίνουν ακριβώς την ίδια απόκριση για στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη (TC), και μάλιστα σε 4 διαφορετικά επίπεδα τάσεων. Επιλέχτηκε η TC, γιατί είναι η συνηθέστερα εκτελούμενη δοκιμή διάτμησης στο εργαστήριο, ενώ τα 4 επίπεδα τάσεων κρίθηκαν αναγκαία για να μπορεί, εν δυνάμει, να προσομοιωθεί επιτυχώς η απόκριση σε όλα τα βάθη μιας εδαφικής στρώσης με όλα τα προσομοιώματα.

Ως απόκριση-στόχος θεωρείται εκείνη του σοφιστευμένου S-FR, καθώς αποτυπώνει με μεγάλη ακρίβεια την απόκριση της άμμου Toyoura για οποιοδήποτε επίπεδο τάσης, δείκτη πόρων και οποιαδήποτε διεύθυνση της δομής (Papadimitriou et al. 2019). Συγκεκριμένα, οι τιμές των σταθερών του δίνονται στον **Πίνακα 3.1 (αριστερή στήλη)**. Η επιλογή βαθμονόμησης σε άμμο Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta = 0^\circ$) συνδέεται με το γεγονός ότι η δοκιμή φυγοκεντρική των Cai et al. (2016) που χρησιμοποιείται στην παράγραφο 3.2.2 χρησιμοποιεί αυτή την άμμο με τέτοια δομή κόκκων.

Επιπλέον, η εν λόγω δοκιμή φυγοκεντρική αφορά σε στρώση πάχους 20m (από άμμο Toyoura με $\delta=0^\circ$) με σχετική πυκνότητα $D_r = 65\%$. Έτσι, στην παρούσα παράγραφο, για τη βαθμονόμηση και των SS και S-R επιλέχτηκε η απόκριση του S-FR σε τριαξονική θλίψη (TC) για αυτή τη σχετική πυκνότητα D_r και ως τιμές για τα 4 επίπεδα τάσεων επιλέχθηκαν οι τάσεις σε βάθη $z = 1, 5, 12.5$ και 20m, δηλαδή τάσεις ίσες με 15, 75, 187 και 300kPa, αντίστοιχα). Η επιλογή της τάσης σε $z = 20m$ (μέγιστη τάση) σχετίζεται και με τις αναμενόμενες τάσεις σε μικρότερα βάθη (π.χ. $z = 10m$), όταν στην επιφάνεια υπάρχει κατασκευή (μεγάλου) φορτίου, καθώς στην παρούσα εργασία διερευνώνται και τέτοιες περιπτώσεις προβλημάτων συνοριακών τιμών.

Συγκεκριμένα, οι τιμές των σταθερών των προσομοιωμάτων S-R και SS που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση σε δοκιμές TC σε βάθη $z = 1, 5, 12.5$ και 20m παρουσιάζονται στους **Πίνακες 3.1 (δεξιά στήλη)** και **3.2**, αντίστοιχα. Επισημαίνεται εδώ ότι καθώς το προσομοίωμα SS θεωρεί σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας E, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θεωρείται παραβολική αύξηση του E με το βάθος με βάση τη σχέση που συμπεριλαμβάνεται στον **Πίνακα 3.2** (έτσι για το E χρειάζονται τιμές 2 παραμέτρων του SS, ήτοι η σταθερά 1500 και ο εκθέτης 0.5).

Με βάση αυτή την βαθμονόμηση προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 3.1**, όπου συγκρίνονται οι σχέσεις διατμητικής τάσης $q=(\sigma_1-\sigma_3)$ – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_1 (άνω υπο-σχήματα) και ογκομετρικής παραμόρφωσης – αξονική παραμόρφωση ϵ_1 (κάτω υπο-σχήματα), για τα 4 επίπεδα τάσεων (4 τιμές βάθους z).

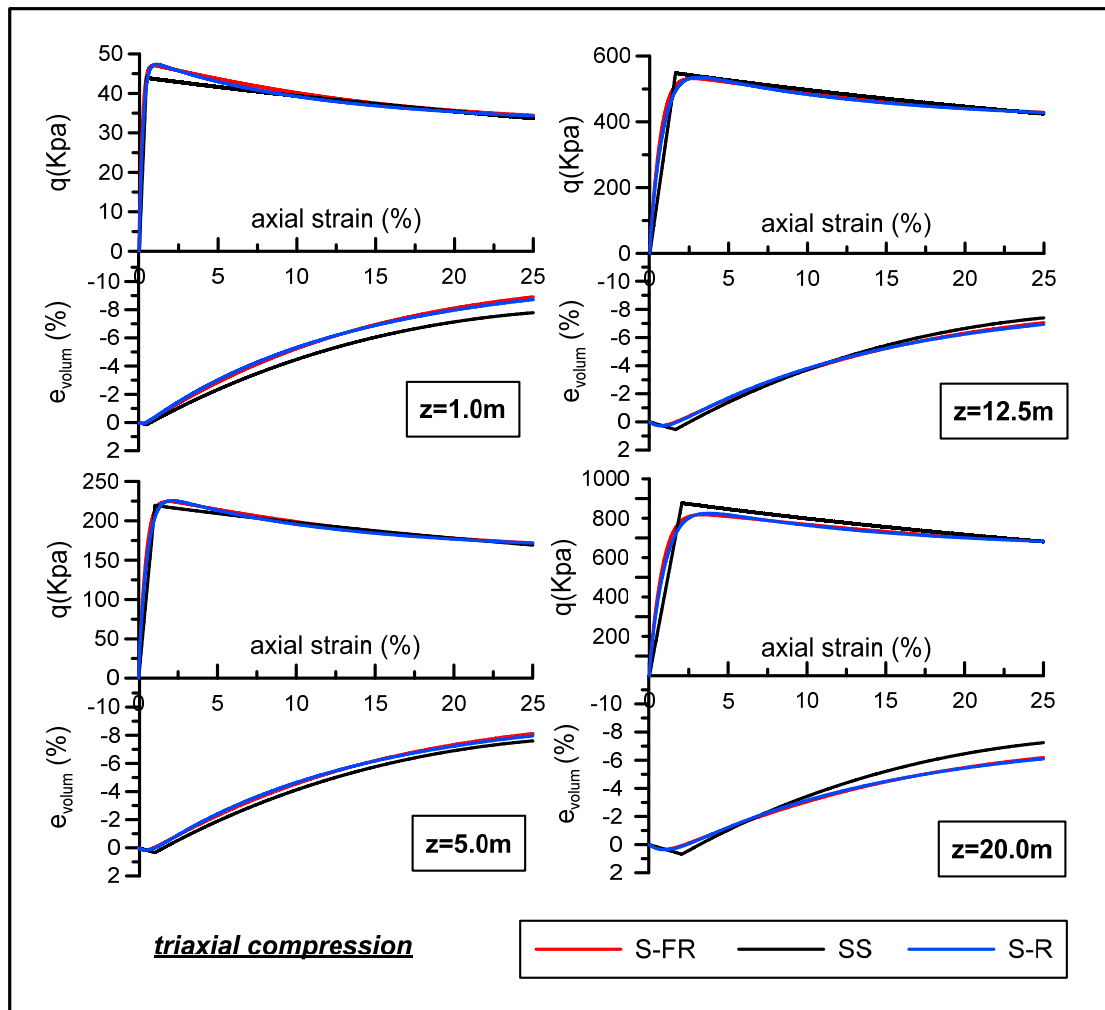
| Παράμετρος | Τιμή για S-FR | Τιμή για S-R |
|-------------|---------------|--------------|
| G_o | 125 | 125 |
| ν | 0.05 | 0.05 |
| M_c^c | 1.25 | 1.25 |
| c | 0.75 | 0.75 |
| e_o | 0.934 | 0.934 |
| λ_c | 0.019 | 0.019 |
| ξ | 0.70 | 0.70 |
| h_1 | 7.5 | 11.0 |
| c_h | 0.85 | 0.85 |
| n^b | 1.4 | 1.15 |
| A_o | 0.704 | 0.90 |
| n^d | 3.5 | 2.0 |
| e_A | 0.0818 | 0.0 |
| F_{in} | 0.5 | 0.0 |
| c_o | 5.2 | 0.0 |
| h_2 | 1.3 | 0.0 |

Πίνακας 3.1. Τιμές παραμέτρων προσομοιώματων S-FR (Papadimitriou et al. 2019) και S-R έπειτα από βαθμονόμηση σε στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη (TC) για άμμο Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$), $D_r = 65\%$ και 4 επίπεδα τάσεων.

| Παράμετρος προσομοιώματος SS | Τιμή |
|--|-------------------|
| Μέγιστη γωνία τριβής ϕ_p | 36.5° |
| Παραμένουσα γωνία τριβής ϕ_{res} | 31° |
| Μέγιστη γωνία διαστολικότητας ψ | 13.5° |
| Πλάστική παραμόρφωση ως την κρίσιμη κατάσταση ϵ_p^q | 35% |
| Μέτρο ελαστικότητας Young E (Kpa) | $1500 z(m)^{0.5}$ |
| Λόγος Poisson ν | 0.33 |

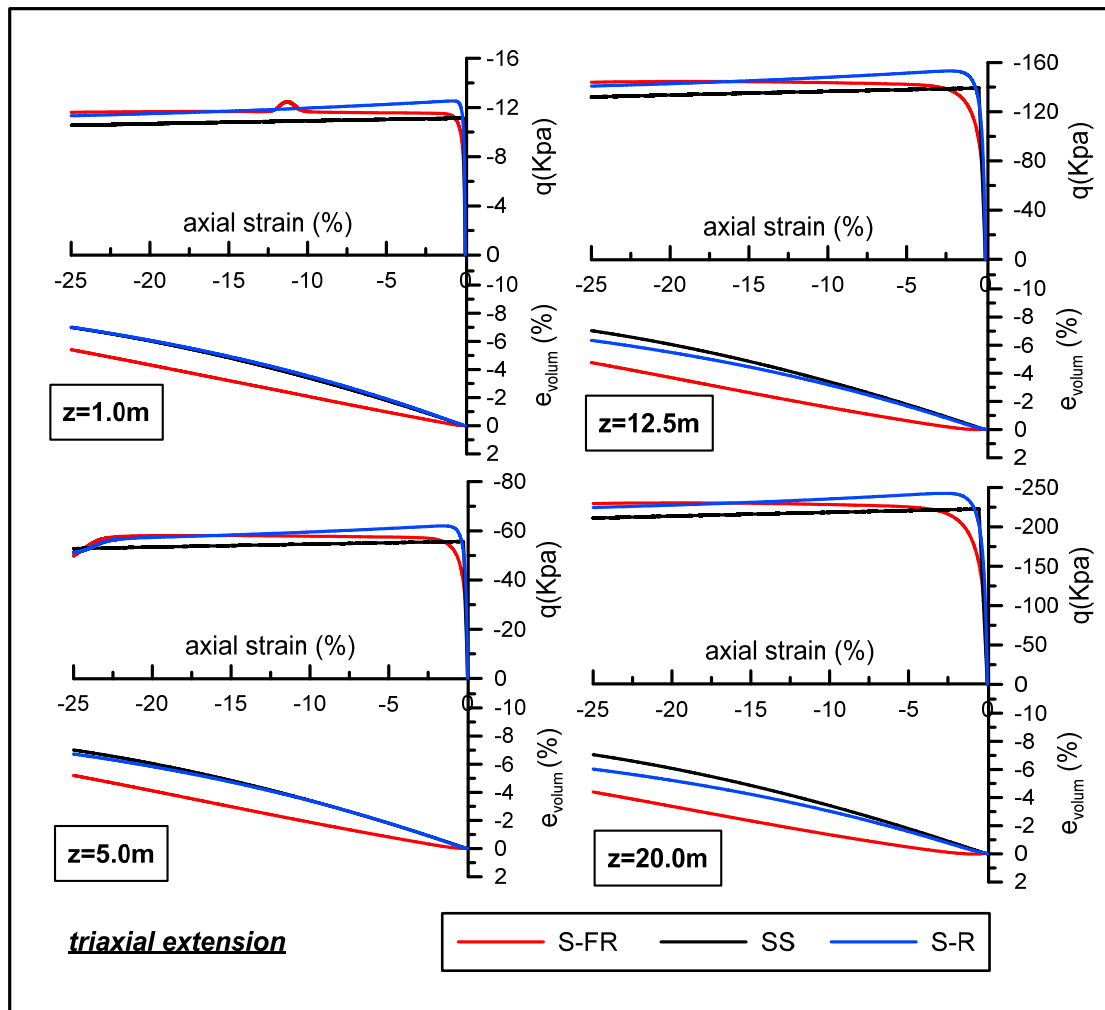
Πίνακας 3.2. Τιμές παραμέτρων προσομοιώματος SS έπειτα από βαθμονόμηση σε στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη (TC) για άμμο Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$), $D_r = 65\%$ και 4 επίπεδα τάσεων.

Με βάση το **Σχήμα 3.1** προκύπτει ότι η άμμος Toyoura με $\delta=0^\circ$ για $D_r = 65\%$ και αυτά τα επίπεδα τάσεων παρουσιάζει χαλάρωση και διαστολική συμπεριφορά, που πάντως βαίνει μειούμενη όσο αυξάνει το βάθος (ή το επίπεδο τάσεων). Επιπλέον προκύπτει ότι τα προσομοιώματα S-FR και S-R παρουσιάζουν πρακτικώς ταυτόσημη συμπεριφορά, ενώ το SS δίνει αντίστοιχα αποτελέσματα για $z = 5$ και $12.5m$ και πολύ μικρές αποκλίσεις για μικρότερα και μεγαλύτερα βάθη (π.χ. υπο-εκτίμηση και υπερ-εκτίμηση της μέγιστης αντοχής και της διαστολικότητας για $z = 1$ και $20m$, αντίστοιχα). Κατά τα άλλα, η βαθμονόμηση θεωρείται επιτυχής, καθώς και τα 3 προσομοιώματα δίνουν ουσιαστικά συγκρίσιμη απόκριση (για άμμο Toyoura με $\delta=0^\circ$ και $D_r = 65\%$), τουλάχιστον υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψης.



Σχήμα 3.1 Σύγκριση σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης (TC) άμμου Τογούρα με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r = 65\%$ σε βάθη $z=1, 5, 12.5$ και 20m , με χρήση των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR (ανάλυση αναφοράς).

Στη συνέχεια, τα βαθμονομημένα με βάση την δοκιμή της τριαξονικής θλίψης (σε φόρτιση) προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση τριαξονικού εφελκυσμού (σε αποφόρτιση), πάντα για το ίδιο γεωϊλικό (άμμος Τογούρα με $\delta=0^\circ$ και $D_r = 65\%$), υπό τα ίδια επίπεδα τάσεων (για βάση $z = 1, 5, 12.5$ και 20m). Σκοπός αυτών των προσομοιώσεων ήταν η διερεύνηση της ακρίβειας των δύο απλουστερών προσομοιωμάτων (SS και S-R) συγκριτικά με το σοφιστευμένο S-FR, που έχει αποδειχθεί ότι δίνει την ακριβέστερη προσομοίωση (Papadimitriou et al. 2019). Η δοκιμή του τριαξονικού εφελκυσμού (TE) επιλέχθηκε ως η ακραία διαφορετική δοκιμή σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου για «οριζόντια δομή» κόκκων, σε σχέση με την δοκιμή τριαξονικής θλίψης όπου βαθμονομήθηκαν τα προσομοιώματα. Η επιλογή αυτή αναμένεται να δώσει τις μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμάτων και να ορίσει το εύρος διαφορετικών προβλέψεων, παρά την πρακτικώς τέλεια σύμπτωση προβλέψεων για TC.



Σχήμα 3.2 Σύγκριση σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για δοκιμές στραγγιζόμενου τριαξονικού εφελκυσμού (TE) άμμου Τογούρα με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r = 65\%$ σε βάθη $z=1, 5, 12.5$ και 20m , με χρήση των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR (ανάλυση αναφοράς).

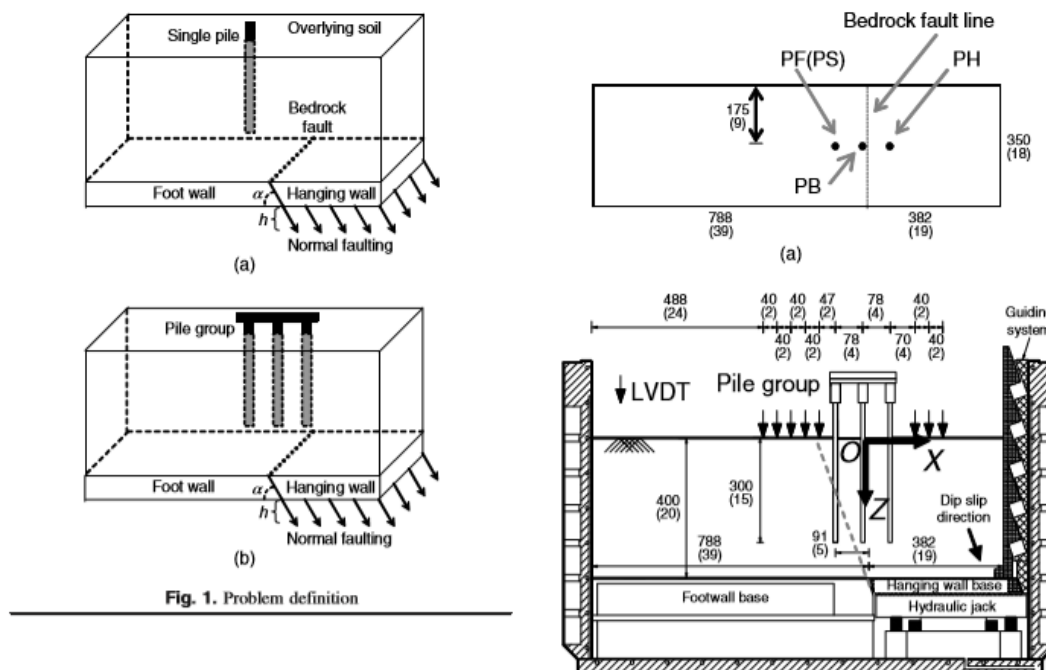
Η σύγκριση των προσομοιώσεων γίνεται στα διαγράμματα του **Σχήματος 3.2**, που απεικονίζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για TE διατηρώντας τη μορφή του **Σχήματος 3.1**. Με βάση τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι τα απλούστερα προσομοιώματα SS και S-R υπερεκτιμούν συστηματικά τη διαστολικότητα της άμμου υπό TE, αν και με αύξηση του επιπέδου των τάσεων η απόκλιση μικραίνει για το S-R αλλά όχι για το SS. Επίσης, παρατηρείται πως το προσομοίωμα SS προσεγγίζει ικανοποιητικά τη μέγιστη αντοχή του εδάφους, αλλά υποεκτιμά την παραμένουσα αντοχή του. Αντίθετα, το S-R τείνει να υπερεκτιμά τη μέγιστη αντοχή του εδάφους σε TE και να προσεγγίζει ικανοποιητικά την παραμένουσα αντοχή. Συνοπτικά, το S-R δείχνει να προσομοιώνει το έδαφος με $\delta=0^\circ$ υπό TE συστηματικά ως λίγο «πυκνότερο» από αυτό που πραγματικά είναι, καθώς εμφανίζει μεγαλύτερη τάση για διόγκωση, μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή, αλλά ίδια παραμένουσα αντοχή. Αντίστοιχα, το SS δείχνει να προσομοιώνει το έδαφος με $\delta=0^\circ$ υπό TE ως ένα γεωυλικό ελαφρά μικρότερης αντοχής, αλλά με σαφώς μεγαλύτερη τάση για διόγκωση.

3.3 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο μελετάται η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος φυγοκεντριστή των Cai et al (2016) κάνοντας χρήση των διαφορετικών προσομοιωμάτων που βαθμονομήθηκαν σε στραγγιζόμενη TC, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.

Το πείραμα των Cai et al (2016) αφορά στην αλληλεπίδραση ενός πασσάλου ή/και μιας ομάδας πασσάλων με το περιβάλλον έδαφος κατά τη διάρκεια διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος. Η διάδοση πραγματοποιήθηκε σε στρώση άμμου Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων (από απόθεση) σχετικής πυκνότητας $D_r = 62\%$ (για το πείραμα του ενός πασσάλου) και $D_r = 65\%$ (για την ομάδα πασσάλων). Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης φαίνονται στο **Σχήμα 3.3** και οι τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων της δοκιμής ήταν 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).
- Γωνία τριβής διεπιφάνειας άμμου-πασσάλου: $\delta=29^\circ$
- Ρήγμα: Κανονικό γωνίας $\alpha=70^\circ$

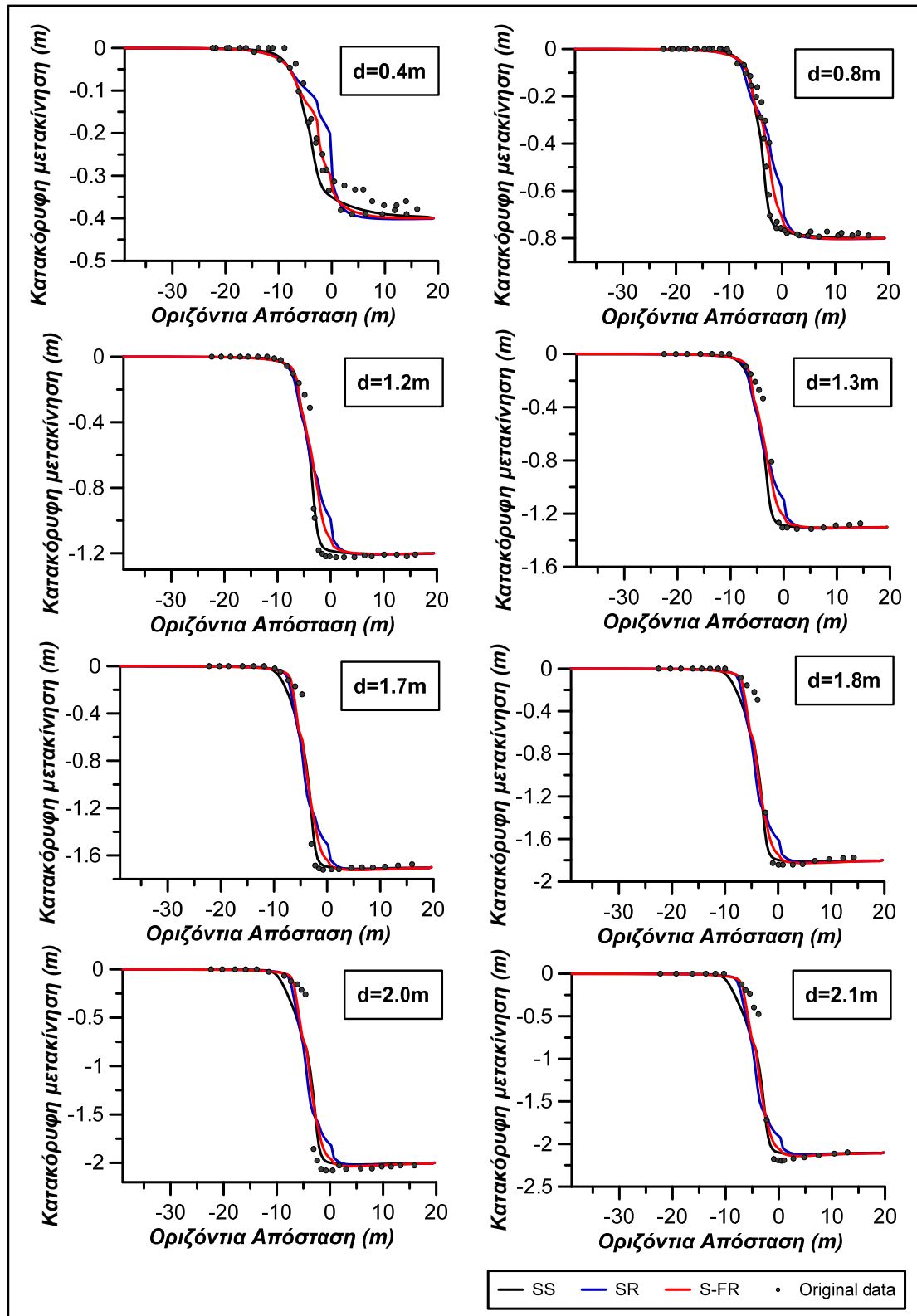


Σχήμα 3.3 Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης δοκιμών φυγοκεντριστή (Cai et al. 2016)

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει πως το πείραμα των Cai et al. (2016) δεν είναι αμιγώς ένα πρόβλημα διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άντληση δεδομένων για την παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους μακριά από τους πασσάλους, εκεί όπου η επιρροή τους θεωρείται μηδενική, δηλαδή στις άκρες του «κουτιού» του φυγοκεντριστή. Το γεγονός ότι η επιρροή τους είναι μηδενική προκύπτει από τις αποστάσεις των πασσάλων από τις άκρες (9m από το κέντρο πασσάλων διαμέτρου 0.65m, δηλαδή απόσταση σχεδόν 14 φορές τη διάμετρο), τις παρατηρήσεις των ίδιων των συγγραφέων, αλλά και το γεγονός ότι το πείραμα με έναν πάσσαλο και ομάδα πασσάλων δίνει ίδια εικόνα παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους στις άκρες του «κουτιού» (Cai et al. 2016).

Συνεπώς, τα αποτελέσματα των 2 δοκιμών φυγοκεντριστή στις άκρες του «κουτιού» θεωρούνται ότι αντιστοιχούν σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου (και μπορούν να θεωρηθούν ως ένα πείραμα), δηλαδή μπορούν να προσομοιωθούν με αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης με χρήση FLAC. Έτσι, η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος γίνεται για ελεύθερο πεδίο και με γωνία κλίσης ρήγματος $\alpha = 70^\circ$. Η ανάλυση γίνεται σε 2D προσομοίωση επίπεδης παραμόρφωσης για κάναβο διαστάσεων 58m (=μήκος) x 20m (=ύψος). Στα αριθμητικά προβλήματα σημαντικό ρόλο παίζει η διακριτοποίηση των στοιχείων, η επίδραση της οποίας παρουσιάζεται αναλυτικά στη Διπλωματική Εργασία της Θελερίτη (2017). Στις αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία το πάχος των στοιχείων διακριτοποίησης επιλέχθηκε με βάση αυτή την διερεύνηση, δηλαδή έχουν διαστάσεις 0.5m x 0.5m, ανεξαρτήτως του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

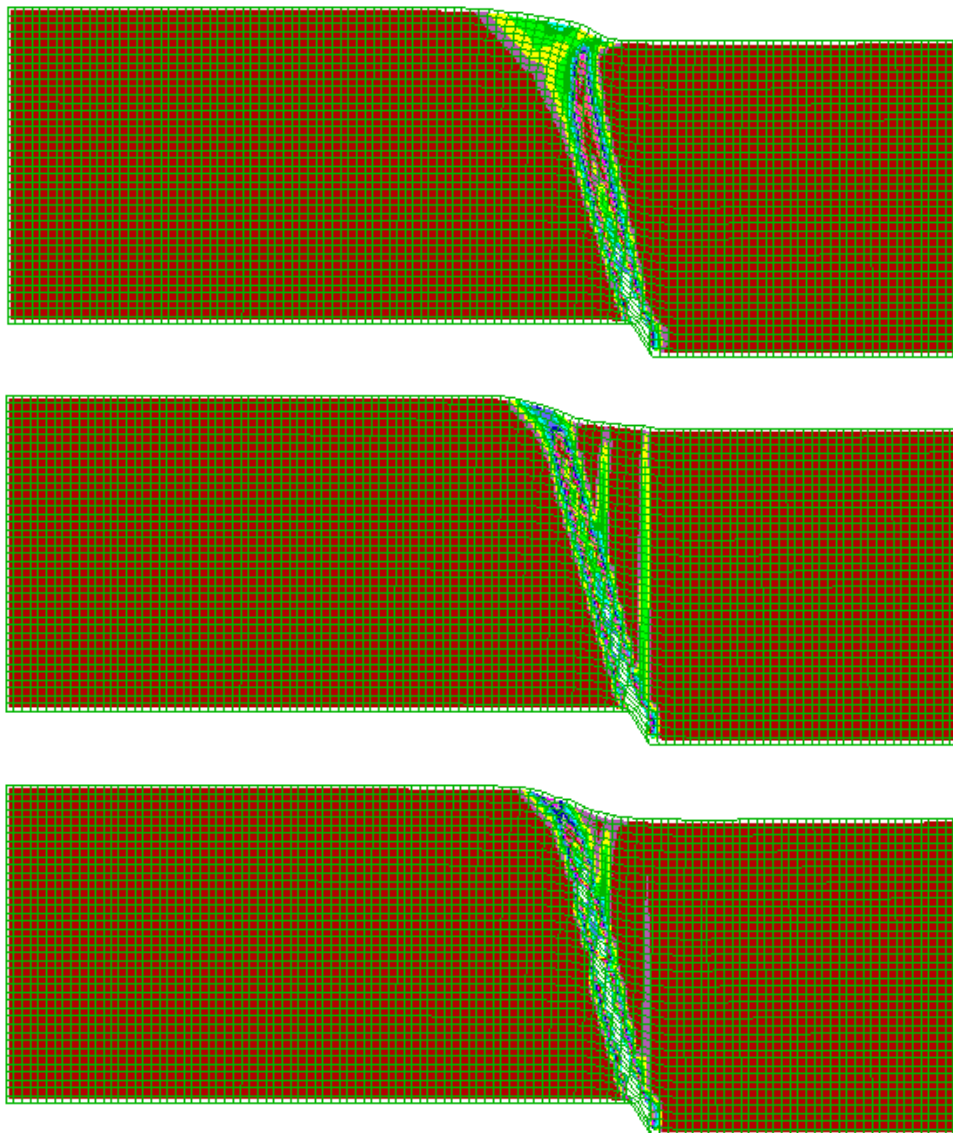
Τα αποτελέσματα της προβλεπόμενης παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους με χρήση των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR (για $\delta=0^\circ$) με βάση τη βαθμονόμηση στους Πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται με διαφορετικού χρώματος καμπύλες στο Σχήμα 3.4. Κάθε υπο-σχήμα συγκρίνει τα αποτελέσματα των 3 προσομοιωμάτων για διαφορετικές τιμές μετατόπισης d του ρήγματος στο υπόβαθρο, ενώ εμπεριέχει και τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις των Cai et al. (2016), με σύμβολα. Από τη σύγκριση των 3 προσομοιωμάτων με τις μετρήσεις προκύπτει γενικώς ικανοποιητική συμφωνία, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους, με το S-FR να δίνει την ενδιάμεση πρόβλεψη μεταξύ των 3 προσομοιωμάτων. Ειδικότερα, για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος ($d = 0.4 - 0.8\text{m}$) προκύπτει ότι το S-FR δίνει τη βέλτιστη προσομοίωση, ενώ για πολύ μεγάλες μετατοπίσεις το SS δίνει ανάδυση της διάρρηξης περισσότερο προς το σταθερό τέμαχος απ' ό,τι δείχνουν τα άλλα 2 προσομοιώματα (και οι μετρήσεις). Σε κάθε περίπτωση, οι ως άνω διαφορές στις προσομοιώσεις είναι μικρές, με γενικό συμπέρασμα να προκύπτει ότι για ένα τέτοιο «απλό» πρόβλημα μιας διάρρηξης ρήγματος υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου η χρήση ενός πολύπλοκου (S-R), και πολύ περισσότερο ενός σοφιστεμένου προσομοιώματος (S-FR), δεν κρίνεται ως αναγκαία.



Σχήμα 3.4 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων (Cai et al. 2016) για την παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια σε διαδοχικά βήματα μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχους κανονικού ρήγματος, με αριθμητικές προβλέψεις από τα προσομοιώματα SS, SANISAND-R και SANISAND-FR.

Με δεδομένη την επιτυχή πρόβλεψη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους υπό διαφορετικές τιμές της μετατόπισης ρήγματος στο υπόβαθρο, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η προβλεπόμενη διάρρηξη (επιφάνεια ολίσθησης) μέσα στην αμμώδη στρώση.

Αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.5** μέσω των ισοκαμπυλών συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος (*ssi* σε ορολογία FLAC) για τις τρεις διαφορετικές αριθμητικές προσομοιώσεις και για τη μέγιστη μετατόπιση ρήγματος $d=2.1\text{m}$ των πειραμάτων των Cai et al. (2016).



Σχήμα 3.5 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδάφους για μετατόπιση $d=2.1\text{m}$ κανονικού ρήγματος γωνίας 70° μέσω αμμόδους στρώσης 20m , όπως προκύπτει με βάση τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR(κάτω).

Το σχήμα αυτό δεν εμπεριέχει αντίστοιχη μέτρηση, καθώς οι Cai et al.(2016) δεν αποτύπωσαν τη ζώνη διάρρηξης των πειραμάτων τους στη δημοσίευσή τους. Από τη σύγκριση των επιφανειών ολίσθησης προκύπτει συμφωνία, δηλαδή εκτροπή της διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος (όπως ορίζεται αυτό με την ευθεία προβολή του ρήγματος από το υπόβαθρο στην επιφάνεια). Οι μικρές διαφορές τους αφορούν στο πάχος της επιφάνειας ολίσθησης (παχύτερη για το SS, ειδικά πλησίον της επιφάνειας)

και η δημιουργία δευτερογενών (κατακόρυφων) διαρρήξεων (μόνο στα S-R και S-FR). Με βάση τα ανωτέρω, οι διαρρήξεις που προβλέπουν τα S-R και S-FR παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιότητα μεταξύ τους, συγκριτικά με το απλούστερο προσομοίωμα SS, χωρίς όμως να προκύπτουν σημαντικές διαφορές.

3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

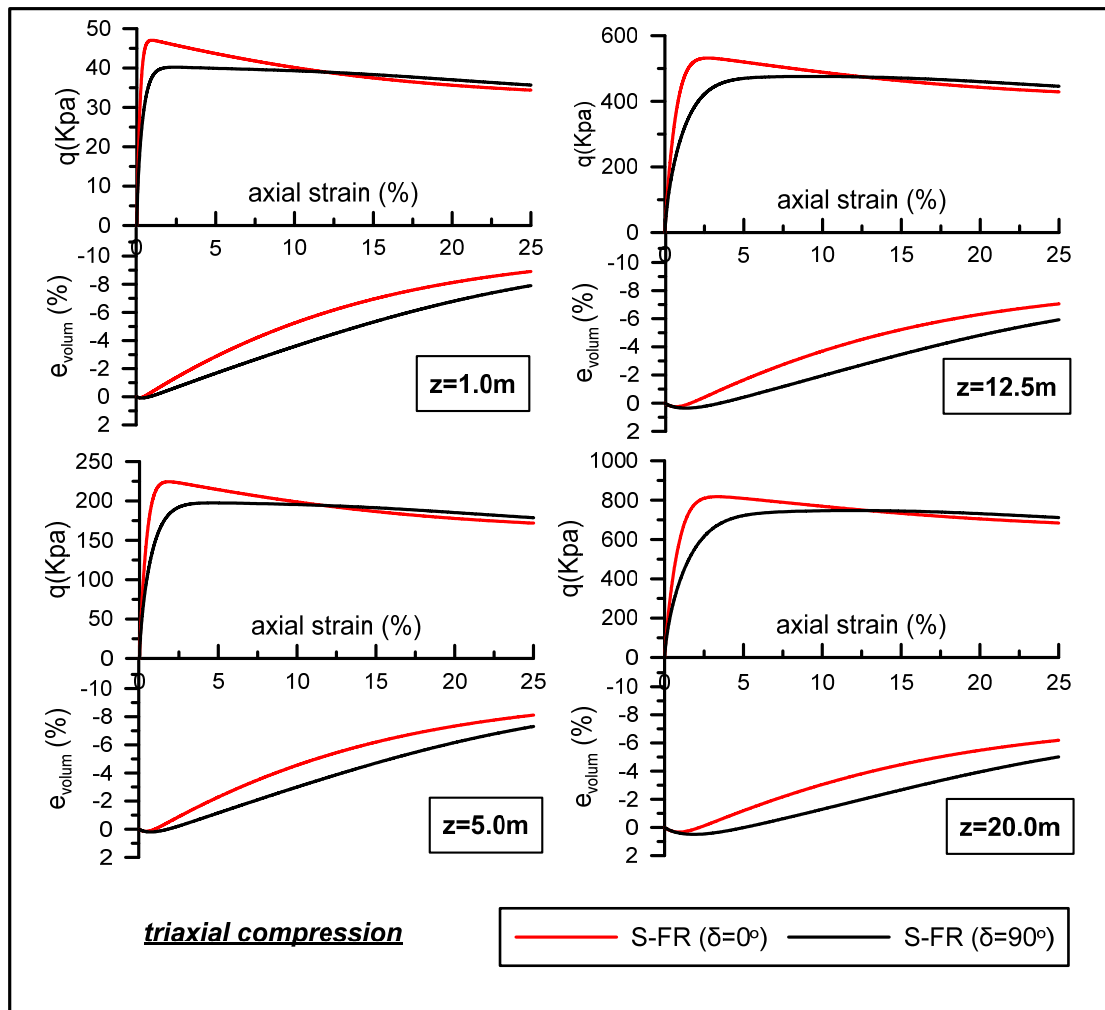
Όλες οι αναλύσεις των προηγούμενων παραγράφων, σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου και σε επίπεδο προβλήματος συνοριακών τιμών, αφορούν άμμο Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων. Αυτό προκύπτει με βάση τη βαθμονόμηση, η οποία στηρίχτηκε στις προβλέψεις του S-FR για άμμο με $\delta = 0^\circ$. Στην παράγραφο αυτή, οι προσομοιώσεις του S-FR για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης (TC) και στραγγιζόμενου τριαξονικού εφελκυσμού (TE) επαναλήφθηκαν κάνοντας χρήση του σοφιστευμένου S-FR για την «ακραία» δομή κόκκων που προέρχεται από περιστροφή της «οριζόντιας δομής» κατά 90° , ήτοι για $\delta = 90^\circ$ («κατακόρυφη δομή» κόκκων). Στόχος αυτών των αναλύσεων είναι να διαφανεί πόση είναι, κατά μέγιστο, η επίδραση της διεύθυνσης της δομής των κόκκων στην απόκριση της άμμου. Στα σχήματα αυτά δεν εμπεριέχονται προβλέψεις των απλούστερων προσομοιωμάτων SS και S-R, καθώς αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη τη δομή των κόκκων και συνεπώς οι προβλέψεις τους ταυτίζονται με αυτές που ήδη εμπεριέχονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.6 συγκρίνονται οι προβλεπόμενες αποκρίσεις του S-FR για $\delta=0^\circ$ και $\delta=90^\circ$ υπό στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη (TC), ενώ στο Σχήμα 3.7 γίνεται το ίδιο υπό στραγγιζόμενο τριαξονικό εφελκυσμό (TE). Με βάση τις συγκρίσεις στα δύο αυτά σχήματα προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Υπό τριαξονική θλίψη (TC), η απόκριση για $\delta=90^\circ$ δίνει μεγαλύτερες «ελαστικές» παραμορφώσεις, μικρότερη μέγιστη αντοχή και μικρότερη τάση για διόγκωση απ' ό,τι για $\delta=0^\circ$. Με άλλα λόγια, η απόκριση για $\delta=90^\circ$ υπό TC είναι σαν η άμμος να είναι «χαλαρότερη».
- Υπό τριαξονικό εφελκυσμό (TE), η απόκριση για $\delta=90^\circ$ δίνει μικρότερες «ελαστικές» παραμορφώσεις, μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή και μεγαλύτερη τάση για διόγκωση απ' ό,τι για $\delta=0^\circ$. Με άλλα λόγια, η απόκριση για $\delta=90^\circ$ υπό TE είναι σαν η άμμος να είναι «πυκνότερη», αν και συγκριτικά οι διαφορές δείχνουν λίγο μικρότερες απ' ό,τι για TC.

Αυτά τα αποτελέσματα οφείλονται στην ενσωμάτωση της Θεωρίας Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (ΘΑΚΚ) των Li and Dafalias (2012) στις εξισώσεις του S-FR. Συνοπτικά αναφέρεται εδώ ότι στον πυρήνα της ΘΑΚΚ βρίσκεται η δομή του εδάφους, η οποία εκφράζεται μέσω της Μεταβλητής Ανισοτροπίας Δομής A που ορίζεται ως:

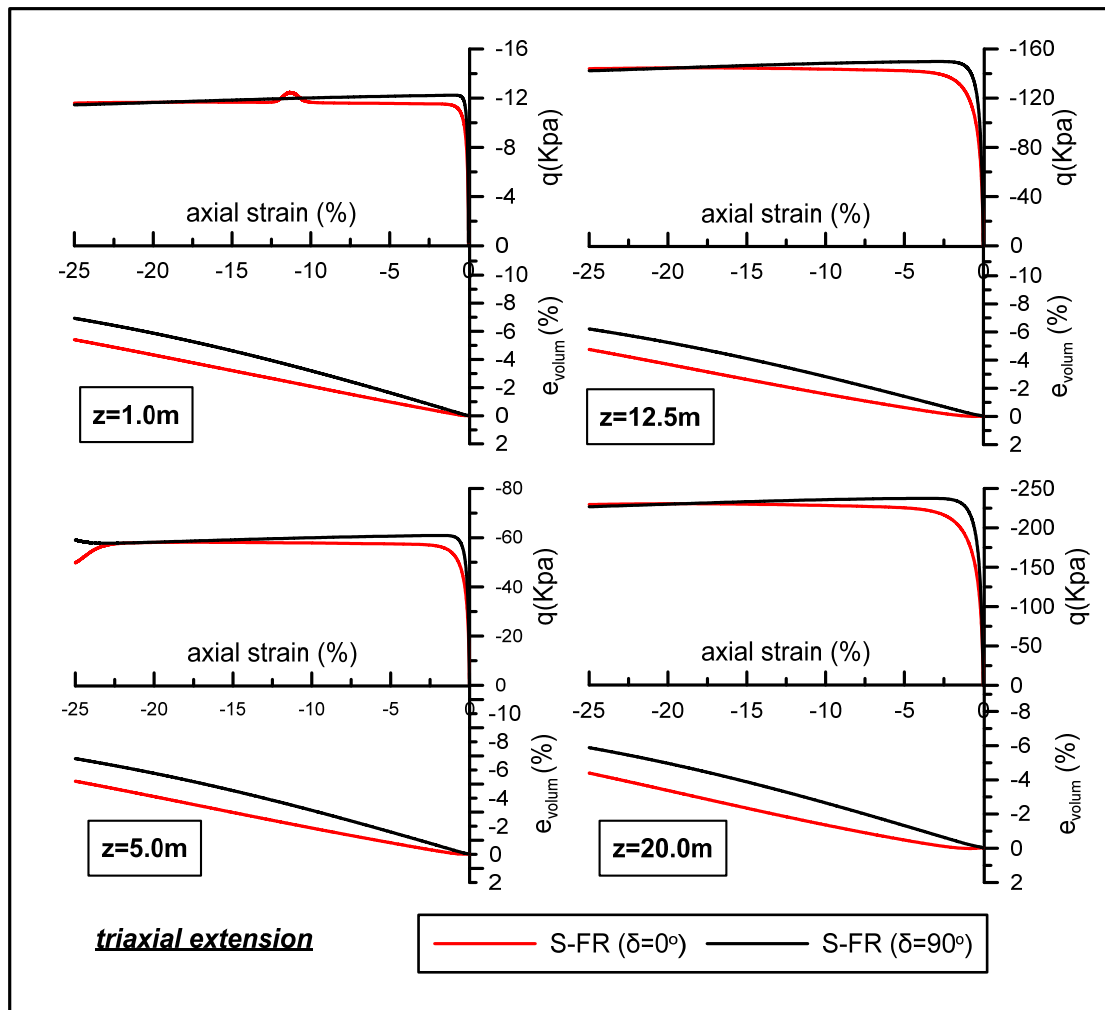
$$A = \mathbf{F} : \mathbf{n} = F \mathbf{n}_F : \mathbf{n} = FN \quad (1)$$



Σχήμα 3.6 Σύγκριση σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης με χρήση του προσομοιώματος S-FR για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης (TC) άμμου Toyoura με $D_r = 65\%$ σε βάθη $z=1, 5, 12.5$ και $20m$, για «οριζόντια δομή» ($\delta=0^\circ$) και «κατακόρυφη δομή» κόκκων ($\delta=90^\circ$).

όπου \mathbf{F} είναι ο αποκλίνων τανυστής δομής ο οποίος μπορεί να αναλυθεί στο μέτρο F και σε έναν μοναδιαίο μέτρο τανυστή κατεύθυνσης \mathbf{n}_F , \mathbf{n} είναι ο μοναδιαίος τανυστής της κατεύθυνσης της φόρτισης ίσος με τον αποκλίνοντα τανυστή του πλαστικού ρυθμού παραμόρφωσης, το βαθμωτό μέγεθος $N=\mathbf{n}_F : \mathbf{n}$ ποσοτικοποιεί τη σχετική κατεύθυνση των \mathbf{F} και \mathbf{n} , με την άνω-κάτω τελεία να δηλώνει το ίχνος του γινομένου των δύο προσκείμενων τανυστών. Το μέτρο F ορίζεται κανονικοποιημένο με την κρίσιμη τιμή του ώστε στην Κρίσιμη Κατάσταση (ΚΚ) $F=1$. Συνεπώς η παράμετρος A τη δομή σε όρους έντασης, αλλά και σχετικής κατεύθυνσης με τη φόρτιση. Η ένταση της δομής F ορίζεται ως το μέτρο του τανυστή δομής, κανονικοποιημένο με την τιμή του στην ΚΚ. Οι Li & Dafalias (2012) πρότεinan μία εξίσωση για την εξέλιξη της δομής ως:

$$\dot{\mathbf{F}} = \langle \lambda \rangle (\mathbf{n} - r\mathbf{F}) \quad (2)$$



Σχήμα 3.7 Σύγκριση σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης με χρήση του προσομοιώματος S-FR για δοκιμές στραγγιζόμενου τριαξονικού εφελκυσμού (TE) άμμου Toyoura με $D_r = 65\%$ σε βάθη $z=1, 5, 12.5$ και $20m$, για «οριζόντια δομή» ($\delta=0^\circ$) και «κατακόρυφη δομή» κόκκων ($\delta=90^\circ$).

όπου λ ο πολλαπλασιαστής πλαστικότητας, $\langle \lambda \rangle$ οι αγκύλες Macauley (που δίνουν θετική τιμή $\langle \lambda \rangle$ όταν $\lambda > 0$ (φόρτιση) και $\langle \lambda \rangle = 0$ για $\lambda \leq 0$ (αποφόρτιση ή ουδέτερη φόρτιση) και r μία συνάρτηση η οποία γίνεται 1 στην ΚΚ ώστε $\mathbf{F} = \mathbf{n}$ και $\dot{F} = 0$.

Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι καθώς εξελίσσεται ο τανυστής δομής με την πλαστική παραμόρφωση, η κατεύθυνση του \mathbf{n}_F τείνει να ευθυγραμμιστεί με το \mathbf{n} και γίνονται συγγραμικά στην ΚΚ (εάν δεν έχουν ήδη γίνει), ενώ το μέτρο F τείνει προς την κρίσιμη τιμή του εξ' ορισμού είναι ίση με 1. Τελικώς, στην ΚΚ έχουμε $N=1$ (δεδομένων των μοναδιαίων \mathbf{n}_F και \mathbf{n}), $F=1$ και $\mathbf{F} = \mathbf{n}$. Βασιζόμενοι στον ορισμό του A στην Εξίσωση (1), έπεται η τρίτη συνθήκη της ΘΑΚΚ, $A=1$, η οποία προστίθεται στις κλασικές δύο συνθήκες $\eta = \eta_c$ και $e = e_c$, δηλαδή όταν ο (αποκλίνων) λόγος τάσεων η και ο λόγος κενών e λαμβάνουν τις κρίσιμες τιμές τους η_c και e_c , αντίστοιχα. Με βάση τα ανωτέρω, γίνεται σαφές ότι η παράμετρος A λαμβάνει και αρνητικές τιμές, με βάση το N που αλλάζει πρόσημο, π.χ. στην περίπτωση τριαξονικού εφελκυσμού για «οριζόντια δομή» κόκκων. Υπογραμμίζεται, ότι η παράμετρος A μπορεί να λάβει τιμές και μεγαλύτερες του 1, όταν το μέτρο της ανισοτροπίας της δομής F γίνει μεγαλύτερο του

1. Παρόλα αυτά, στο S-FR και στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε $r=1$, οπότε το μέτρο $F \leq 1$ πάντα.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της ΘΑΚΚ ορίζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ :

$$\zeta = \psi - \hat{e}_A (A - 1) \quad (3)$$

όπου $\psi = e - e_c$ η γνωστή (ισοτροπική) παράμετρος κατάστασης των Been and Jefferies (1985) και e_A μία κατάλληλη συνάρτηση του λόγου κενών e και της μέσης ενεργού τάσης p (στην απλούστερη περίπτωση μία θετική σταθερά, όπως στο προσομοίωμα S-FR). Υπενθυμίζεται ότι με βάση τον ορισμό του, όταν $\psi > 0$ παρατηρείται τάση για συστολή και όταν $\psi < 0$ τάση για διαστολή ώστε το έδαφος να φτάσει στην ΚΚ όπου $\psi = 0$. Επιπλέον όταν $\psi = 0$ στην ΚΚ, ισχύει κατ' επέκταση και $A = 1$ (Εξίσωση 1). Στην ουσία, το ζ αντικαθιστά το ψ σε όλες τις καταστατικές εξισώσεις των προσομοιωμάτων SANISAND (όπως στο S-R), καθώς είναι η παράμετρος που συνδυάζει την πυκνότητα (ή το λόγο κενών) σε σχέση με την ΚΚ μέσω του ψ και την ανισοτροπία της δομής μέσω του A . Συνεπώς καταστάσεις με $\zeta > 0$ και $\zeta < 0$ αντιστοιχούν σε τάση για συστολή και διαστολή αντιστοίχως, ώστε στην ΚΚ $\zeta = 0$.

Η πρακτική χρήση της ΘΑΚΚ των Li and Dafalias (2012) στην κατάρτιση καταστατικών προσομοιωμάτων βασίζεται στην αντικατάσταση της (ισοτροπικής) παραμέτρου κατάστασης ψ από την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ . Με αυτόν τον τρόπο, δύο κρίσιμες παράμετροι σε οποιαδήποτε καταστατική διατύπωση (έτσι και στο S-FR), η διαστολικότητα D (ο λόγος της ογκομετρικής προς την διατμητική παραμόρφωση) και το πλαστικό μέτρο K_p (που καθορίζει το μέγεθος του πλαστικού ρυθμού παραμόρφωσης), μπορούν να οριστούν στην τριαξονική φόρτιση ως:

$$D = d(Me^{m\zeta} - \eta) \quad (4)$$

$$K_p = h(Me^{n\langle -\zeta \rangle} - \eta) \quad (5)$$

όπου d , m , h , n είναι θετικές ποσότητες. Συγκεκριμένα, στις Εξισώσεις (4) και (5) εμφανίζεται η εξάρτηση από το ζ του λόγου τάσεων στη Γραμμή Αλλαγής Φάσης $M^d = Me^{m\zeta}$ και του μέγιστου λόγου τάσεων $M^b = Me^{n\langle -\zeta \rangle}$ που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή. Μάλιστα στο προσομοίωμα S-FR, η ποσότητα h του πλαστικού μέτρου K_p θεωρείται επιπλέον και αύξουσα συνάρτηση της παραμέτρου A .

Στην πράξη, μια «οριζόντια δομή» κόκκων αντιστοιχεί σ' ένα οριζόντιο επίπεδο απόθεσης ($\delta = 0^\circ$), οπότε το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο αυτό είναι συγγραμικό με τη φόρτιση (βλ. την κατακόρυφη διεύθυνση της σ_1 , έναντι της οριζόντιας των $\sigma_2 = \sigma_3$) στην τριαξονική θλίψη (TC), καθ' όλη τη διάρκειά της. Αυτό συνεπάγεται ότι τα μοναδιαία διανύσματα \mathbf{n}_F και \mathbf{n} είναι συγγραμικά, οπότε $N = 1$ και καθώς το μέτρο $F > 0$ συνάγεται ότι η παράμετρος $A > 0$, με βάση την Εξίσωση (1). Αντίθετα, για «κατακόρυφη δομή» κόκκων το κατακόρυφο επίπεδο απόθεσης ($\delta = 90^\circ$) παύει να είναι συγγραμικό με τη φόρτιση υπό τριαξονική θλίψη (TC), με αποτέλεσμα $N < 1$ και για την ίδια τιμή του μέτρου F προκύπτει μικρότερη τιμή της παραμέτρου A . Συνεπώς, με βάση την Εξίσωση (3), και για αρχικώς $\psi < 0$ (λόγω $D_i = 65\%$), η τιμή της ανισοτροπικής

παραμέτρου κατάστασης ζ είναι αλγεβρικά μικρότερη για «οριζόντια δομή» συγκριτικά με εκείνη για «κατακόρυφη δομή» κόκκων (αλλά πάντα $\zeta < 0$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, περισσότερο αρνητική τιμή D (υπό διαστολή) και μεγαλύτερη τιμή K_p για «οριζόντια δομή» συγκριτικά με εκείνη για «κατακόρυφη δομή» κόκκων, γεγονός που εξηγεί γιατί η απόκριση για $\delta=90^\circ$ υπό TC είναι σαν η άμμος να είναι «χαλαρότερη» από εκείνη για $\delta=0^\circ$.

Το αντίθετο ακριβώς προκύπτει υπό τριαξονικό εφελκυσμό (TE), όπου η φόρτιση είναι αντίθετης διεύθυνσης (βλ. την κατακόρυφη διεύθυνση της σ_3 , έναντι της οριζόντιας των $\sigma_1 = \sigma_2$) με αποτέλεσμα, αρχικώς έστω, να έχουμε $N=-1$ για άμμο «οριζόντιας δομής» κόκκων. Έτσι, η παράμετρος $A < 0$ (καθώς $F > 0$) για $\delta=0^\circ$. Για την «κατακόρυφη δομή» κόκκων ($\delta=90^\circ$), η φόρτιση παύει να είναι ακριβώς αντίθετη της δομής, και συνεπώς $N > -1$. Το αποτέλεσμα είναι η παράμετρος A να έχει αλγεβρικά μεγαλύτερη τιμή για $\delta=90^\circ$, συγκριτικά με εκείνη για $\delta=0^\circ$, οπότε με βάση την Εξίσωση (3), και για αρχικώς $\psi < 0$ (λόγω $D_i=65\%$), η τιμή της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ να είναι αλγεβρικά μεγαλύτερη για «οριζόντια δομή» συγκριτικά με εκείνη για «κατακόρυφη δομή» κόκκων (αλλά πάντα $\zeta < 0$). Αυτό εξηγεί τη λιγότερο αρνητική τιμή D (υπό διαστολή) και τη μικρότερη τιμή K_p για «οριζόντια δομή» συγκριτικά με εκείνη για «κατακόρυφη δομή» κόκκων, το οποίο τελικώς οδηγεί την απόκριση για $\delta=90^\circ$ υπό TE είναι σαν η άμμος να είναι «πυκνότερη» από εκείνη για $\delta=0^\circ$.

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση της χρήσης καταστατικών προσομοιωμάτων διαφορετικής πολυπλοκότητας, μετά από βαθμονόμηση ώστε να δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα με βάση τις πλέον συνήθεις δοκιμές τριαξονικής θλίψης (TC) όπου η άμμος έχει «οριζόντια δομή» κόκκων (οριζόντιο επίπεδο απόθεσης $\delta=0^\circ$). Τα καταστατικά προσομοιώματα που εξετάζονται είναι ένα απλό ελαστοπλαστικό ιστροπικό προσομοίωμα SS με 7 σταθερές και δύο της οικογένειας προσομοιωμάτων SANISAND, ήτοι ένα πολύπλοκο ιστροπικό προσομοίωμα S-R με 12 σταθερές και ένα σοφιστεμένο ανισοτροπικό προσομοίωμα S-FR με 16 σταθερές. Το S-FR προτάθηκε πρόσφατα από τους Papadimitriou et al. (2019), ενώ το προσομοίωμα S-R προκύπτει από το S-FR μηδενίζοντας την επίδραση της εξελισσόμενης δομής των κόκκων (μηδενίζοντας 4 από τις 16 σταθερές).

Δεδομένης της βαθμονόμησής τους να δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα για TC για άμμο με $\delta=0^\circ$, παρουσιάζουν διαφορές για στραγγιζόμενο τριαξονικό εφελκυσμό (TE) για την ίδια άμμο. Συγκεκριμένα, τα απλούστερα προσομοιώματα SS και S-R υπερεκτιμούν συστηματικά τη διαστολικότητα της άμμου υπό TE. Συνοπτικά, το S-R δείχνει να προσομοιώνει το έδαφος με $\delta=0^\circ$ υπό TE συστηματικά ως λίγο «πυκνότερο» από αυτό που πραγματικά είναι, καθώς εμφανίζει μεγαλύτερη τάση για διόγκωση, μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή, αλλά ίδια παραμένουσα αντοχή. Αντίστοιχα, το SS δείχνει να προσομοιώνει το έδαφος με $\delta=0^\circ$ υπό TE ως ένα γεωλυκτικό ελαφρά μικρότερης αντοχής, αλλά με σαφώς μεγαλύτερη τάση για διόγκωση.

Η χρήση των τριών, ως άνω βαθμονομημένων, προσομοιωμάτων στο «απλό» πρόβλημα συνοριακών τιμών της διάρρηξης κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου οδηγεί σε μικρές διαφορές στην προσομοίωση της παραμορφωμένης (λόγω διάρρηξης) επιφάνειας του εδάφους και καλή συμφωνία με σχετικά πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές φυγοκεντρική (Cai et al. 2016). Σε κάθε περίπτωση όμως, οι όποιες διαφορές στις προσομοιώσεις είναι μικρές (κυρίως στις προβλεπόμενες επιφάνειες ολίσθησης). Συνεπώς, προκύπτει ότι για ένα τέτοιο «απλό» πρόβλημα συνοριακών τιμών η χρήση ενός πολύπλοκου (S-R), και πολύ περισσότερο ενός σοφιστευμένου προσομοιώματος (S-FR), δεν κρίνεται ως αναγκαία.

Τέλος, η μελέτη της επίδρασης της δομής των κόκκων στην απόκριση σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, με αποκλειστική χρήση του σοφιστευμένου S-FR, δείχνει σημαντικές διαφορές στις «ελαστικές» παραμορφώσεις, τη μέγιστη αντοχή και την τάση για διόγκωση. Πρακτικά, προκύπτει ότι υπό τριαξονική θλίψη (TC), η απόκριση για $\delta=90^\circ$ είναι σαν η άμμος να είναι «χαλαρότερη» απ' ό,τι για $\delta=0^\circ$, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα προκύπτει υπό τριαξονικό εφελκυσμό (TE), δηλαδή η απόκριση για $\delta=90^\circ$ είναι σαν η άμμος να είναι «πυκνότερη» απ' ό,τι για $\delta=0^\circ$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απόλυτα συμβατά με τη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (ΘΑΚΚ) των Li and Dafalias (2012) και με ό,τι δείχνουν σχετικά πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Papadimitriou et al. 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο διερευνάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων χρήσης των δύο (2) απλούστερων καταστατικών προσομοιωμάτων **SS** και **S-R** στο πρόβλημα διάδοσης διάρρηξης ενεργού ρήματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, αλλά και όταν υπάρχει στην επιφάνεια κατασκευή και συνεπώς προκύπτει αλληλεπίδραση ρήματος-κατασκευής. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από τη χρήση του πλέον σοφιστευμένου **S-FR** προσομοιώματος (Paradimitriou et al. 2019), το οποίο θεωρείται ότι δίνει, κατά τεκμήριο, την ορθότερη προσομοίωση. Και τα 3 προσομοιώματα χρησιμοποιούνται μετά από βαθμονόμηση που δίνει πρακτικώς ταυτόσημα αποτελέσματα υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψης για άμμο Toyoura με σχετική πυκνότητα $D_r=65\%$ και οριζόντια δομή κόκκων, $\delta=0^\circ$ (βλ. Κεφάλαιο 3).

Στο πλαίσιο της διερεύνησης εξετάζονται τρία (3) διαφορετικά είδη ρήματος και για τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης της επιφάνειας του εδάφους: υπό ελεύθερο πεδίο, με φορτίο μεγέθους $q=100\text{kPa}$ επί πλάτους $B=4\text{m}$ και τέλος με φορτίο μεγέθους $q=185\text{kPa}$ επί του ίδιου πλάτους. Επισημαίνεται εδώ ότι παρόλο που τα 3 προσομοιώματα έχουν βαθμονομηθεί να δίνουν ταυτόσημη απόκριση σε τριαξονική θλίψη, η φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής δεν αναμένεται ίδια καθώς επηρεάζεται από την απόκριση του εδάφους όχι μόνο κάτω από αυτή (όπου η φόρτιση προσομοιάζει σε τριαξονική θλίψη) αλλά και πλευρικά αυτής (όπου η φόρτιση προσομοιάζει σε τριαξονικό εφελκυσμό). Πιο συγκεκριμένα, για την ίδια κατασκευή (π.χ. πλάτους $B=4\text{m}$ όπως εδώ) η φέρουσα ικανότητα αναμένεται σχετικώς μικρότερη με χρήση του **SS** (λόγω υποεκτίμησης της γωνίας τριβής φ σε κατευθύνσεις φόρτισης εκτός της τριαξονικής θλίψης, π.χ. σε τριαξονικό εφελκυσμό, βλ. Κεφ.3), μέση από το **S-FR** (λόγω θεώρησης της ανισοτροπίας που μειώνει την αντοχή σε κατευθύνσεις φόρτισης παράλληλες με την οριζόντια δομή κόκκων, π.χ. σε τριαξονικό εφελκυσμό, βλ. Κεφ.3) και σχετικώς μεγαλύτερη από το **S-R** (λόγω θεώρησης ισοτροπίας που δεν λαμβάνει υπόψη την απομείωση αντοχής σε κατευθύνσεις φόρτισης παράλληλες με την οριζόντια δομή κόκκων, π.χ. σε τριαξονικό εφελκυσμό, βλ. Κεφ.3). Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο φορτίο q ο συντελεστής ασφαλείας είναι ο ελάχιστος για το **SS** και ο μέγιστος για το **S-R**.

Πιο συγκεκριμένα στην **παράγραφο 4.1** εξετάζεται η διάδοση διάρρηξης ρήματος σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου και διαμέσου στρώσης πάχους 20m με άμμο Toyoura με $D_r=65\%$ και οριζόντια δομή κόκκων (την ίδια άμμο για την οποία έγινε η βαθμονόμηση στο Κεφάλαιο 3). Προκειμένου να καλυφθεί όλο το εύρος των πιθανών περιπτώσεων διάρρηξης εξετάζονται οι τρεις περιπτώσεις διάδοσης κανονικού, κατακόρυφου και ανάστροφου ρήματος, ενώ λαμβάνεται σε όλες ως μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ρήματος $d=1.0\text{m}$. Η μετακίνηση αυτή θεωρείται αρκετά μεγάλη τόσο για την ανάδυση της διάρρηξης επί της ελεύθερης επιφάνειας, όσο και για την εμφάνιση των όποιων

διαφορών μεταξύ των αποτελεσμάτων κάνοντας χρήση των διαφορετικών προσομοιωμάτων.

Στην **παράγραφο 4.2** η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται, καθώς τοποθετείται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ πάχους 20m) κατασκευή πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{Kpa}$. Υπογραμμίζεται ότι η κατασκευή λαμβάνεται ως άκαμπτη και υπάρχει η δυνατότητα ανασηκώματος ή ολίσθησης στο έδαφος. Οι παραδοχές αυτές είναι εύλογες και πιθανές στην πράξη. Παρόλα αυτά, για μια κατασκευή πλάτους μόνο 4m και φορτίου $q=100\text{kPa}$ δεν θεωρείται αναμενόμενο να παρατηρηθεί ολίσθηση ή ανασήκωμα, λόγω των ισχυρών δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται (μεγάλο φορτίο και μικρό πλάτος). Για τις αναλύσεις που παρουσιάζονται, η θέση της κατασκευής μεταβάλλεται σε κάθε διαφορετική περίπτωση ρήγματος προκειμένου να είναι εκείνη που έχει την μεγαλύτερη επιρροή στη διάρρηξη. Έτσι, επιλέγονται τρεις (3) «χαρακτηριστικές» θέσεις, όσα και τα διαφορετικά ήδη ρήγματος που εξετάζονται, η εύρεση των οποίων αποτελεί επί το πλείστον αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας της Βαρελά (2018). Εξαιρέση αποτελεί η «χαρακτηριστική» θέση της κατασκευής για την διάδοση του ανάστροφου ρήγματος, η οποία διερευνήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για την τελική θέση, καθώς η διερεύνηση ακολούθησε τη λογική της Βαρελά (2018) και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα δεν προσδίδουν κάτι στην ανάλυση.

Στην συνέχεια, οι αναλύσεις που παρουσιάζονται στην **παράγραφο 4.2** επαναλαμβάνονται στην **παράγραφο 4.3** για τις τρεις περιπτώσεις ρήγματος και τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα αυξάνοντας όμως το φορτίο της κατασκευής στα $q=185\text{kPa}$ και διατηρώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά (ιδιότητες εδάφους, «χαρακτηριστική» θέση κατασκευής). Κλείνοντας, στην **παράγραφο 4.4** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο των αναλύσεων για περεταίρω χρήση.

4.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

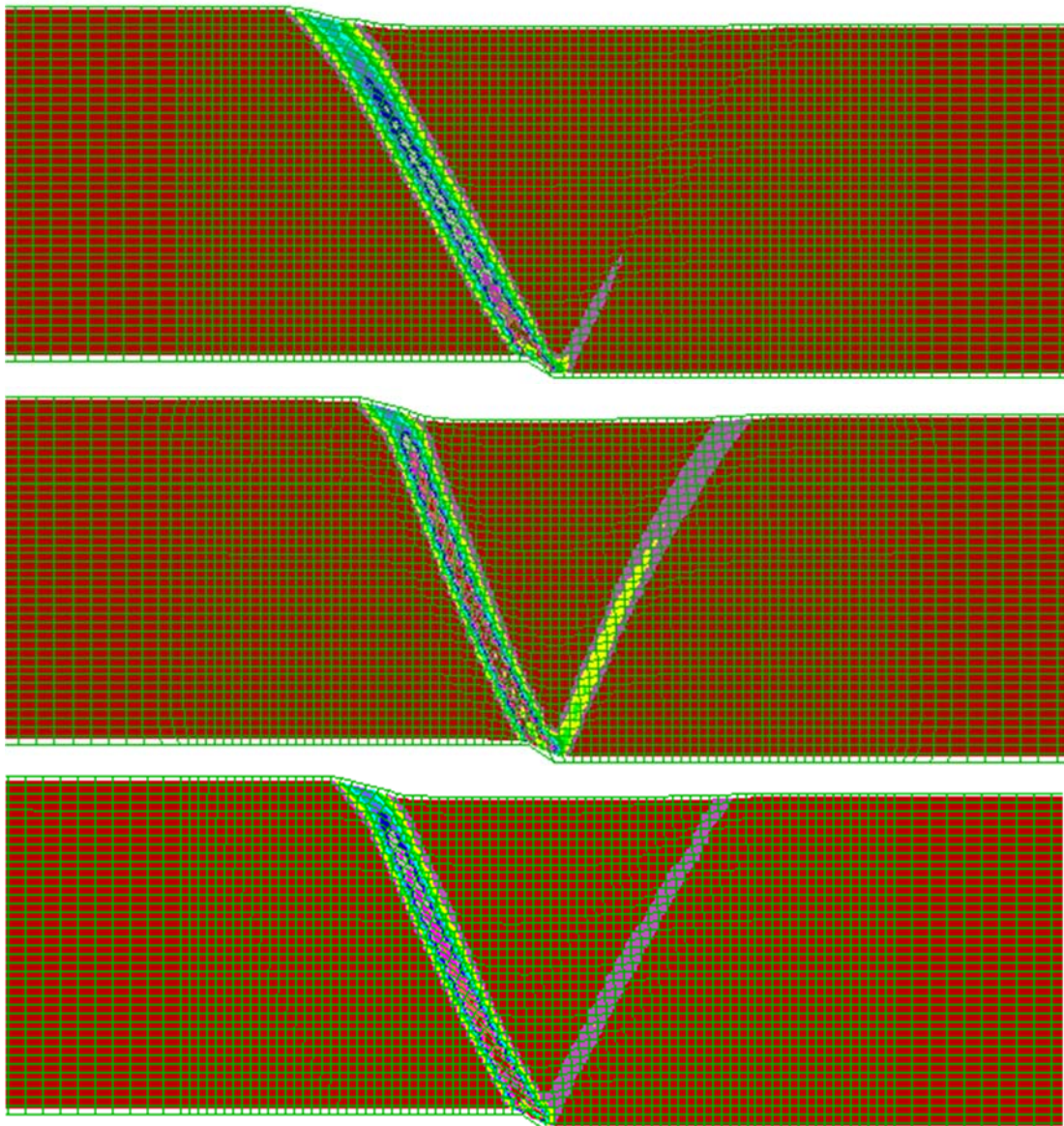
4.2.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Στην συγκεκριμένη υπο-παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης με χρήση των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR στο φυσικό πρόβλημα διάδοσης κανονικού ρήγματος υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου (free field) προκειμένου να διερευνηθεί η μεταξύ τους απόκλιση. Η σύγκριση γίνεται αρχικώς σε όρους συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων (ssi σε ορολογία FLAC). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος για τις τρεις διαφορετικές αριθμητικές προσομοιώσεις και για μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$, η οποία αποτελεί και τη μέγιστη που επιβλήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Όπως παρατηρείται, όσον αφορά στη θέση και στο μέγεθος των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων της κύριας διάρρηξης, η εικόνα που προκύπτει από την χρήση των 3 προσομοιωμάτων έχει ελάχιστες διαφορές. Συγκεκριμένα, η ανάδυση της

για το SS εκτρέπεται πολύ ελαφρά προς το σταθερό τέμαχος (προς τα αριστερά) και το αντίθετο συμβαίνει για το S-R, συγκριτικά πάντα με την ανάδυση για το S-FR. Αντίστοιχα, σε όρους *ssi* εντός της κύριας διάρρηξης, υπάρχει πολύ μικρή υποεκτίμηση των παραμορφώσεων κάνοντας χρήση του SS, και το αντίθετο (πολύ μικρή υπερεκτίμηση) με το S-R, πάντα σε σχέση με το S-FR.

Όσον αφορά στη δευτερεύουσα διάρρηξη, παρατηρούνται πιο σημαντικές διαφορές μεταξύ των 3 προσομοιώματων. Συγκεκριμένα, για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$, με το προσομοίωμα SS δεν σχηματίζεται δευτερεύουσα διάρρηξη μέχρι την επιφάνεια, αντίθετα με ό,τι παρατηρείται για τα άλλα 2 προσομοιώματα. Από την άλλη μεριά, με το προσομοίωμα S-R η διάρρηξη φτάνει σαφέστερα μέχρι την επιφάνεια, και εμφανίζει ελαφρώς πιο έντονες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις (*ssi* σε όρους FLAC) συγκριτικά με το S-FR.

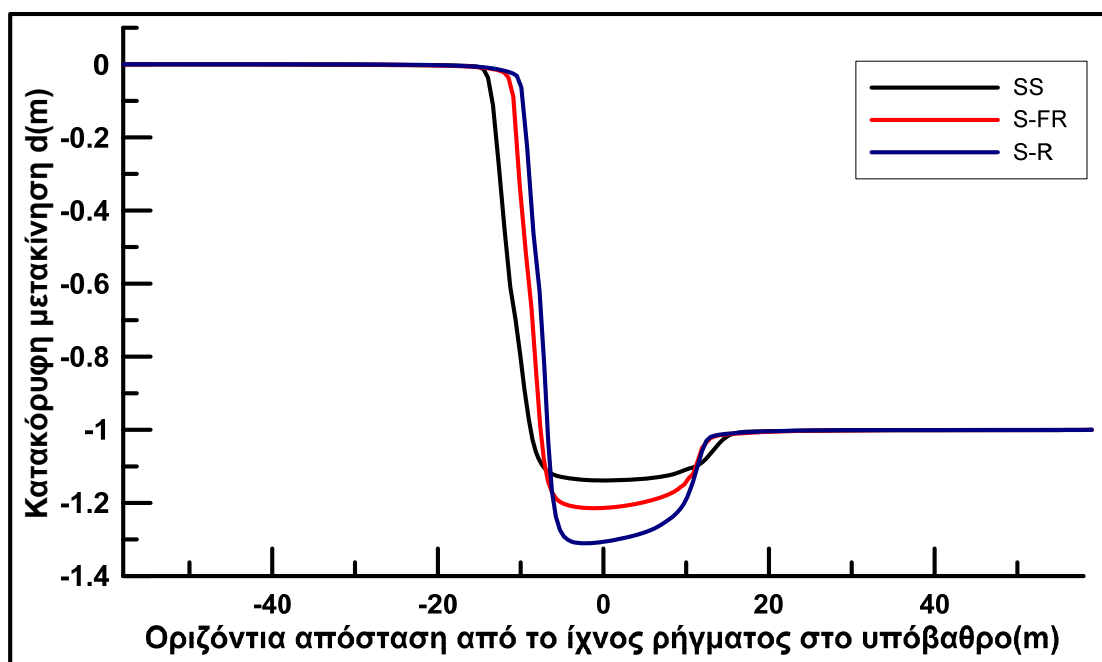


Σχήμα 4.1 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Με άλλα λόγια, συνολικά οι προσομοιώσεις με το SS και το S-R δείχνουν διαρρήξεις με μικρότερες και μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις, αντίστοιχα, συγκριτικά πάντα με το κατά τεκμήριο ορθότερο S-FR, αλλά οι διαφορές είναι γενικώς μικρές, ειδικά μεταξύ των S-R και S-FR. Επισημαίνεται ότι οι μικρές διαφορές μεταξύ S-R και S-FR είναι συμβατές με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου για τριαξονική θλίψη (όπου πρακτικώς συμπίπτουν), αλλά και με την αντίστοιχη για το SS όπου το έδαφος εμφανίζεται πιο συστολικό (σαν «χαλαρότερο») τουλάχιστον για τις μικρές τιμές κατακόρυφης τάσης που αντιστοιχούν σε ελεύθερο πεδίο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να διερευνηθεί η κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος στην οποία η διάρρηξη φτάνει στην επιφάνεια της στρώσης. Η μετατόπιση αυτή λαμβάνεται ως εκείνη για την οποία η διατμητική παραμόρφωση εντός της ζώνης διάρρηξης υπερβαίνει το 5% σε όλο το ύψος της στρώσης και είναι διαφορετική για τις τρεις αναλύσεις. Συγκεκριμένα, η ανάλυση με το SS συνεπάγεται ανάδυση της διάρρηξης σε μετακίνηση ρήγματος $d=0.2\text{m}$, πιο γρήγορα από τις αναλύσεις S-R και S-FR όπου για την ίδια μετακίνηση η διάρρηξη βρίσκεται αντίστοιχα σε βάθος 3m και 4m κάτω από την επιφάνεια. Σε μετακίνηση ρήγματος $d=0.4\text{m}$ η διάρρηξη έχει εμπεδωθεί πλήρως σε όλες τις αναλύσεις και μάλιστα οι διατμητικές παραμορφώσεις εντός της είναι ελαφρώς μεγαλύτερες για τα προσομοιώματα S-R και S-FR, εικόνα η οποία όπως προαναφέρθηκε διατηρείται ποιοτικά στις μεγαλύτερες μετακινήσεις.

Σε συνέχεια της διαδικασίας διερεύνησης, στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ με βάση τα αποτελέσματα των τριών προσομοιωμάτων.



Σχήμα 4.2 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d=1.0\text{m}$ για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, με χρήση προσομοιωμάτων SS (μαύρη γραμμή), S-R (μπλε γραμμή) και S-FR (κόκκινη γραμμή).

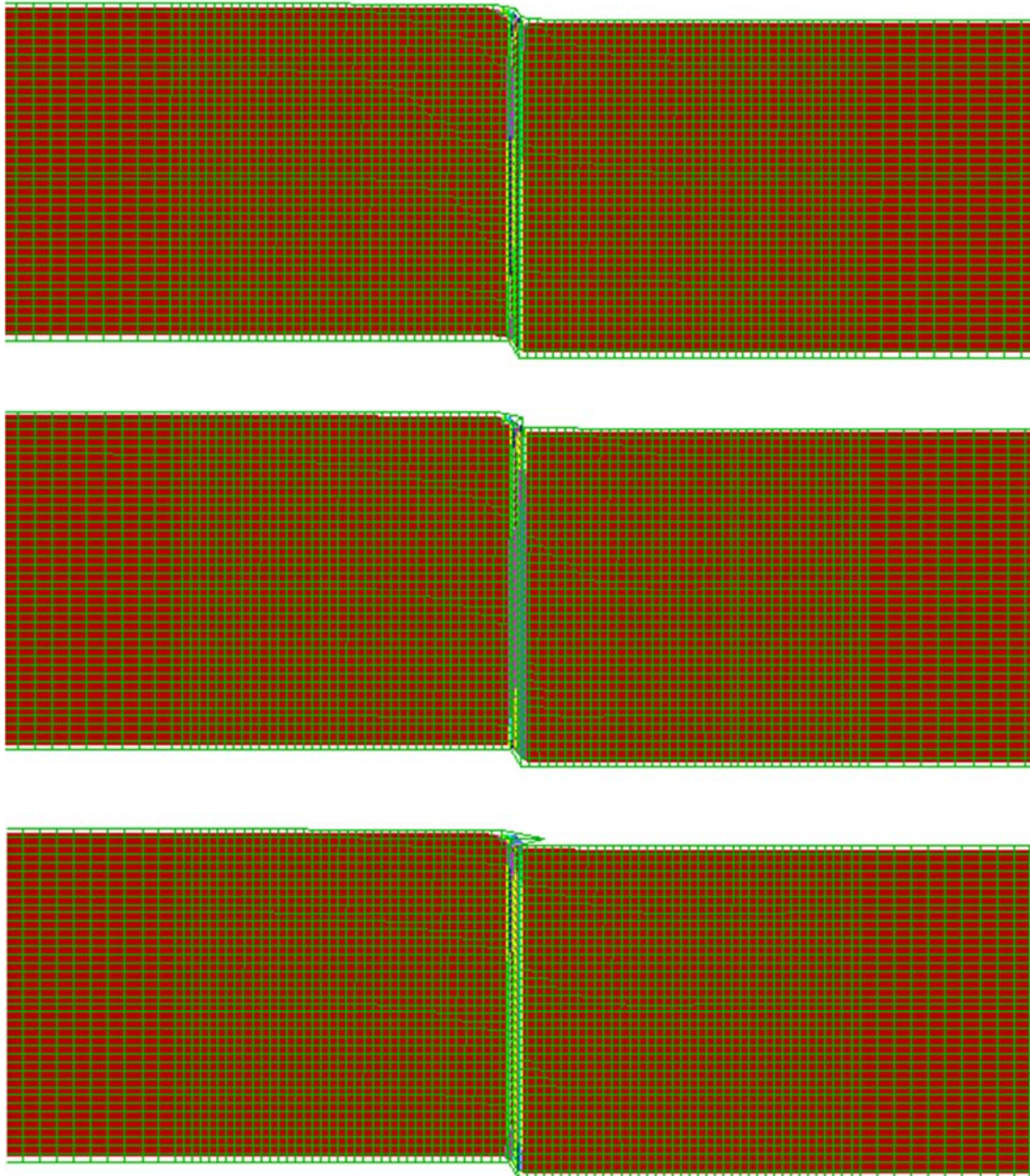
Συγκρίνοντας την εικόνα της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους που προκύπτει από τις αναλύσεις με τα δύο απλούστερα προσομοιώματα με την ανάλυση αναφοράς με το S-FR, επαληθεύεται η μικρή απόκλιση της θέσης ανάδυσης (προς το σταθερό τέμαχος) της κύριας διάρρηξης για το SS προσομοίωμα. Επιπλέον, δεδομένης της πλήρους ανάδυσης της δευτερεύουσας διάρρηξης για το S-R και το S-FR, προκύπτουν βαθύτερα κατακρημνίσματα συγκριτικά με εκείνο για το SS. Συνολικά λοιπόν, το προσομοίωμα SS που δίνει την πιο συστολική συμπεριφορά (για μικρές κατακόρυφες τάσεις του ελευθέρου πεδίου) οδηγεί και σε λιγότερο έντονες κλίσεις στην επιφάνεια. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι διαφορές είναι μικρές, και δεν δικαιολογούν τη χρήση σοφιστευμένων προσομοιωμάτων συγκριτικά με το απλουστευμένο SS.

4.2.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται αφορά εκείνη της διάδοσης «κατακόρυφου» ρήγματος επί ελευθέρου πεδίου (free field), όπου και πάλι συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τα προσομοιώματα SS, S-R και S-FR για «οριζόντια» δομή των κόκκων.

Υπογραμμίζεται πως στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας για την περίπτωση «κατακόρυφου» ρήγματος η γωνία επιβολής της διάρρηξης στο βραχώδες υπόβαθρο επιλέχθηκε να είναι $\beta=85^\circ$ για λόγους αριθμητικής σύγκλισης, ενώ οι διαφορές που θα προκύπταν για ρήγμα γωνίας $\beta=90^\circ$ αποδεικνύονται ασήμαντες (Βαρελά 2018).

Για την σύγκριση των αναλύσεων, αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, παρουσιάζονται αρχικώς στο **Σχήμα 4.3** οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους (*ssi* σε όρους FLAC) που προκύπτουν από την χρήση των τριών προσομοιωμάτων και για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0m$. Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις, ανεξαρτήτως προσομοιώματος προβλέπεται μια εντελώς κατακόρυφη διάρρηξη του «κατακόρυφου» ρήγματος από το υπόβαθρο. Σημειώνεται επίσης, χωρίς να παρατείνονται τα αντίστοιχα σχήματα, ότι η πλήρης ανάδυση της διάρρηξης, ήτοι $ssi > 5\%$ εντός της ζώνης διάρρηξης σε όλο το πάχος της στρώσης, συμβαίνει πρακτικά σε κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=0.2m$, ανεξαιρέτως χρησιμοποιούμενου προσομοιώματος, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα των απλούστερων προσομοιωμάτων για ακριβή προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος επί ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.3 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος $\beta=85^\circ$ και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0m$ υπό **ελεύθερο πεδίο**, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Ακολούθως, παρουσιάζεται το **Σχήμα 4.4** στο οποίο φαίνεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους όπως προκύπτει για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0m$ και χρήση των τριών προαναφερθέντων προσομοιωμάτων.

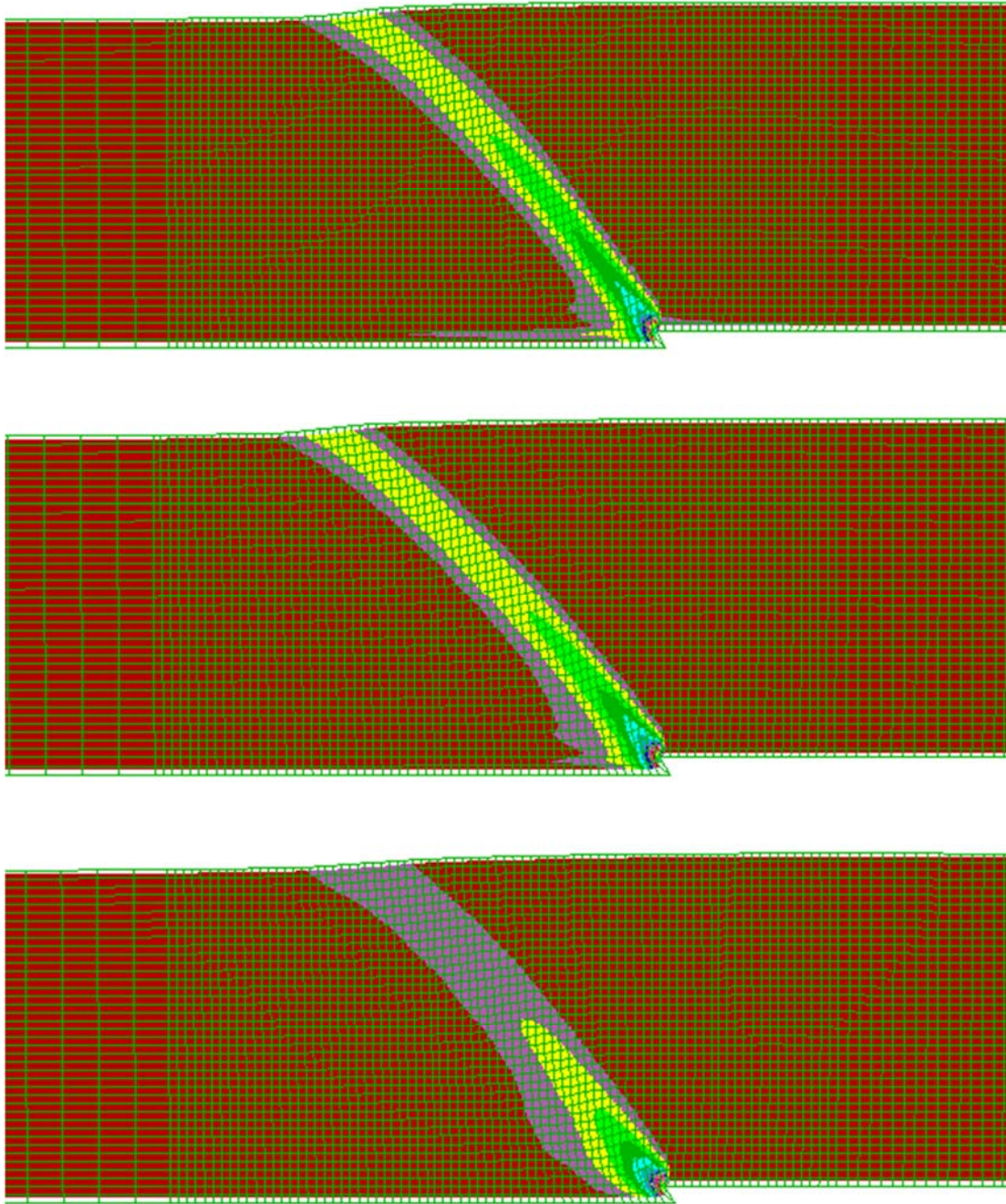


Σχήμα 4.4 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Το **Σχήμα 4.4** έρχεται να επιβεβαιώσει την προηγούμενη παρατήρηση σχετικά με την ακριβή πρόβλεψη της διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος με χρήση των απλούστερων προσομοιωμάτων SS και S-R. Όπως και για το κανονικό ρήγμα, οι ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους δεν συνηγορούν προς τη χρήση των ακριβέστερων S-R και S-FR, συγκριτικά με το απλούστερο SS.

4.2.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Τελευταία εκ των τριών περιπτώσεων για διάρρηξη ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο στην οποία διερευνάται η ακρίβεια των προσομοιωμάτων SS και S-R, έναντι του ορθότερου κατά τεκμήριο S-FR, είναι εκείνη για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$. Η εν λόγω γωνία $135^\circ (= 180^\circ - 45^\circ)$ αντιστοιχεί σε γωνία ρήγματος 45° με προς τα άνω μετακίνηση του κινούμενου τεμάχους. Προκειμένου να γίνει αυτή η σύγκριση, στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους (ssi σε όρους FLAC) για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$, όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις με τα 3 προσομοιώματα.



Σχήμα 4.5 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος $\beta=135^\circ$ και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.5** οι διαφορές που προκύπτουν σε όρους ss_i για χρήση των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων είναι μικρές και αφορούν μόνο στο μέγεθος των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων, και όχι στη θέση ανάπτυξης της διάρρηξης (η ανάλυση με το SS δίνει ανάπτυξη λίγο μετατοπισμένη προς το κινούμενο τέμαχος). Συγκεκριμένα, οι παραμορφώσεις εμφανίζονται πιο μεγάλες για το απλουστευμένο SS και μικρότερες για τα άλλα δύο προσομοιώματα (με τις ελάχιστες να εμφανίζονται για το S-FR). Δηλαδή, προκύπτει η αντίθετη εικόνα συγκριτικά με ό,τι

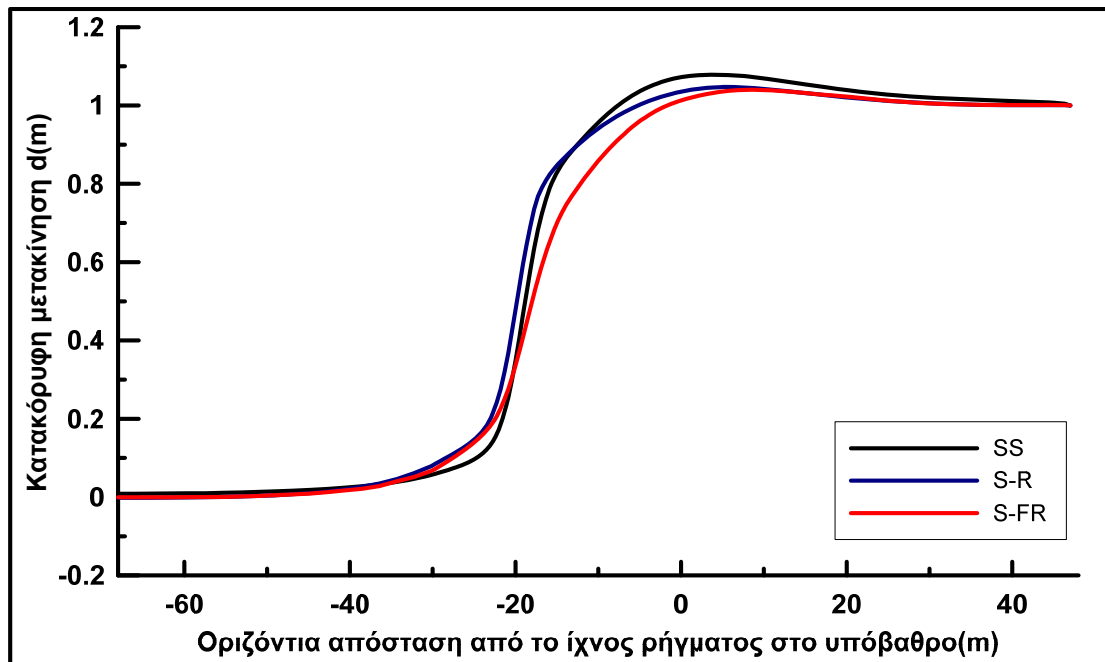
παρατηρήθηκε για το κανονικό ρήγμα, όπου οι παραμορφώσεις εμφανίζονται πιο μεγάλες για το απλουστευμένο SS και μικρότερες για τα άλλα δύο, πιο πολύπλοκα, προσομοιώματα. Συν τοις άλλοις, η διαφορά στο μέγεθος των παραμορφώσεων που υφίσταται για κατακόρυφη μετακίνηση $d=1.0m$, και η οποία μακροσκοπικά φαίνεται σαν η άμμος για χρήση SS να είναι «πυκνότερη» υπό την διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, διαφαίνεται ήδη από την διαφορετική κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος που απαιτείται για πλήρη ανάδυση της διάρρηξης, κάνοντας χρήση των τριών διαφορετικών προσομοιώματων. Συγκεκριμένα, για χρήση του SS η ανάδυση της διάρρηξης συμβαίνει σε μετακίνηση ίση με $d=0.6m$, μικρότερη από την μετακίνηση $d=0.8m$ που προβλέπουν τα δύο πιο πολύπλοκα προσομοιώματα ενώ τονίζεται πως οι παραπάνω διαφορές είναι αναμενόμενες με βάση την εικόνα των προσομοιώσεων σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, καθώς για δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού (αντίστοιχη ποιοτικά με το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο που επιβάλει η διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος) το SS εμφανίζει την πιο διαστολική συμπεριφορά, ενώ αντίθετα το S-FR την πλέον συστολική.

Επισημαίνεται επίσης ότι οι αναλύσεις με χρήση του S-FR επιβεβαίωσαν ότι η ανάδυση της διάρρηξης είναι ευχερέστερη για το κανονικό ρήγμα (όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες) συγκριτικά με το ανάστροφο ρήγμα (όπου οι παραμορφώσεις είναι μικρότερες) για την ίδια πάντα κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος ($d = 1.0m$ εδώ). Αυτό το βασικό συμπέρασμα είναι συμβατό με τη βιβλιογραφία που συγκλίνει στο ότι χρειάζονται πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις ρήγματος για την ανάδυση διαρρήξεων ανάστροφων ρηγμάτων, συγκριτικά με ό,τι χρειάζεται για κανονικά και «κατακόρυφα» (π.χ. Αναστασόπουλος 2007, Loukidis et al. 2009).

Στην συνέχεια συγκρίνεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για μετατόπιση ρήγματος $d=1.0m$, όπως αυτή προκύπτει για τις τρεις διαφορετικές αναλύσεις διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.6**.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι το προσομοίωμα με τις μικρότερες παραμορφώσεις στη ζώνη διάτμησης (S-FR) παρουσιάζει τις μικρότερες κλίσεις στην επιφάνεια, ενώ τα άλλα δύο εμφανίζουν ελαφρώς εντονότερες κλίσεις. Με άλλα λόγια, όσο πιο συστολική είναι η συμπεριφορά, τόσο ηπιότερες είναι οι κλίσεις στην επιφάνεια του εδάφους, ένα ποιοτικό συμπέρασμα που προέκυψε και για τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος στο ελεύθερο πεδίο.

Σε κάθε περίπτωση, η παραμορφωμένη επιφάνεια και με τα 3 προσομοιώματα παρουσιάζει πολύ μικρές διαφορές, που σε καμία περίπτωση δεν δικαιολογούν τη χρήση σοφιστευμένων προσομοιωμάτων συγκριτικά με το απλουστευμένο SS.



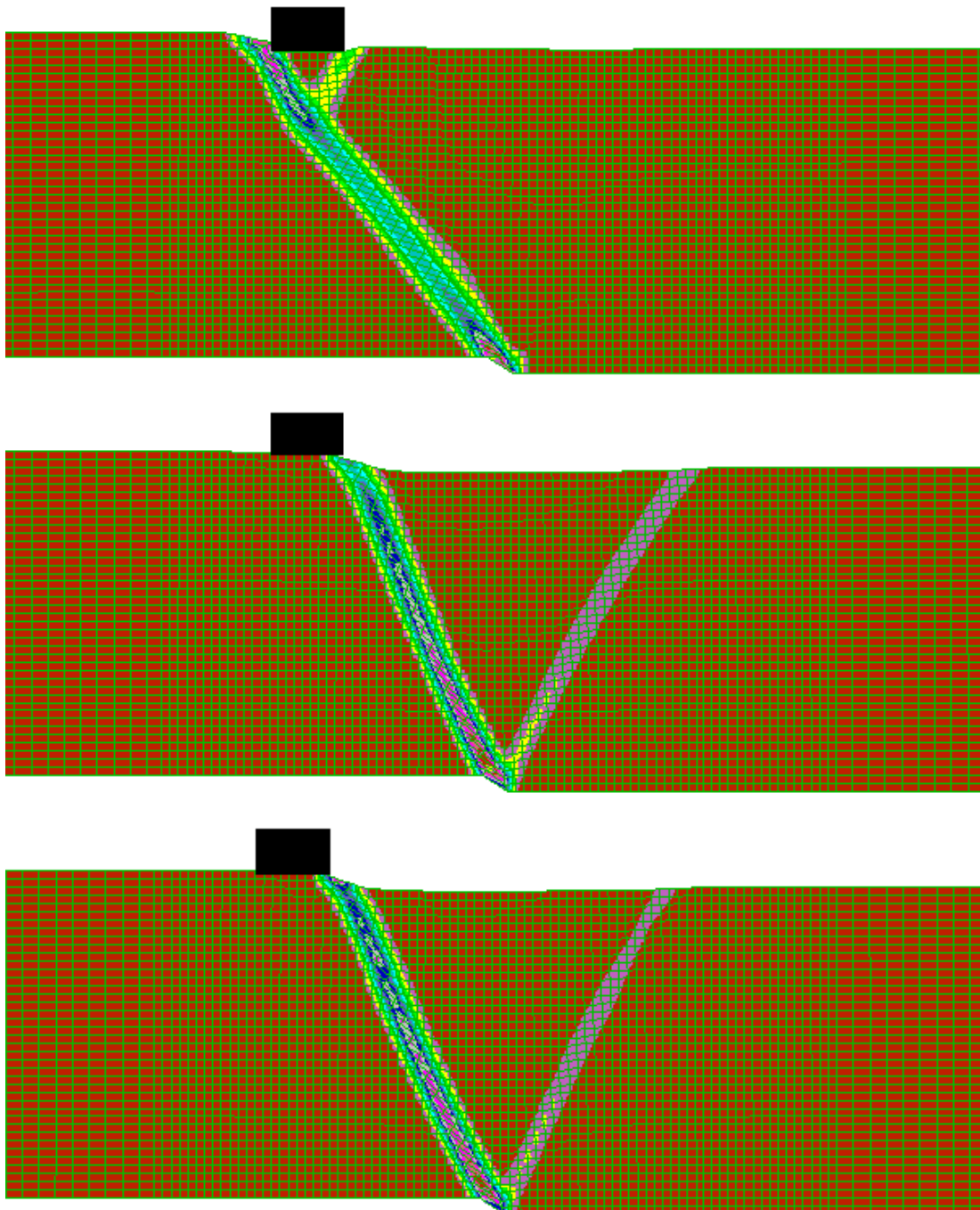
Σχήμα 4.6 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d=1.0\text{m}$ για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

4.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.3.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Σε αυτή την παράγραφο εισάγεται για πρώτη φορά στην παρούσα εργασία η έννοια της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, η οποία εξετάζεται για ανάλυση με τα προσομοιώματα SS, S-R και S-FR, σε αντιστοιχία με τις αναλύσεις ελεύθερου πεδίου. Όπως διευκρινίστηκε στην εισαγωγή του συγκεκριμένου κεφαλαίου, στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης προσομοιώνεται άκαμπτη και με δυνατότητα ανασηκώματος ή ολίσθησης κατασκευή πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$, το οποίο είναι σχετικώς μικρό (συγκριτικά με τη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου επί στρώσης άμμου μέσης πυκνότητας που διερευνάται εδώ). Το κέντρο της κατασκευής απέχει οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$), δηλαδή βρίσκεται στην περιοχή ανάδυσσης του ρήγματος στην επιφάνεια υπό ελεύθερο πεδίο.

Έτσι, αντίστοιχα με τη μορφή συγκρίσεων για τις συνθήκες ελεύθερου πεδίου, στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση (ssi σε όρους FLAC) της εδαφικής στρώσης για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος 1.0m , όπως προκύπτει από τις τρεις προαναφερθείσες αναλύσεις. Υπογραμμίζεται εδώ, πως αντίθετα με ό,τι παρατηρείται σε ελεύθερο πεδίο, σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται έντονα όχι μόνο στην δευτερεύουσα, αλλά και στην κύρια διάρρηξη.



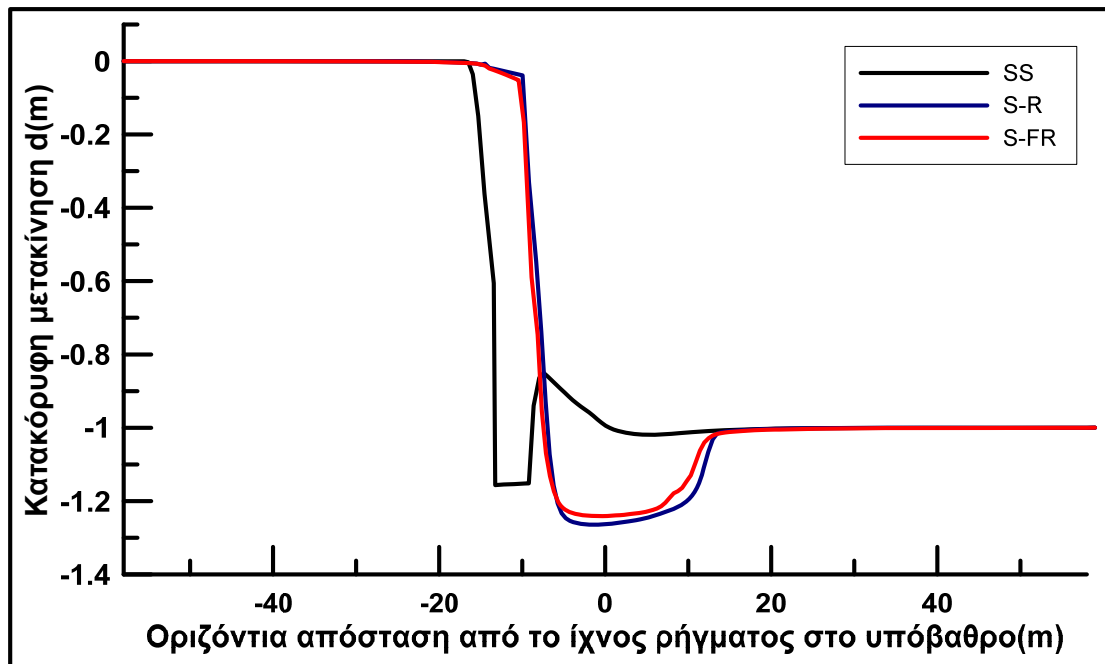
Σχήμα 4.7 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Συγκεκριμένα, το προσομοίωμα SS, όπως και στην περίπτωση του ελευθέρου πεδίου, αδυνατεί να προβλέψει την ύπαρξη δευτερεύουσας διάρρηξης στο μετακινούμενο τέμαχος, που ξεκινά από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο. Αντιθέτως, προβλέπει την ανάδυση της κύριας διάρρηξης στην αριστερή πλευρά της κατασκευής και την εμφάνιση αβαθούς δευτερεύουσας διάρρηξης ακριβώς στο δεξί της άκρο. Από την άλλη μεριά, με τα προσομοιώματα S-R και S-FR, η κύρια διάρρηξη αναδύεται στα

δεξιά της κατασκευής (πρακτικά στην ίδια θέση), ενώ η δευτερεύουσα δημιουργείται στο μετακινούμενο τέμαχος, όπως και στην περίπτωση διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο. Γενικώς, η εικόνα των αποτελεσμάτων των προσομοιωμάτων S-R και S-FR είναι σχεδόν η ίδια, και διαφοροποιήσεις υπάρχουν από χρήση του προσομοιώματος SS. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί πως στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος-κατασκευής φορτίου 100kPa το S-R προβλέπει εξαιρετικά καλά τα αποτελέσματα του ακριβέστερου S-FR, ενώ αντίθετα το απλούστερο προσομοίωμα SS προβλέπει λανθασμένα τόσο τη θέση ανάδυσης της κύριας διάρρηξης στην ελεύθερη επιφάνεια, όσο και την ύπαρξη και τη θέση της δευτερεύουσας διάρρηξης.

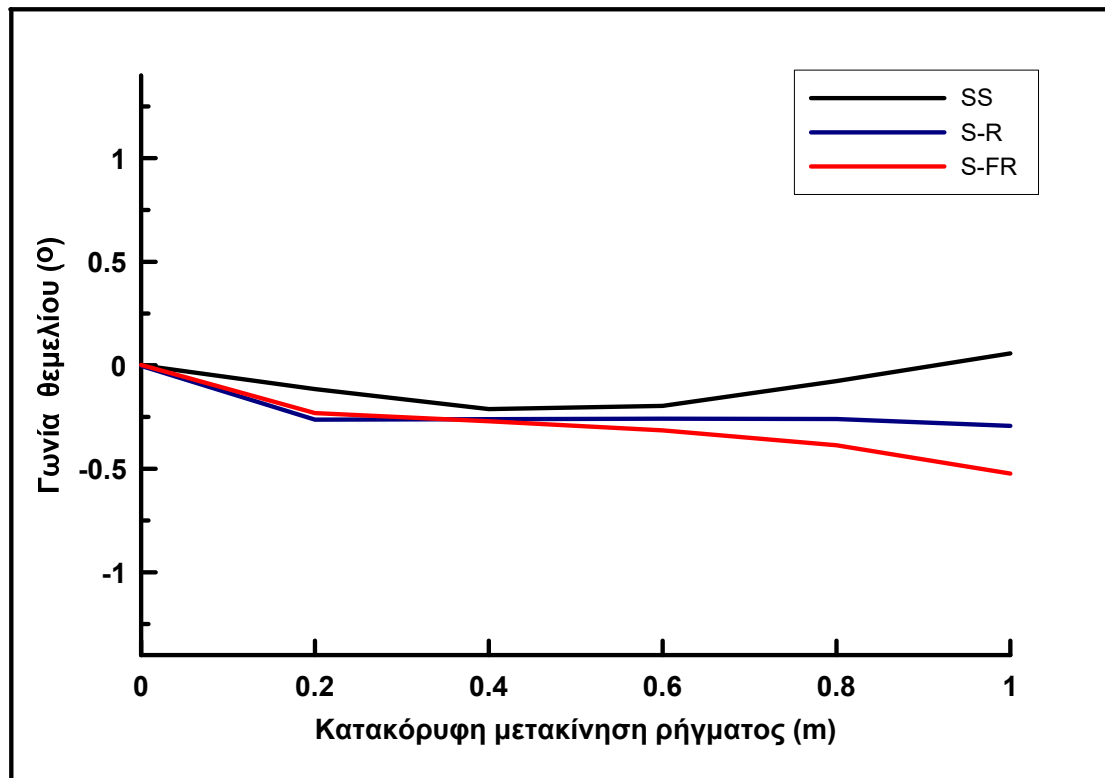
Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί η μετακίνηση ρήγματος στην οποία η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια, για χρήση των τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων. Σε αντίθεση με την περίπτωση ελεύθερου πεδίου, στην οποία η ανάδυση συνέβαινε πιο γρήγορα για χρήση του SS και μάλιστα σε μετακίνηση ρήγματος $d=0.2m$, εδώ στην ίδια μετακίνηση αναδύεται η διάρρηξη μόνο για την ανάλυση με S-FR ενώ κοντεύει να αναδυθεί και η S-R διάρρηξη. Για $d=0.4m$ η διάρρηξη έχει φτάσει στην επιφάνεια για όλες τις αναλύσεις, με τις μεγαλύτερες ssi που παρατηρούνται στην S-R ανάλυση να υποδηλώνουν πως η ανάδυση σε αυτή την περίπτωση απαιτεί μικρότερη μετακίνηση, συγκριτικά με την SS ανάλυση. Παρατηρείται επομένως πως η διάρρηξη φτάνει πρακτικά ταυτόχρονα στην επιφάνεια για ανάλυση με τα δύο σοφιστευμένα προσομοιώματα, ενώ η εκτροπή της προς το σταθερό τέμαχος που συμβαίνει για χρήση του SS, έχει ως αποτέλεσμα η διάρρηξη να πρέπει να διέρθει από το έδαφος κάτω από το πέδιλο, προκειμένου να αναδυθεί, και έτσι να καθυστερεί λόγω της αυξημένης αντοχής του που οφείλεται στην αύξηση των κατακόρυφων τάσεων μετά την τοποθέτηση του πεδίου.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0m$, όπως αυτή προκύπτει με βάση τις τρεις προαναφερθείσες αναλύσεις. Η εικόνα των αποτελεσμάτων έρχεται να επιβεβαιώσει το προηγούμενο συμπέρασμα περί πρακτικά ταύτισης της παραμορφωμένης επιφάνειας που προκύπτει από τις αναλύσεις με τα προσομοιώματα S-R και S-FR. Αντίθετα, η ανάλυση με το SS προσομοίωμα παρουσιάζει πολύ σημαντικές διαφορές, όπως η μη δημιουργία κατακρημνίσματος και η εκτροπή της κύριας διάρρηξης στα αριστερά της κατασκευής, γεγονός που οδηγεί την κατασκευή στο κινούμενο τέμαχος επιβάλλοντας της καθιζήσεις της τάξης της κατακόρυφης μετατόπισης της διάρρηξης (περί το 1.0m εδώ).



Σχήμα 4.8 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$ σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Λεπτομερέστερη παρατήρηση του **Σχήματος 4.8** υποδεικνύει πέραν των καθιζήσεων και στροφές του θεμελίου, διαφορετικές για τις τρεις πραγματοποιηθείσες αναλύσεις. Για την διακρίβωση των διαφορών στην τελική τιμή της στροφής αλλά και την εξέλιξή της σε όλα τα στάδια μετακίνησης του ρήγματος, στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζεται η τιμή της στροφής συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος, για χρήση των τριών προαναφερθέντων προσομοιωμάτων. Η τελική θέση της κατασκευής στο μετακινούμενο τέμαχος, για χρήση του SS προσομοιώματος, οδηγεί σε αρχικές αρνητικές στροφές (δεξιόστροφες). Ωστόσο, η μετ'έπειτα δημιουργία αβαθούς δευτερεύουσας διάρρηξης, έχει ως αποτέλεσμα για μετακίνηση ρήγματος μεγαλύτερης από 0.6m να εμφανίζονται στροφές αντιωρολογιακής φοράς, με την τελική τιμή της στροφής να προβλέπεται λίγο μεγαλύτερη του μηδενός (αριστερόστροφη, περίπου ίση με 0.1°). Αντίθετα, οι S-R και S-FR αναλύσεις προβλέπουν παρόμοιες στροφές, ωρολογιακής φοράς (αρνητικές) για όλες τις μετακινήσεις ρήγματος και τελικής απόλυτης τιμής μεγαλύτερης από εκείνη που προβλέπει η χρήση SS (περί τις 0.3° - 0.5° , κατ' απόλυτη τιμή).



Σχήμα 4.9 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=12\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Υπενθυμίζεται ότι το προσομοίωμα SS προβλέπει ανάδυση της διάρρηξης κανονικού ρήγματος ελαφρώς μετατοπισμένη προς το σταθερό τέμαχος (αριστερά) κατά 2-3 m περίπου, συγκριτικά με τα άλλα 2 προσομοιώματα. Έτσι, για τη συγκεκριμένη θέση της κατασκευής στην περιοχή ανάδυσης υπό ελεύθερο πεδίο, η ανάλυση με το SS δείχνει εκτροπή της ανάδυσης ακόμη περισσότερο προς το σταθερό τέμαχος, ενώ αντίστοιχα οι αναλύσεις με τα S-R και S-FR υποδεικνύουν εκτροπή προς το μετακινούμενο τέμαχος. Σε κάθε περίπτωση, ο λόγος που συμβαίνει αυτή η εκτροπή είναι ότι η ύπαρξη φορτίου αυξάνει τις τάσεις και συνεπώς τη διατμητική αντοχή του εδάφους θεμελίωσης της κατασκευής, οπότε η διάρρηξη αναζητά έδαφος μικρότερης αντοχής για να αναδυθεί.

Αυτές οι διαφορές είναι μεγάλες και σαφώς μη αναμενόμενες, με δεδομένη την ικανοποιητική σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα 3 προσομοιώματα για τη διάρρηξη του ίδιου κανονικού ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου (π.χ. διαφορές στη θέση ανάδυσης κατά 2-3m περίπου). Συμπερασματικά, η χρήση του απλουστευμένου SS κρίνεται μη-ακριβής, ενώ η χρήση του ισοτροπικού S-R θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

4.3.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Προχωρώντας στην διερεύνηση της επόμενης περίπτωσης αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$, στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση (ssi σε όρους FLAC) της εδαφικής στρώσης για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους 4m. Η θέση της κατασκευής σε αυτές τις αναλύσεις απέχει οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (δηλαδή στο σταθερό τέμαχος για συνθήκες

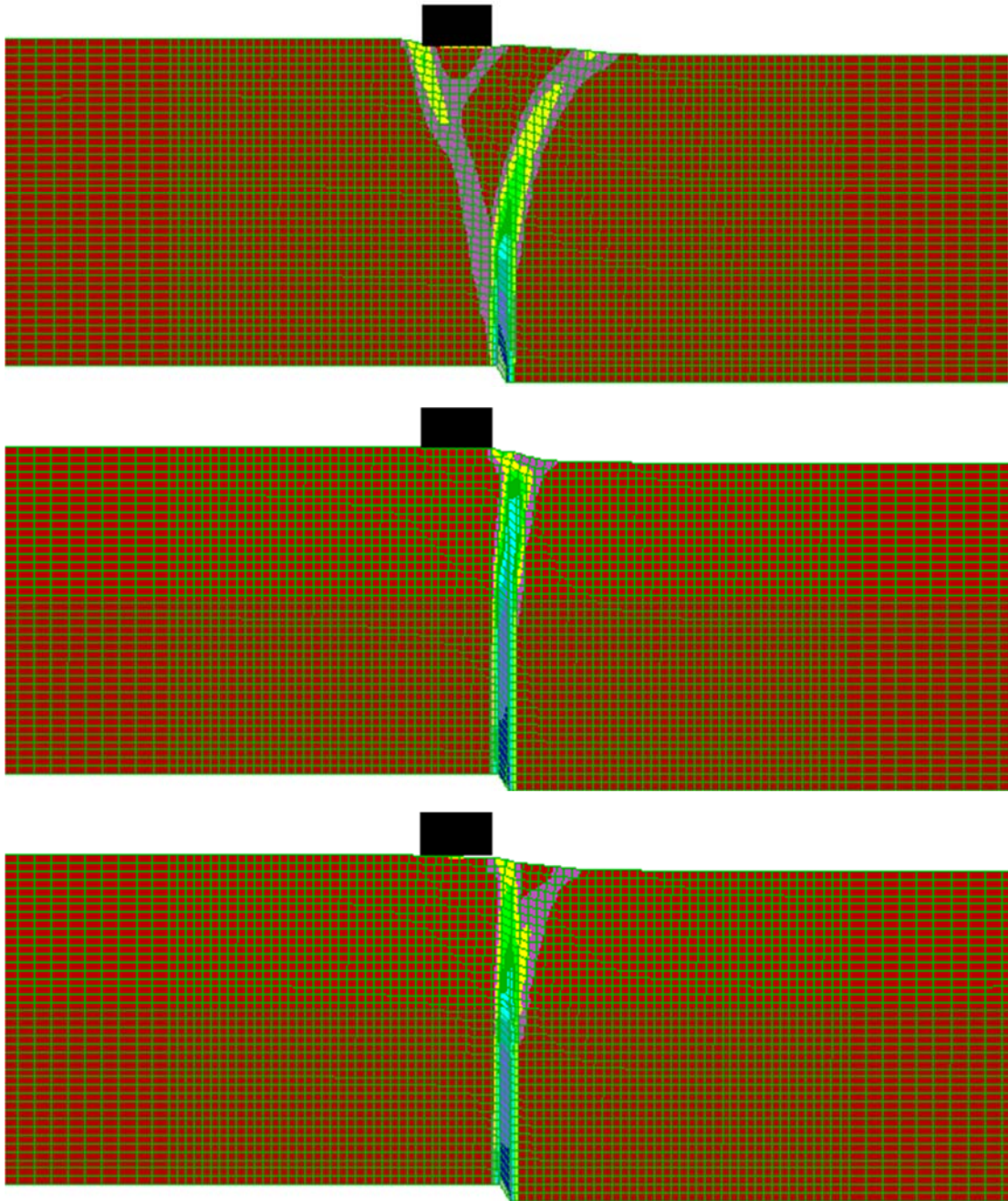
ελευθέρου πεδίου), και οι τρεις εξεταζόμενες αναλύσεις αφορούν τα 3 προσομοιώματα SS, S-R και S-FR, όπως και πριν.

Οι διαφορές που προκύπτουν εδώ με χρήση των τριών προσομοιωμάτων είναι λιγότερο έντονες από αυτές στην περίπτωση κανονικού ρήγματος, δεδομένου ότι σε όλες τις περιπτώσεις προβλέπεται η ανάδυση της κύριας διάρρηξης επί της ίδιας (δεξιάς) πλευράς της κατασκευής, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη θέση ($C=3m$). Ωστόσο, δεδομένου ότι τα ίδια προσομοιώματα στην περίπτωση διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα, η απόκλιση τους για αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής εδώ είναι και πάλι αξιοσημείωτη.

Συγκεκριμένα, και πάλι το απλουστευμένο προσομοίωμα SS δίνει διαφορετικά αποτελέσματα απ' ό,τι τα 2 πιο πολύπλοκα προσομοιώματα S-R και S-FR. Ειδικότερα, στην ανάλυση με το προσομοίωμα SS, η κύρια διάρρηξη προβλέπεται αρκετά δεξιότερα της κατασκευής, ενώ σχηματίζεται και δευτερεύουσα διάρρηξη, η οποία διέρχεται από το αριστερό της άκρο. Αντίθετα, με την ανάλυση S-R προβλέπεται ορθά η θέση της κύριας διάρρηξης (ακριβώς δεξιά από την κατασκευή), με μόνη επουσιώδη διαφορά την αδυναμία πρόβλεψης της μικρής δευτερεύουσας διάρρηξης πλησίον της επιφάνειας που δίνει η ανάλυση με το κατά τεκμήριο ορθό προσομοίωμα S-FR.

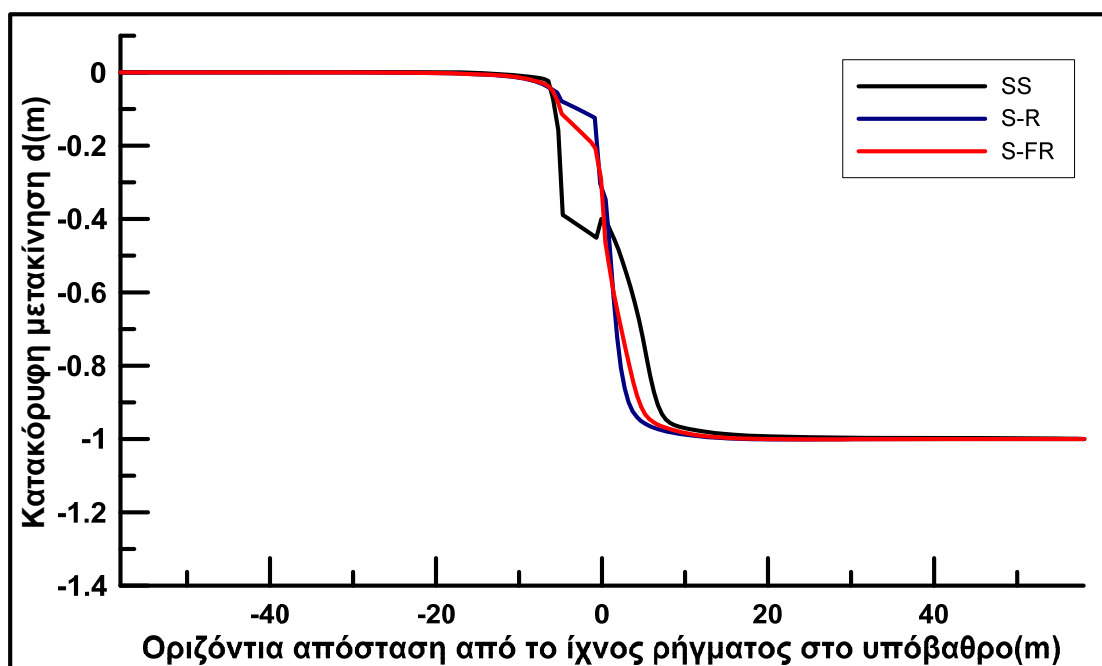
Διαφορές στα αποτελέσματα για χρήση του SS προδιαγράφονται άλλωστε ήδη από την απαιτούμενη μετακίνηση ρήγματος για πλήρη ανάδυση της διάρρηξης, καθώς η S-FR ανάλυση προβλέπει την τιμή της ίση με $d=0.4m$ και η S-R λίγο μεγαλύτερη, ενώ η SS ανάλυση απέχει αρκετά από τις δύο πολυπλοκότερες, προβλέποντας την ανάδυση της διάρρηξης σε μετακίνηση μεγαλύτερη από $d=0.6m$. Φαίνεται επομένως πως ενώ η αύξηση της κατακόρυφης τάσης και κατ'επέκταση της αντοχής του εδάφους λόγω τοποθέτησης της κατασκευής επηρεάζει όλες τις αναλύσεις (συγκριτικά με την περίπτωση διάδοσης της διάρρηξης επί ελευθέρου πεδίου), η μέγιστη επίδραση συμβαίνει για χρήση του SS προσομοιώματος. Για την χρήση του ίδιου προσομοιώματος συμβαίνει αργότερα η μεγαλύτερη εκτροπή της θέσης ανάδυσης της διάρρηξης, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.10**.

Οι διαφορές μεταξύ των τριών αναλύσεων φαίνονται ακόμα καλύτερα από την σύγκριση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $1.0m$, η οποία παρουσιάζεται γραφικά στο **Σχήμα 4.11**. Από το σχήμα αυτό υπογραμμίζεται η επίδραση της δευτερεύουσας διάρρηξης στα αριστερά της κατασκευής για την ανάλυση με το SS, η οποία επιβάλλει σημαντικές καθιζήσεις στην κατασκευή (στο 40% της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος), κάτι που υπογραμμίζει τη διαφορά της συγκεκριμένης ανάλυσης από τις άλλες δύο με τα πολυπλοκότερα S-R και S-FR, των οποίων οι διαφορές είναι ανεπαίσθητες (όπως ισχύει και για το κανονικό ρήγμα).



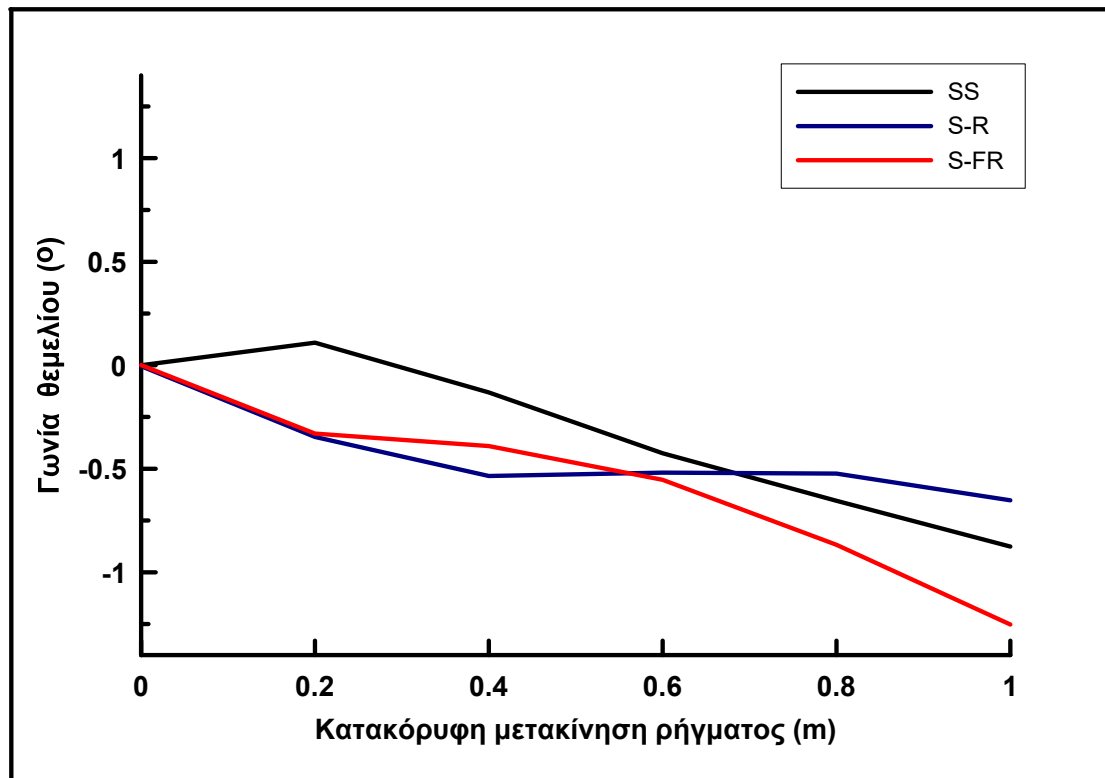
Σχήμα 4.10 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος $\beta=85^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο συντελεστής ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας της κατασκευής αναμένεται πιο μικρός στην περίπτωση της ανάλυσης με το απλουστευμένο προσομοίωμα SS (δες παράγραφο 4.1 για λεπτομέρειες). Αυτό μπορεί να σχετίζεται με τη δημιουργία της δευτερεύουσας διάρρηξης προς τα αριστερά της κατασκευής (και της μικρή τριτεύουσας προς το δεξί της άκρο), μόνο για την ανάλυση με το προσομοίωμα SS, καθώς για τα άλλα προσομοιώματα οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας αναμένονται μεγαλύτεροι.



Σχήμα 4.11 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d=1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$ σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Με βάση το **Σχήμα 4.11** παρατηρείται επιπρόσθετα πως για μετακίνηση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ η κατασκευή στρίβει δεξιόστροφα, ανεξαιρέτως του χρησιμοποιούμενου προσομοιώματος. Ωστόσο συγκρίνοντας την εξέλιξη της τιμής της στροφής συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος στο **Σχήμα 4.12**, προκύπτει το συμπέρασμα πως κάνοντας χρήση του SS προσομοιώματος, σε αρχικές μετακινήσεις ρήγματος προβλέπονται θετικές στροφές (δεξιόστροφες), αντίθετης φοράς από αυτές που προβλέπει η χρήση των πολυπλοκότερων S-R και S-FR. Συγκεκριμένα, τα δύο τελευταία προσομοιώματα προβλεπουν -όπως και στη περίπτωση αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου-πρακτικά παρόμοια εξέλιξη της στροφής (αριστερόστροφη, ανεξαιρέτως μετακίνησης του ρήγματος), με την μικρότερη τελική τιμή που προκύπτει για χρήση του ισοτροπικού S-R, να σχετίζεται με τον μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα, που αναμένεται για χρήση του συγκεκριμένου προσομοιώματος.



Σχήμα 4.12 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=3\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

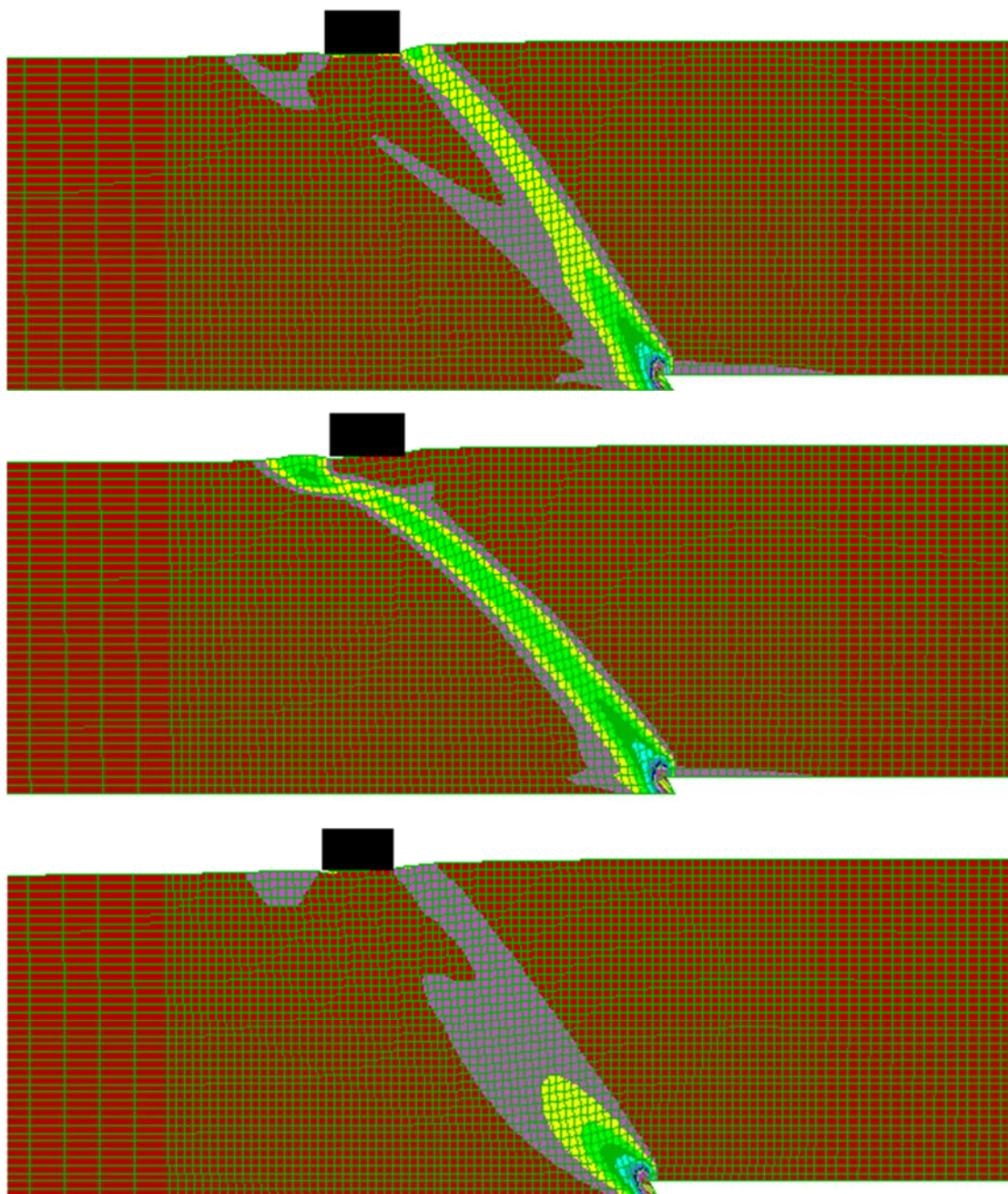
Με βάση τα παραπάνω, οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των αναλύσεων με τα 3 προσομοιώματα είναι μεγάλες και σαφώς μη αναμενόμενες, με δεδομένη την ταύτιση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων για τη διάρρηξη του ίδιου «κατακόρυφου» ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Συμπερασματικά, η χρήση του απλουστευμένου SS κρίνεται μη-ακριβής, ενώ η χρήση του ισοτροπικού S-R θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

4.3.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Η τελευταία περίπτωση που διερευνάται στο πλαίσιο αυτής της παραγράφου αφορά στην διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με ύπαρξη κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ και πλάτους $B=4\text{m}$ σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο. Όπως και στα προηγούμενες δύο περιπτώσεις, γίνονται τρεις αναλύσεις με τα υπό σύγκριση προσομοιώματα (SS, S-R και S-FR) και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται αρχικά σε όρους συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων (*ssi* στο FLAC) στο **Σχήμα 4.13**.

Στο σχήμα αυτό, οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τα SS και S-R έναντι της ανάλυσης με το S-FR είναι μεγάλες, και μάλιστα με το SS οι διαφορές δείχνουν μικρότερες απ' ό,τι με το S-R. Συγκεκριμένα, με το SS προσομοίωμα η κύρια διάρρηξη εμφανίζεται στη δεξιά πλευρά της κατασκευής σε συμφωνία με την εικόνα που προκύπτει με το S-FR. Οι διαφορές μεταξύ των δύο αποτυπώνονται στις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός των ζωνών διάτμησης, οι οποίες

είναι αρκετά μικρότερες στην περίπτωση του S-FR, εικόνα που συμβαδίζει και με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανάστροφου ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



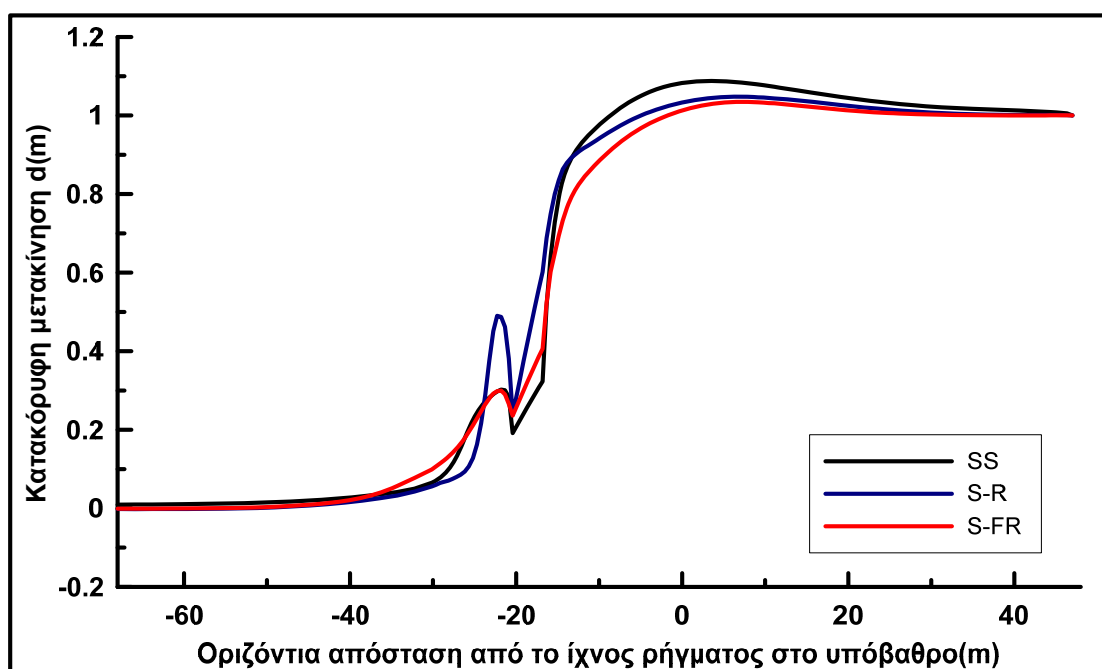
Σχήμα 4.13 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος $\beta=135^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Αντιθέτως, με χρήση του S-R προσομοιώματος η εικόνα των αποτελεσμάτων διαφέρει αρκετά από την ορθότερη με χρήση του S-FR, με κυριότερη διαφορά την εκτροπή της κύριας διάρρηξης προς τα αριστερά της κατασκευής. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σε πρώτη ανάγνωση μη-αναμενόμενο, δεδομένου ότι για ελεύθερο πεδίο η απόκριση με το S-R ήταν ενδιάμεση μεταξύ της πλέον συστολικής με το S-FR και της ελαφρώς πιο

διαστολικής με το SS. Όμως με χρήση του S-R προκύπτει η συγκριτικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα του εδάφους κάτω από την κατασκευή. Συνεπώς, η περιοχή κάτω από την κατασκευή αποκρίνεται με μεγαλύτερη στιβαρότητα και αντοχή όταν χρησιμοποιείται το προσομοίωμα S-R, γεγονός που εκτρέπει τη διάρρηξη σε περιοχή μικρότερης στιβαρότητας και αντοχής προς τα αριστερά της.

Σημειώνεται πως η μετακίνηση ρήγματος που χρειάζεται για να εμφανιστεί η διάρρηξη στη επιφάνεια είναι $d=0.6m$, $d=0.8m$ και $d=1.0m$ για την περίπτωση SS, S-R και S-FR αντίστοιχα.

Για την πληρέστερη διερεύνηση των ανωτέρω, στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζεται η εικόνα της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για την αλληλεπίδραση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος με κατασκευή για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $1.0m$, όπως προκύπτει με βάση τις τρεις αναλύσεις.

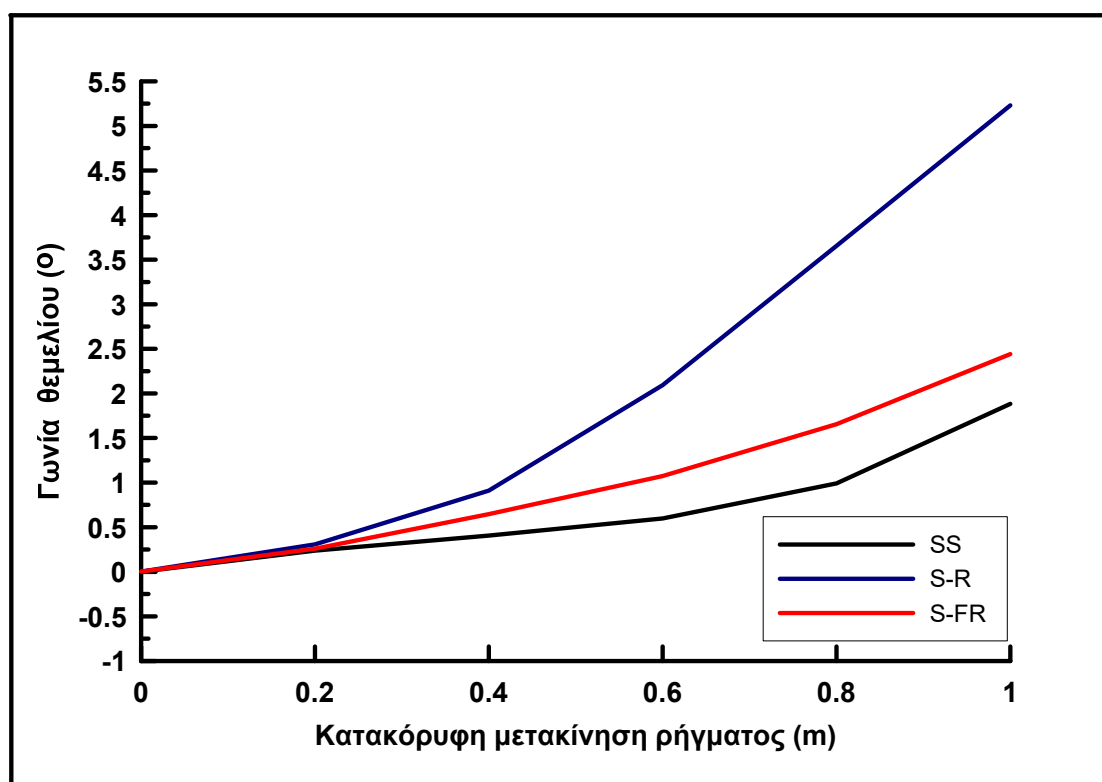


Σχήμα 4.14 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d=1.0m$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4m$ και φορτίου $q=100kPa$ σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Με βάση το **Σχήμα 4.14** προκύπτει πως μακριά από την κατασκευή η απόκριση της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους είναι αντίστοιχη με εκείνη για διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο, δηλαδή οι αναλύσεις με το SS και το S-FR δίνουν την πλέον διαστολική και συστολική συμπεριφορά. Όμως, στη γειτονιά της κατασκευής, η απόκριση εξαρτάται από τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους με χρήση των 3 προσομοιωμάτων, δηλαδή η ανάλυση με το S-FR δίνει ενδιάμεσα αποτελέσματα συγκριτικά με τα άλλα 2 προσομοιώματα. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι αναλύσεις δίνουν ανύψωση της κατασκευής λόγω της διάρρηξης, με τη μέγιστη στροφή της να

εμφανίζεται για την ανάλυση με το S-R όπου η κατασκευή βρίσκεται σαφέστερα στο ανερχόμενο τέμαχος της διάρρηξης (αναδύεται στα αριστερά της).

Χάριν λεπτομερέστερης σύγκρισης, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής του θεμελίου συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος, όπως αυτή προκύπτει για χρήση των τριών διαφορετικών καταστατικών προσομοιώματων. Η ομοιότητα των αναλύσεων SS και S-FR επιβεβαιώνεται για όλες τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος όπως επίσης και η σαφέστερα μεγαλύτερη τιμή της στροφής για την S-R ανάλυση, ήδη για μετακινήσεις ρήγματος μεγαλύτερες από 0.4m. (π.χ. για $d=1.0\text{m}$ η στροφή με το S-R προκύπτει ίση με 5.3° ενώ με τα SS, S-FR περί των $2^\circ - 2.5^\circ$)



Σχήμα 4.15 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=18\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Συμπερασματικά, η χρήση οποιουδήποτε εκ των SS και S-R δεν κρίνεται ικανοποιητική.

4.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.4.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

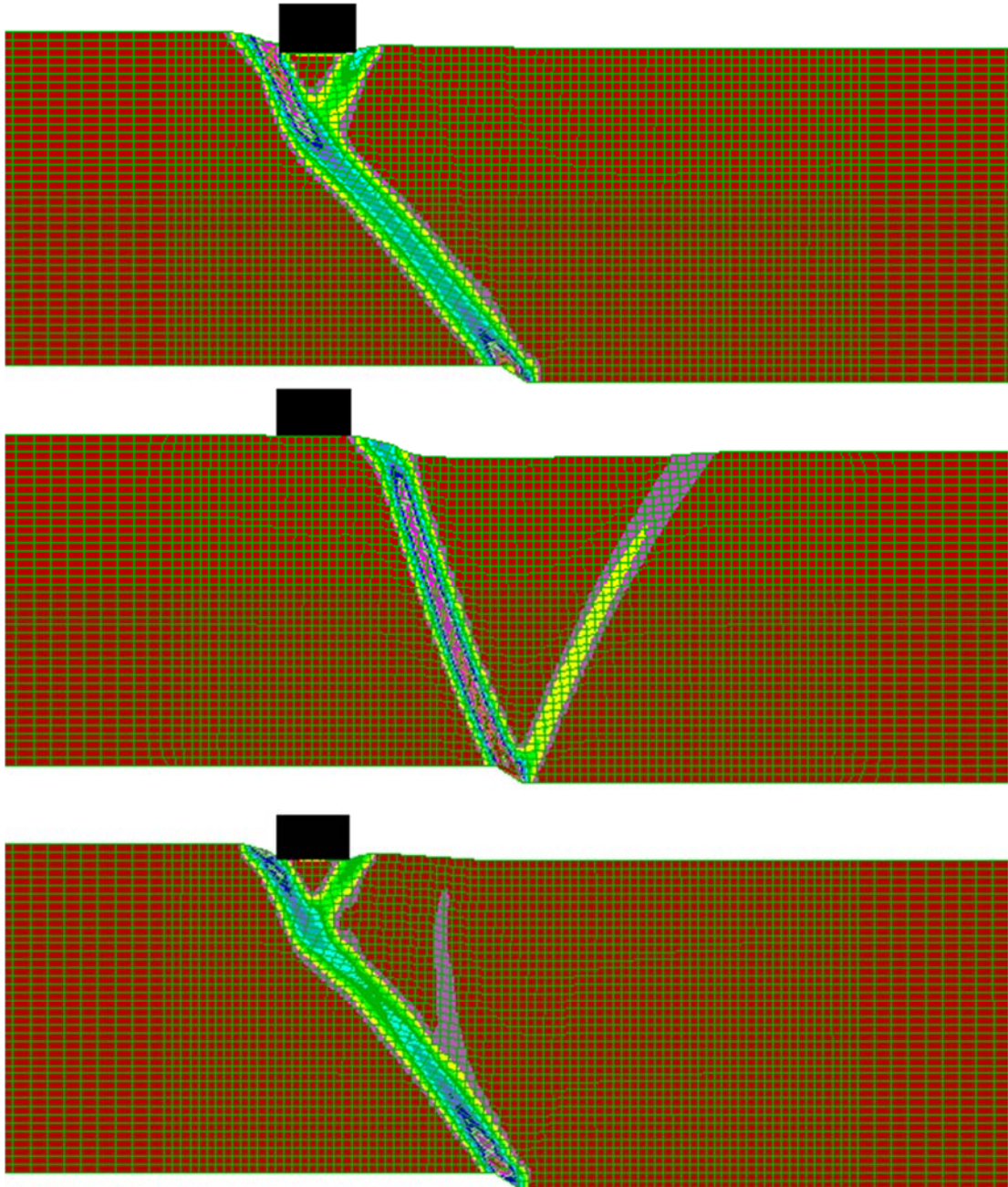
Στην προηγούμενη παράγραφο διερευνήθηκε πρώτη φορά η επίδραση της χρήσης των SS και S-R στην ακρίβεια της προσομοίωσης του προβλήματος της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, εξετάζοντας την περίπτωση κατασκευής με σχετικά μικρό φορτίο $q=100\text{kPa}$ επί της επιφάνειας του εδάφους. Στην παρούσα παράγραφο, το ίδιο πρόβλημα μελετάται για κατασκευή με σχεδόν διπλάσιο φορτίο (ήτοι $q=185\text{kPa}$),

προκειμένου να εκτιμηθεί η ενδεχόμενη επίδραση της αύξησης του στα συμπεράσματα που προέκυψαν για τα προσομοιώματα με βάση τις αναλύσεις της παραγράφου 4.3.

Έτσι, εδώ μελετάται η διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με ύπαρξη κατασκευής πλάτους ($B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$) στην επιφάνεια της στρώσης και σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (όπως ακριβώς και στην παράγραφο 4.3, χάριν σύγκρισης). Υπογραμμίζεται ότι η αύξηση του φορτίου της κατασκευής μειώνει τους συντελεστές ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας συγκριτικά με τις περιπτώσεις για $q=100\text{kPa}$ της παραγράφου 4.3.

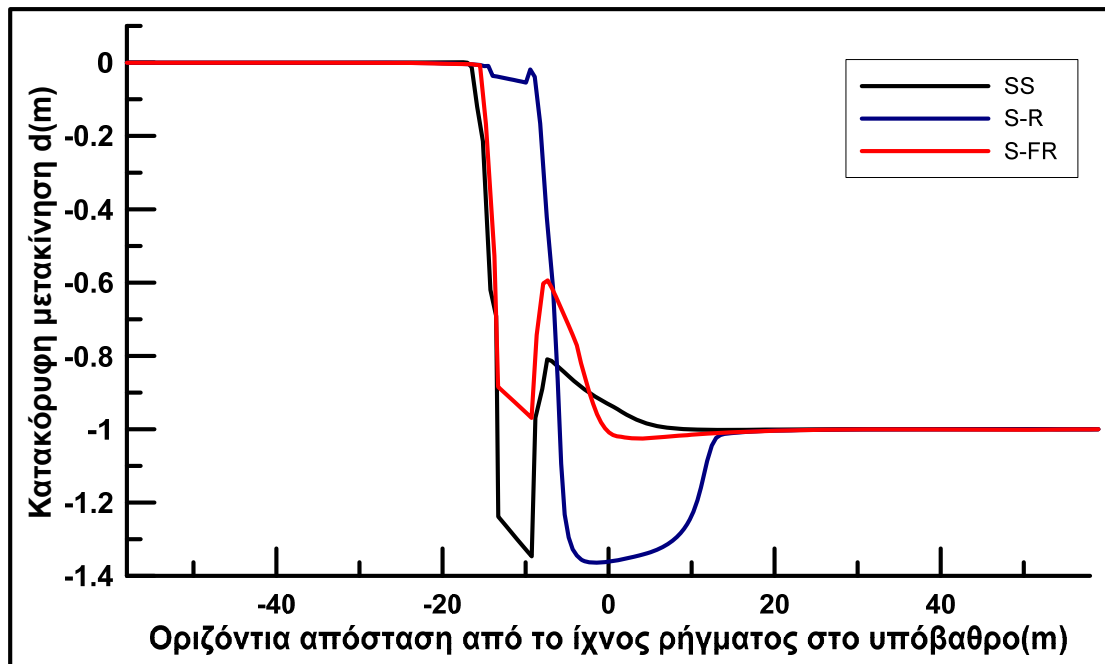
Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι εν λόγω συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους (*ssi* σε όρους FLAC) όπως προκύπτουν από τις τρεις αναλύσεις. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται αφορούν, όπως και στις προηγούμενες παραγράφους, κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$, ενώ σημειώνεται, χωρίς να παρατείνονται τα αντίστοιχα σχήματα, πως σε αυτές τις αναλύσεις η διάρρηξη φτάνει στην επιφάνεια πρακτικά σε ίδια μετακίνηση ρήγματος, ίση με $d=0.4\text{m}$

Παρατηρείται πως η αύξηση του φορτίου της κατασκευής στην περίπτωση της ανάλυσης με τα προσομοιώματα SS και S-R δεν επιδρά ουσιαστικά στην τελική εικόνα της διάρρηξης, όπως αυτή προκύπτει για το μικρότερο φορτίο παρά μόνο οδηγεί σε μεγαλύτερες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός των ζωνών διάτμησης. Αντίθετα, οι αναλύσεις με το, κατά τεκμήριο, ορθότερο προσομοίωμα S-FR δείχνουν πως για διπλασιασμό του φορτίου η κύρια διάρρηξη εκτρέπεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ στις αναλύσεις για $q=100\text{kPa}$ εκείνη εμφανιζόταν στη δεξιά πλευρά. Αυτό συμβαίνει επειδή δημιουργείται πρίσμα ολίσθησης κάτω από την κατασκευή και για την ανάλυση με το S-FR, όπως συμβαίνει και για την ανάλυση με το SS ακόμη και για το μικρότερο φορτίο $q=100\text{kPa}$. Αυτό αποδίδεται στο ότι το μεγαλύτερο φορτίο $q=185\text{kPa}$ κάνει κρίσιμο τον συντελεστή ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας και για το προσομοίωμα S-FR, και όχι μόνο για το προσομοίωμα SS όπως ίσχυε για το μικρότερο φορτίο. Αυτό εξηγεί γιατί η εικόνα του παραμορφωμένου εδάφους συμφωνεί περισσότερο με τις αναλύσεις με το SS, απ' ό,τι με το S-R προσομοίωμα, σε αντίθεση με ό,τι παρατηρήθηκε για τις περιπτώσεις ελευθέρου πεδίου και κατασκευής με μικρό φορτίο όπου η εικόνα του παραμορφωμένου εδάφους συμφωνεί περισσότερο με τις αναλύσεις με το S-R, απ' ό,τι με το SS προσομοίωμα.



Σχήμα 4.16 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Προκειμένου να μελετηθούν περαιτέρω οι ανωτέρω αναλύσεις, στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, όπως προκύπτει από τις τρεις αναλύσεις με κατασκευή μεγάλου φορτίου και για κατακόρυφη μετατόπιση κανονικού ρήγματος $d=1.0\text{m}$.



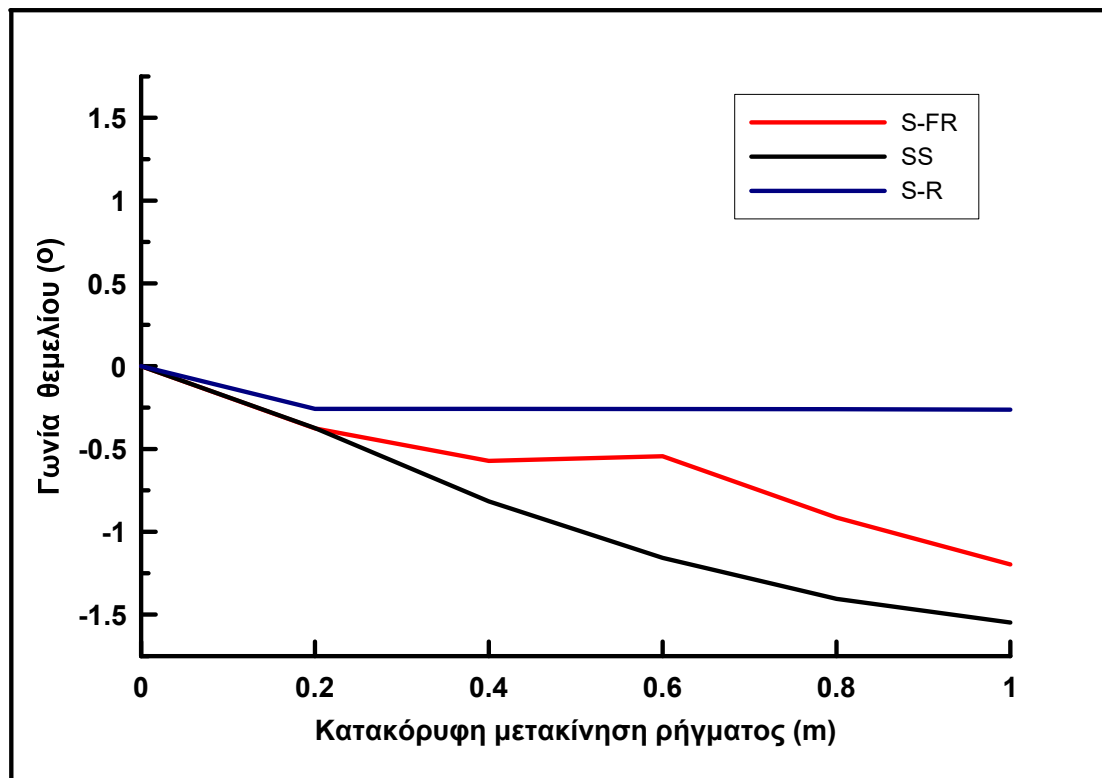
Σχήμα 4.17 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή),S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Από το **Σχήμα 4.17** προκύπτει ότι η παραμορφωμένη επιφάνεια για την ανάλυση με το SS έχει αρκετές ομοιότητες με εκείνη για την ανάλυση με το S-FR. Για παράδειγμα, με βάση τις αναλύσεις με τα SS και S-FR η κατασκευή βρίσκεται στο μετακινούμενο τέμαχος και συνεπώς εμφανίζει καθίζηση της τάξης μεγέθους της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος. Αντιθέτως, από την ανάλυση με το S-R προκύπτει ότι η κατασκευή παραμένει στο σταθερό τέμαχος, και εμφανίζεται βαθιά δευτερογενής διάρρηξη με αποτέλεσμα τη δημιουργία κατακρημνίσματος.

Διευκρινίζεται ότι στη διάρρηξη κανονικού ρήγματος προκύπτει μείωση των οριζοντίων τάσεων (ομοιάζει της φόρτισης ενεργητικής αστοχίας), και συνεπώς της πλευρικής υποστήριξης στο έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Έτσι, ενώ η φέρουσα ικανότητα του S-FR δείχνει επαρκής για φορτίο $q=100\text{kPa}$ παρά τη σημαντική επίδραση της διάρρηξης, αυτό παύει να ισχύει για φορτίο $q=185\text{kPa}$, και συνεπώς η μορφή της διάρρηξης ομοιάζει εκείνης της ανάλυσης με το SS, για την οποία ακόμη και το φορτίο $q=100\text{kPa}$ δείχνει κρίσιμο. Αυτός είναι ο λόγος που δεν αλλάζει καθόλου η μορφή της διάρρηξης με χρήση του SS ανεξαρτήτως φορτίου κατασκευής. Αντιθέτως, η ανάλυση με το S-R δε δείχνει να επηρεάζεται, δηλαδή θα χρειαζόταν είτε μεγαλύτερο φορτίο κατασκευής ή μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να ομοιάσει στις αναλύσεις με τα SS και S-FR.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής της κατασκευής συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος. Η εκτροπή της διάρρηξης στα αριστερά της κατασκευής, που προκύπτει για χρήση των προσομοιωμάτων SS και S-FR, συνεπάγεται στην τελική θέση του θεμελίου εγγύτερα του μετακινούμενου τεμάχους, γεγονός που οδηγεί σε δεξιόστροφες στροφές, αυξανόμενες (κατ' απόλυτη

τιμή) με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος και πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που προέκυπταν για την περίπτωση αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου. Αντίθετα, για την S-R ανάλυση, η στροφή της κατασκευής μειώνεται με την αύξηση του φορτίου και έτσι η τελική τιμή της προκύπτει ίση με 0.25° (δεξιόστροφη).



Σχήμα 4.18 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=12\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Με βάση όλα τα ανωτέρω προκύπτει ότι για το πολύπλοκο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης διάρρηξης κανονικού ρήγματος-κατασκευής δεν μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα ως προς την αξιοπιστία των απλούστερων προσομοιωμάτων, καθώς η σχετική ακρίβεια των προβλέψεων εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής (θέση, φορτίο). Πάντως, η ανάλυση με το ορθότερο S-FR δίνει ενδιάμεσα αποτελέσματα μεταξύ των SS και S-R, με βάση το **Σχήμα 4.17** και ενδιάμεση στροφή της κατασκευής, με βάση το **Σχήμα 4.18**.

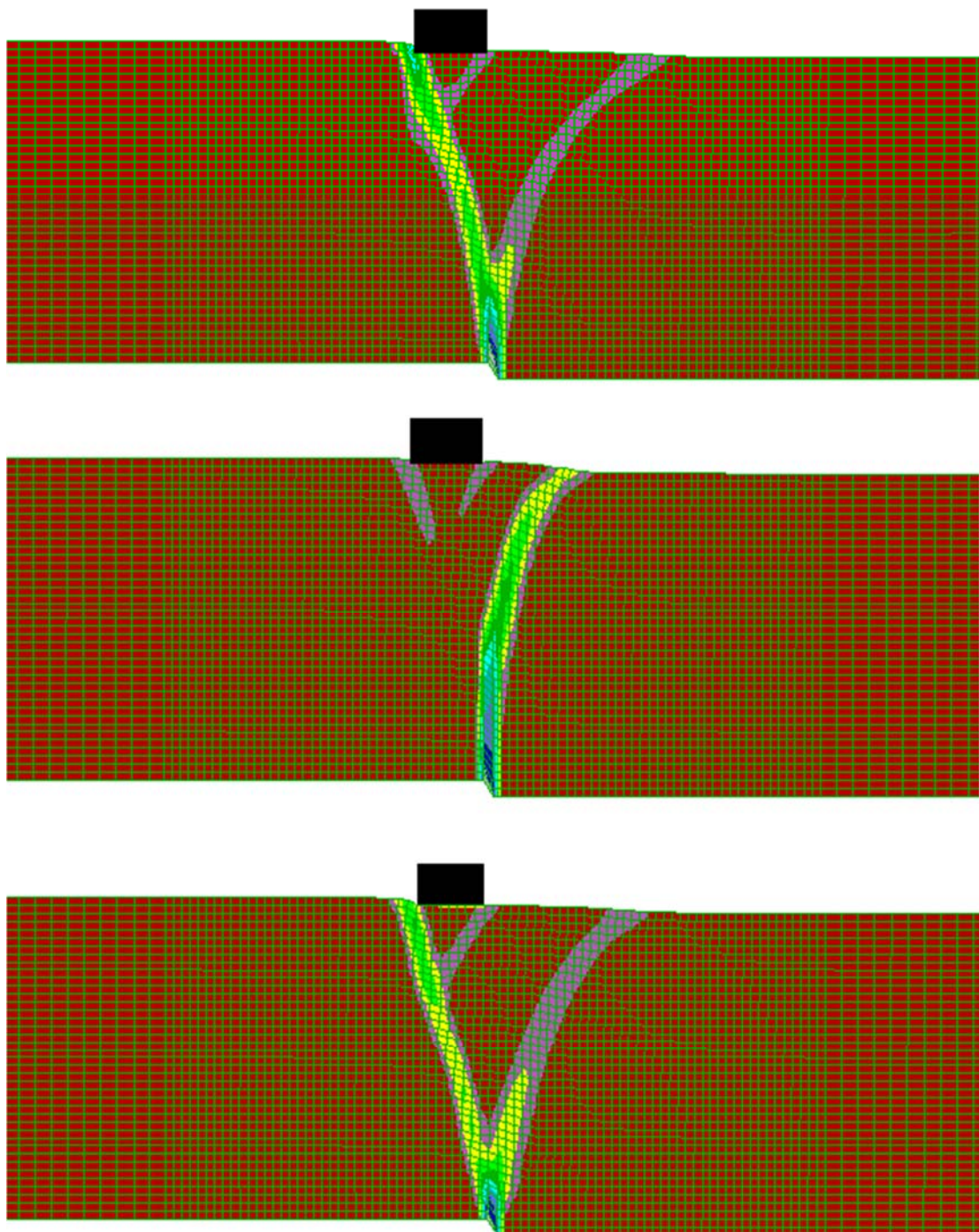
4.4.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Στην παρούσα παράγραφο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της χρήσης των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με ύπαρξη στην επιφάνεια της άμμου κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ στην θέση $C=3\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$, δηλαδή σχεδόν διπλάσιου απ' ό,τι στην παράγραφο 4.3.

Αρχικώς, επισημαίνεται πως η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια της στρώσης παρατηρείται σε μετακίνηση ρήγματος ίση με $d=0.4\text{m}$, τόσο για χρήση του S-FR όσο και για χρήση του απλούστερου όλων SS. Αντιθέτως, η χρήση του σοφιστευμένου S-R

οδηγεί σε υποεκτίμηση της απαιτούμενης μετακίνησης για ανάδυση της διάρρηξης, συγκεκριμένα προβλέποντας την τιμή της ίση με $d=0.6m$.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους (*ssi* σε όρους FLAC) για τις τρεις αναλύσεις και για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος ίση με $1.0m$.



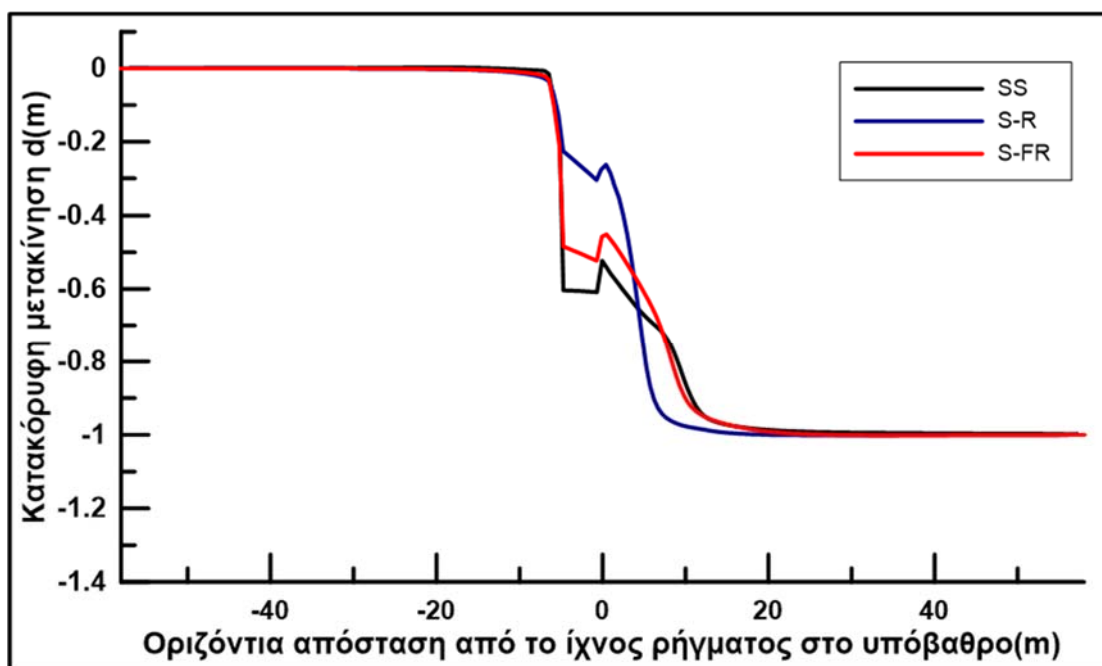
Σχήμα 4.19 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος $\beta=85^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Με βάση αυτό το σχήμα, προκύπτει πως σε συμφωνία με την περίπτωση του κανονικού ρήγματος, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής επηρεάζει την εικόνα της διάρρηξης κυρίως στην ανάλυση με το S-FR, και δευτερευόντως στην ανάλυση με το S-R. Συγκεκριμένα, η αύξηση του φορτίου για την ανάλυση με το SS οδηγεί σε αύξηση των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων εντός των ζωνών διάτμησης, αλλά με την εικόνα της διάρρηξης να παραμένει η ίδια. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση της ανάλυσης με το S-R η κύρια διάρρηξη μετατοπίζεται περισσότερο προς τα δεξιά, απ' ό,τι ήταν για το μικρότερο φορτίο κατασκευής. Αντίθετα, η ανάλυση με το S-FR δείχνει πως η κύρια διάρρηξη εκτρέπεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, αντί για τη δεξιά πλευρά που προκύπτει για το μικρότερο φορτίο. Στην πράξη, η εικόνα της διάρρηξης με το S-FR είναι πιο συμβατή με εκείνη από την ανάλυση με το SS, αντίθετα με ό,τι συνέβαινε για το μικρότερο φορτίο που ήταν πιο συμβατή με εκείνη από την ανάλυση με το S-R.

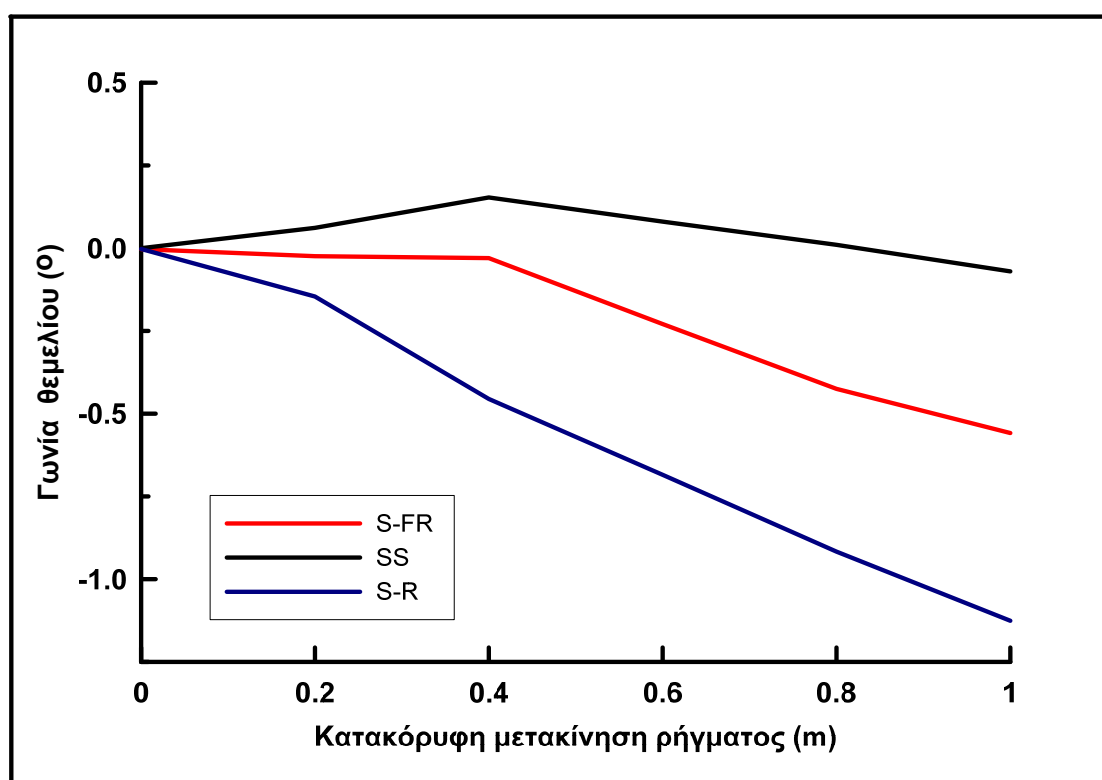
Υπενθυμίζεται ότι στη διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος η κατασκευή είναι τοποθετημένη οριακά στο σταθερό τέμαχος ($C=3\text{m}$) και η διάρρηξη οδηγεί σε ελαφρά μείωση των οριζοντίων τάσεων, και συνεπώς της πλευρικής υποστήριξης στο έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Έτσι, ενώ η φέρουσα ικανότητα του S-FR δείχνει επαρκής για φορτίο $q=100\text{kPa}$ παρά την όποια μικρή επίδραση της διάρρηξης, αυτό παύει να ισχύει για φορτίο $q=185\text{kPa}$, και συνεπώς η μορφή της διάρρηξης αρχίζει να ομοιάζει εκείνης της ανάλυσης με το SS, για την οποία ακόμη και το φορτίο $q=100\text{kPa}$ δείχνει κρίσιμο. Αντιθέτως, η ανάλυση με το S-R δε δείχνει να επηρεάζεται, δηλαδή θα χρειαζόταν είτε μεγαλύτερο φορτίο κατασκευής ή μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος, ή συνδυασμός και των δύο για να ομοιάσει στις αναλύσεις με τα SS και S-FR.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.20** η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους με βάση τις τρεις αναλύσεις για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος 1.0m. Με βάση το σχήμα αυτό, η παραμορφωμένη επιφάνεια εδάφους στην ανάλυση με το SS πλησιάζει αρκετά την μορφή εκείνης με το S-FR. Για παράδειγμα, με βάση τις αναλύσεις με τα SS και S-FR η κατασκευή βρίσκεται ουσιαστικά στο μετακινούμενο τέμαχος και συνεπώς εμφανίζει σημαντική καθίζηση, ήτοι της τάξης του 50%-60% του μεγέθους της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος. Αντιθέτως, από την ανάλυση με το S-R προκύπτει ότι η κατασκευή είναι πιο κοντά στο σταθερό τέμαχος, και έτσι έχει μικρότερη καθίζηση (25% της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος) και μεγαλύτερη στροφή.

Η συστηματική υπερεκτίμηση της στροφής του θεμελίου, για χρήση του S-R προσομοιώματος αποτυπώνεται λεπτομερέστερα στο **Σχήμα 4.21**. Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται επιπλέον πως παρά τις ομοιότητες που παρουσιάζουν οι αναλύσεις για χρήση των SS και S-FR προσομοιώματος στην εξεταζόμενη περίπτωση αλληλεπίδρασης «κατακόρυφου» ρήγματος-κατασκευής, υπάρχει μια συστηματική υποεκτίμηση του μεγέθους της στροφής, για χρήση του απλούστερου προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, η στροφή του θεμελίου για χρήση του SS δεν ξεπερνάει κατά πολύ τις 0° (μέγιστη τιμή ίση με 0.2° για $d=0.4\text{m}$), αντίθετα με όσα παρατηρούνται για την S-FR ανάλυση, στην οποία η στροφή αυξάνει δεξιόστροφα με την αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος, φτάνοντας την τιμή των 0.5° (για $d=1.0\text{m}$).



Σχήμα 4.20 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας $\beta=85^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d=1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 4.21 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=3\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Με βάση όλα τα ανωτέρω προκύπτει ότι για το πολύπλοκο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος-κατασκευής δεν μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα ως προς την αξιοπιστία των απλούστερων προσομοιωμάτων, καθώς η σχετική ακρίβεια των προβλέψεων εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής (θέση και φορτίο).

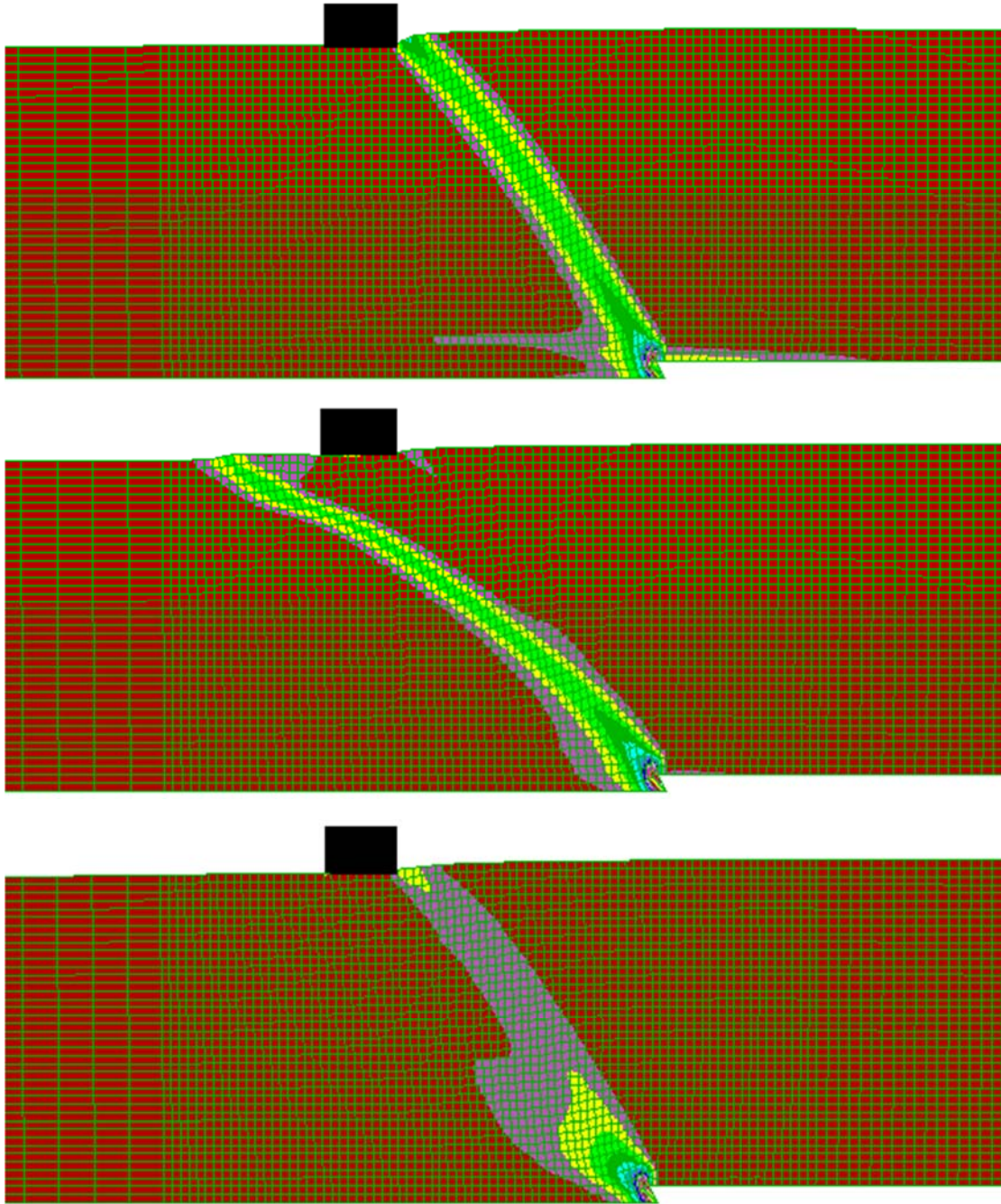
Πάντως, η ανάλυση με το ορθότερο S-FR δίνει ενδιάμεσα αποτελέσματα μεταξύ των SS και S-R, με βάση το **Σχήμα 4.20**, και ενδιάμεση στροφή της κατασκευής, με βάση το **Σχήμα 4.21**, σε απόλυτη ποιοτική συμφωνία με ό,τι παρατηρήθηκε για την αλληλεπίδραση διάρρηξης «κανονικού» ρήγματος στην παράγραφο 4.4.1.

4.4.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Κατ' επέκταση των προηγούμενων, εδώ συγκρίνονται τα αποτελέσματα της χρήσης των προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR για την περίπτωση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με ύπαρξη κατασκευής πλάτους **B=4m** και μεγάλου φορτίου (**q=185kPa**) στην επιφάνεια της στρώσης και σε οριζόντια απόσταση από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο **C=18m**.

Αρχικά, επισημαίνεται πως η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους παρατηρείται σε μετακίνηση ρήγματος ίση με $d=0.8m$, τόσο για χρήση του ορθότερου S-FR όσο και για χρήση του S-R, με τις αυξημένες ωστόσο συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της S-R διάρρηξης να υποδηλώνουν πως η ακριβής τιμή της μετακίνησης που απαιτείται σε αυτή την ανάλυση είναι ελάχιστα μικρότερη. Αντίθετα, για χρήση του SS προσομοιώματος η απαιτούμενη μετακίνηση προκύπτει ίση με $d=0.6m$, αρκετά μικρότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε στις δύο προαναφερθείσες αναλύσεις. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η σχετική διαφορά στην ταχύτητα ανάδυσης της διάρρηξης είναι ίδια με την περίπτωση αλληλεπίδρασης ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου, στην οποία η εξεταζόμενη διάρρηξη έφτασε ταχύτερα στην επιφάνεια για χρήση του SS προσομοιώματος, έπειτα για χρήση του S-R και αργότερα όλων για χρήση του ορθότερου S-FR.

Ακολούθως, στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριών αναλύσεων σε όρους συσσωρευμένης διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος (*ssi* στο FLAC) για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος 1.0m. Με βάση αυτό προκύπτει πως ο διπλασιασμός του φορτίου της κατασκευής δεν επηρεάζει ουσιαστικά την εικόνα της διάρρηξης, κι αυτό ισχύει για τις αναλύσεις και με τα 3 προσομοιώματα. Συγκεκριμένα, οι διαρρήξεις δείχνουν πιο εμποδωμένες στην πλευρά της κατασκευής που εκτρέπονται η κάθε μια (στα δεξιά της κατασκευής για τα SS και S-FR και στα αριστερά με το S-R), δηλαδή δεν υπάρχουν πια οι ημιτελείς δευτερεύουσες διαρρήξεις στα αριστερά της κατασκευής για τα SS και S-FR. Αυτό συνεπάγεται ότι η αύξηση του φορτίου κάτω από την κατασκευή εδραιώνει την εκτροπή της διάρρηξης.

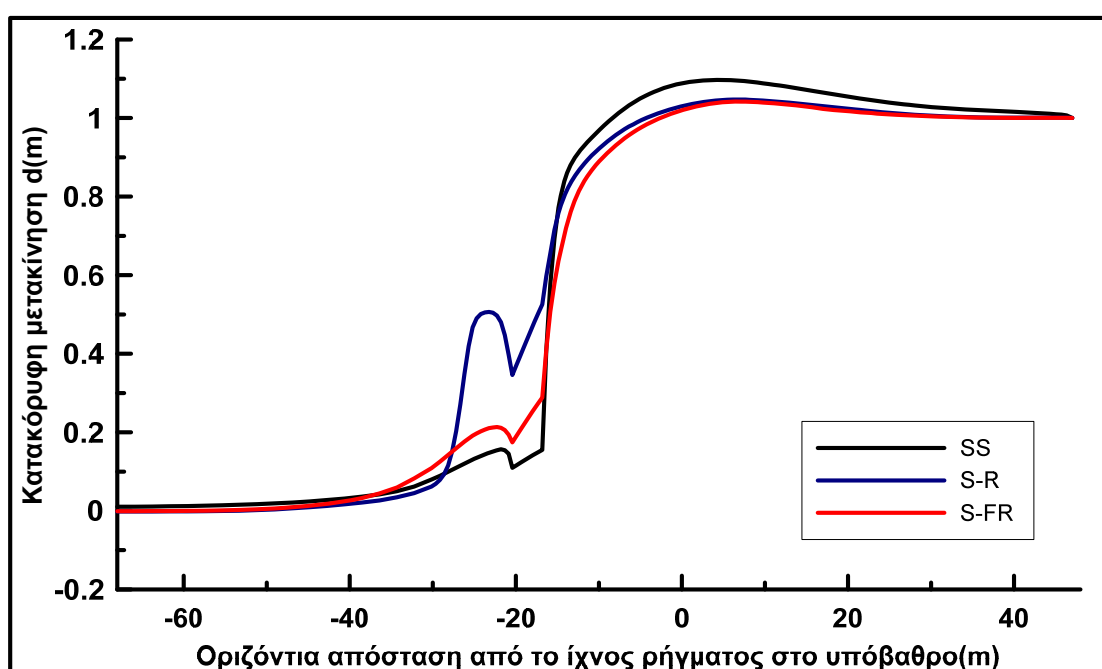


Σχήμα 4.22 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος $\beta=135^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, από ανάλυση με τα προσομοιώματα SS (πάνω), S-R (μέση) και S-FR (κάτω).

Υπενθυμίζεται ότι η αύξηση του φορτίου κατασκευής σε διάρρηξη «κατακόρυφου» και κυρίως σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος άλλαξε την εικόνα της διάρρηξης κάτω από την κατασκευή για τις αναλύσεις με το S-FR και την έκανε να μοιάζει περισσότερο με εκείνη της ανάλυσης με το SS. Αυτό δε συμβαίνει με την αύξηση του φορτίου κατασκευής στη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Επισημαίνεται ότι στη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος προκύπτει σημαντική αύξηση των οριζοντίων τάσεων (ομοιάζει της φόρτισης σε παθητική αστοχία), και συνεπώς της πλευρικής υποστήριξης στο

έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Έτσι, η φέρουσα ικανότητα του S-FR δείχνει επαρκής τόσο για φορτίο $q=100\text{kPa}$ όσο και για φορτίο $q=185\text{kPa}$, και συνεπώς η μορφή της διάρρηξης δεν διαφοροποιείται. Το ίδιο ισχύει ακόμη και για την ανάλυση με το SS η οποία δίνει τη σχετικά μικρότερη φέρουσα ικανότητα, καθώς η αύξηση των οριζοντίων τάσεων είναι τόσο μεγάλη σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, ώστε φορτία κατασκευής της τάξης των $q=100$ και 185 kPa δεν δείχνουν να την επηρεάζουν. Πιστεύεται ότι χρειάζονται πολύ μεγαλύτερα φορτία κατασκευής για να επηρεάσουν ουσιαδώς την αλληλεπίδραση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος – κατασκευής.

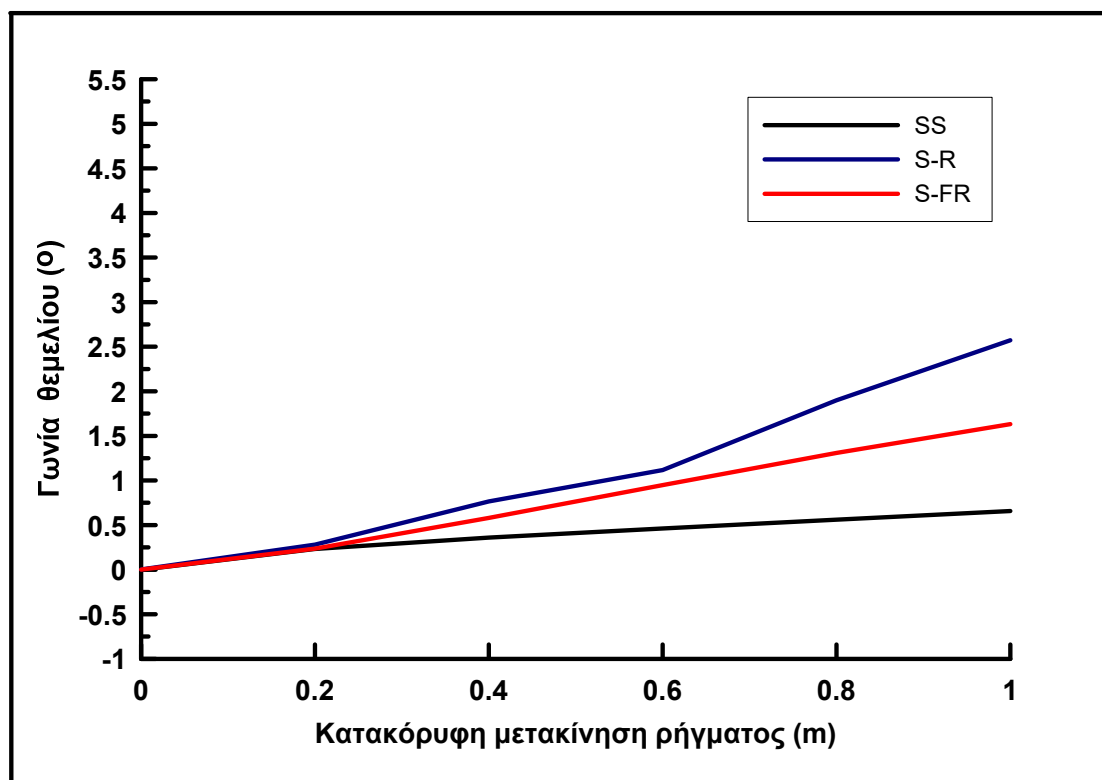
Σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες περιπτώσεις, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.23** η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις με τα τρία προσομοιώματα και για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$.



Σχήμα 4.23 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος $\beta=135^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, με χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Η εικόνα του **Σχήματος 4.23** είναι αντίστοιχη με την εικόνα στο **Σχήμα 4.14** (για ανάστροφο ρήγμα και φορτίο κατασκευής 100kPa), απλά οι ανυψώσεις της κατασκευής είναι μικρότερες λόγω του μεγαλύτερου φορτίου q . Ανάλογο ποιοτικό συμπέρασμα προκύπτει με παρατήρηση του **Σχήματος 4.24**, στο οποίο παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής του θεμελίου συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος. Συγκεκριμένα, η σύγκριση με το **Σχήμα 4.15** οδηγεί στο συμπέρασμα πως η εξέλιξη της στροφής για χρήση των διαφορετικών προσομοιωμάτων είναι ανάλογη με εκείνη που πρόκυπτε για ανάστροφο ρήγμα και φορτίο κατασκευής $q=100\text{kPa}$, με

μοναδική διαφορά πως οι τιμές της στροφής προκύπτουν μικρότερες, με την αύξηση του φορτίου της.



Σχήμα 4.24 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=18\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και χρήση προσομοιωμάτων SS(μαύρη γραμμή), S-R(μπλε γραμμή) και S-FR(κόκκινη γραμμή).

Συνεπώς, και πάλι το S-FR δίνει ενδιάμεσα αποτελέσματα στην περιοχή της κατασκευής, και η χρήση οποιουδήποτε εκ των SS και S-R δεν κρίνεται ικανοποιητική.

4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα χρήσης 3 προσομοιωμάτων SS, S-R και S-FR διαφορετικών δυνατοτήτων στο πρόβλημα της διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης και στο πολυπλοκότερο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος–κατασκευής στην ίδια στρώση. Συγκεκριμένα, το προσομοίωμα SS είναι ισοτροπικό και θεωρεί ενιαία γωνία τριβής και διαστολικότητας ανεξαρτήτως κατεύθυνσης φόρτισης, ενώ το προσομοίωμα S-R είναι και πάλι ισοτροπικό αλλά θεωρεί γωνία τριβής και διαστολικότητας που είναι συνάρτηση της κατεύθυνσης φόρτισης (γωνία Lode). Τέλος, το προσομοίωμα S-FR είναι το πλέον σοφιστευμένο, καθώς θεωρεί γωνία τριβής και διαστολικότητας που είναι συνάρτηση τόσο της κατεύθυνσης φόρτισης, όσο και της ανισοτροπίας του εδάφους.

Για να καταστούν συγκρίσιμες οι αναλύσεις, τα διαφορετικά προσομοιώματα πρώτα βαθμονομήθηκαν για να δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα σε τριαξονική θλίψη, δηλαδή στην πλέον συνήθη εργαστηριακή δοκιμή της πράξης. Για τον ίδιο λόγο, στο

πρόβλημα της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιήθηκε η ίδια στρώση άμμου μέσης πυκνότητας ($D_r = 65\%$) και πάχους 20m, καθώς και η ίδια κατασκευή πλάτους $B = 4\text{m}$ που φέρει ίδιο φορτίο (100kPa ή 185kPa). Διερευνήθηκαν διαρρήξεις 3 ειδών ρηγμάτων, ενός κανονικού κλίσης $\beta=45^\circ$, ενός «κατακόρυφου» κλίσης $\beta=85^\circ$ και ενός ανάστροφου κλίσης $\beta=135^\circ (=180 - 45^\circ)$ μέχρι κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος 1.0m. Η τιμή αυτή μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης αντιστοιχεί στο 5% του πάχους της στρώσης και αποδεικνύεται επαρκής για την ανάδυση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια σε όλα τα είδη ρήγματος. Σε όλες τις περιπτώσεις ρήγματος, η κατασκευή βρίσκεται στην περιοχή ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, ώστε να μελετηθεί η πλέον έντονη πιθανή αλληλεπίδραση της διάρρηξης με την κατασκευή. Αν η κατασκευή βρίσκεται εκτός αυτής της περιοχής, τότε η αλληλεπίδραση αναμένεται μικρή έως ανύπαρκτη.

Η σύγκριση γίνεται επί της θεώρησης ότι το πλέον σοφιστευμένο ανισοτροπικό προσομοίωμα S-FR δίνει την κατά τεκμήριο ορθότερη προσομοίωση. Με βάση τη βαθμονόμηση που έγινε σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης, η απόκριση σε τριαξονικό εφελκυσμό συγκριτικά με το S-FR προκύπτει πιο διαστολική και πιο συστολική για τα προσομοιώματα SS και S-R, αντίστοιχα. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής υποεκτιμάται με χρήση του SS και υπερεκτιμάται με χρήση του S-R, συγκριτικά πάντα με την πρόβλεψη με χρήση του ορθότερου S-FR.

Με βάση τις παρουσιαζόμενες συγκρίσεις προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

(Α) Στην περίπτωση της διάδοσης ρήγματος επί ελεύθερου πεδίου

Για τη διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος, τα 3 προσομοιώματα δίνουν πρακτικώς ταυτόσημα αποτελέσματα. Αντιθέτως, για το κανονικό ρήγμα το SS δίνει την πιο συστολική συμπεριφορά και συνεπώς το πιο αβαστάς κατακρήμνισμα, ενώ τα άλλα δύο δίνουν συγκρίσιμη απόκριση. Αντιθέτως, για το ανάστροφο ρήγμα το S-FR δίνει την πιο συστολική συμπεριφορά και τη λιγότερη διαστολή στο μετακινούμενο τέμαχος, ενώ τα άλλα δύο δίνουν συγκρίσιμη απόκριση. Σε κάθε περίπτωση, τα 3 προσομοιώματα δίνουν συγκρίσιμες προβλέψεις. Τούτου δοθέντος, για αναλύσεις διάρρηξης ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου δεν δικαιολογείται η χρήση προσομοιώματος πιο πολύπλοκου από το SS.

(Β) Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μικρού φορτίου

Στην περιοχή μακριά από την κατασκευή, η απόκριση του εδάφους προκύπτει αντίστοιχη με εκείνη υπό συνθήκες διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο, δηλαδή καθορίζεται με βάση τη διαστολικότητα του εδάφους, όπως αυτή προβλέπεται από το κάθε προσομοίωμα.

Στην περιοχή της κατασκευής, η απόκριση καθορίζεται ποιοτικά από την αύξηση των τάσεων στο έδαφος θεμελίωσης λόγω της κατασκευής η οποία τείνει να εκτρέψει τη διάρρηξη προς μια από τις δύο άκρες της κατασκευής, και ποτέ κάτω από εκείνη. Ποσοτικά η απόκριση καθορίζεται από το συντελεστή ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, και ο οποίος είναι ελάχιστος για το προσομοίωμα SS και μέγιστος για το προσομοίωμα S-R. Συνεπώς, η κατασκευή εμφανίζει τις μέγιστες και

ελάχιστες καθιζήσεις για τα προσομοιώματα SS και S-R, ενώ το προσομοίωμα S-FR δίνει τη μέση, μεταξύ των δύο, απόκριση.

Για αναλύσεις αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μικρού φορτίου δικαιολογείται η χρήση προσομοιώματος πιο πολύπλοκου από το SS. Συγκριτικά, η προσομοίωση με το S-R προσεγγίζει καλύτερα την, κατά τεκμήριο, ορθότερη προσομοίωση με το S-FR.

(C) Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μεγάλου φορτίου

Ποιοτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την αλληλεπίδραση με κατασκευή μικρού φορτίου εξακολουθούν να ισχύουν. Για παράδειγμα, η κατασκευή εξακολουθεί εμφανίζει τις μέγιστες και ελάχιστες καθιζήσεις για τα προσομοιώματα SS και S-R, και το προσομοίωμα S-FR να δίνει τη μέση, μεταξύ των δύο, απόκριση.

Ποσοτικά, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας δείχνει να επηρεάζεται από το είδος του ρήγματος. Συγκεκριμένα, δείχνει να μειώνεται σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος λόγω μείωσης οριζοντίων τάσεων και συνακόλουθα της πλευρικής υποστήριξης του εδάφους θεμελίωσης, ενώ δείχνει να αυξάνει σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος λόγω αύξησης των οριζοντίων τάσεων και συνακόλουθα της πλευρικής υποστήριξης του εδάφους θεμελίωσης. Το γεγονός αυτό μεταβάλλει τη σχετική σημαντικότητα του φορτίου κατασκευής για διαφορετικά είδη ρήγματος. Για παράδειγμα, η αύξηση του φορτίου κατασκευής από 100kPa σε 185kPa είναι πιο σημαντική για την αλληλεπίδραση με κανονικό παρά με το ανάστροφο ρήγμα. Φυσικά, αυτό έχει να κάνει και με την μετατόπιση του ρήγματος, δηλαδή για μεγαλύτερες μετατοπίσεις από το 1.0m που έφτασαν οι αναλύσεις εδώ αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη επίδραση της διάρρηξης στους συντελεστές ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας.

Για αναλύσεις αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μεγάλου φορτίου δικαιολογείται η χρήση προσομοιώματος πιο πολύπλοκου από το SS. Πάντως, συγκριτικά, η προσομοίωση με το SS προσεγγίζει καλύτερα την, κατά τεκμήριο, ορθότερη προσομοίωση με το S-FR, σε σχέση πάντα με το S-R.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάστηκαν αναλύσεις διάρρηξης ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου και αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής με δύο διαφορετικά επίπεδα φορτίου, για διάδοση της διάρρηξης εντός στρώσης άμμου Toyoura με «**οριζόντια δομή**» κόκκων, όπως αυτή προσομοιώνεται με 3 καταστατικά προσομοιώματα διαφορετικής πολυπλοκότητας. Πρόκειται για μια εγκάρσια ισότροπη δομή άμμου με επίπεδο απόθεσης γωνίας $\delta = 0^\circ$ ως προς την οριζόντια και είναι η συνηθέστερα απαντώμενη στη φύση, αφού είναι εκείνη που προκύπτει μέσω της απόθεσης λόγω βαρύτητας. Η κατεύθυνση αυτή της μικροδομής λήφθηκε άμεσα υπόψιν από το ανισοτροπικό προσομοίωμα S-FR μέσω της σχετικής παραμέτρου που καθορίζει τη γωνία δ του επιπέδου απόθεσης στην αρχική κατάσταση. Αντιθέτως, η κατεύθυνση της μικροδομής λήφθηκε υπόψη έμμεσα από τα ιστροπικά προσομοιώματα SS και S-R μέσω της βαθμονόμησης τους ώστε να προκύπτει ταυτόσημη απόκριση σε δοκιμή στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης (TC) με εκείνη που προβλέπει το S-FR με γωνία επιπέδου απόθεσης $\delta = 0^\circ$ (βλ. **Κεφάλαιο 3**).

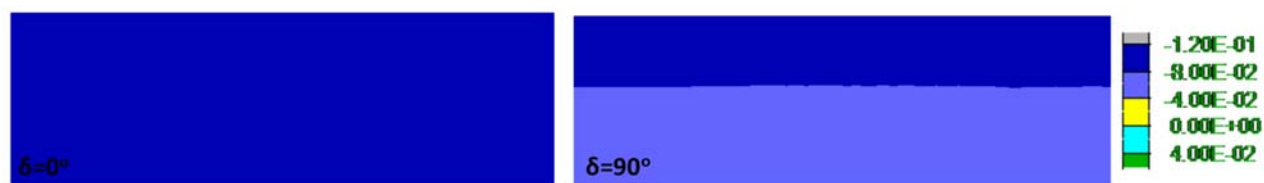
Στο παρόν **Κεφάλαιο 5** διερευνάται η επίδραση της αρχικής διεύθυνσης του επιπέδου απόθεσης των κόκκων της άμμου στο υπό μελέτη πρόβλημα. Ως εκ τούτου, στις αναλύσεις που ακολουθούν γίνεται χρήση μόνο του προσομοιώματος S-FR, καθώς είναι το μοναδικό εκ των 3 προσομοιωμάτων που λαμβάνει άμεσα υπόψιν του την ανισοτροπία. Στο πλαίσιο αυτό συγκρίνονται εδώ τα αποτελέσματα για δύο ακραίες δομές κόκκων: εκείνη της προαναφερθείσας «οριζόντιας δομής» και εκείνης που προκύπτει από την περιστροφή της κατά 90° , ήτοι μιας «**κατακόρυφης δομής**». Επισημαίνεται πως η επιλογή της γωνίας προσανατολισμού $\delta=90^\circ$ ως η δεύτερη τιμή της παραμετρικής διερεύνησης έγινε με το σκεπτικό της αποτύπωσης του μέγιστου δυνατού εύρους απόκλισης, και όχι με βάση τη συχνότητα που η τιμή αυτή απαντάται στη φύση.

Με βάση τα παραπάνω, στην **παράγραφο 5.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την περίπτωση διάρρηξης σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου και για τα 3 είδη ρήγματος (κανονικό, «κατακόρυφο», ανάστροφο) που έχουν μελετηθεί ως τώρα. Στη συνέχεια, στις **παραγράφους 5.3** και **5.4** εξετάζεται για τα ίδια είδη ρηγμάτων η περίπτωση αλληλεπίδρασης τους με άκαμπτη κατασκευή πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$ και $q=185\text{kPa}$ αντίστοιχα. Υπογραμμίζεται ότι σε όλες τις αναλύσεις που αφορούν τις δύο διαφορετικές αρχικές δομές ο κάρναβος, οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, οι χαρακτηριστικές θέσεις της κατασκευής σε κάθε περίπτωση ρήγματος, καθώς και οι σταθερές του προσομοιώματος S-FR -με εξαίρεση τον προσανατολισμό της μικροδομής- είναι οι ίδιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν λεπτομερώς για την «οριζόντια δομή» στα **Κεφάλαια 3** και **4**. Κλείνοντας, στην **παράγραφο 5.5** γίνεται συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων προκειμένου να αντληθούν τα σημαντικότερα συμπεράσματα, τα οποία και παρουσιάζονται για περαιτέρω χρήση.

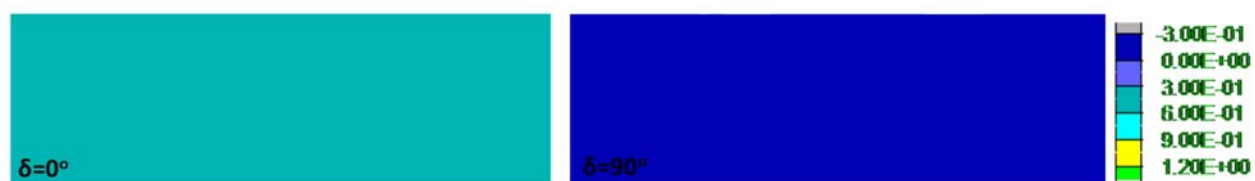
5.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

5.2.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής

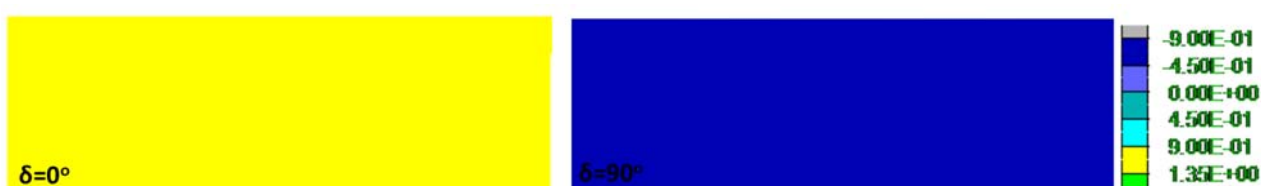
Εδώ παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες (πριν την επιβολή της διάρρηξης) εντός της στρώσης άμμου με «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή κόκκων. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι τιμές των παραμέτρων δομής στις 2 στρώσεις άμμου πάχους 20m υπό γεωστατικές συνθήκες και με σχετική πυκνότητα κόκκων $D_r = 65\%$. Έτσι, στα **Σχήματα 5.1, 5.2, 5.3** και **5.4** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ , της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , της παραμέτρου σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N και του μέτρου τανυστή δομής F , αντίστοιχα.



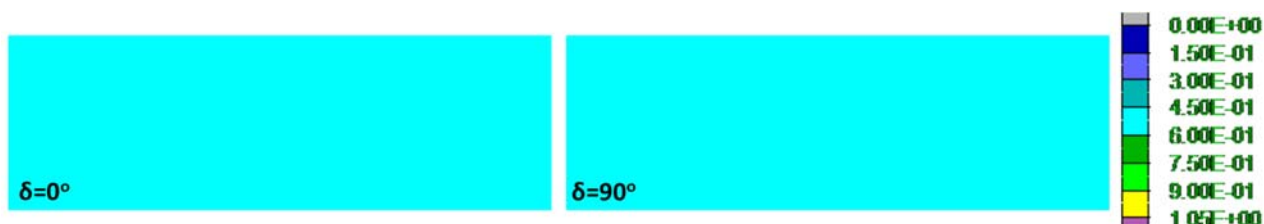
Σχήμα 5.1 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, πριν την διάρρηξη ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.2 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, πριν την διάρρηξη ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.3 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, πριν την διάρρηξη ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.



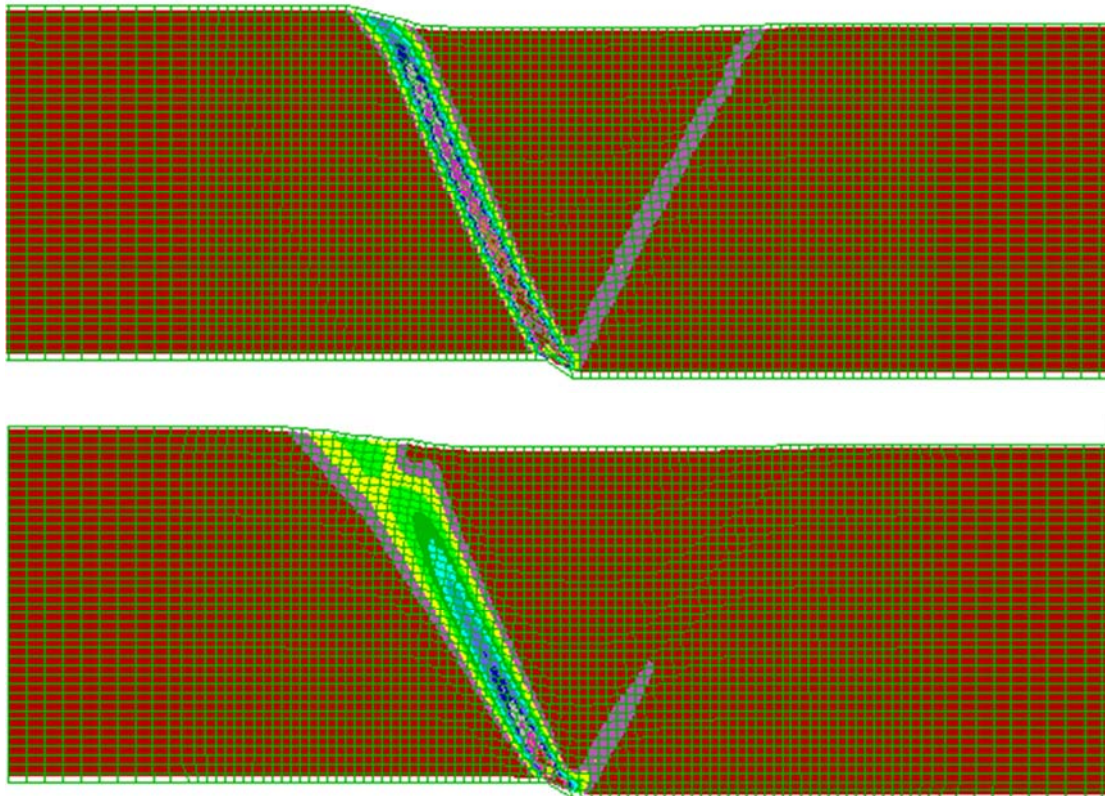
Σχήμα 5.4 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, πριν την διάρρηξη ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.

Σε κάθε ένα από τα σχήματα αυτά, το αριστερά υπο-σχήμα αντιστοιχεί στην «οριζόντια δομή» ενώ το δεξιά στην «κατακόρυφη δομή» κόκκων. Ξεκινώντας από το **Σχήμα 5.4** προκύπτει ότι το μέτρο του τανυστή δομής $F = F_{in} = 0.5$ και στις 2 περιπτώσεις δομής, δηλαδή παίρνει την αρχική τιμή που αποτελεί παράμετρο του προσομοιώματος S-FR. Αντιθέτως, υπάρχει διαφοροποίηση στην παράμετρο σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N , καθώς για οριζόντια δομή έχει τιμή $N=1$ παντού, ενώ για την κατακόρυφη δομή παίρνει τιμή $N=-0.5$ παντού (βλ. **Σχήμα 5.3**). Ο λόγος είναι ότι η γεωστατική φόρτιση επιβάλλει μέγιστη σ_1 κατακόρυφη και $\sigma_2=\sigma_3 (< \sigma_1)$ οριζόντια τάση. Έτσι, προκύπτει ταύτιση του προσανατολισμού της (γεωστατικής) φόρτισης με τον προσανατολισμό της οριζόντιας δομής (το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο απόθεσης είναι κατακόρυφο και συγγραμμικό με τη σ_1), που δικαιολογεί το $N=1$. Αντίθετα, κάνοντας την περιστροφή της δομής περί τον άξονα της σ_2 , φέρνει το επίπεδο απόθεσης κατακόρυφο και συνεπώς το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο απόθεσης είναι οριζόντιο και συγγραμμικό με τη σ_3 , και οδηγεί σε τιμή $N=-0.5$. Ο συνδυασμός των F και N ορίζει την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=FN$ και σε τιμές $A=0.5$ και -0.25 παντού, όπως υποδεικνύει το **Σχήμα 5.2**. Τέλος, ο συνδυασμός της ίδιας τιμής $e = 0.74$ (για $D_r = 65\%$) με αυξανόμενη τιμή της μέσης ενεργού τάσης p με το βάθος οδηγεί σε μικρή αλγεβρική αύξηση της αρνητικής παραμέτρου κατάστασης ψ με το βάθος. Όμως, οι διαφορετικές τιμές της μεταβλητής A για τις 2 δομές οδηγούν σε διαφορετικού επιπέδου τιμές της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ που παραμένει αρνητική, με τις τιμές για την «οριζόντια δομή» να είναι αλγεβρικά σχετικώς μικρότερες (πιο αρνητικές).

5.2.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Η πρώτη περίπτωση διάδοσης ρήγματος που εξετάζεται ως προς την απόκλιση της απόκρισης που προκύπτει για τους δύο έντονα διαφορετικούς προσανατολισμούς του επιπέδου απόθεσης της άμμου είναι εκείνη του κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ εντός στρώσης άμμου σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου (free field). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η απαιτούμενη μετακίνηση ρήγματος που χρειάζεται προκειμένου να αναδυθεί η διάρρηξη στην επιφάνεια της στρώσης είναι λίγο μεγαλύτερη από $d=0.2m$ για την περίπτωση της «οριζόντιας» δομής και ίση με $d=0.4m$ για την «κατακόρυφη».

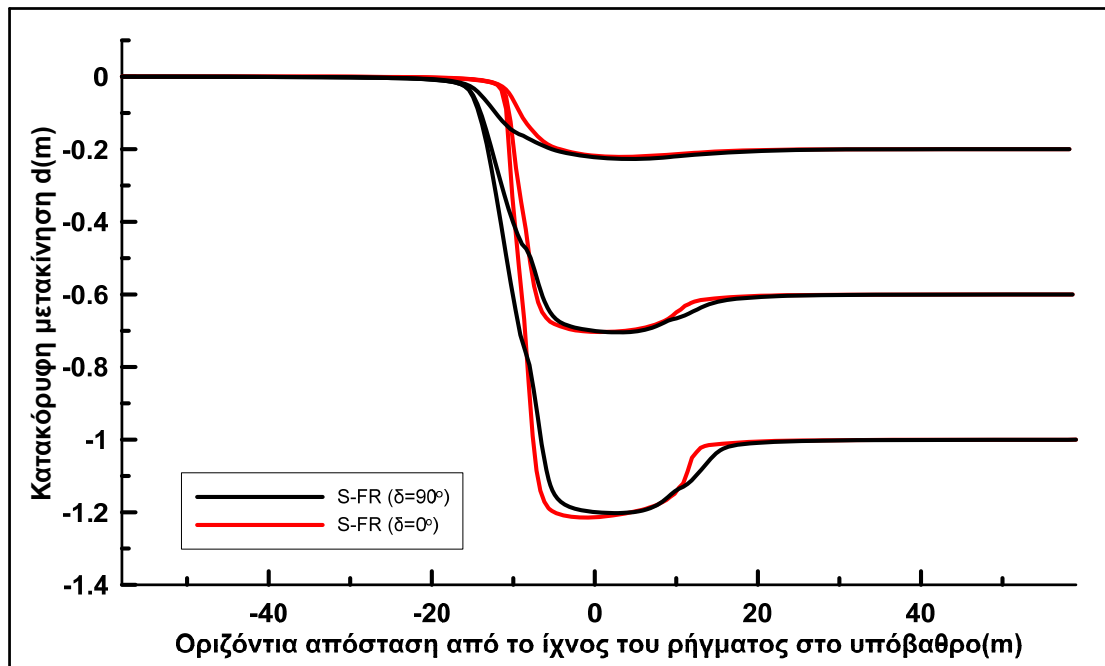
Σε αντιστοιχία με το Κεφάλαιο 4, για την λεπτομερέστερη διερεύνηση των διαφορών μεταξύ των δύο περιπτώσεων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.5** η σύγκριση σε όρους συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων (ssi σε ορολογία FLAC), για τις δύο διαφορετικές αρχικές δομές και για μετατόπιση ρήγματος $d=1.0m$. Οι διαφορές στις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις που δημιουργούνται λόγω της ίδιας διάρρηξης όταν εκείνη διαδίδεται σε 2 στρώσεις με διαφορετικές αρχικές μικρο-δομές δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αμελητέες. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των 2 αναλύσεων προκύπτει ότι στην άμμο με αρχικώς «κατακόρυφη δομή» παρατηρείται μετατόπιση της κύριας διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος (αριστερά) κατά 2-3m, ενώ ταυτόχρονα το εύρος της επιφάνειας διάρρηξης είναι μεγαλύτερο, ειδικά πλησιάζοντας την επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον, οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της κύριας διάρρηξης προκύπτουν συγκριτικά μικρότερες. Τέλος, και για τις 2 περιπτώσεις δομής σχηματίζεται βαθιά δευτερεύουσα διάρρηξη, η οποία όμως εμπεδώνεται μέχρι την επιφάνεια μόνο για την «οριζόντια δομή».



Σχήμα 5.5 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα S-FR.

Συνολικά, η διάρρηξη κανονικού ρήγματος δημιουργεί «εφελκυστικό» εντατικό πεδίο, δηλαδή μείωση της οριζόντιας τάσης υπό σταθερή κατακόρυφη τάση, που προσομοιάζει τη «ενεργητική» φόρτιση πίσω από τοίχο αντιστήριξης που μετακινείται προς τα έξω. Για μια τέτοια φόρτιση (που διατηρεί την σ_1 κατακόρυφη), η «οριζόντια δομή» εμφανίζεται πιο δύσμητη και διαστολική απ' ό,τι η «κατακόρυφη δομή», ή, με άλλα λόγια, η «κατακόρυφη δομή» δημιουργεί απόκριση άμμου που ομοιάζει «χαλαρότερη», όπως είχε περιγράψει ποιοτικά και στο Κεφάλαιο 3.

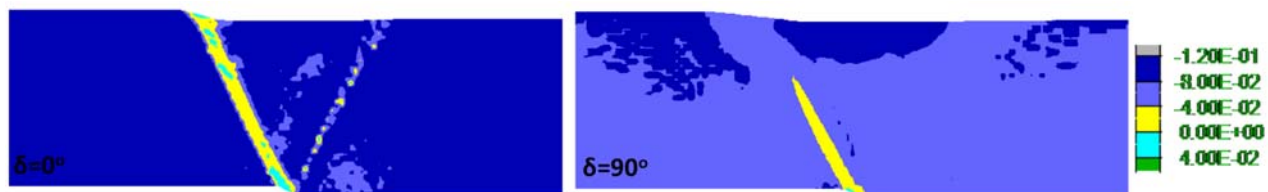
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζεται η εικόνα της παραμορφωμένης εδαφικής επιφάνειας, για τις δύο περιπτώσεις μικροδομής και για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=0.2m, 0.6m$ και $1.0m$. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η εκτροπή της θέσης ανάδυσης της κύριας διάρρηξης για την αρχικά «κατακόρυφη» δομή όπως επίσης και η μικρότερη κλίση της επιφάνειας του εδάφους λόγω αυτής της εκτροπής, ειδικά στις μικρότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος d . Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις που προκύπτουν για τη θέση «ανάδυσης» της δευτερεύουσας διάρρηξης και την κλίση της επιφάνειας του εδάφους στη θέση αυτή. Ως αποτέλεσμα αυτού, προκύπτει ευρύτερο (και ελαφρώς αβαθέστερο) κατακρήμνισμα για την περίπτωση «κατακόρυφης δομής», που συνάδει ποιοτικά με την απόκριση «χαλαρότερης» άμμου που προαναφέρθηκε (π.χ. Loukidis et al. 2009).



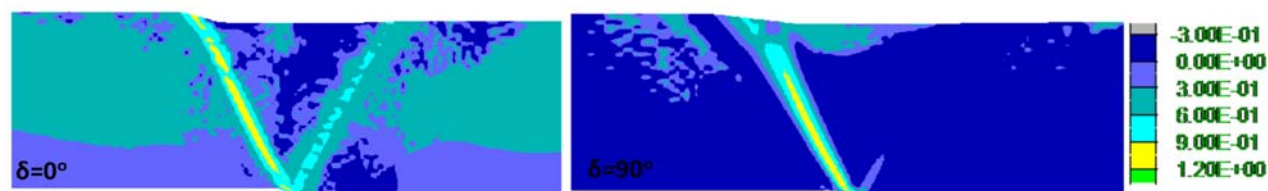
Σχήμα 5.6 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ και κατακόρυφη μετατόπιση $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m υπό ελεύθερο πεδίο

Για την περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων που καθορίζουν τη διαφορετική απόκριση των δύο αρχικών δομών, στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζεται η ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, με κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$, για «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 5.8, 5.9** και **5.10** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανιστροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και προσανατολισμών δομής κόκκων. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανιστροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).

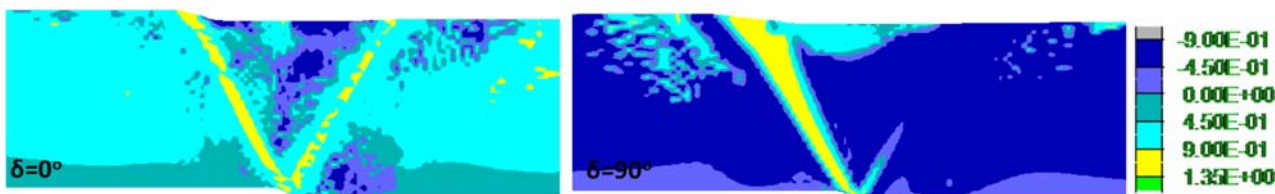
Παρατηρείται ότι, ενώ η διάρρηξη έχει αναδυθεί πλήρως και στους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων, η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση σχεδόν σε όλο το μήκος της ζώνης διάτμησης μόνο στην περίπτωση της «οριζόντιας δομής». Για αρχικώς «κατακόρυφη δομή», η άμμος βρίσκεται σε Κρίσιμη Κατάσταση μόνο από κάποιο βάθος και κάτω (8m περίπου) κατά μήκος της κύριας διάρρηξης. Αντίστοιχα, για τις περιπτώσεις των δευτερευουσών διαρρήξεων, σε καμιά από τις δύο περιπτώσεις προσανατολισμού δομής κόκκων δε φτάνει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση αν και ανάμεσα στις δύο, η αρχικώς «οριζόντια δομή» είναι εκείνη που την προσεγγίζει περισσότερο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι εκτός των περιοχών διαρρήξεων, δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στις παραμέτρους δομής του εδάφους. Σε κάθε περίπτωση, καθώς η «κατακόρυφη» δομή αποκρίνεται ως μια «χαλαρότερη» άμμος, η «αστοχία» και η Κρίσιμη Κατάσταση επέρχεται σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, δηλαδή χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να προκύψει.



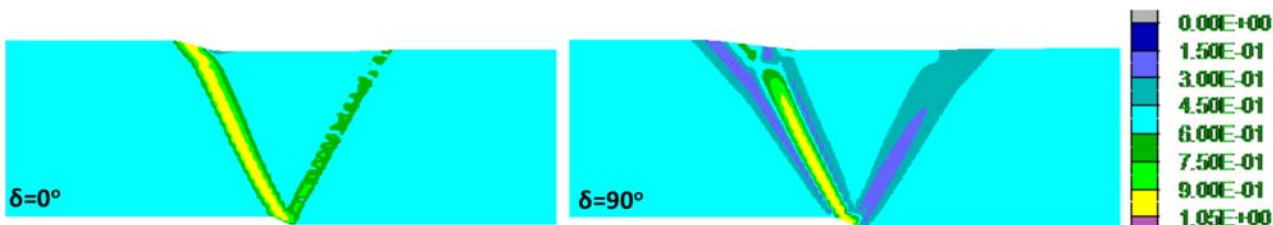
Σχήμα 5.7 Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.8 Μεταβλητή ανιστροπίας δομής A σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.9 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.10 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο.

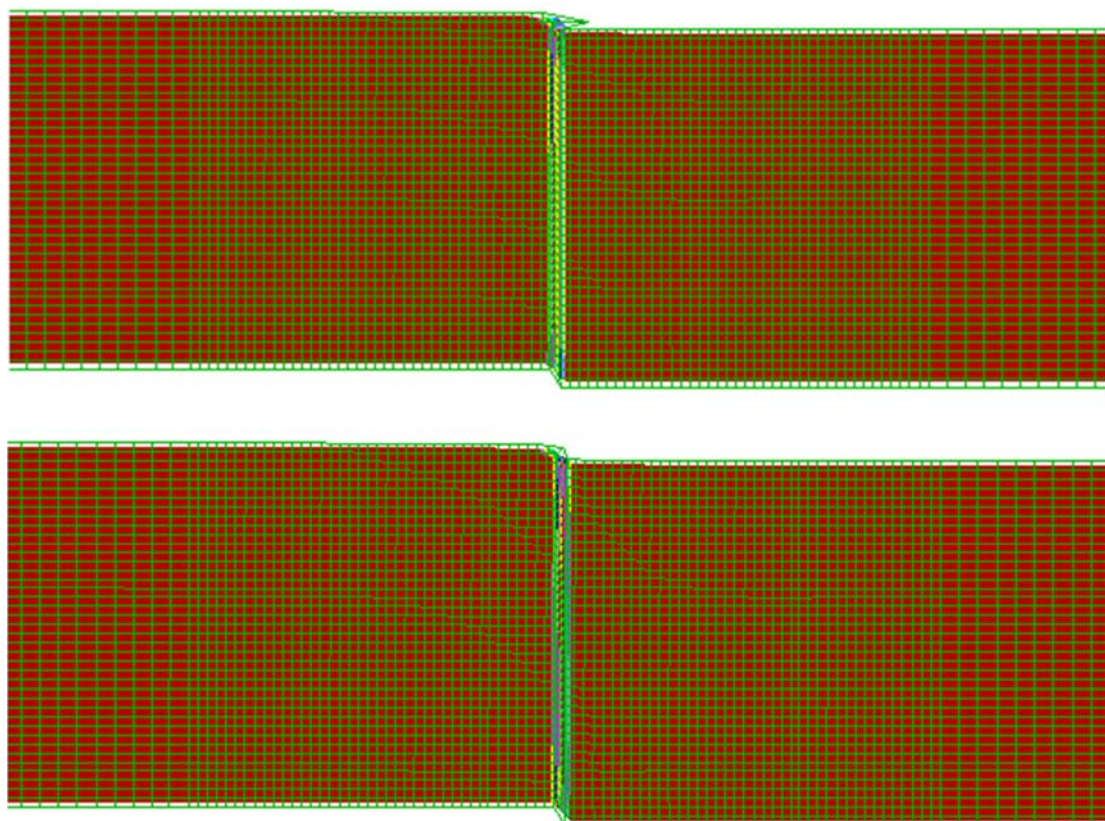
5.2.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Στη συνέχεια, διερευνάται η διάδοση «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας 85° εντός αμμάδους στρώσης με τις δύο έντονα διαφορετικές αρχικές δομές που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Σημειώνεται πως και σε αυτή την περίπτωση η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια απαιτεί κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=0.2m$ για άμμο «οριζόντιας δομής», ήτοι μικρότερη της $d = 0.4m$ που απαιτείται για ανάδυση στην «κατακόρυφη δομή» άμμου, δηλαδή τιμές αντίστοιχες με εκείνες για διάρρηξη κανονικού ρήγματος.

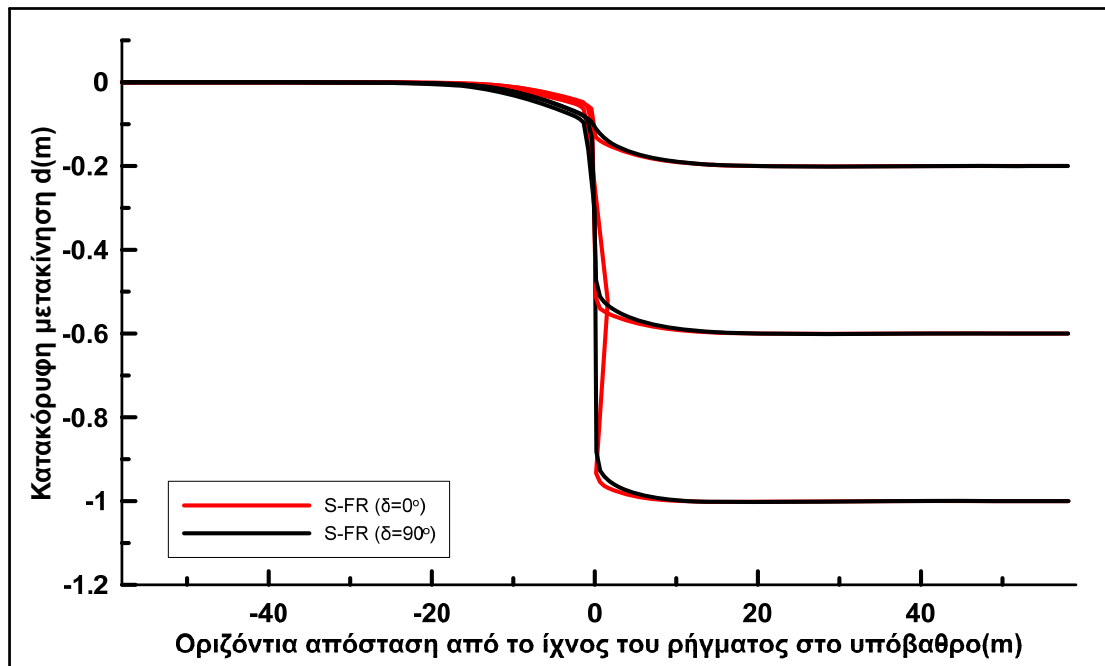
Στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για τις δύο αναλύσεις και για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=1.0m$. Με βάση αυτή την εικόνα, οι διαφορές στη διάρρηξη όταν εκείνη διαδίδεται σε 2 στρώσεις με

διαφορετικές αρχικές μικρο-δομές μπορούν να χαρακτηριστούν μικρές, και σίγουρα μικρότερες απ' ό,τι προκύπτει για τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Ο λόγος είναι ότι η διαφορά στον προσανατολισμού του επιπέδου απόθεσης της άμμου δεν επηρεάζει την τελική εικόνα της διάρρηξης σε θέση και εύρος. Και για τις δύο περιπτώσεις δομής, η διάρρηξη προκύπτει κατακόρυφη, με μικρές διαφορές στο μέγεθος των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων εντός αυτής (η τιμή τους είναι λίγο μεγαλύτερη για την αρχικά «οριζόντια δομή»).

Συνολικά, η διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος δημιουργεί εντατικό πεδίο μορφής απλής διάτμησης, με αντίθετο πρόσημο της διατμητικής τάσης στο σταθερό (αριστερά) και το μετακινούμενο (δεξιά) τέμαχος. Σε κάθε περίπτωση η επιβολή διατμητικής τάσης περιστρέφει τη διεύθυνση της σι από την αρχικώς κατακόρυφη θέση των γεωστατικών συνθηκών, και συνεπώς αυτή βρίσκεται υπό γωνία τόσο για αρχικώς «οριζόντια» όσο και για αρχικώς «κατακόρυφη» δομή. Για μια τέτοια φόρτιση (που έχει την σι υπό γωνία ως προς την οριζόντια), δεν αναμένονται μεγάλες διαφορές στην απόκριση για αρχικώς «οριζόντια» και αρχικώς «κατακόρυφη» δομή, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις ταυτιζόμενες εικόνες των διαρρήξεων στο **Σχήμα 5.11**. Αντίστοιχη εικόνα ταύτισης παρουσιάζει και η παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος d έως 1.0m σε στρώσεις με τις 2 εξεταζόμενες αρχικές δομές άμμου στο **Σχήμα 5.12**.



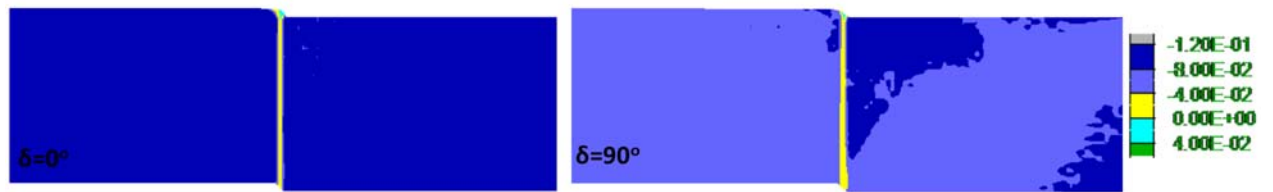
Σχήμα 5.11 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα S-FR.



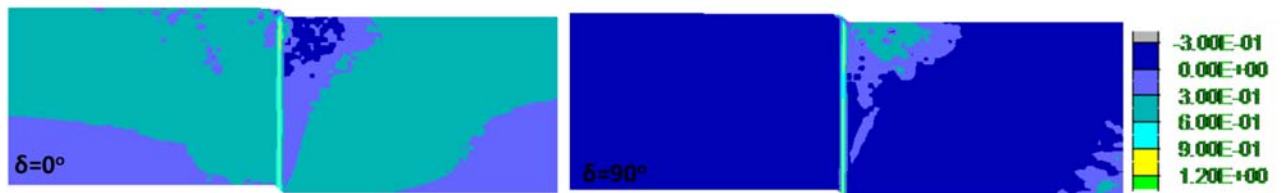
Σχήμα 5.12 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και κατακόρυφη μετατόπιση $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m υπό ελεύθερο πεδίο

Ακολουθώς, στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, με κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$, για «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 5.14, 5.15** και **5.16** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και προσανατολισμών δομής κόκκων. Σημειώνεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).

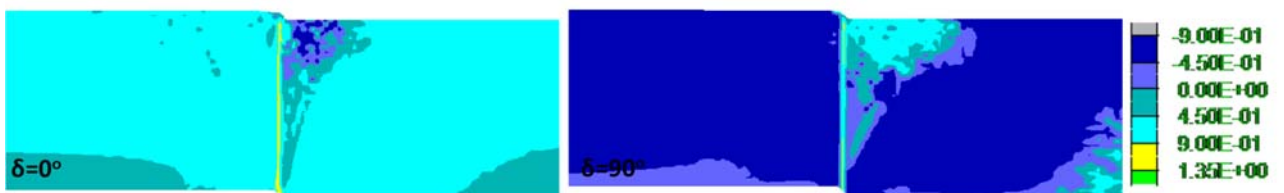
Παρατηρείται ότι, ενώ η διάρρηξη έχει αναδυθεί πλήρως και στους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων, η άμμος έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση σχεδόν σε όλο το μήκος της ζώνης διάτμησης μόνο στην περίπτωση της «οριζόντιας δομής». Συγκεκριμένα, για «κατακόρυφη δομή», η παράμετρος σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N δεν έχει πάρει την κρίσιμη τιμή της $N=1$ σε όλο το μήκος της διάρρηξης, γεγονός που αποτυπώνεται και στην μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A που δεν έχει την τιμή $A=1$ σε όλο το μήκος της κατακόρυφης διάρρηξης. Αντιθέτως, το μέτρο του τανυστή δομής $F=1$ σε όλο το μήκος της διάρρηξης και για τις 2 περιπτώσεις δομής. Αυτή η «καθυστέρηση» στην άφιξη στην Κρίσιμη Κατάσταση για την «κατακόρυφη» δομή είναι συμβατή ποιοτικά και με την σχετικώς μεγαλύτερη αναγκαία τιμή κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος d για την ανάδυση της διάρρηξης.



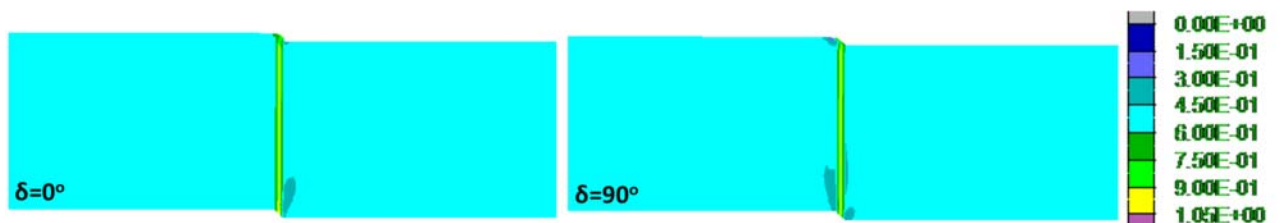
Σχήμα 5.13 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.14 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.15 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.16 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.

Γενικότερα, εκτός της ζώνης διάρρηξης, δεν υπάρχει σημαντική επίδραση στις τιμές των παραμέτρων δομής. Συγκεκριμένα, στην «οριζόντια δομή» η παράμετρος σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N διατηρεί το (γεωστατικό) θετικό πρόσημο με εξαίρεση την αβαθή περιοχή πλησίον της διάρρηξης στο μετακινούμενο τέμαχος, και αντίστοιχα, στην «κατακόρυφη» δομή η παράμετρος N διατηρεί το (γεωστατικό) αρνητικό πρόσημο με εξαίρεση την αβαθή περιοχή πλησίον της διάρρηξης στο μετακινούμενο τέμαχος. Δεδομένης της πρακτικώς σταθερής τιμής του μέτρου του τανυστή δομής $F = F_{in} = 0.5$ εκτός της ζώνης διάρρηξης, η διατήρηση των αρχικών τιμών αφορά και στην μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , με εξαίρεση την ίδια αβαθή

περιοχή πλησίον της διάρρηξης στο μετακινούμενο τέμαχος, όπου η A έχει συγκριτικώς αλγεβρικά μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, αντίστοιχα. Οι προαναφερθείσες τοπικές διαφοροποιήσεις της τιμής της A καθιστούν τις τιμές της τοπικά συγκρίσιμες, ανεξαρτήτως αρχικής δομής. Τα ίδια ισχύουν και για την ανισοτροπική παράμετρο κατάστασης ζ που διατηρεί αδρά τις τιμές της που είχε στη γεωστατική κατάσταση, με εξαίρεση τη διάρρηξη και την αβαθή περιοχή πλησίον αυτής στο μετακινούμενο τέμαχος, όπου η παράμετρος ζ παίρνει συγκρίσιμες τιμές ανεξαρτήτως αρχικής δομής. Αποτέλεσμα αυτών είναι οι παράμετροι δομής ζ και A που υπεισέρχονται στην προσομοίωση να είναι συγκρίσιμες στην περιοχή ενδιαφέροντος (τουλάχιστον για $d = 1.0\text{m}$ που αποτυπώνεται εδώ) με αποτέλεσμα τη σχεδόν ταυτόσημη εικόνα διάρρηξης ανεξαρτήτως αρχικής δομής.

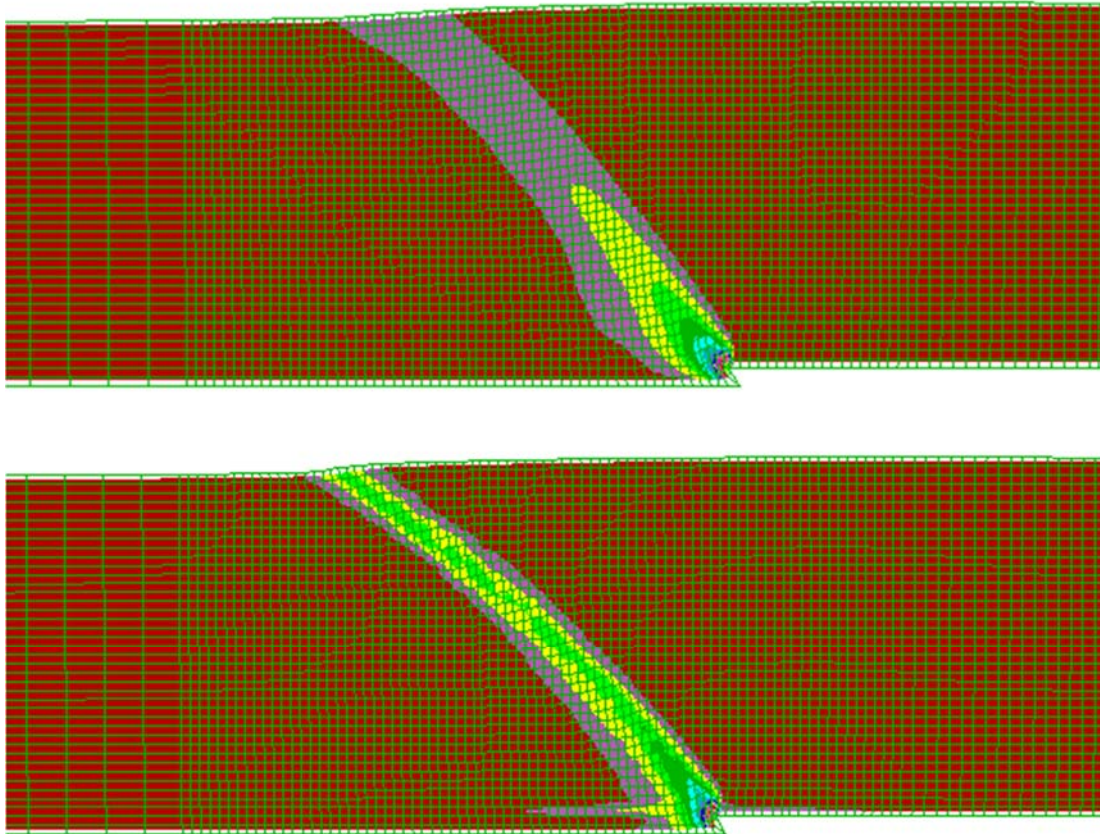
5.2.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Η τελευταία περίπτωση ρήγματος που διερευνάται ως προς την επίδραση της δομής της άμμου στη διάρρηξή του υπό ελεύθερο πεδίο είναι εκείνη του ανάστροφου γωνίας $\beta=135^\circ$. Τονίζεται πως σε αυτή την περίπτωση οι δύο διαφορετικές αρχικές δομές δεν επηρεάζουν πολύ την απαιτούμενη μετακίνηση ρήγματος προκειμένου να υπάρξει ανάδυση της διάρρηξης στην ελεύθερη επιφάνεια, καθώς αυτή συμβαίνει αδρά και στις δύο περιπτώσεις για $d = 0.8\text{m}$, με τη διάρρηξη στην «κατακόρυφη» δομή μάλλον να προηγείται ελαφρώς. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή $d = 0.8\text{m}$ είναι πολύ μεγαλύτερη από τις τιμές $d = 0.2 - 0.4\text{m}$ που προέκυψαν για την ανάδυση κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία (π.χ. Loukidis et al. 2009).

Ωστόσο, η ίδια η διάρρηξη έχει ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούνται, ειδικά για μεγαλύτερες μετακινήσεις. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 5.17** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους που αντιστοιχούν στην μέγιστη επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετακίνηση $d=1.0\text{m}$, και για τις 2 αρχικώς διαφορετικές δομές άμμου. Η πρώτη διαφορά εντοπίζεται στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης, η οποία για την «κατακόρυφη» δομή προκύπτει μετατοπισμένη κατά 4-5m προς το σταθερό τέμαχος (αριστερά). Η δεύτερη αφορά στο μέγεθος των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων εντός της ζώνης διάρρηξης, με την αρχικά «κατακόρυφη» δομή να χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τιμές.

Συνολικά, η διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος δημιουργεί «θλιπτικό» εντατικό πεδίο, δηλαδή αύξηση της οριζόντιας τάσης υπό σταθερή κατακόρυφη τάση, που ομοιάζει την «παθητική» φόρτιση πίσω από τοίχο αντιστήριξης που μετακινείται προς τα μέσα. Για μια τέτοια φόρτιση (που για μεγάλες μετατοπίσεις χαρακτηρίζεται από οριζόντια σ_1), η «κατακόρυφη δομή» εμφανίζεται πιο δύσμητη και διαστολική απ' ότι η «οριζόντια δομή», ή, με άλλα λόγια, η «κατακόρυφη δομή» δημιουργεί απόκριση άμμου που ομοιάζει «πυκνότερη», όπως είχε περιγραφεί ποιοτικά και στο Κεφάλαιο 3.

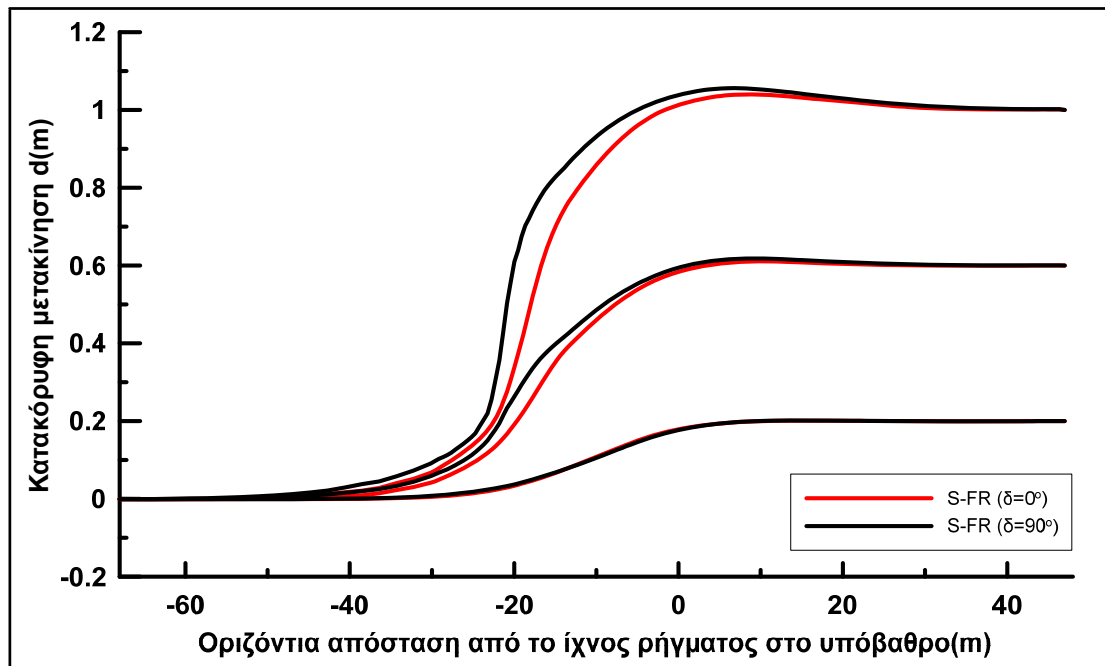
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.18** παρουσιάζεται η εικόνα της παραμορφωμένης εδαφικής επιφάνειας, για τις δύο περιπτώσεις μικροδομής και για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m . Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η εκτροπή της θέσης ανάδυσης της κύριας διάρρηξης για την αρχικά «κατακόρυφη» δομή όπως επίσης και η μεγαλύτερη διόγκωση του εδάφους (ως αποτέλεσμα της αυξημένης διαστολικότητας), ειδικά όσο μεγαλώνει η κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος d .



Σχήμα 5.17 Συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εδαφικής στρώσης άμμου Τογούρα με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0m$ υπό ελεύθερο πεδίο, από αριθμητική ανάλυση με προσομοίωμα S-FR.

Οι παρατηρήσεις αυτές συνάδουν ποιοτικά με την απόκριση «πυκνότερης» άμμου που προαναφέρθηκε (π.χ. Loukidis et al. 2009). Επιπλέον, για τη διερεύνηση των παραμέτρων που καθορίζουν τη διαφορετική απόκριση των δύο αρχικών δομών, στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, με κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0m$, για «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 5.20, 5.21** και **5.22** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και προσανατολισμών δομής κόκκων. Όπως και παραπάνω, η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).

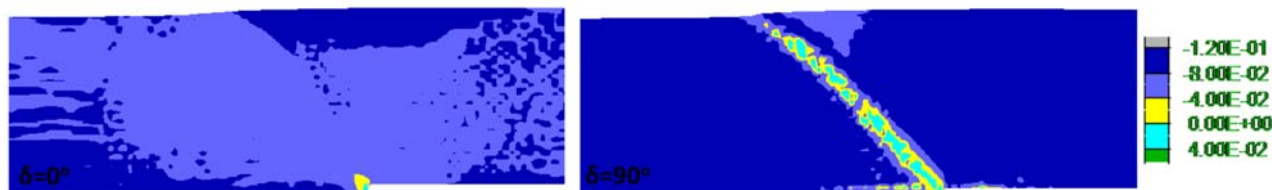
Παρατηρείται εδώ ότι, καθώς η διάρρηξη έχει μόλις αναδυθεί στις 2 στρώσεις (αναδύεται για $d = 0.8m$ περίπου), η άμμος δεν έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση σε καμία από αυτές, δηλαδή χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερη από $1.0m$ κατακόρυφη μετατόπιση ανάστροφου ρήγματος για να την προσεγγίσει.



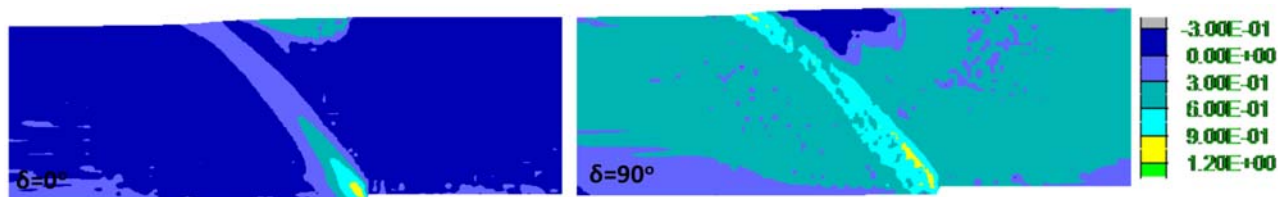
Σχήμα 5.18 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και κατακόρυφη μετατόπιση $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m υπό ελεύθερο πεδίο

Βέβαια, βρίσκεται σαφώς εγγύτερα στην Κρίσιμη Κατάσταση στην περίπτωση της «κατακόρυφης δομής». Για παράδειγμα, το μέτρο του τανυστή δομής F έχει πάρει τιμές μεγαλύτερες από 0.6 σε όλο το μήκος της διάρρηξης εντός της στρώσης με «κατακόρυφη δομή», ενώ το αντίστοιχο μήκος εντός της στρώσης με «οριζόντια δομή» είναι μόλις τα βαθύτερα 4m της στρώσης. Από εκεί και πέρα, εκτός των περιοχών διαρρήξεων, οι παράμετροι δομής παρουσιάζουν τις τιμές που σχετίζονται με το «θλιπτικό» τασικό πεδίο του ανάστροφου ρήγματος (οριζόντια σ_1). Με άλλα λόγια, εμφανίζονται αρνητικές και θετικές τιμές της παραμέτρου N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, αντίστοιχα, αντιστρέφοντας τα πρόσημα που είχαν υπό γεωστατικές συνθήκες (όπου η σ_1 είναι κατακόρυφη). Αυτή η αντιστροφή των πρόσημων της παραμέτρου N συνεπάγεται αντιστροφή των πρόσημων και της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , που αντιστοιχεί σε αλγεβρικά μικρότερες τιμές της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ για την «κατακόρυφη δομή». Αυτό επεξηγεί την μακροσκοπική απόκριση της στρώσης, δηλαδή ότι η «κατακόρυφη δομή» εμφανίζεται πιο δύστημη και διαστολική απ' ό,τι η «οριζόντια δομή» για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Αυτό αιτιολογεί και ότι η «αστοχία» και η Κρίσιμη Κατάσταση επέρχεται σε μικρότερες παραμορφώσεις, δηλαδή χρειάζεται μικρότερη μετατόπιση ρήγματος για να προκύψει Κρίσιμη Κατάσταση όταν η αρχική δομή είναι «κατακόρυφη».

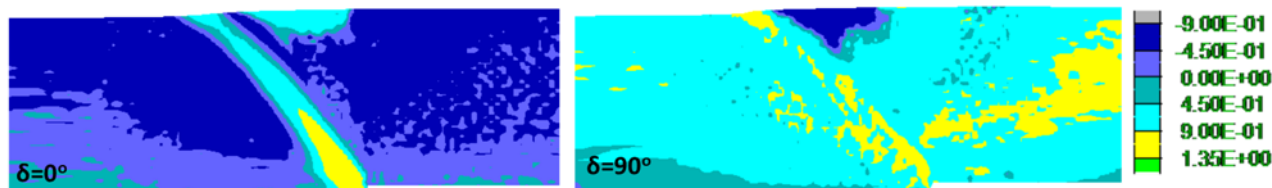
Συνοπτικά προκύπτει ότι σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, η «κατακόρυφη» δομή δίνει απόκριση άμμου «χαλαρότερης» και «πυκνότερης» απ' ό,τι η «οριζόντια» δομή, κατά τη διάρρηξη κανονικού και ανάστροφου ρήγματος, αντίστοιχα. Αντιθέτως, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος, η «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή δίνουν πρακτικώς ταυτόσημα αποτελέσματα.



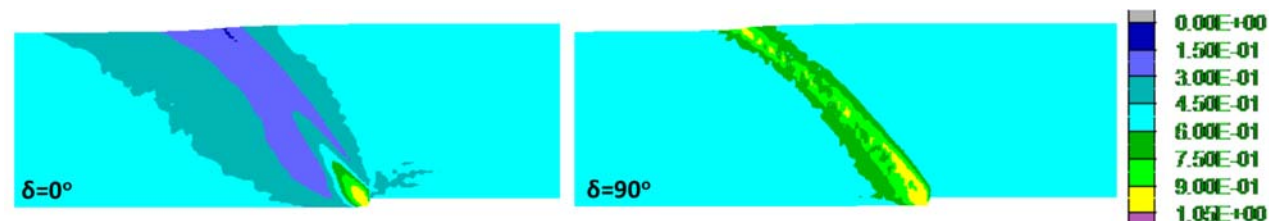
Σχήμα 5.19 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.20 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



Σχήμα 5.21 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.



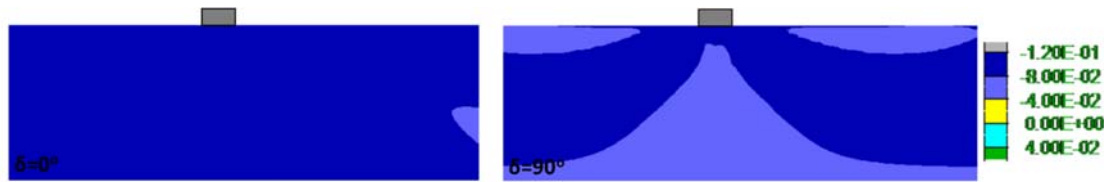
Σχήμα 5.22 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) με κατακόρυφη μετατόπιση $d = 1.0\text{m}$ υπό ελεύθερο πεδίο.

5.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

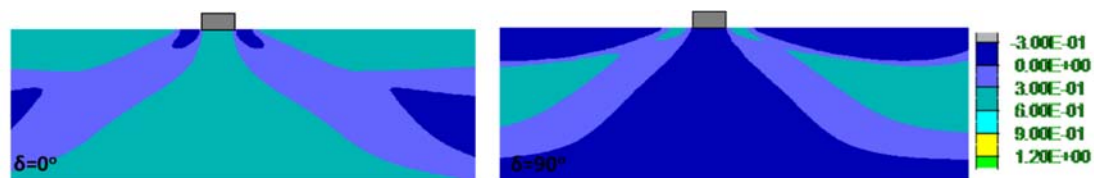
5.3.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής

Εδώ παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες (πριν την επιβολή της διάρρηξης, αλλά μετά την επιβολή του μικρού φορτίου λόγω κατασκευής) εντός της στρώσης άμμου με οριζόντια και την κατακόρυφη δομή κόκκων. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι τιμές των

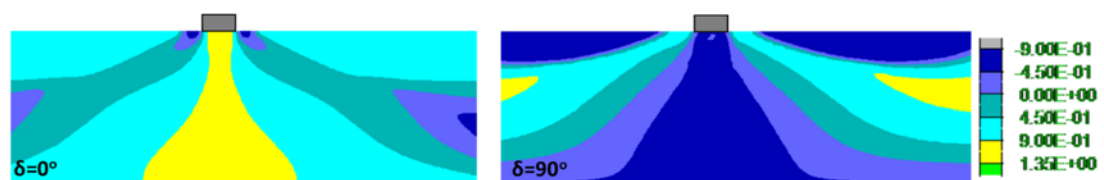
παραμέτρων δομής στις 2 στρώσεις άμμου πάχους 20m με σχετική πυκνότητα κόκκων $D_r = 65\%$ υπό τις συνθήκες που επικρατούν μετά την επιβολή του μικρού φορτίου κατασκευής. Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 5.23, 5.24, 5.25 και 5.26** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ , της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , της παραμέτρου σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N και του μέτρου τανυστή δομής F , αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά η θέση της κατασκευής σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο δεν παίζει κάποιο ρόλο, αφού δεν έχει ξεκινήσει η διάρρηξη. Παρόλα αυτά, χάριν πληρότητας, αναφέρεται ότι η κατασκευή βρίσκεται τοποθετημένη σε απόσταση $C=3m$ από το ίχνος, δηλαδή είναι άμεσα συμβατή με τις αναλύσεις για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος.



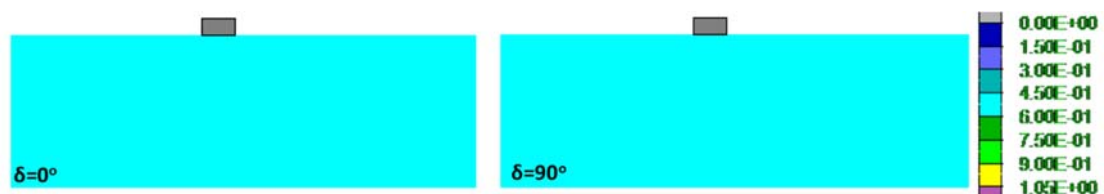
Σχήμα 5.23 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4m$ και φορτίου $q=100kPa$ (σε απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος)



Σχήμα 5.24 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4m$ και φορτίου $q=100kPa$ (σε απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος).



Σχήμα 5.25 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4m$ και φορτίου $q=100kPa$ (σε απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος).



Σχήμα 5.26 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4m$ και φορτίου $q=100kPa$ (σε απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος).

Όπως και για τις διαρρήξεις σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου, σε κάθε ένα από τα σχήματα αυτά, το αριστερά υπο-σχήμα αντιστοιχεί στην «οριζόντια δομή» ενώ το δεξιά στην «κατακόρυφη δομή» κόκκων. Ξεκινώντας από το **Σχήμα 5.26** προκύπτει ότι το μέτρο του τανυστή δομής F παραμένει πρακτικώς ίσο με $F_{in} = 0.5$ και στις 2 περιπτώσεις δομής, δηλαδή διατηρεί ουσιαστικά την αρχική τιμή (που αποτελεί παράμετρο του προσομοιώματος S-FR). Αυτό γιατί η φόρτιση λόγω κατασκευής είναι σχετικώς μικρή συγκρινόμενη με τη φέρουσα ικανότητα, οπότε δεν έχουν δημιουργηθεί συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων που να δημιουργούν μεταβολή της δομής. Αντίθετα, υπάρχει διαφοροποίηση στην παράμετρο σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N (**Σχήμα 5.27**), τόσο μεταξύ των 2 δομών, όσο και συγκριτικά με τις γεωστατικές συνθήκες κάθε δομής (βλ. παράγραφο 5.2.1). Συγκεκριμένα, για «οριζόντια δομή» διατηρείται η (αρχική) τιμή $N=1$ μόνο κάτω από το θεμέλιο, ενώ η τιμή αυτή αλγεβρικά μειώνεται με την απόσταση από την περιοχή αυτή, καθώς η σ_1 σταδιακά αρχίζει να οριζοντιώνεται. Αντίστοιχα, για την «κατακόρυφη δομή» διατηρείται η αρχική τιμή $N=-0.5$ μόνο κάτω από το θεμέλιο, όπου η σ_1 είναι κατακόρυφη. Η τιμή αυτή αυξάνει αλγεβρικά με την απόσταση από την περιοχή αυτή, και πάλι λόγω της τάσης για οριζοντίωση της σ_1 . Υπενθυμίζεται ότι η σ_2 παραμένει οριζόντια και κάθετη στο επίπεδο των σχημάτων.

Ο συνδυασμός των F και N ορίζει την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=FN$, η οποία διατηρεί (περίπου) τις (αρχικές) τιμές $A=0.5$ και -0.25 για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, μόνο κάτω από το θεμέλιο (**Σχήμα 5.28**). Η τιμή της μεταβλητής A αλγεβρικά μειώνεται και αυξάνει, αντίστοιχα, για τις 2 δομές, με την απόσταση από την περιοχή αυτή, λόγω της αντίστοιχης μεταβολής της N . Τέλος, ο συνδυασμός της (πρακτικώς) ίδιας τιμής δείκτη πόρων e (για $D_r = 65\%$, δεν έχει αλλάξει ιδιαίτερα λόγω φορτίου κατασκευής) και της σχετικά πολύπλοκης κατανομής της παραμέτρου A , λόγω τοπικής αύξησης των τάσεων κάτω από το θεμέλιο, δίνει αντίστοιχα πολύπλοκη κατανομή της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ , η οποία όμως διατηρεί την αρνητική τιμή της, καθώς και τις αλγεβρικά σχετικώς μικρότερες (πιο αρνητικές) τιμές της για την «οριζόντια δομή» (βλ. **Σχήμα 5.29**).

5.3.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Στην παράγραφο 5.2 έγινε μία προσπάθεια να καθοριστεί η επίδραση της δομής στη διάδοση διάρρηξης ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, μελετώντας την πορεία της διάρρηξης μακροσκοπικά και μικροσκοπικά για δύο ακραίους προσανατολισμούς δομής. Αν και το πρόβλημα που εξετάστηκε αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα συνοριακών τιμών, οι διαφορές στα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις 3 γωνίες διάδοσης λόγω διαφορετικής αρχικής δομής μπόρεσαν να αιτιολογηθούν συγκρίνοντας την γενικευμένη φόρτιση που επιβάλλει η κάθε περίπτωση ρήγματος με την απόκριση της άμμου στην αντίστοιχη δοκιμή σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου. Το κρίσιμο ωστόσο ερώτημα είναι κατά πόσο οι διαφορές που παρατηρήθηκαν στις αναλύσεις υπό ελεύθερο πεδίο εξακολουθούν να ισχύουν με την τοποθέτηση κατασκευής σε κατάλληλη θέση και κυρίως το μέγεθος της απόκλισης στην περίπτωση που αυτές εντείνονται.

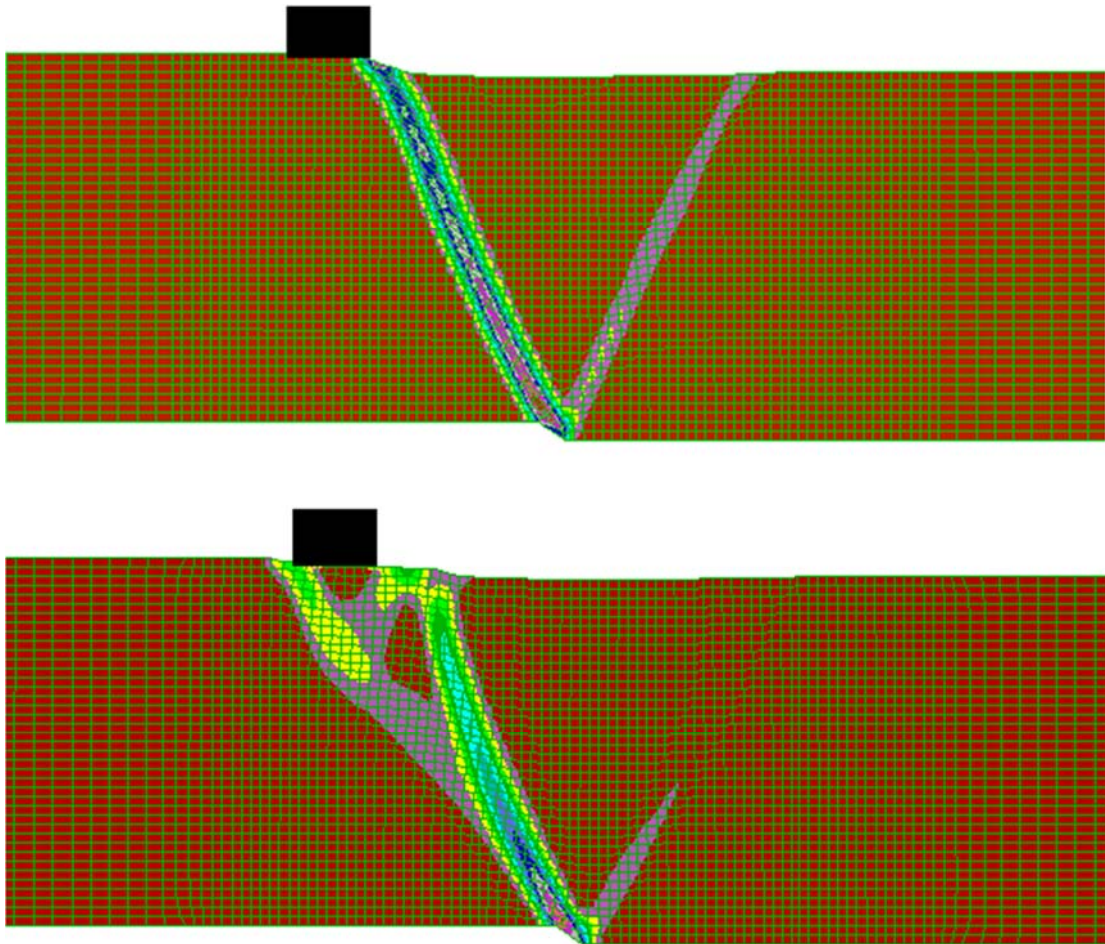
Για τον λόγο αυτό, μελετάται, σε πρώτη φάση, η διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ για την περίπτωση που αυτό αλληλεπιδρά με επιφανειακό θεμέλιο πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100\text{kPa}$ με το κέντρο του τοποθετημένο στη «χαρακτηριστική θέση» $C=12\text{m}$ (οριζόντια απόσταση του κέντρου θεμελίου από το ίχνος του ρήγματος

στο υπόβαθρο) και για αρχικά «κατακόρυφο» και «οριζόντιο» προσανατολισμό δομής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τοποθέτηση της κατασκευής στην επιφάνεια της άμμου «οριζόντιας δομής» δεν επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή της απαιτούμενης μετακίνησης για ανάδυση της διάρρηξης, καθώς αυτή προκύπτει ίση με $d=0.2\text{m}$. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την άμμο «κατακόρυφης δομής», με την διάρρηξη να αναδύεται λίγο μετά την μετακίνηση $d=0.4\text{m}$. Με άλλα λόγια, η σχετική διαφορά για τις δύο μικρο-δομές προκύπτει πρακτικά ίση με εκείνη που προκύπτει και για διάρρηξη του ίδιου ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.

Ακολούθως, στο **Σχήμα 5.27** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για τις δύο διαφορετικές αρχικές δομές και για την μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος που επιβλήθηκε, δηλαδή $d=1.0\text{m}$. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να αντληθεί είναι πως η συνολικά πιο διαστολική συμπεριφορά που παρουσίαζε η αρχικά «οριζόντια» δομή σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου εξακολουθεί να ισχύει και μετά την τοποθέτηση της κατασκευής μικρού φορτίου. Η διαπίστωση αυτή τεκμηριώνεται με βάση το ότι για αυτή την περίπτωση, οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της κύριας διάρρηξης είναι εμφανώς μεγαλύτερες συγκριτικά με εκείνες για αρχικά «κατακόρυφη» δομή. Το ίδιο ισχύει και για τη δευτερεύουσα διάρρηξη, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις και εμπέδωση μέχρι την επιφάνεια για την περίπτωση μόνο της «οριζόντιας» δομής.

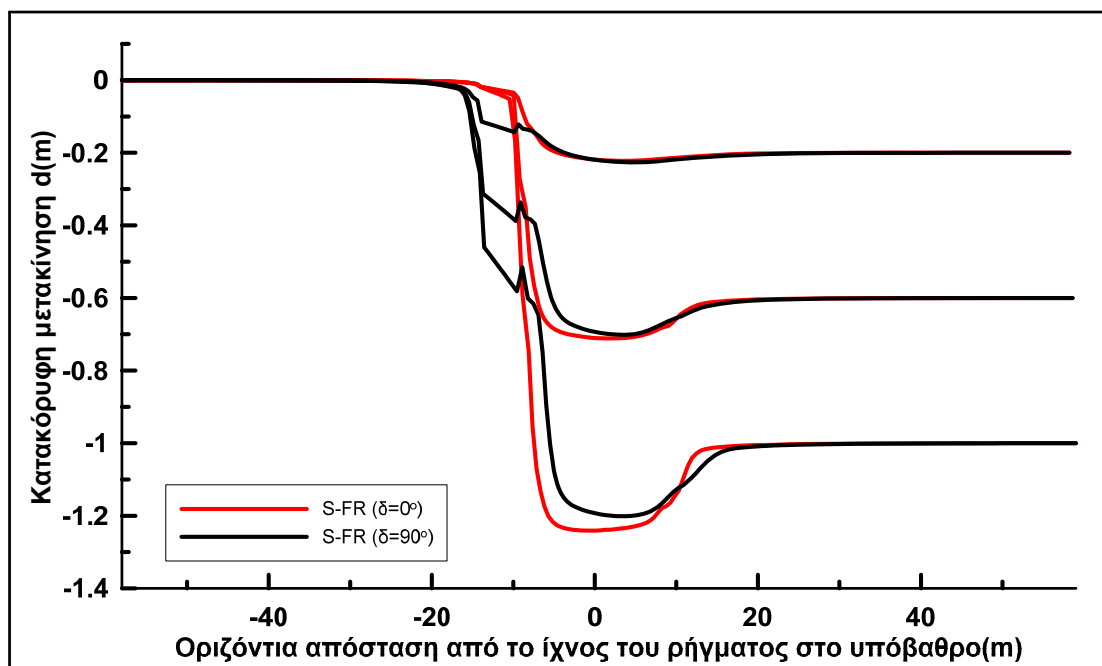
Πέραν των ανωτέρω ομοιοτήτων, προκύπτουν και σημαντικές διαφορές στη μορφή της κύριας διάρρηξης λόγω αρχικής δομής. Συγκεκριμένα, ενώ και στις δύο περιπτώσεις η κύρια διάρρηξη αναδύεται στη δεξιά πλευρά της κατασκευής, στην περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής δημιουργείται διακλάδωση μέσω βάθους και προς την αριστερή πλευρά της κατασκευής. Επιπλέον, δημιουργείται και «αστοχία» μορφής πρίσματος κάτω από το θεμέλιο, σαν από αστοχία σε φέρουσα ικανότητα. Αυτή η διαφοροποίηση σχετίζεται με την αλληλεπίδραση του μηχανισμού αστοχίας λόγω φέρουσας ικανότητας με εκείνον λόγω της διάρρηξης ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα, για συνθήκες μη-διάρρηξης, η φέρουσα ικανότητα της άμμου «κατακόρυφης» δομής προκύπτει μικρότερη από εκείνη της «οριζόντιας» (Chaloulos et al. 2019). Επιπλέον, η διάρρηξη κανονικού ρήγματος μειώνει τις οριζόντιες τάσεις, και συνεπώς μειώνει την πλευρική υποστήριξη στο έδαφος θεμελίωσης με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητάς τους, ανεξαρτήτως δομής. Συνεπώς, η μειωμένη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου υπό «κατακόρυφη» δομή, μειώνεται περαιτέρω λόγω διάρρηξης, καθιστώντας την τιμή του φορτίου κατασκευής $q=100\text{kPa}$ σχετικώς σημαντική, κάτι που δε συμβαίνει για την οριζόντια δομή. Αποτέλεσμα αυτού είναι η «πολύπλοκη» μορφή διάρρηξης για την «κατακόρυφη» δομή, που συνεπάγεται και καθιζήσεις της κατασκευής, καίτοι βρίσκεται στο σταθερό τμήμα της (κύριας) διάρρηξης.

Τα αποτελέσματα αυτής της διάρρηξης στην παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια με βάση τις 2 αναλύσεις, για τις 2 διαφορετικές αρχικές δομές, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.28**, όχι μόνο για $d=1.0\text{m}$ αλλά και για μικρότερες τιμές μετακίνησης ρήγματος.



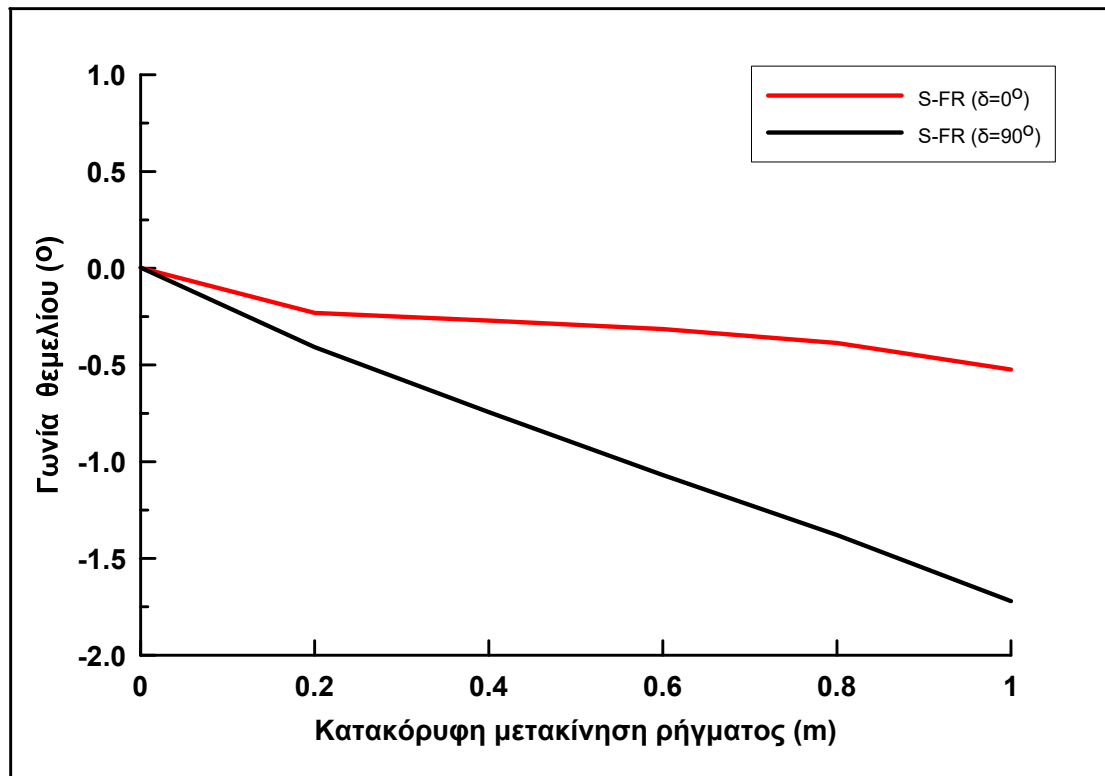
Σχήμα 5.27 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Παρατηρείται πως λόγω της θέσης της κατασκευής (στο σταθερό τέμαχος της κύριας διάρρηξης) οι διαφορές που προκύπτουν στο κινούμενο τέμαχος έρχονται σε ποιοτική συμφωνία με τις αναλύσεις ελεύθερου πεδίου. Δηλαδή, για την «κατακόρυφη» δομή, η δευτερογενής διάρρηξη εμφανίζεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το σταθερό τέμαχος (προς τα δεξιά), ενώ το βάθος του κατακρημνίσματος είναι μικρότερο (καθώς χρειάζεται ακόμη μεγαλύτερη μετακίνηση ρήγματος για να αναδυθεί). Οι ομοιότητες με την απόκριση σε ελεύθερο πεδίο παρατηρούνται και στο σταθερό τέμαχος, π.χ. υπάρχει μετατόπιση της θέσης ανάδυσης προς το σταθερό τέμαχος για την «κατακόρυφη» δομή. Με άλλα λόγια, η απόκριση της «κατακόρυφης» δομής ως άμμου «χαλαρότερης» εξακολουθεί να αποτυπώνεται και όταν υπάρχει επιφανειακή κατασκευή. Ωστόσο, στη στενή γειτονιά της κατασκευής, η απόκριση καθορίζεται από την απόκριση επιφανειακού θεμελίου, δηλαδή η μικρότερη φέρουσα ικανότητα για «κατακόρυφη» δομή έχει ως αποτέλεσμα σημαντικότερες καθιζήσεις, ενώ για «οριζόντια» δομή οι καθιζήσεις είναι ελάχιστες. Για παράδειγμα, για την τελική μετακίνηση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ προκύπτει καθίζηση περί τα 55cm , κατά μέση τιμή, για «κατακόρυφη» δομή, έναντι μόλις 3cm για «οριζόντια» δομή.



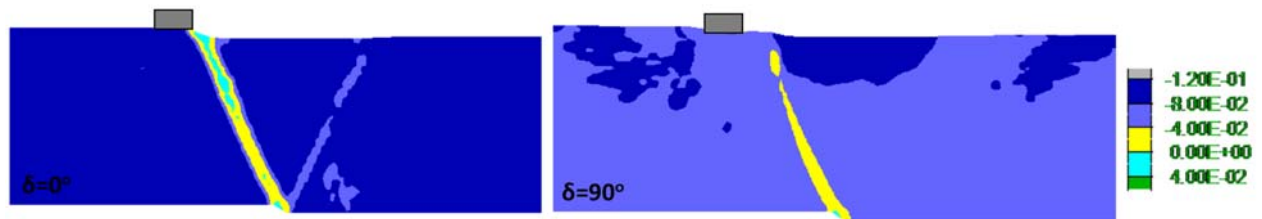
Σχήμα 5.28 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Προσεκτική παρατήρηση του **Σχήματος 5.28** υποδεικνύει και στροφές του θεμελίου, πέραν των καθιζήσεων αυτού. Για τη λεπτομερέστερη διερεύνηση της στροφής που αναπτύσσει το θεμέλιο, αλλά και της εξέλιξής της σε όλα τα στάδια μετακίνησης του ρήγματος, στο **Σχήμα 5.29** παρουσιάζεται η τιμή της στροφής συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος, τόσο για «οριζόντια» όσο και για «κατακόρυφη» δομή άμμου. Συγκεκριμένα, στην άμμο «οριζόντιας» δομής η στροφή της κατασκευής αυξάνεται (δεξιόστροφα) μέχρι την μετακίνηση $d=0.2\text{m}$, όπου και συμβαίνει η ανάδυση της (κύριας) διάρρηξης στην επιφάνεια της στρώσης. Για μεγαλύτερες μετακινήσεις ρήγματος και λόγω της τελικής θέσης της κατασκευής στο σταθερό τέμαχος, η στροφή αυξάνει λίγο και στην τελική μετακίνηση $d=1.0\text{m}$ δεν ξεπερνάει την τιμή 0.5° . Αντιθέτως, στην άμμο με «κατακόρυφη» δομή, η τιμή της στροφής αυξάνεται δεξιόστροφα και σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της μετακίνησης του ρήγματος σε όλα τα στάδια, φτάνοντας την τελική τιμή των 1.8° (για $d=1.0\text{m}$). Από όλα τα ανωτέρω προκύπτει σημαντική επίδραση της δομής της άμμου στην προβλεπόμενη απόκριση της στρώσης, αλλά και του επιφανειακού θεμελίου, τόσο σε όρους μέσης καθίζησης όσο και σε όρους στροφής. Με άλλα λόγια, η σχετικά μικρή αλλά συστηματική επίδραση της δομής στη διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο, μπορεί να γίνει εξαιρετικά μεγάλη όταν υπάρχει αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής.

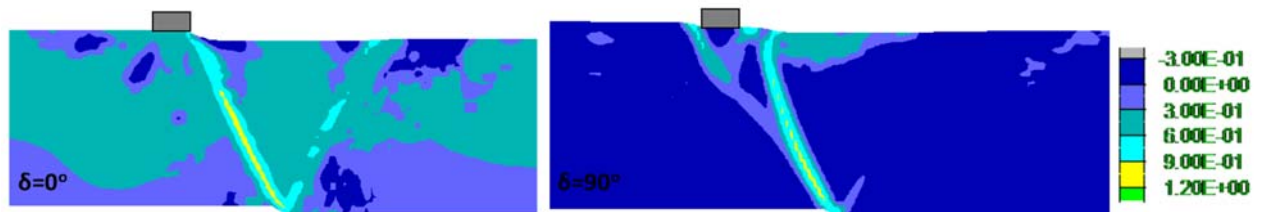


Σχήμα 5.29 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=12\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_f=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.

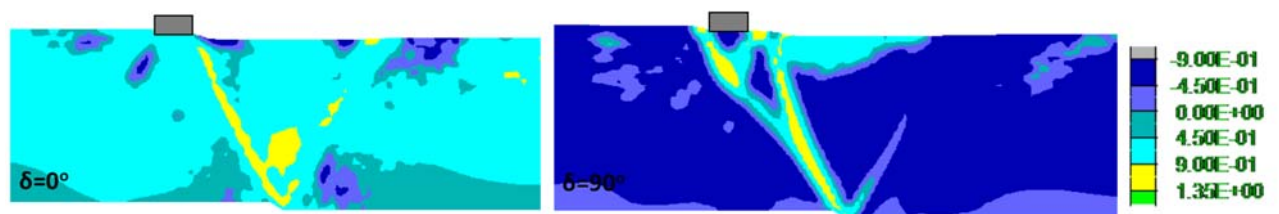
Χάριν μικροσκοπικής διερεύνησης των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, στο **Σχήμα 5.30** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ για την περίπτωση αλληλεπίδρασης διάρρηξης κανονικού ρήγματος (υπό κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$) με κατασκευή φορτίου 100kPa στην επιφάνεια (σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$), για «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 5.31**, **5.32** και **5.33** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ισοκαμπύλες για τη μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , την παράμετρο N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό φορτίου, ρήγματος, μετατόπισης και προσανατολισμών δομής κόκκων. Επισημαίνεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).



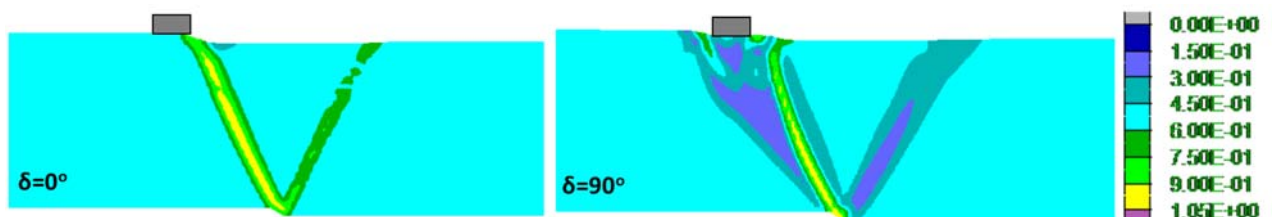
Σχήμα 5.30 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.31 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.32 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.33 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Σε ποιοτική συμφωνία με τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου, η άμμος φτάνει στην Κρίσιμη Κατάσταση μόνο εντός της κύριας διάρρηξης, και σχεδόν σε όλο το μήκος της μόνο για την αρχικά «οριζόντια» δομή. Αντίθετα, στις δευτερεύουσες διαρρηξίσεις, το έδαφος απέχει σημαντικά από την Κρίσιμη Κατάσταση, και για τις 2 δομές. Όπως και σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου, η «κατακόρυφη» δομή αποκρίνεται ως μια

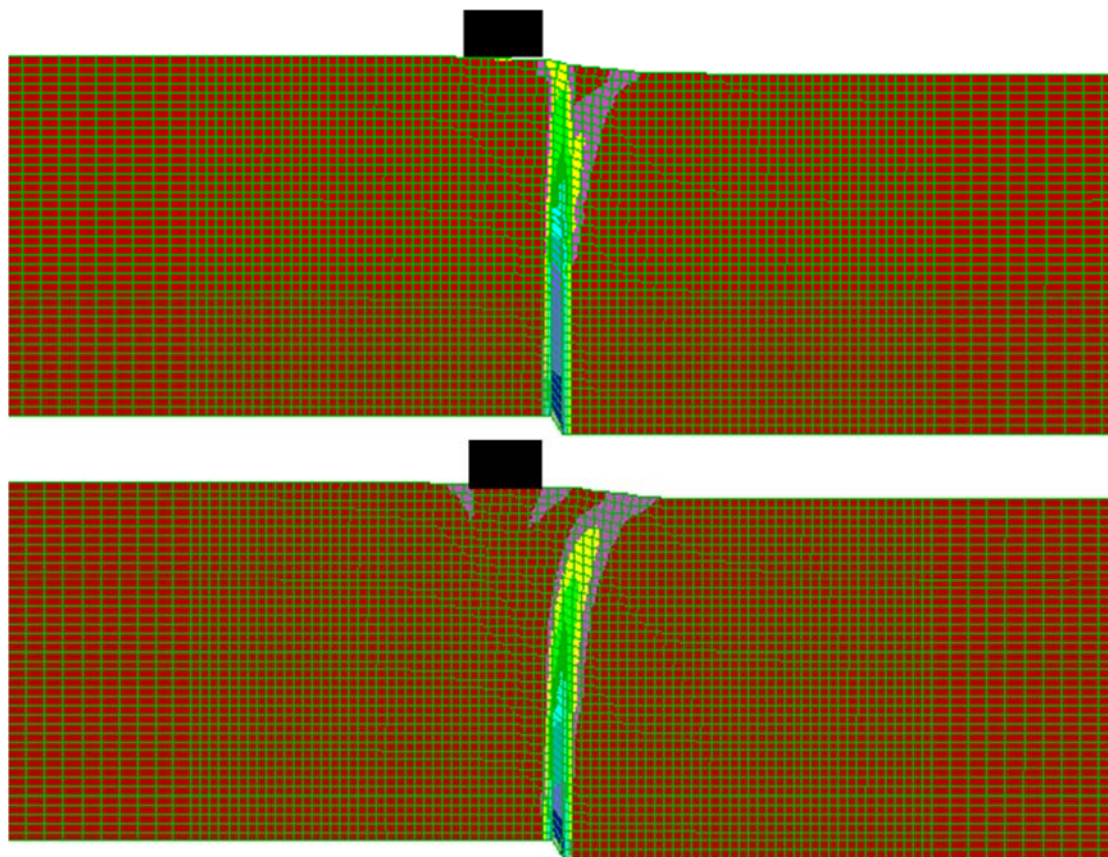
«χαλαρότερη» άμμος (βλέπε αλγεβρικά μεγαλύτερες, αλλά πάντα αρνητικές τιμές της παραμέτρου ζ), και έτσι η «αστοχία» και η Κρίσιμη Κατάσταση επέρχεται σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, δηλαδή χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να προκύψει. Η ύπαρξη του φορτίου δείχνει να δημιουργεί απαίτηση μεγαλύτερης μετατόπισης ρήγματος για να εμποδωθεί η Κρίσιμη Κατάσταση, αλλά αυτή η επίδραση είναι μικρή, όπως μικρή ήταν και η αντίστοιχη επίδραση στην αναγκαία μετατόπιση για την ανάδυση της διάρρηξης. Από όλες τις παραμέτρους δομής, μόνο το μέτρο του τανυστή δομής F έχει σημαντικά διαφοροποιηθεί από την αρχική τιμή του, αλλά αποκλειστικά εντός των (κύριων και δευτερευουσών) διαρρήξεων. Στις δευτερεύουσες διαρρήξεις συμπεριλαμβάνονται και εκείνες που σχετίζονται με την αστοχία μορφής σφήνας λόγω φέρουσας ικανότητας κάτω από το θεμέλιο για την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής.

5.3.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Προχωρώντας στη διερεύνηση της επόμενης περίπτωσης αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$, στο **Σχήμα 5.34** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση (ssi σε όρους FLAC) της εδαφικής στρώσης για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) με ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους 4m και για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=1.0\text{m}$. Η θέση της κατασκευής σε αυτές τις αναλύσεις απέχει οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (δηλαδή στο σταθερό τέμαχος για συνθήκες ελευθέρου πεδίου), και οι δύο εξεταζόμενες δομές αφορούν – σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα- αρχικό «οριζόντιο» και «κατακόρυφο» προσανατολισμό. Επισημαίνεται πως η ύπαρξη της κατασκευής αυξάνει τις κατακόρυφες τάσεις κάτω από το θεμέλιο και ως εκ τούτου και την αντοχή του εδάφους στην περιοχή αυτή. Το αποτέλεσμα είναι να δυσχεραίνεται η διάδοση της διάρρηξης και η ανάδυση της στην επιφάνεια να προκύπτει για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος ίση με $d = 0.4\text{m}$ για την άμμο «οριζόντιας» δομής και $d = 0.8\text{m}$ για την άμμο «κατακόρυφης» δομής. Υπενθυμίζεται ότι οι αντίστοιχες τιμές για την ανάδυση της διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος είναι $d = 0.2\text{m}$ και 0.4m , για την «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, αντίστοιχα.

Η ύπαρξη της κατασκευής όμως διαφοροποιεί και την εικόνα της διάρρηξης για τις 2 συγκρινόμενες δομές. Δηλαδή, ενώ υπό ελεύθερο πεδίο, η διάρρηξη είναι κατακόρυφη και για τις 2 δομές, η ύπαρξη της κατασκευής εκτρέπει τη διάρρηξη προς το μετακινούμενο τέμαχος όταν η δομή είναι «κατακόρυφη», ενώ δημιουργεί μια αβαθή δευτερογενή διάρρηξη (προς το μετακινούμενο τέμαχος) όταν η δομή είναι «οριζόντια». Επισημαίνεται ότι η απαρχή δημιουργίας πρίσματος αστοχίας μορφής σφήνας κάτω από το θεμέλιο, μόνο για «κατακόρυφη» δομή, που δικαιολογείται από το γεγονός ότι αυτή η δομή προσφέρει μικρότερη φέρουσα ικανότητα συγκριτικά με την «οριζόντια» (Chaloulos et al. 2019). Αυτό το πρίσμα δεν έχει σχηματιστεί ευκρινώς, αντίθετα με ό,τι παρατηρείται για διάρρηξη κανονικού ρήγματος, και αυτό γιατί δεν παρατηρείται εδώ η (σημαντική) απομείωση των οριζοντίων τάσεων που χαρακτηρίζει τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Τέλος, επισημαίνεται ότι η δημιουργία της δευτερογενούς αβαθούς διάρρηξης για $\delta=0^\circ$ σχετίζεται και με την προς τα κάτω μετατόπιση του μετακινούμενου τεμάχους, καθώς αν η μετατόπιση αυτή ήταν προς τα άνω τότε η διάρρηξη θα παρέμενε αμιγώς κατακόρυφη (όπως συμβαίνει και στο ελεύθερο πεδίο). Αντίθετα, για μετατόπιση του μετακινούμενου τεμάχους προς τα άνω στην περίπτωση της άμμου γωνίας $\delta=90^\circ$ θα υπήρχε δημιουργία βαθιάς δευτερεύουσας

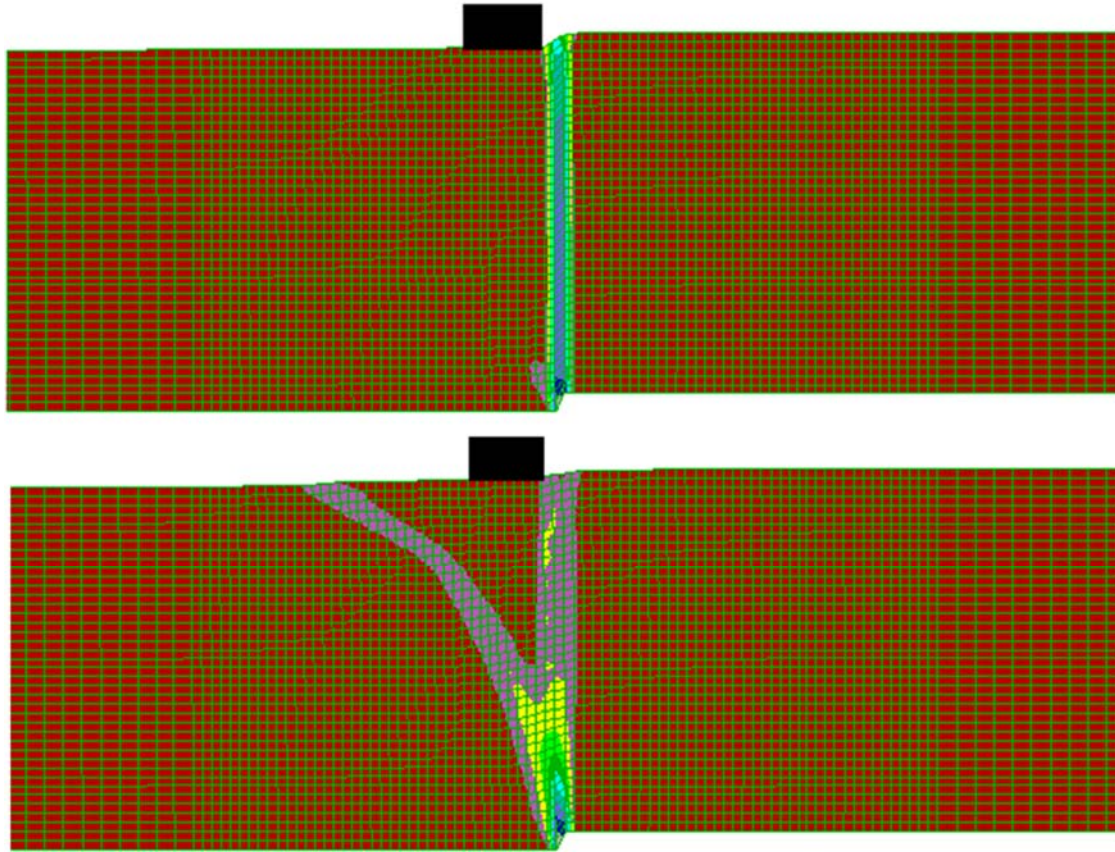
διάρρηξης. Η εικόνα της διάρρηξης για μετακίνηση του τεμάχους προς τα άνω και για τις δύο αρχικές μικροδομές απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.35**.



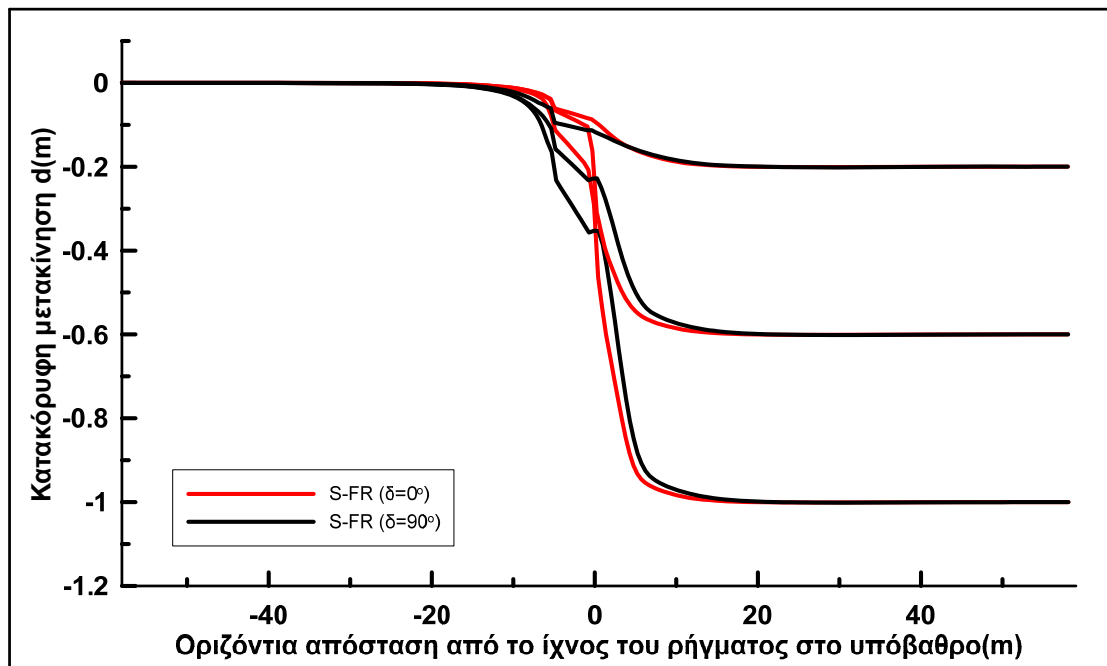
Σχήμα 5.34 Συνσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με $D_f=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.36** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος d έως 1.0m , για τους 2 συγκρινόμενους προσανατολισμούς δομής. Πρώτη αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι λόγω της κατασκευής η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους έχει ελαφρά μικρότερη κλίση, από την παραμόρφωση μορφής «σκαλοπατιού» που εμφανίζει υπό ελεύθερο πεδίο. Από εκεί και πέρα, η μικρότερη φέρουσα ικανότητα για «κατακόρυφη» δομή αντικατοπτρίζεται σε συγκριτικά αυξημένες καθιζήσεις του θεμελίου, και ελαφρά μεγαλύτερες δεξιόστροφες στροφές.

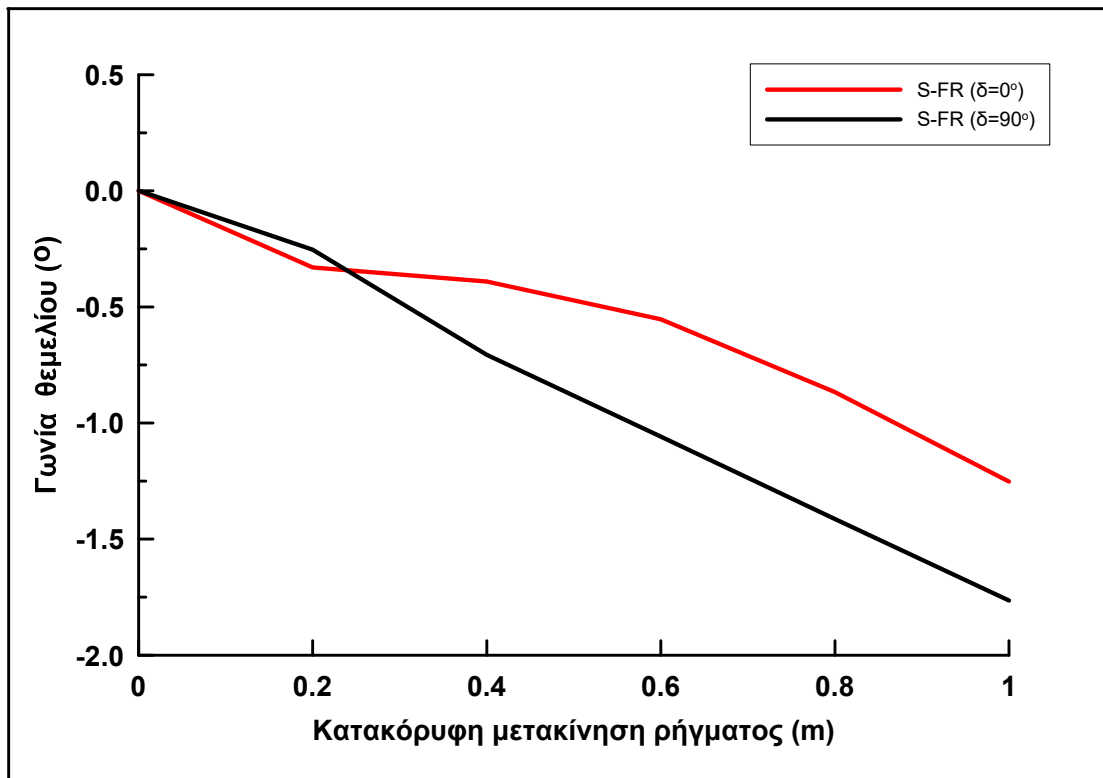
Για τη λεπτομερέστερη μελέτη της επίδρασης της μικροδομής στην καταπόνηση της κατασκευής, στο **Σχήμα 5.37** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής της ως συνάρτηση της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος. Σε συμφωνία με την παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, η «κατακόρυφη» δομή δίνει μεγαλύτερες στροφές απ' ότι η «οριζόντια» δομή, όπως συμβαίνει και για τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Η διαφορά είναι ότι για «οριζόντια» δομή εμφανίζεται συγκριτικά μεγαλύτερη στροφή θεμελίου στη διάρρηξη «κατακόρυφου» απ' ότι κανονικού ρήγματος (π.χ. για $d=1.0\text{m}$ η στροφή σε «κατακόρυφο» ρήγμα είναι 1.2° , ενώ για κανονικό ρήγμα είναι μόλις 0.5°), ενώ για την «κατακόρυφη» δομή η στροφή είναι σχεδόν ίδια και για τους 2 τύπους ρηγμάτων (π.χ. για $d=1.0\text{m}$ περίπου ίση με 1.8°).



Σχήμα 5.35 Συνσφωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (μετακίνηση τεμάχους προς τα άνω).



Σχήμα 5.36 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



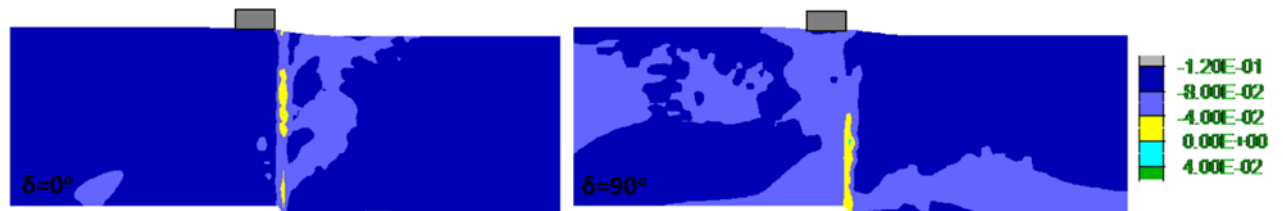
Σχήμα 5.37 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=12\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_f=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.

Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της δομής στη στροφή του θεμελίου είναι σαφώς μικρότερη για διάρρηξη «κατακόρυφου» έναντι κανονικού ρήγματος. Για την καλύτερη κατανόηση της συγκριτικά μικρής επίδρασης της αρχικής δομής στη μορφή της διάρρηξης, καθώς και στην καθίζηση και στροφή του θεμελίου, χρήσιμες είναι οι παράμετροι δομής.

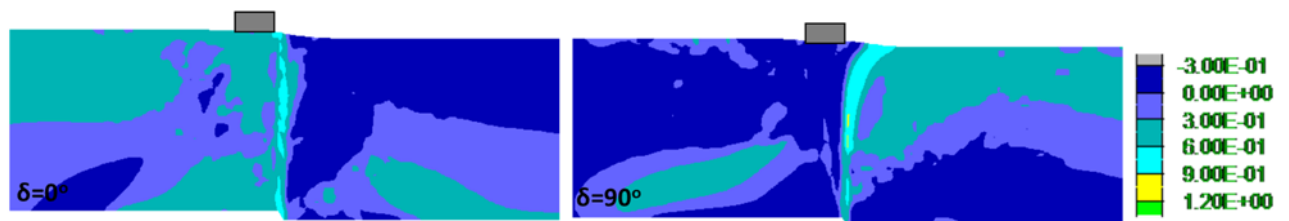
Έτσι, στο **Σχήμα 5.38** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με μετατόπιση $d=1.0\text{m}$, με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση $C=3\text{m}$ και για «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή κόκκων. Αντίστοιχα, στα **Σχήματα 5.39, 5.40** και **5.41** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης, φορτίου κατασκευής και τους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).

Παρατηρείται ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και στις δύο περιπτώσεις προσανατολισμού δομής κόκκων, σε καμιά από τις δύο δομές δε φτάνει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση εντός της διάρρηξης, αντίθετα με το κανονικό ρήγμα όπου για τις ίδιες αρχικές συνθήκες εδάφους και φορτίου, προσεγγίζεται μερικώς η Κρίσιμη Κατάσταση εντός της κύριας διάρρηξης. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, αφού η διάρρηξη αναδύεται σε $d=0.4-0.8\text{m}$ στο «κατακόρυφο» ρήγμα, αντίθετα με τις τιμές $d=0.2-0.4\text{m}$ για κανονικό ρήγμα. Επιπλέον, υπενθυμίζεται ότι στη διάρρηξη του ίδιου «κατακόρυφου» ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο (που αναδύεται για $d=0.2-$

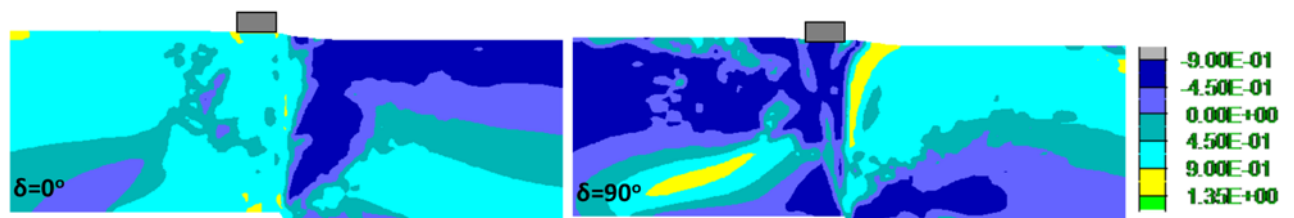
0.4m), η Κρίσιμη Κατάσταση προσεγγίζεται επίσης μερικώς εντός της διάρρηξης. Συνεπώς, η αύξηση των τάσεων λόγω της κατασκευής έχει συνολικά ευεργετική επίδραση στην απόκριση της άμμου και δυσχεραίνει την ανάδυση της διάρρηξης συγκριτικά με τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου.



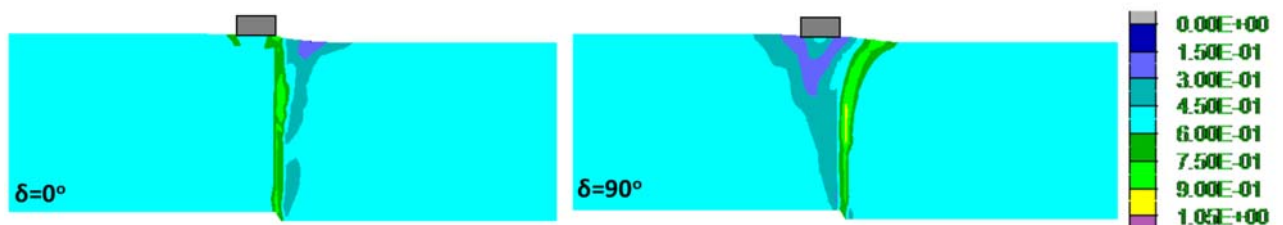
Σχήμα 5.38 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.39 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.40 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.41 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=3m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Η δεύτερη σημαντική παρατήρηση που προκύπτει αφορά στον «αντικατοπτρισμό» στις τιμές των παραμέτρων N και A στα δύο τεμάχια, η οποία απεικονίζεται τόσο για $d = 1.0\text{m}$, όσο και για μικρότερες μετακινήσεις ρήγματος που δεν παρουσιάζονται εδώ χάριν συντομίας. Με τον όρο «αντικατοπτρισμό» εννοούμε ότι πλησίον της επιφάνειας του εδάφους εμφανίζονται αρνητικές τιμές του N στο κινούμενο (δεξιά) τέμαχος στην «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, αντίστοιχα (**Σχήμα 5.40**). Το ενδιαφέρον είναι ότι παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο στο σταθερό (αριστερά) τέμαχος, δηλαδή θετικές τιμές του N για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, αντίστοιχα. Αυτός ο «αντικατοπτρισμός» παρατηρείται και στην παράμετρο A (**Σχήμα 5.39**). Επιπλέον, στο **Σχήμα 5.41** παρατηρείται ότι το μέτρο F διατηρεί ουσιαστικά την αρχική τιμή του εκτός της επιφάνειας διάρρηξης, ενώ υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση στις τιμές του και κάτω από το θεμέλιο, αλλά μόνο για «κατακόρυφη» δομή που προσφέρει μικρότερη φέρουσα ικανότητα (Chaloulos et al. 2019). Τέλος, στο **Σχήμα 5.38** εμφανίζεται η άμμος κάτω από την κατασκευή (στο σταθερό τέμαχος) με αλγεβρικά μεγαλύτερες (αλλά πάντα αρνητικές) τιμές της παραμέτρου ζ (λόγω μικρότερης τιμής A) στην «κατακόρυφη» δομή, οπότε εξακολουθεί να έχει απόκριση «χαλαρότερης» άμμου. Αυτό επεξηγεί τη σχετικά μεγαλύτερη τιμή d που χρειάζεται η ανάδυση του «κατακόρυφου» ρήγματος για «κατακόρυφη» έναντι «οριζόντιας» δομής, αντίστοιχα με ό,τι συμβαίνει και για το κανονικό ρήγμα.

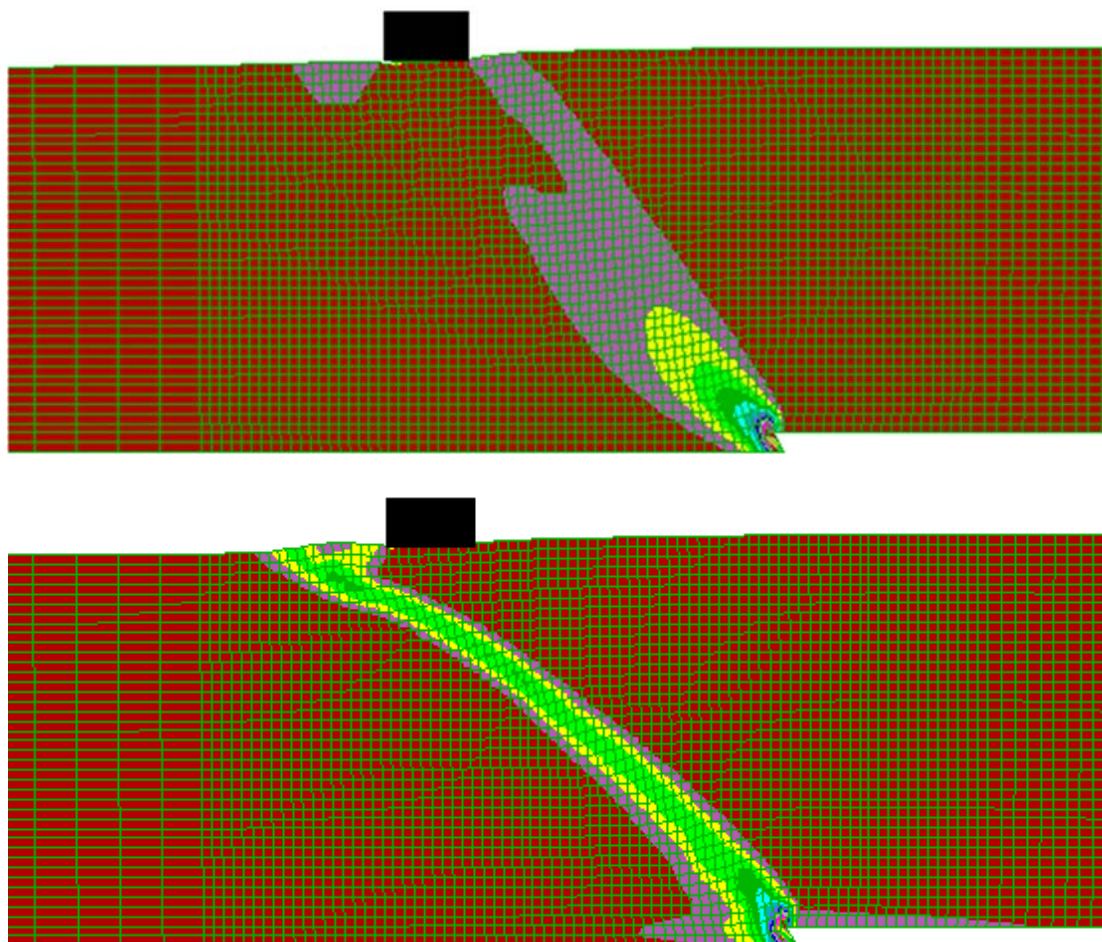
5.3.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Η τρίτη περίπτωση διάδοσης διάρρηξης ρήγματος υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής μικρού φορτίου ($q = 100\text{kPa}$) για την οποία μελετάται η επίδραση της δομής των κόκκων είναι εκείνη της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$. Υπενθυμίζεται πως η εξεταζόμενη θέση της κατασκευής για αυτή τη γωνία διάρρηξης απέχει απόσταση $C = 18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Οι διαφορές που προκύπτουν λόγω μικροδομής εντοπίζονται ήδη από την απαιτούμενη μετακίνηση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Για την άμμο με «κατακόρυφο» επίπεδο απόθεσης η τιμή της προκύπτει μικρότερη από $d=0.8\text{m}$, ενώ για την άμμο «οριζόντιας» δομής η ανάδυση προκύπτει για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$.

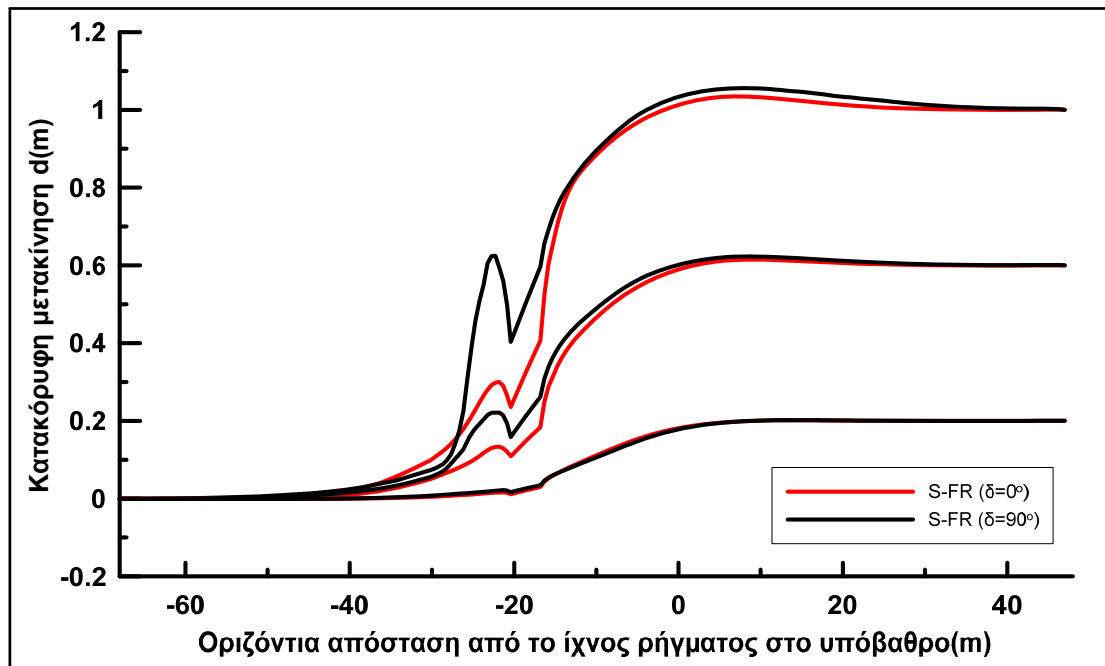
Οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της εδαφικής στρώσης που αντιστοιχούν σε $d=1.0\text{m}$ και για τις δύο αρχικές μικροδομές παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.42**. Η επίδραση της δομής στην αλληλεπίδραση κατασκευής - ανάστροφου ρήγματος φαίνεται να είναι μεγαλύτερη, συγκριτικά με τις περιπτώσεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος. Συγκεκριμένα, η ελαφρά εκτροπή της διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος υπό ελεύθερο πεδίο για την περίπτωση «κατακόρυφης» δομής εντείνεται όταν υπάρχει κατασκευή στην επιφάνεια. Ειδικότερα, η τελική θέση ανάδυσης βρίσκεται στα αριστερά της κατασκευής (ακόμη περισσότερο προς το σταθερό τέμαχος) για την αρχικά «κατακόρυφη» δομή, ενώ το αντίθετο προκύπτει για την «οριζόντια» δομή όπου η διάρρηξη αναδύεται στα δεξιά της κατασκευής (μετατόπιση προς το μετακινούμενο τέμαχος). Επίσης, επισημαίνεται η μεγάλη διαφορά στο μέγεθος των διατμητικών παραμορφώσεων εντός της διάρρηξης, όπου η «οριζόντια» δομή δημιουργεί συγκριτικά πολύ μικρότερες, γεγονός που συνδέεται και με την ανάγκη μεγαλύτερης μετατόπισης ρήγματος για την ανάδυση της διάρρηξης που προαναφέρθηκε. Αντίστοιχη διαφορά για τις 2 δομές άμμου σε αναγκαία μετατόπιση ρήγματος και μέγεθος παραμορφώσεων εντός της ζώνης διάρρηξης είχε παρατηρηθεί

και για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, και συνεπώς αποδίδονται στην απόκριση της «κατακόρυφης» δομής ως συγκριτικά «πυκνότερης» άμμου, μια θεώρηση που φαίνεται να έχει ισχύ και όταν υπάρχει κατασκευή στην επιφάνεια.



Σχήμα 5.42 Συνσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Χάριν πληρέστερης διερεύνησης των διαφορών λόγω δομής άμμου, στο **Σχήμα 5.43** απεικονίζεται η εξέλιξη (με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος) της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για τη διάδοση της διάρρηξης εντός της άμμου με τις 2 διαφορετικές αρχικές δομές, για τα χαρακτηριστικά κατασκευής και ανάστροφου ρήγματος που αναλύονται εδώ. Όπως προκύπτει, μακριά από την περιοχή της κατασκευής, η άμμος με $\delta=90^\circ$ («κατακόρυφη» δομή) αποκρίνεται πιο διαστολικά, σε συμφωνία με τη γενικότερη θεώρηση της απόκρισης της ως «πυκνότερης» που προέκυψε και υπό ελεύθερο πεδίο.

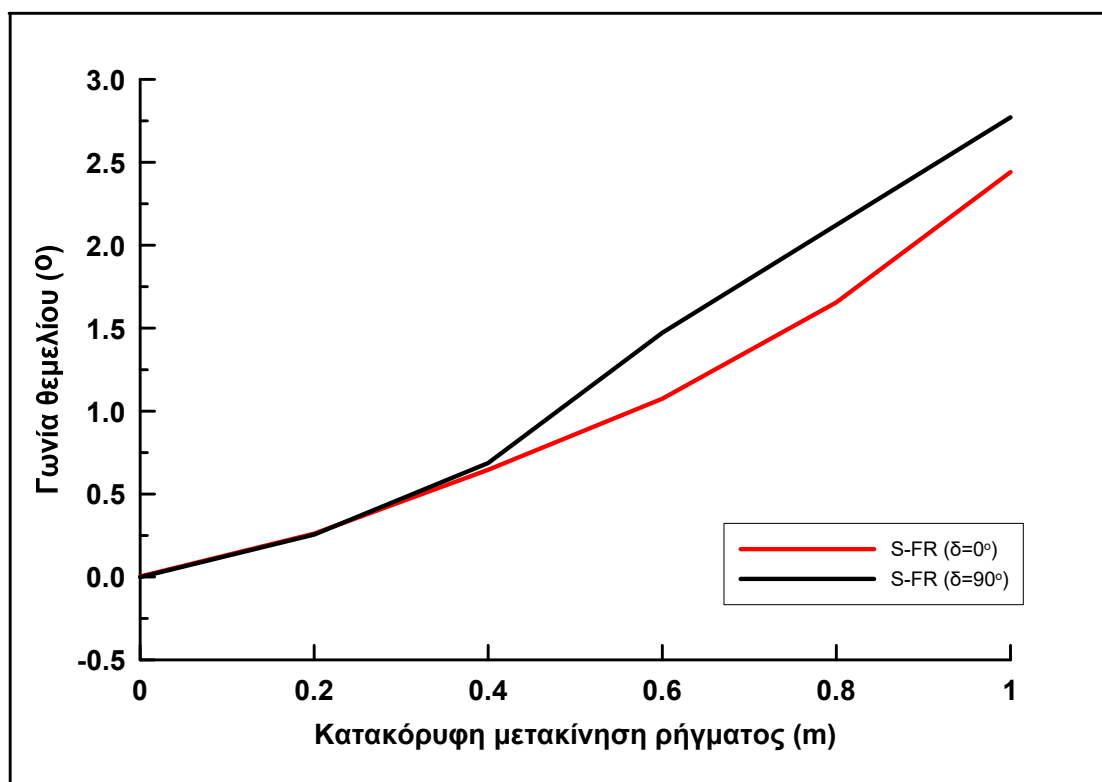


Σχήμα 5.43 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Από εκεί και πέρα, ανεξαρτήτως αρχικής δομής η κατασκευή ανυψώνεται συγκριτικά με τις γεωστατικές συνθήκες. Όμως καθώς υπό «κατακόρυφη» δομή η διάρρηξη εκτρέπεται προς το σταθερό τέμαχος, η κατασκευή βρίσκεται καθαρά στο μετακινούμενο τέμαχος με αποτέλεσμα συγκριτικά μεγαλύτερη ανύψωση. Εκτιμάται ότι η διαφορά στην ανύψωση θα ήταν ακόμη μεγαλύτερη αν η «κατακόρυφη» δομή δεν αντιστοιχούσε σε μειωμένη φέρουσα ικανότητα (και συνεπώς σχετικά μεγαλύτερη καθίζηση). Επιπλέον, η μειωμένη φέρουσα ικανότητα επηρεάζει και τις στροφές της κατασκευής, οι οποίες δείχνουν ελαφρά μεγαλύτερες.

Λόγω της μεγάλης σημασίας της στροφής της κατασκευής στην καταπόνηση της, στο **Σχήμα 5.44** παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της για όλες τις επιβαλλόμενες κατακόρυφες μετατοπίσεις του ανάστροφου ρήγματος, για τις 2 συγκρινόμενες περιπτώσεις προσανατολισμού της δομής της άμμου. Με βάση το **Σχήμα 5.44** προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερες στροφές, απ' ότι για διαρρήξεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, και αντίθετης φοράς (εδώ είναι θετικές, δηλαδή αριστερόστροφες). Για παράδειγμα, για $d=1.0\text{m}$ και «κατακόρυφη» δομή, η (απόλυτη) τιμή της γωνίας θεμελίου που προκύπτει για ανάστροφο ρήγμα είναι αρκετά μεγαλύτερη (2.8°) από εκείνη για διάρρηξη κανονικού (1.8°) και «κατακόρυφου» ρήγματος (1.8°). Αντίστοιχα, για $d=1.0\text{m}$ και «οριζόντια» δομή, η (απόλυτη) τιμή της γωνίας θεμελίου που προκύπτει για ανάστροφο ρήγμα είναι επίσης αρκετά μεγαλύτερη (2.3°) από εκείνη για διάρρηξη κανονικού (0.5°) και «κατακόρυφου» ρήγματος (1.2°). Όλες αυτές οι γωνίες στροφής για $d=1.0\text{m}$ είναι πολύ μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες διαφορικές καθιζήσεις με βάση την βιβλιογραφία (π.χ. $\tan\theta=1/200$ ($\theta=0.3^\circ$) κατά Wahls et al. 1990, $\tan\theta=1/500$ ($\theta=0.12^\circ$) κατά Skempton 1956), και θα

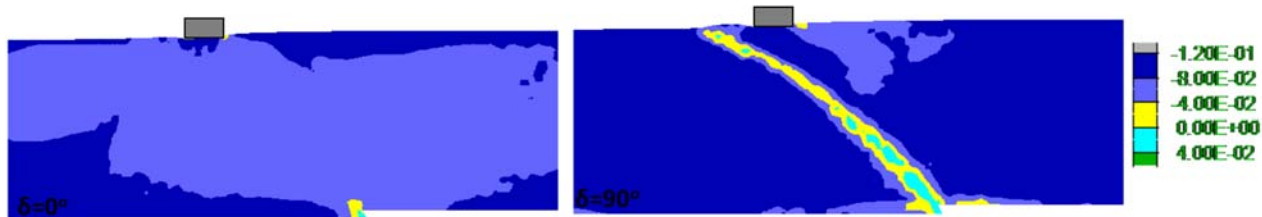
πρέπει να μικρύνει πολύ η κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος για να προκύπτουν επιτρεπόμενες γωνίες στροφής.



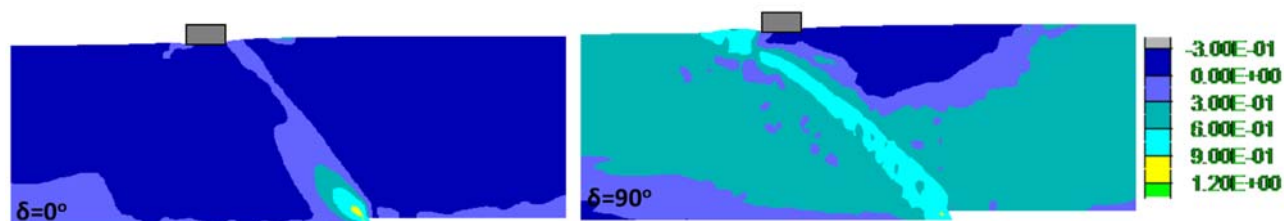
Σχήμα 5.44 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=18\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.

Επιπλέον, προκύπτει ότι η «κατακόρυφη» δομή οδηγεί σε μεγαλύτερες στροφές, απ' ότι για «οριζόντια» δομή, ακριβώς όπως συμβαίνει και για τις διάρρηξεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος. Στη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, η μεγαλύτερη στροφή οφείλεται στη μεγαλύτερη διόγκωση που παρουσιάζει η «κατακόρυφη» δομή, συγκριτικά με την «οριζόντια» δομή, καθώς αποκρίνεται ως «πυκνότερη» άμμος. Εκτιμάται ότι η γωνία στροφής για $\delta=90^\circ$ θα ήταν ακόμη μεγαλύτερη αν η διάρρηξη δεν είχε εκτραπεί προς τα αριστερά της κατασκευής.

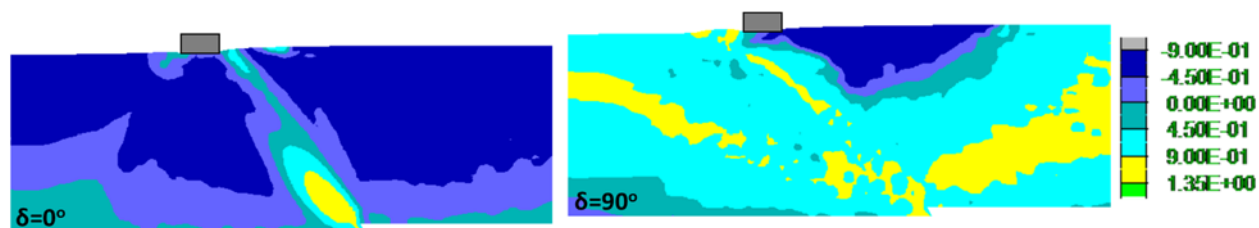
Προκειμένου να γίνει μικροσκοπική διερεύνηση των ανωτέρω διαφορών, στο **Σχήμα 5.45** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση $d=1.0\text{m}$ και με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση $C=18\text{m}$. Επίσης, στα **Σχήματα 5.46, 5.47 και 5.48** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και χαρακτηριστικών κατασκευής. Σε όλες τις περιπτώσεις τα σχήματα είναι διπλά και συγκρίνουν τα σχετικά αποτελέσματα για αρχικά «οριζόντια» (αριστερά) και «κατακόρυφη» (δεξιά) δομή. Όπως σε όλα τα αντίστοιχα σχήματα, η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).



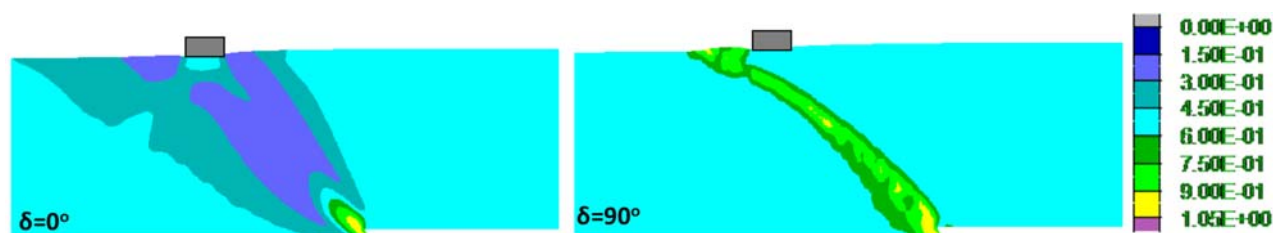
Σχήμα 5.45 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.46 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.47 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.48 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m, q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Σε ποιοτική συμφωνία με τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου, η άμμος προσεγγίζει στην Κρίσιμη Κατάσταση εντός της διάρρηξης, και σχεδόν σε όλο το μήκος της μόνο για την αρχικά «κατακόρυφη» δομή. Αντίθετα, εκτός της διάρρηξης η άμμος απέχει σημαντικά από την Κρίσιμη Κατάσταση, και για τις 2 δομές. Δηλαδή εκτός της

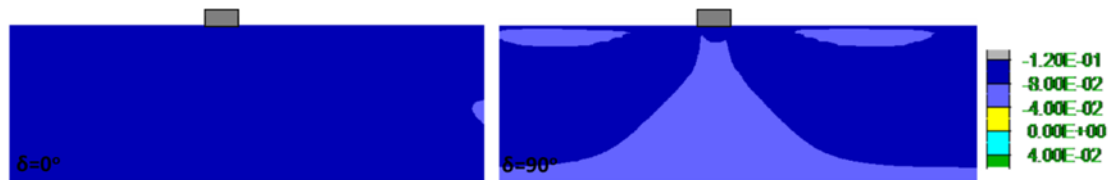
διάρρηξης αποκρίνεται όπως και σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου, και οι τιμές των παραμέτρων δομής έχουν αντίστοιχες τιμές, δηλαδή αρνητικές και θετικές τιμές της N (και της A) για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή. Αυτό συνεπάγεται η «κατακόρυφη» δομή να αποκρίνεται ως μια «πυκνότερη» άμμος (βλέπε αλγεβρικά μικρότερες, και πάντα αρνητικές τιμές της παραμέτρου ζ) και έτσι η «αστοχία» και η Κρίσιμη Κατάσταση επέρχεται σε μικρότερες παραμορφώσεις, δηλαδή χρειάζεται μικρότερη μετατόπιση ρήγματος για να προκύψει. Η ύπαρξη του φορτίου δημιουργεί απαίτηση μεγαλύτερης μετατόπισης ρήγματος για να εμπεδωθεί η Κρίσιμη Κατάσταση, αντίστοιχα με την επίδραση στην αναγκαία μετατόπιση για την ανάδυσση της διάρρηξης. Επισημαίνεται τέλος ότι από όλες τις παραμέτρους δομής, μόνο το μέτρο του τανυστή δομής F έχει σημαντικά διαφοροποιηθεί από την αρχική τιμή του, αλλά αποκλειστικά εντός των διαρρήξεων.

5.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

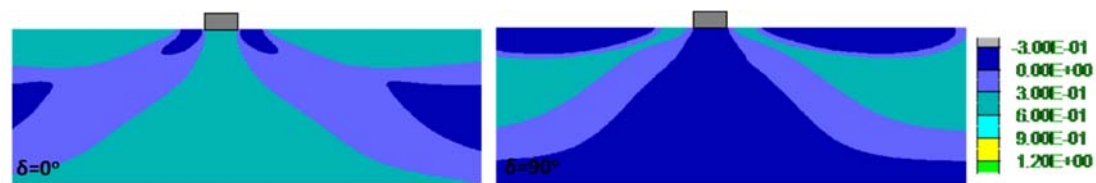
5.4.1 Αρχικές τιμές παραμέτρων δομής

Εδώ παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες (πριν την επιβολή της διάρρηξης, αλλά μετά την επιβολή του μεγάλου φορτίου λόγω κατασκευής) εντός της στρώσης άμμου με οριζόντια και την κατακόρυφη δομή κόκκων. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι τιμές των παραμέτρων δομής στις δύο στρώσεις άμμου πάχους 20m με σχετική πυκνότητα κόκκων $D_r = 65\%$ υπό τις συνθήκες που επικρατούν μετά την επιβολή του φορτίου κατασκευής $q=185\text{kPa}$. Για τον λόγο αυτό, στα **Σχήματα 5.49, 5.50, 5.51 και 5.52** παρουσιάζονται οι ισοκαμπύλες της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ , της μεταβλητής ανισοτροπίας δομής A , της παραμέτρου σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N και του μέτρου τανυστή δομής F , αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται πως σε αυτά τα σχήματα η θέση της κατασκευής σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο δεν παίζει κάποιο ρόλο, αφού δεν έχει ξεκινήσει η διάρρηξη. Ωστόσο, χάριν πληρότητας, αναφέρεται ότι η κατασκευή βρίσκεται τοποθετημένη σε απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος, σε αντιστοιχία με τα σχήματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.3.1, και ως εκ τούτου και σε αυτή την περίπτωση είναι άμεσα συμβατή με τις αναλύσεις για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος.

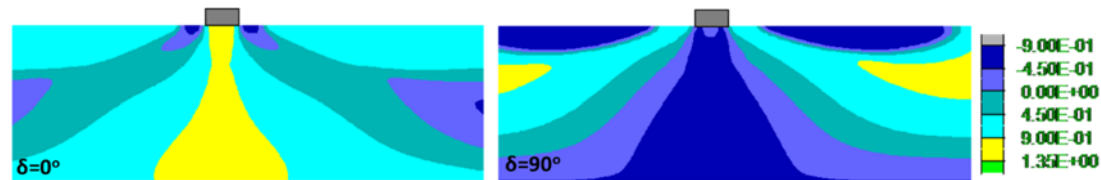
Όπως και για τις διαρρήξεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου, σε κάθε ένα από τα σχήματα αυτά, το αριστερά υπο-σχήμα αντιστοιχεί στην «οριζόντια δομή» ενώ το δεξιά στην «κατακόρυφη δομή» κόκκων. Πρακτικώς, η εικόνα που προκύπτει μετά την τοποθέτηση κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ταυτίζεται με εκείνη έπειτα από τοποθέτηση φορτίου $q=100\text{kPa}$. Έτσι στο **Σχήμα 5.52** παρατηρείται ότι το μέτρο του τανυστή δομής F παραμένει περίπου ίσο με $F_{in} = 0.5$ και στις 2 περιπτώσεις δομής, καθώς η φόρτιση λόγω κατασκευής, ακόμα και μετά την αύξηση του αρχικού φορτίου της, παραμένει σχετικώς μικρή συγκρινόμενη με τη φέρουσα ικανότητα. Αν κοιτάξει κανείς με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα, θα δει ότι η τιμή της παραμέτρου F στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, συγκριτικά με εκείνη που πρόκυπτε μετά την τοποθέτηση κατασκευής μικρότερου φορτίου, καθώς η δομή έχει αρχίσει να κινητοποιείται προς την Κρίσιμη Κατάσταση λόγω της φόρτισης του επιφανειακού θεμελίου.



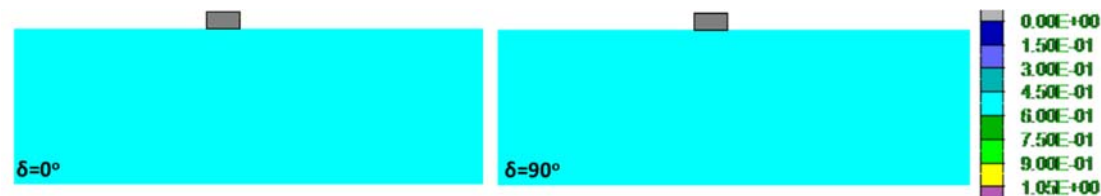
Σχήμα 5.49 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ (σε απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος).



Σχήμα 5.50 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ (σε απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος).



Σχήμα 5.51 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ (σε απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος).



Σχήμα 5.52 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, λόγω τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ (σε απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος).

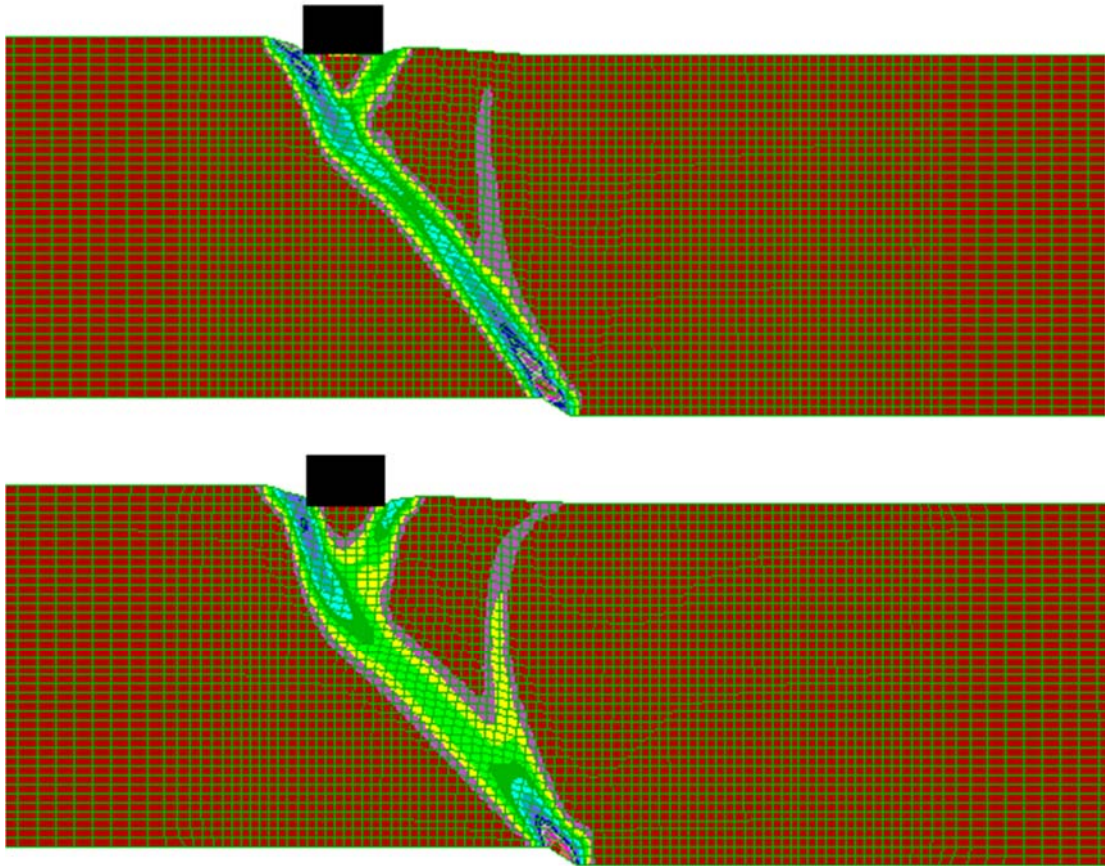
Όσον αφορά στην παράμετρο σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης N (**Σχήμα 5.51**), διαφοροποιείται τόσο μεταξύ των δύο δομών, όσο και συγκριτικά με τις γεωστατικές συνθήκες κάθε δομής, με τις τιμές που λαμβάνει να είναι αντίστοιχες εκείνων που παρατηρήθηκαν για τοποθέτηση κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ (βλ. παράγραφο 5.3.1). Ο συνδυασμός των F και N ορίζει την μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=FN$, η οποία διατηρεί (περίπου) τις (αρχικές) τιμές $A=0.5$ και -0.25 για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή, μόνο κάτω από το θεμέλιο (**Σχήμα 5.50**). Πιο λεπτομερώς, με δεδομένη την προαναφερθείσα ελαφρώς αυξημένη τιμή της παραμέτρου F , η αύξηση της απόλυτης τιμής της παραμέτρου A κάτω από το θεμέλιο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη που προκύπτει με την τοποθέτηση κατασκευής

μικρότερου φορτίου, κάτι που δεν αποτυπώνεται πρακτικά στο **Σχήμα 5.50** λόγω του επιλεγμένου εύρους των ισοκαμπύλων. Με την απόσταση από την περιοχή αυτή, η τιμή της μεταβλητής A αλγεβρικά μειώνεται και αυξάνει, αντίστοιχα, για τις 2 δομές, λόγω της αντίστοιχης μεταβολής της N . Τέλος, ο συνδυασμός της ελαφρά μικρότερης τιμής δείκτη πόρων e και της σχετικά πολύπλοκης κατανομής της παραμέτρου A , λόγω τοπικής αύξησης των τάσεων κάτω από το θεμέλιο, δίνει αντίστοιχα πολύπλοκη κατανομή της ανισοτροπικής παραμέτρου κατάστασης ζ , η οποία διατηρεί την αρνητική τιμή της, καθώς και τις αλγεβρικά σχετικώς μικρότερες (πιο αρνητικές) τιμές της για την «οριζόντια δομή» (βλ. **Σχήμα 5.49**). Συγκριτικά με την περίπτωση τοποθέτησης κατασκευής μικρότερου φορτίου, η παράμετρος ζ λαμβάνει και στις δύο δομές περισσότερο αρνητικές τιμές κάτω από το θεμέλιο, λόγω μεγαλύτερης αύξησης των τάσεων, γεγονός που και πάλι δεν αποτυπώνεται με το επιλεγμένο εύρος ισοκαμπύλων το οποίο διατηρείται σε όλο το κείμενο της παρούσας εργασίας.

5.4.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Στην προηγούμενη παράγραφο διερευνήθηκε πρώτη φορά η επίδραση της ανισοτροπίας της άμμου στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, εξετάζοντας την περίπτωση τοποθέτησης κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και σχετικά μικρού φορτίου ($q=100\text{kPa}$) επί της επιφάνειας του εδάφους. Στην παρούσα παράγραφο, το ίδιο πρόβλημα μελετάται για κατασκευή με διπλάσιο φορτίο (ήτοι $q=185\text{kPa}$), προκειμένου να εκτιμηθεί η ενδεχόμενη επίδραση της αύξησης του στα συμπεράσματα που προέκυψαν με βάση τις αναλύσεις της παραγράφου 5.3.

Για τον λόγο αυτό, αρχικά μελετάται η αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) με επιφανειακή κατασκευή πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=185\text{kPa}$ σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (όπως ακριβώς και στην παράγραφο 5.3, χάριν σύγκρισης). Υπογραμμίζεται ότι η αύξηση του φορτίου της κατασκευής μειώνει τους συντελεστές ασφαλείας έναντι φέρουσας ικανότητας, γεγονός που -όπως λεπτομερέστερα φαίνεται στα ακόλουθα αποτελέσματα- έχει καθοριστικό ρόλο στην πορεία της διάρρηξης ανεξαιρέτως μικροδομής. Σε αντίθεση με την προαναφερθείσα αρνητική επίδραση, η αύξηση του φορτίου ταυτόχρονα αυξάνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους, γεγονός που συνεπάγεται τη μικρή «καθυστέρηση» για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια, συγκριτικά με την περίπτωση αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$. Αυτή η «καθυστέρηση» παρατηρείται και για τους δύο προσανατολισμούς εξίσου. Συγκεκριμένα, σε μετακίνηση ρήγματος $d=0.2\text{m}$ η διάρρηξη δεν έχει αναδυθεί σε καμία περίπτωση στην επιφάνεια, παρατηρούνται όμως και για τις δύο δομές άμμου συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις μορφής σφήνας στα άκρα της κατασκευής, οι οποίες, όπως αναμένεται, έχουν μεγαλύτερη τιμή στην περίπτωση της άμμου «κατακόρυφου» προσανατολισμού. Η τελική ανάδυση της διάρρηξης παρατηρείται για μετακίνηση ρήγματος $d=0.4\text{m}$, αν και σημειώνεται πως λόγω αυξημένων διατμητικών παραμορφώσεων στην άμμο «οριζόντιας» δομής εκτιμάται πως σε αυτή την περίπτωση η ανάδυση συμβαίνει ελαφρώς νωρίτερα. Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.53** παρουσιάζεται η τελική εικόνα των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων εντός της άμμου, ήτοι εκείνη που προκύπτει για μετακίνηση ρήγματος $d=1.0\text{m}$.

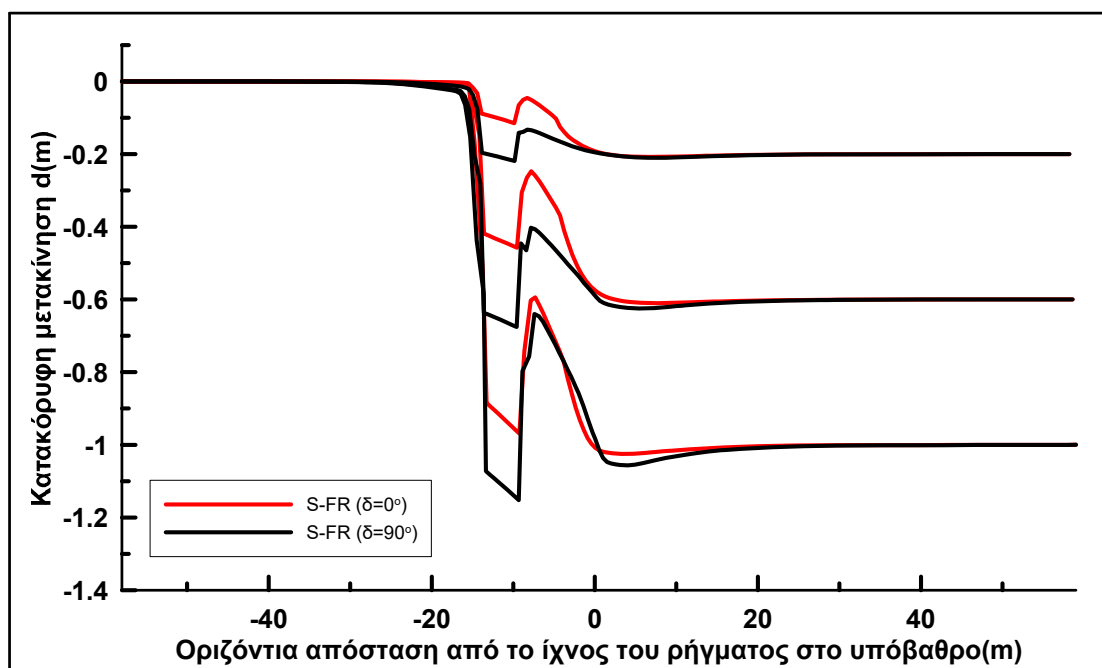


Σχήμα 5.53 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα τη μη ουσιώδη διαφοροποίηση της διάρρηξης λόγω δομής, δηλαδή τη δημιουργία αστοχίας μορφής σφήνας κάτω από το θεμέλιο και στις δύο περιπτώσεις και ουσιαστικά τη μη δημιουργία κατακρημνίσματος. Ο λόγος είναι ότι το αυξημένο φορτίο $q=185kPa$ είναι επαρκές ώστε να αρχίζει να γίνεται κρίσιμο και για την «οριζόντια δομή» παρά την αυξημένη συγκριτικά αντοχή της σε φέρουσα ικανότητα, παρατήρηση που στην περίπτωση κατασκευής μικρότερου φορτίου ($q=100kPa$) αφορούσε μόνο την άμμο με δομή γωνίας $\delta=90^\circ$. Φυσικά σε καμία εκ των δύο περιπτώσεων δεν αστοχεί το θεμέλιο, απλά η απομείωση της οριζόντιας τάσης σ_3 λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος, χαμηλώνει τη φέρουσα ικανότητα και για τις δύο δομές και έτσι η τελική εικόνα σε όρους *ssi* προκύπτει πρακτικώς ταυτιζόμενη. Λεπτομερής παρατήρηση υποδεικνύει τις συγκριτικά μεγαλύτερες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της (κύριας) διάρρηξης για την περίπτωση της «οριζόντιας δομής» και το ελαφρώς μικρότερο εύρος της, γεγονός που οφείλεται στην πιο δύστημη και διαστολική συμπεριφορά της συγκεκριμένης δομής σε φόρτιση που διατηρεί την σ_1 κατακόρυφη. Τέλος, σημειώνεται ότι η δευτερεύουσα διάρρηξη ξεκινάει από το μέσον της στρώσης και στις δύο αναλύσεις, αλλά αναδύεται περισσότερο μετατοπισμένη προς το σταθερό

τέμαχος και με μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις εντός αυτής για την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής.

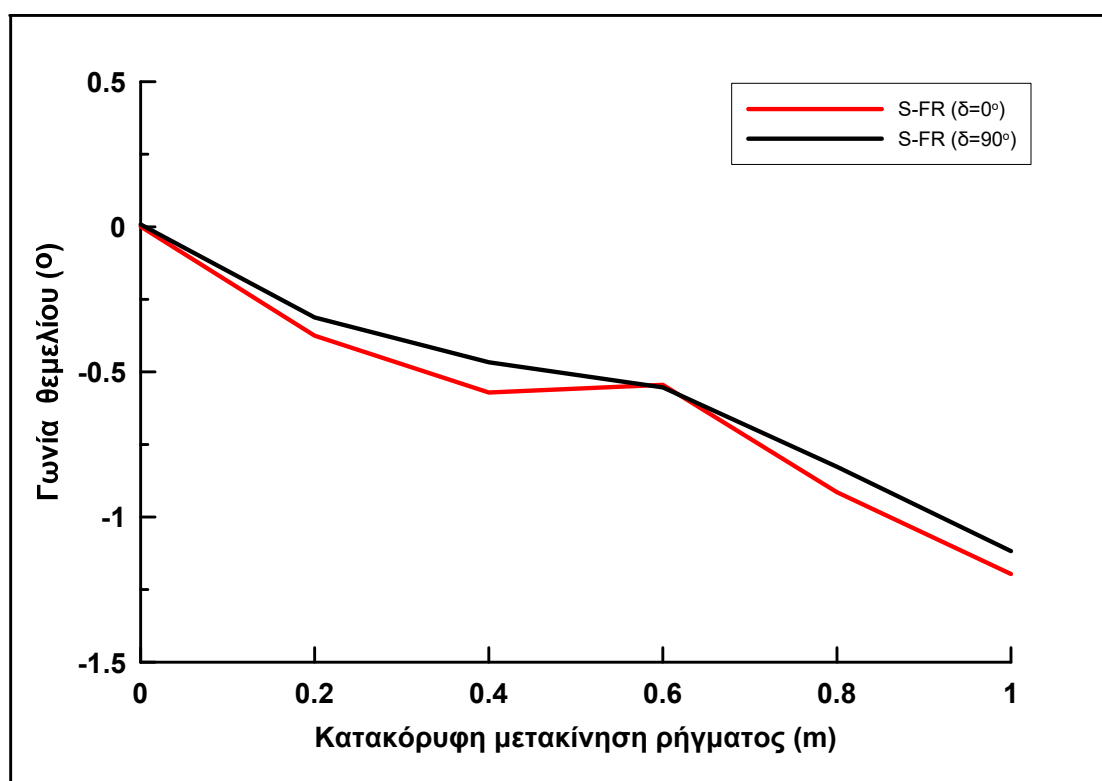
Στη συνέχεια της σύγκρισης, στο **Σχήμα 5.54** παρουσιάζεται η εικόνα της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=0.2\text{m}$, 0.6m και 1.0m και τους προαναφερθέντες συνδυασμούς φορτίου και προσανατολισμών δομής.



Σχήμα 5.54 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

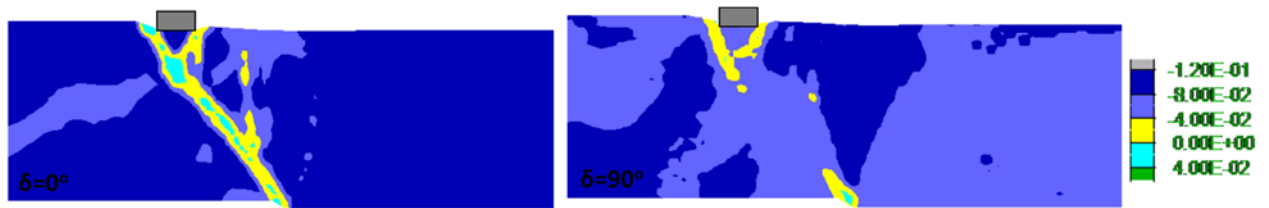
Η εικόνα επιβεβαιώνει την ομοιότητα στις συνέπειες της διάρρηξης, ενώ οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στις καθιζήσεις της κατασκευής, οι οποίες σε κάθε περίπτωση καθορίζονται από την απόκριση επιφανειακού θεμελίου και την διαφορετική φέρουσα ικανότητα των δύο μικροδομών. Συγκεκριμένα, παρόλο που η κρίσιμη τιμή του φορτίου $q=185\text{kPa}$ οδηγεί και στις δύο περιπτώσεις σε αυξημένες τελικές καθιζήσεις συγκριτικά με εκείνες της κατασκευής μικρότερου φορτίου, η τελική τιμή της στον προσανατολισμό δομής άμμου $\delta=90^\circ$ προκύπτει ίση με 110cm , δηλαδή μεγαλύτερη της τελικής μετατόπισης της ελεύθερης επιφάνειας του κινούμενου τεμάχους και μικρότερη από εκείνη των 90cm στην άμμο «οριζόντιας» δομής. Σε ποιοτική συμφωνία με τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος τόσο υπό ελεύθερο πεδίο, όσο και με την ταυτόχρονη ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$, παρατηρείται μεγαλύτερη διαστολικότητα του εδάφους στην γειτονιά της κατασκευής για την άμμο «οριζόντιου» προσανατολισμού. Αυτή η διαφορά στη διαστολικότητα τείνει να εξαλειφθεί με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος και την εμπέδωση της διάρρηξης

Για την πληρότητα των αποτελεσμάτων, στο **Σχήμα 5.55** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής της κατασκευής συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και για τους δύο προαναφερόμενους προσανατολισμούς δομής. Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής στην περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής, για την οποία είναι κρίσιμη ήδη η τιμή $q=100\text{kPa}$, προκαλεί μικρή μείωση της τελικής στροφής ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την άμμο «οριζόντιου» προσανατολισμού, για την οποία κρίσιμο είναι μόνο το φορτίο μεγέθους $q=185\text{kPa}$. Ως αποτέλεσμα, η τελική τιμή της στροφής (για $d=1.0\text{m}$) προκύπτει ενδιάμεσα των τιμών 0.5° - 1.8° που παρατηρήθηκαν για την κατασκευή φορτίου $q=100\text{kPa}$ και πρακτικά ίση με 1.2° ανεξαρτέτως δομής, επιβεβαιώνοντας την ομοιότητα των δύο αναλύσεων σε όλα τα υπό σύγκριση μεγέθη.

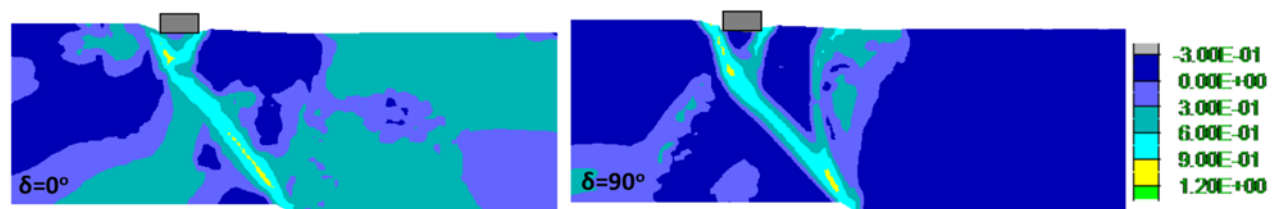


Σχήμα 5.55 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=12\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_f=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.

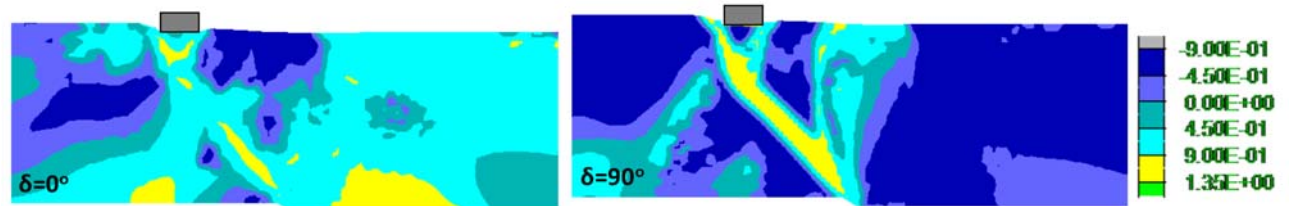
Χάριν μικροσκοπικής διερεύνησης των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν πιο πάνω στο **Σχήμα 5.56** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ και στα **Σχήματα 5.57**, **5.58** και **5.59** η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για μετατόπιση $d=1.0\text{m}$ και τους προαναφερθέντες συνδυασμούς φορτίου, ρήγματος και προσανατολισμών δομής κόκκων. Επισημαίνεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).



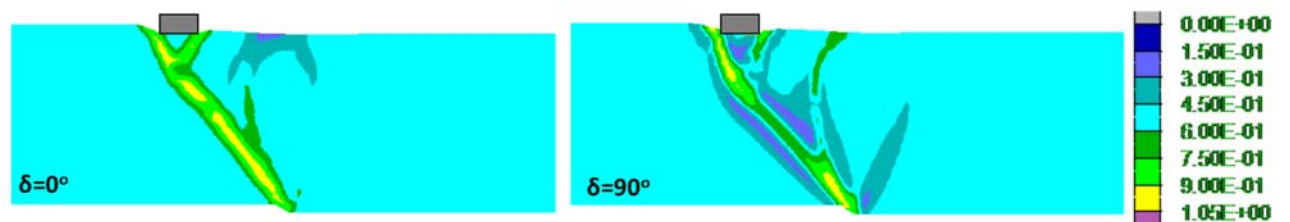
Σχήμα 5.56 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.57 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.58 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.59 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

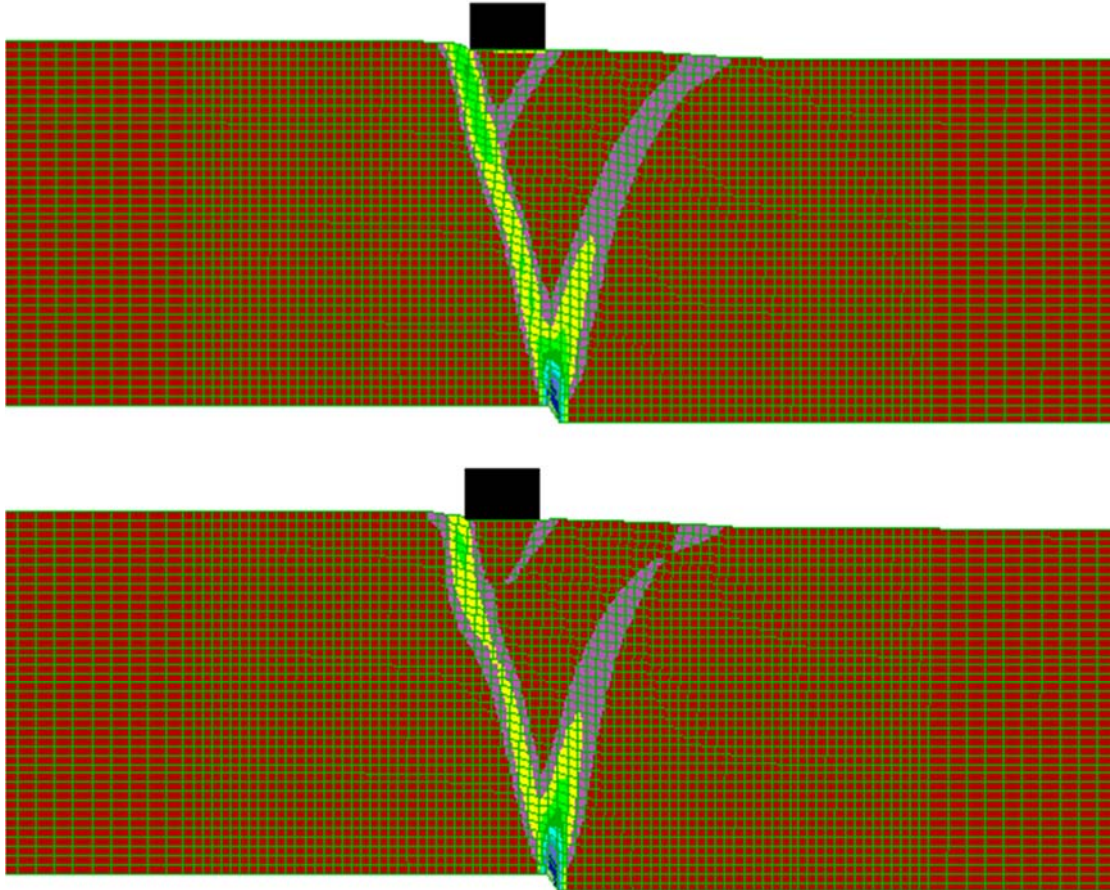
Φαίνεται πως για καμία εκ των δύο περιπτώσεων δεν φτάνει η άμμος στην Κρίσιμη Κατάσταση σε σημαντικό μήκος εντός της κύριας διάρρηξης αν και την προσεγγίζει περισσότερο για την αρχικά «οριζόντια» δομή. Σε ποιοτική συμφωνία με τις αναλύσεις αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου, η «κατακόρυφη» δομή αποκρίνεται ως μια «χαλαρότερη» άμμος (βλέπε αλγεβρικά μεγαλύτερες, αλλά πάντα αρνητικές τιμές της παραμέτρου ζ), και έτσι η «αστοχία» και η Κρίσιμη

Κατάσταση χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να προκύψει. Ωστόσο σημειώνεται πως οι διαφορές στις τιμές των παραμέτρων ανισοτροπίας στην περιοχή εκτός της διάρρηξης είναι μικρότερες από εκείνες που προέκυπταν για κατασκευή φορτίου $q=100\text{kPa}$ και τους δύο ακραίους προσανατολισμούς άμμου. Τέλος παρατηρείται πως η αύξηση του φορτίου δημιουργεί απαίτηση μεγαλύτερης μετατόπισης ρήγματος για να εμποδωθεί η Κρίσιμη Κατάσταση, αλλά αυτή η επίδραση είναι μικρή όπως μικρή ήταν και στην απαιτούμενη μετακίνηση για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια.

5.4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

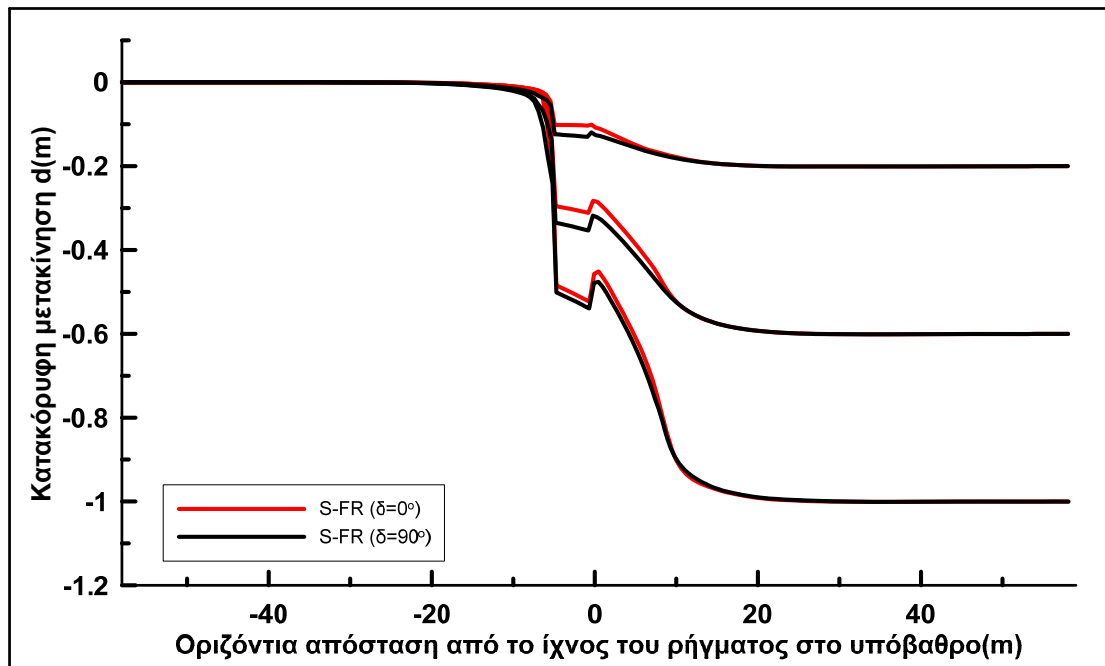
Προχωρώντας στην διερεύνηση της επόμενης περίπτωσης αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$, συγκρίνεται η διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) εντός άμμου «οριζόντιου» και «κατακόρυφου» προσανατολισμού με ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους 4m στη θέση $C=3\text{m}$ (στο σταθερό τέμαχος). Στην περίπτωση της άμμου προσανατολισμού $\delta=0^\circ$, η απαιτούμενη κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης προκύπτει ίδια με εκείνη στην οποία η κατασκευή είχε το μισό φορτίο, δηλαδή ίση με $d=0.4\text{m}$. Αντιθέτως, για διάδοση εντός άμμου προσανατολισμού $\delta=90^\circ$, συσσωρεύονται σημαντικές διατμητικές παραμορφώσεις στο αριστερό άκρο της κατασκευής ήδη από την μετατόπιση $d=0.4\text{m}$ και έτσι η ανάδυση προκύπτει σε μικρότερη μετατόπιση ρήγματος συγκριτικά με εκείνη της περίπτωσης κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$, με την ακριβή τιμή της να είναι ίση με $d=0.6\text{m}$.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.60** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση (*ssi* σε όρους FLAC) της εδαφικής στρώσης για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ και τους συνδυασμούς φορτίου κατασκευής, γωνίας ρήγματος και προσανατολισμού άμμου που προαναφέρθηκαν. Όπως και στο κανονικό ρήγμα, η διάρρηξη δεν διαφοροποιείται πια λόγω δομής. Συγκεκριμένα, λόγω της αύξησης της αντοχής του εδάφους στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο που επιβάλλει η τοποθέτηση κατασκευής μεγαλύτερου φορτίου, συμβαίνει εκτροπή της κύριας διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος, όταν για αλληλεπίδραση με φορτίο $q=100\text{kPa}$ εξακολουθούσε να παραμένει κατακόρυφη. Ταυτόχρονα, ξεκινάει βαθιά δευτερεύουσα διάρρηξη προς το μετακινούμενο τέμαχος, ενώ παρατηρείται και απαρχή δημιουργίας πρίσματος μορφής σφήνας στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο. Η ύπαρξη αυτών των διατμητικών παραμορφώσεων μορφής πρίσματος οφείλεται, όπως και στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος, σε (μικρότερη) μείωση των οριζοντίων τάσεων που επιβάλλει η διάδοση της διάρρηξης η οποία έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος κάτω από το πέδιλο να προσεγγίζει περισσότερο την αστοχία σε φέρουσα ικανότητα. Λεπτομερής παρατήρηση υποδεικνύει τις συγκριτικά μεγαλύτερες συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της κύριας και δευτερεύουσας διάρρηξης για την περίπτωση της «οριζόντιας» δομής. Όλα τα παραπάνω εμφανίζουν πολλές ομοιότητες με την προηγούμενη περίπτωση διάρρηξης κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, με την μακροσκοπική εικόνα να προσεγγίζει εκείνη της διάδοσης ενός κανονικού ρήγματος μεγαλύτερης γωνίας από εκείνο που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 5.60 Συνσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικός «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

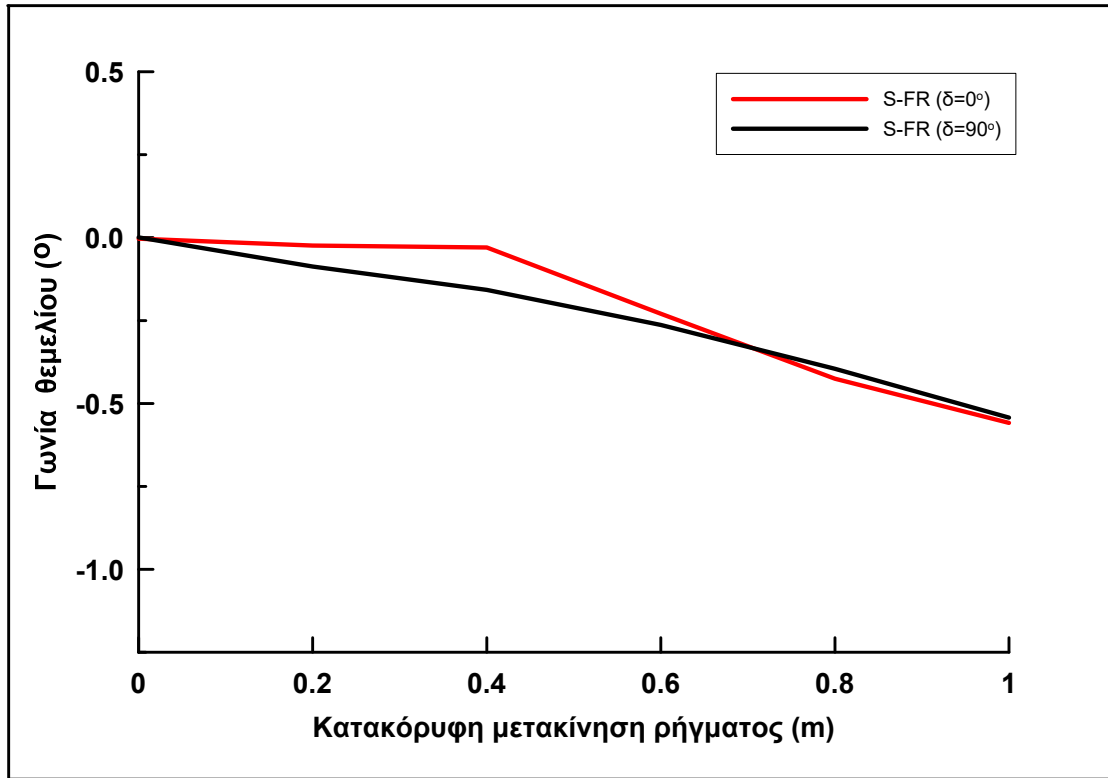
Η ποιοτική αυτή αντιστοιχία εντοπίζεται και στην εικόνα της παραμορφωμένης επιφάνειας η οποία παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.61** για μετατόπιση ρήγματος $d=0.2\text{m}$, 0.6m και 1.0m και την ίδια περίπτωση φορτίου κατασκευής και προσανατολισμών δομής. Συγκεκριμένα η παραμορφωμένη επιφάνεια πρακτικά ταυτίζεται για τις δύο δομές και οι ελάχιστες διαφορές αφορούν στην μεγαλύτερη καθίζηση της κατασκευής για τον προσανατολισμό $\delta=90^\circ$ (λόγω μικρότερης φέρουσας ικανότητας σε αυτή την περίπτωση) και στην μικρότερη διαστολή του εδάφους στα άκρα της κατασκευής. Σημειώνεται βέβαια πως και σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές αμβλύνονται με την αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος και την εμπέδωση της διάρρηξης.



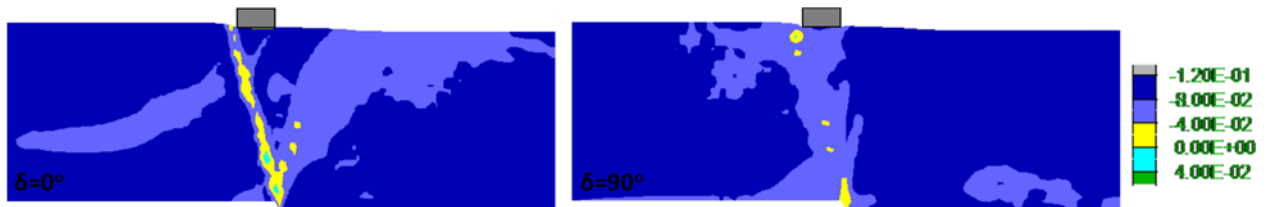
Σχήμα 5.61 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Χάριν πληρότητας της σύγκρισης, στο **Σχήμα 5.62** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής της κατασκευής συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του ρήγματος. Η πρακτικώς ταύτιση στα αποτελέσματα είναι εμφανής, ιδιαίτερα αυξανόμενης της μετακίνησης του ρήγματος, με την τελική στροφή του θεμελίου (για $d=1.0\text{m}$) να προκύπτει σε κάθε περίπτωση ίση με 0.6° (δεξιόστροφη). Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη εκείνης της κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ υπό την διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος, για την οποία η μέγιστη τιμή της (για $d=1.0\text{m}$) ήταν ίση με $1.2^\circ-1.8^\circ$.

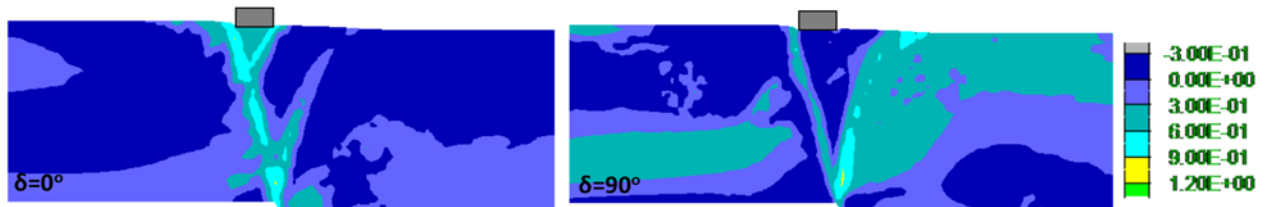
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.63** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με μετατόπιση $d=1.0\text{m}$, με την κατασκευή να φέρει φορτίο $q=185\text{kPa}$ και να είναι τοποθετημένη στην θέση $C=3\text{m}$. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τα σχήματα είναι διπλά και συγκρίνουν την διάδοση εντός «οριζόντιας» (αριστερά) και «κατακόρυφης» (δεξιά) δομής κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 5.64, 5.65** και **5.66** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης, φορτίου κατασκευής και προσανατολισμούς δομής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).



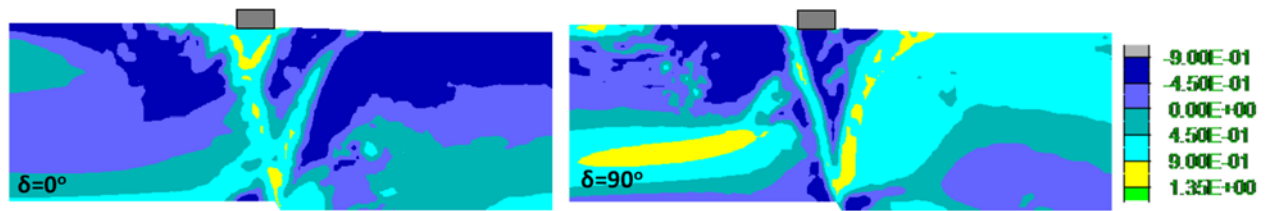
Σχήμα 5.62 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=3\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Τουργουρα με $D_f=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.



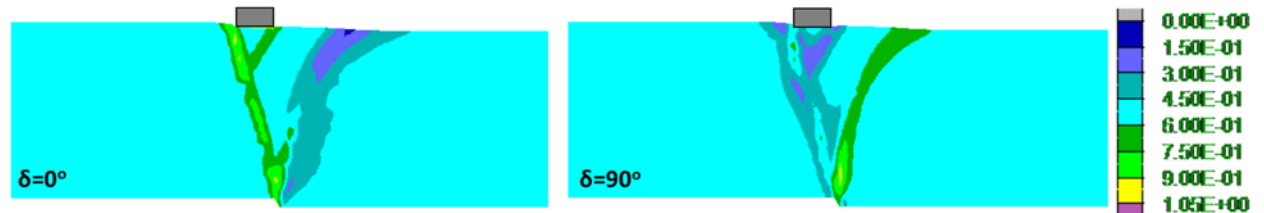
Σχήμα 5.63 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τουργουρα σχετικής πυκνότητας $D_f=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.64 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τουργουρα σχετικής πυκνότητας $D_f=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



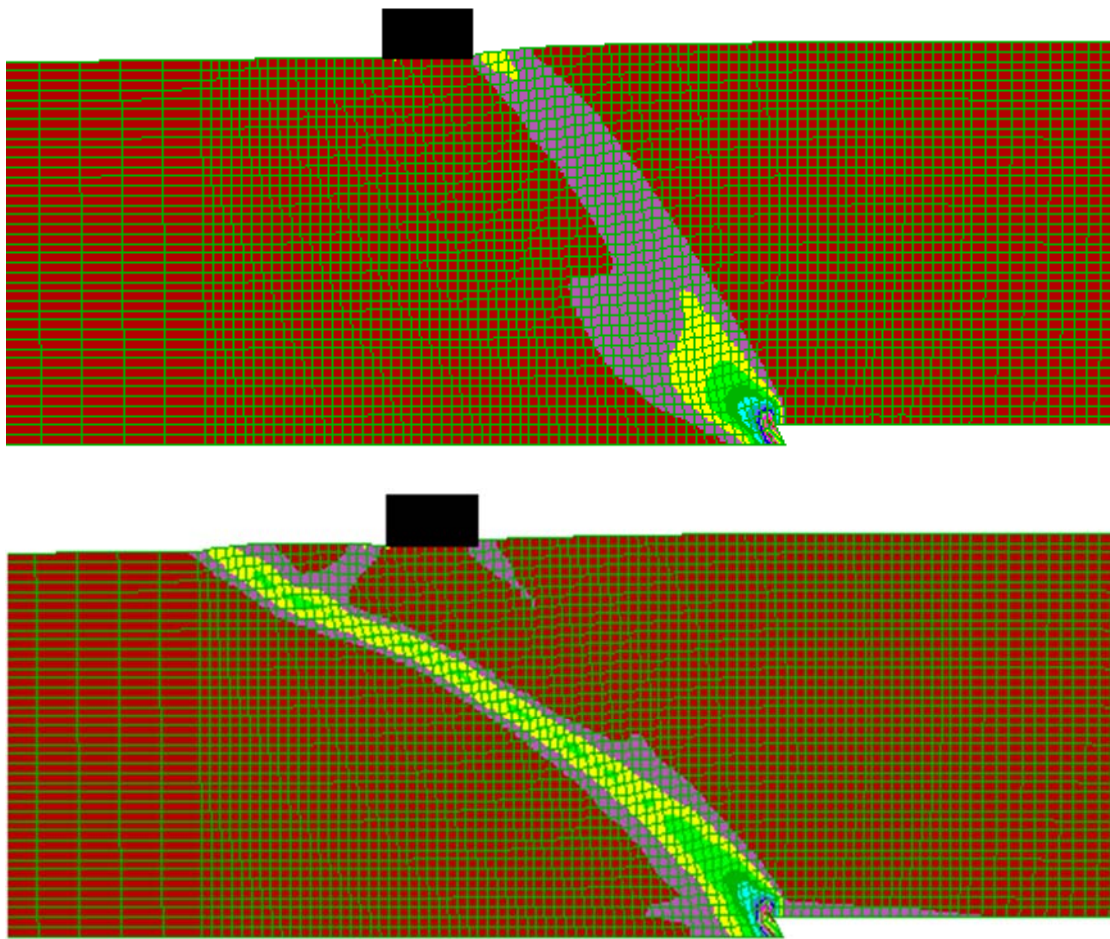
Σχήμα 5.65 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.66 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ($\beta=85^\circ$) και $d=1.0\text{m}$, με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=3\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

5.4.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Η τελευταία περίπτωση αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ που μελετάται ως προς τον βαθμό επίδρασης της δομής των κόκκων στο πρόβλημα είναι εκείνη της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος γωνίας $\beta=135^\circ$. Υπενθυμίζεται πως σε αυτές τις αναλύσεις η χαρακτηριστική θέση της κατασκευής απέχει απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο και πως η ίδια έχει την δυνατότητα ανασηκώματος. Σε αντιστοιχία με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται αρχικώς σε όρους συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων εντός της εδαφικής στρώσης, οι οποίες παρουσιάζονται το **Σχήμα 5.67** για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ και αρχικά «οριζόντια» (άνω) και «κατακόρυφη» (κάτω) δομή κόκκων. Σημειώνεται πως η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια παρατηρείται και για τους δύο προσανατολισμούς άμμου σε μετακίνηση ρήγματος $d=0.8\text{m}$, με την αυξημένη ωστόσο τιμή των συσσωρευμένων παραμορφώσεων εντός της διάρρηξης για άμμο «κατακόρυφης» δομής να υποδηλώνει την ανάδυση της ελαφρώς νωρίτερα συγκριτικά με εκείνη σε άμμο «οριζόντιας» δομής.

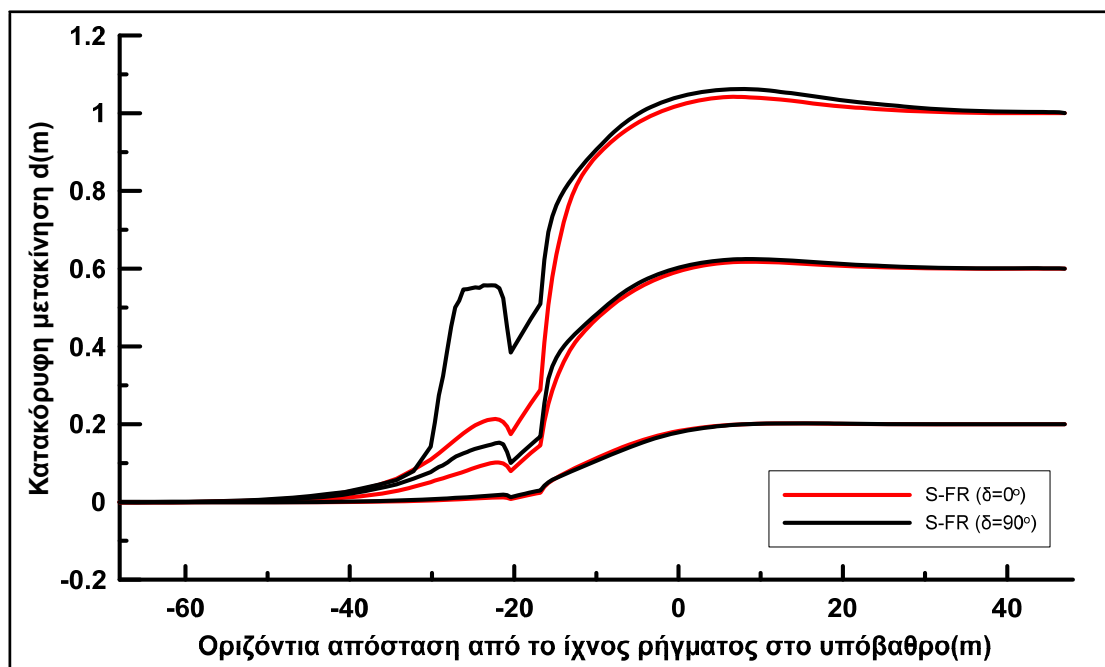


Σχήμα 5.67 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura με $D_r=65\%$ για αρχικά «οριζόντια δομή» (πάνω) και «κατακόρυφη δομή» (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

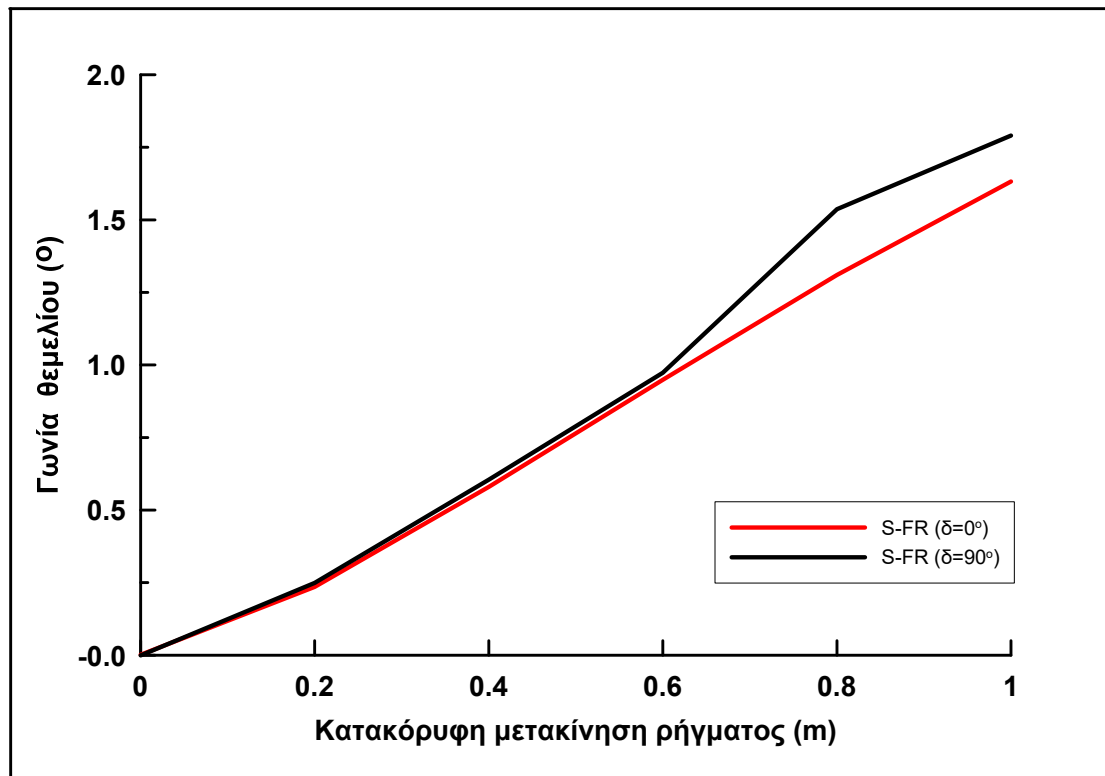
Ο διαφορετικός προσανατολισμός της άμμου έχει ως αποτέλεσμα την επιφανειακή ανάδυση της διάρρηξης εκατέρωθεν της κατασκευής, ήτοι στα δεξιά της για «οριζόντιο» προσανατολισμό και στα «αριστερά» της για κατακόρυφο. Αυτή η διαφορά είναι πολύ σημαντική και έρχεται σε αντίθεση με την ομοιότητα των αναλύσεων αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής μεγάλου φορτίου ($q=185kPa$) που παρατηρήθηκε για ρήγματα με γωνίες $\beta=45^\circ$ και $\beta=85^\circ$. Υπογραμμίζεται επίσης πως το αποτέλεσμα των δύο αναλύσεων δε διαφέρει ποιοτικά από τις αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου ($q=100kPa$), αντιθέτως οι διαφορές λόγω δομής εντείνονται, δηλαδή η διάρρηξη εκτρέπεται ακόμα περισσότερο προς το σταθερό τέμαχος για $\delta=90^\circ$, ενώ παρατηρείται σαφέστερη εμπέδωση προς το μετακινούμενο τέμαχος για την άμμο γωνίας $\delta=0^\circ$. Σε αντίθεση με τη διάρρηξη κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, κατά τη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος προκύπτει σημαντική αύξηση των οριζοντίων τάσεων και συνεπώς της πλευρικής υποστήριξης στο έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Το αποτέλεσμα είναι η απομάκρυνση από την αστοχία σε φέρουσα ικανότητα (συγκριτικά με συνθήκες μη-διάρρηξης) και ως εκ τούτου η αύξηση του φορτίου της κατασκευής απλώς αυξάνει

την αντοχή του εδάφους στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο, με συνέπεια να εντείνεται η -ήδη παρατηρούμενη λόγω της ύπαρξης κατασκευής μικρότερου φορτίου- εκτροπή της διάρρηξης, χωρίς να προκύπτει κίνδυνος απώλειας φέρουσας ικανότητας.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.68** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος d έως 1.0m, για φορτίο κατασκευής $q=185\text{kPa}$ και τους 2 συγκρινόμενους προσανατολισμούς δομής. Επιβεβαιώνεται η τελική θέση της κατασκευής στο μετακινούμενο τμήμα για την περίπτωση «κατακόρυφης» δομής που οδηγεί στην αισθητά μεγαλύτερη ανύψωση (της τάξης του 40-50% της μέγιστης ανύψωσης του εδάφους) και στροφή της. Σε πλήρη αντιστοιχία με τις αναλύσεις ελεύθερου πεδίου και εκείνες για την αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου, η απόκριση της άμμου «κατακόρυφης» δομής στην περιοχή εκτός της κατασκευής είναι «πυκνότερη», με τη διαπίστωση αυτή να εντείνεται με την αύξηση της μετακίνησης του ρήγματος.



Σχήμα 5.68 Παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης άμμου Toyoura με $D_r=65\%$ για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=0.2\text{m}, 0.6\text{m}$ και 1.0m , με κατασκευή ($B=4\text{m}$, $q=185\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=18\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

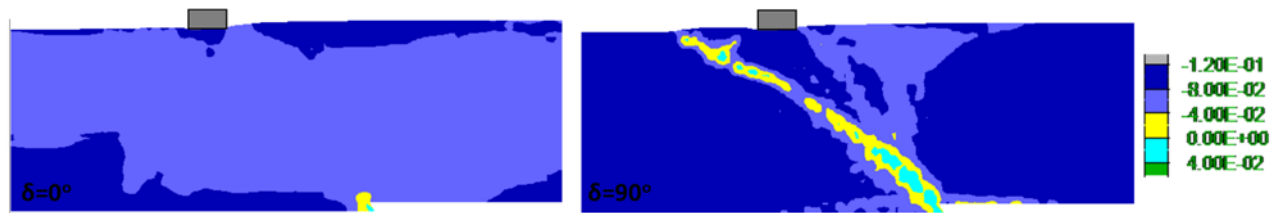


Σχήμα 5.69 Εξέλιξη της στροφής της κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$ ($B=4\text{m}$, $C=18\text{m}$) συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) για διάρρηξη εντός άμμου Toyoura με $D_f=65\%$ και για αρχικώς «οριζόντια δομή» (κόκκινο) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρο) κόκκων.

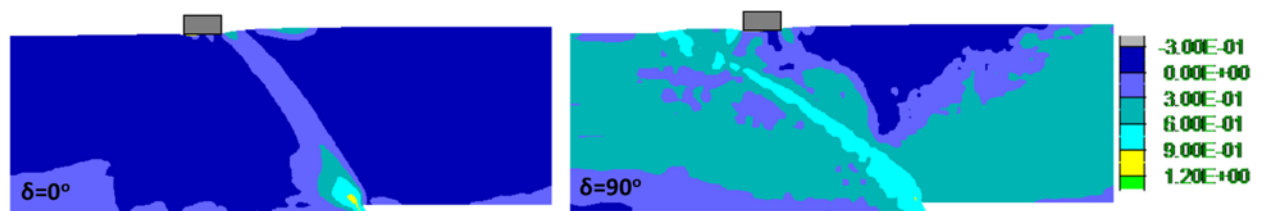
Για τη λεπτομερέστερη μελέτη της επίδρασης της μικροδομής στην καταπόνηση της κατασκευής, στο **Σχήμα 5.69** παρουσιάζεται η εξέλιξη της στροφής της ως συνάρτηση της κατακόρυφης μετακίνησης του, για διάρρηξη εντός στρώσεων άμμου με τους δύο προαναφερόμενους προσανατολισμούς δομής. Οι διαφορές στη στροφή προκύπτουν μετά την μετακίνηση $d=0.6\text{m}$ με τις μεγαλύτερες στροφές στην περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής να οφείλονται στη σχετική θέση της κατασκευής (περισσότερο προς το μετακινούμενο τμήμα για $\delta=90^\circ$). Συνολικά η αύξηση του φορτίου και της αντοχής του εδάφους κάτω από αυτό έχει θετική επίδραση στο μέγεθος της στροφής (μείωση της τιμής της) με την τελική στροφή (για $d=1.0\text{m}$) να προκύπτει σχεδόν ίδια ανεξαρτέτως δομής και συγκεκριμένα για διάρρηξη εντός άμμου «κατακόρυφης» δομής ίση με 1.8° και εντός άμμου «οριζόντιας» ίση με 1.6° (αριστερόστροφη). Παρά την παρατηρούμενη μείωση της στροφής (συγκριτικά με την περίπτωση αλληλεπίδρασης ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής μικρού φορτίου) η τελική τιμή της γωνίας εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη από εκείνη που παρατηρείται για αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=185\text{kPa}$.

Για την μικροσκοπική διερεύνηση όσων παρατηρήθηκαν πιο πάνω, στο **Σχήμα 5.70** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ και στα **Σχήματα 5.71**, **5.72** και **5.73** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A , η παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και το μέτρο του τανυστή δομής F για τον συνδυασμό ανάστροφου ρήγματος, μετατόπισης $d=1.0\text{m}$ και προαναφερθέντων χαρακτηριστικών κατασκευής και προσανατολισμών δομής κόκκων. Όπως σε όλα τα αντίστοιχα σχήματα, η Κρίσιμη Κατάσταση κατά τη θεωρία ACST των Li & Dafalias

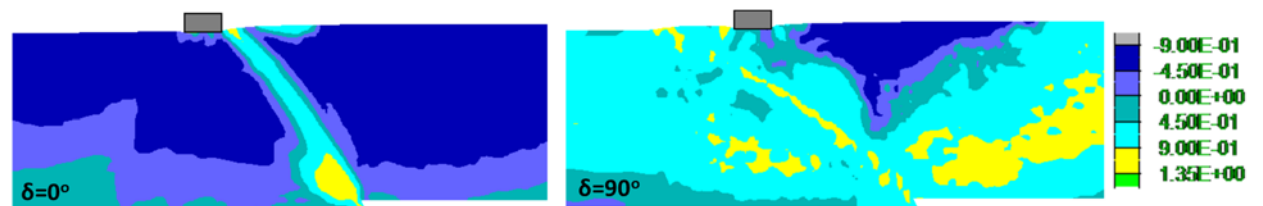
2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής $A=1$ (γεγονός που συνοδεύεται από $\zeta=0$, $F=N=1$, και αποτυπώνεται με «κίτρινο» χρώμα).



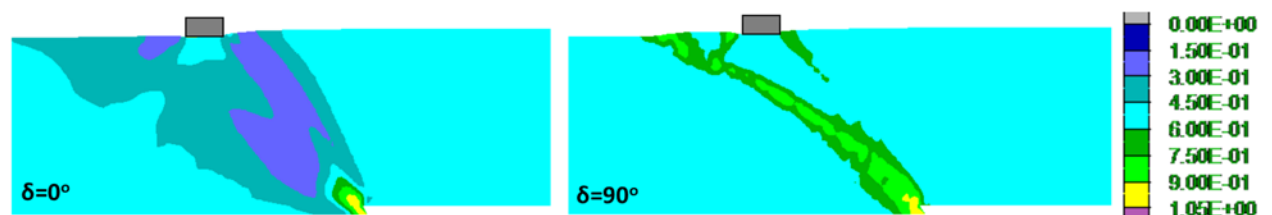
Σχήμα 5.70 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.71 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.72 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα 5.73 Μέτρο τανυστή δομής F σε στρώση άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ με «οριζόντια δομή» (αριστερά) και «κατακόρυφη δομή» (δεξιά) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ($\beta=135^\circ$) και $d=1.0m$, με κατασκευή ($B=4m$, $q=185kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=18m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Η πρώτη σημαντική παρατήρηση που προκύπτει είναι πως και σε αυτή την περίπτωση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος η άμμος δε φτάνει την Κρίσιμη Κατάσταση εντός

της ζώνης διάρρηξης παρά μόνο την προσεγγίζει περισσότερο στην περίπτωση «κατακόρυφης» δομής. Εκτός της ζώνης διάρρηξης, η τιμή των παραμέτρων είναι πρακτικώς ίδια με εκείνη για αλληλεπίδραση ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$, δηλαδή αρνητικές και θετικές τιμές της N (και της A) για «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή αντίστοιχα. Από όλες τις παραμέτρους δομής, μόνο το μέτρο του τανυστή δομής F έχει σημαντικά διαφοροποιηθεί από την αρχική τιμή του. Η ομοιότητα των αποτελεσμάτων εδώ με εκείνα της αλληλεπίδρασης ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής φορτίου $q=100\text{kPa}$ επιβεβαιώνει τη μικρή επίδραση της αύξησης του φορτίου σε προβλήματα γωνίας διάδοσης ρήγματος μεγαλύτερης των 90° . Πιστεύεται ότι χρειάζονται πολύ μεγαλύτερα φορτία κατασκευής για να επηρεάσουν ουσιωδώς την αλληλεπίδραση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος – κατασκευής, όπως συνέβη για τις γωνίες ρηγμάτων $\beta=45^\circ$ και 85° .

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται η επίδραση της δομής των κόκκων στο πρόβλημα της διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης και στο πολυπλοκότερο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος-κατασκευής στην ίδια στρώση. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα για δύο «ακραίους» προσανατολισμούς δομής, αυτόν που προκύπτει για απόθεση μέσω βαρύτητας, ήτοι «οριζόντιο» προσανατολισμό του επιπέδου απόθεσης και εκείνον που προκύπτει με περιστροφή του «οριζόντιου» επιπέδου απόθεσης κατά γωνία $\delta=90^\circ$, ήτοι μια δομή με «κατακόρυφο» προσανατολισμό του επιπέδου απόθεσης. Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιείται το σοφιστευμένο προσομοίωμα S-FR (Papadimitriou et al. 2019). Πρόκειται για ένα προσομοίωμα που βασίζεται στη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (Anisotropic Critical State Theory) των Li and Dafalias (2012), και λαμβάνει υπόψιν του την ανισοτροπία του εδάφους, θεωρώντας την αντοχή και τη διαστολικότητα συναρτήσεις της έντασης και του σχετικού προσανατολισμού της δομής με την επιβαλλόμενη φόρτιση.

Για να καταστούν συγκρίσιμες οι αναλύσεις, στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιήθηκε η ίδια στρώση άμμου μέσης πυκνότητας ($D_r = 65\%$) και πάχους 20m , καθώς και η ίδια κατασκευή πλάτους $B = 4\text{m}$ που φέρει ίδιο φορτίο (100kPa ή 185kPa). Διερευνήθηκαν διαρρήξεις 3 ειδών ρηγμάτων: α) ενός κανονικού κλίσης $\beta = 45^\circ$, β) ενός «κατακόρυφου» κλίσης $\beta = 85^\circ$ (όχι $\beta=90^\circ$ αμιγώς για αριθμητικούς λόγους) και γ) ενός ανάστροφου κλίσης $\beta = 135^\circ (= 180 - 45^\circ)$, όλα μέχρι κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος 1.0m . Η τιμή αυτή μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης αντιστοιχεί στο 5% του πάχους της στρώσης και αποδεικνύεται επαρκής για την ανάδυση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια σε όλα τα είδη ρήγματος, ανεξαρτήτως αν έχουν ή όχι επιφανειακή κατασκευή. Σε όλες τις περιπτώσεις ρήγματος, η κατασκευή βρίσκεται στην περιοχή ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, ώστε να μελετηθεί η πλέον έντονη πιθανή αλληλεπίδραση της διάρρηξης με την κατασκευή. Αν η κατασκευή βρίσκεται εκτός αυτής της περιοχής, τότε η αλληλεπίδραση αναμένεται μικρή έως ανύπαρκτη, οπότε δεν υπάρχει ενδιαφέρον μελέτης της. Η επιλογή των γωνιών διεύθυνσης του επιπέδου απόθεσης της

άμμου ίσες με $\delta = 0^\circ$ και $\delta = 90^\circ$ έγινε στην ίδια λογική, δηλαδή για την εκτίμηση των μέγιστων πιθανών αποκλίσεων λόγω προσανατολισμού του επιπέδου απόθεσης των κόκκων, συγκριτικά με την περίπτωση $\delta=0^\circ$ που αντιστοιχεί σε συνήθη δομή με απόθεση λόγω βαρύτητας.

Υπενθυμίζεται πως σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου αναλύσεις με το S-FR προσομοίωμα (Κεφάλαιο 3) αποτυπώνουν πως η απόκριση της άμμου με «κατακόρυφη» δομή ($\delta = 90^\circ$) συγκριτικά με την άμμο «οριζόντιας» δομής ($\delta=0^\circ$) είναι πιο ισχυρή/διαστολική και ασθενής/συστολική σε τριαξονικό εφελκυσμό και τριαξονική θλίψη, αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, μια άμμος με «κατακόρυφη» δομή αποκρίνεται ως «πυκνότερη» ή «χαλαρότερη» της άμμου με «οριζόντια» δομή για φορτίσεις τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης, αντίστοιχα. Επιπλέον, με βάση τη μελέτη των Chaloulos et al. (2019) προκύπτει ότι φέρουσα ικανότητα του εδάφους προκύπτει μικρότερη για άμμο με «κατακόρυφη» δομή ($\delta=90^\circ$), συγκριτικά με την ίδια άμμο με «οριζόντια» δομή ($\delta = 0^\circ$).

Με βάση τις παρουσιαζόμενες συγκρίσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(Α) Στην περίπτωση διάρρηξης ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου

Στην περίπτωση διάρρηξης κανονικού ρήγματος, η άμμος με «κατακόρυφη» δομή συμπεριφέρεται μακροσκοπικά ως «χαλαρότερη» συγκριτικά με την ίδια άμμο, ίδιας πυκνότητας με «οριζόντια» δομή. Ο λόγος είναι ότι σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος έχουμε μείωση της (οριζόντιας) σ_3 , δηλαδή φόρτιση που επιφέρει παραμόρφωση μορφής τριαξονικής θλίψης, με την σ_1 κατακόρυφη. Οπότε η σ_1 είναι συγγραμική με το κατακόρυφο επίπεδο απόθεσης, γεγονός που οδηγεί σε ασθενέστερη/συστολικότερη απόκριση συγκριτικά με την άμμο με «οριζόντια» δομή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην «κατακόρυφη» δομή η διάρρηξη του κανονικού ρήγματος να αναδύεται δυσχερέστερα και να δημιουργείται αβαθέστερο κατακρήμνισμα. Αντίστοιχα, η εμφάνιση της Κρίσιμης Κατάστασης εντός της κύριας και της δευτερεύουσας διάρρηξης να απαιτεί συγκριτικά μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος.

Αντίθετα, στην περίπτωση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος, η άμμος με «κατακόρυφη» δομή συμπεριφέρεται μακροσκοπικά ως «πυκνότερη» συγκριτικά με την ίδια άμμο, ίδιας πυκνότητας με «οριζόντια» δομή. Ο λόγος είναι ότι σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος έχουμε μεγάλη αύξηση της (οριζόντιας) τάσης, που φέρνει την σ_1 οριζόντια, δηλαδή έχει μορφή φόρτισης που επιφέρει παραμόρφωση μορφής τριαξονικού εφελκυσμού. Οπότε η οριζόντια σ_1 είναι κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο απόθεσης, γεγονός που οδηγεί σε ισχυρότερη/διαστολικότερη απόκριση συγκριτικά με την άμμο με οριζόντια δομή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην «κατακόρυφη» δομή η διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος να αναδύεται ευχερέστερα και η εμφάνιση της Κρίσιμης Κατάστασης εντός της διάρρηξης να απαιτεί συγκριτικά μικρότερη μετατόπιση ρήγματος.

Τέλος, στην περίπτωση διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος, δεν υπάρχει ουσιώδης διαφορά στην απόκριση της ίδιας άμμου αν έχει «οριζόντια» ή «κατακόρυφη» δομή. Ο λόγος είναι ότι η φόρτιση είναι μορφής απλής διάτμησης, δηλαδή η σ_1 βρίσκεται υπό (οξεία) γωνία ως προς την οριζόντια διεύθυνση. Με άλλα λόγια, η σ_1 βρίσκεται υπό γωνία τόσο ως προς το οριζόντιο όσο και ως προς το κατακόρυφο επίπεδο απόθεσης, γεγονός που οδηγεί σε πρακτικώς ταυτόσημη απόκριση για τις 2 αυτές υπό σύγκριση

δομές άμμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εντελώς κατακόρυφη διάρρηξη να αναδύεται το ίδιο εύκολα και για τις 2 εξεταζόμενες αρχικές δομές άμμου, ενώ η εμφάνιση Κρίσιμης Κατάστασης εντός της διάρρηξης να απαιτεί συγκρίσιμη μετατόπιση ρήγματος.

(B) Στην περίπτωση αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μικρού φορτίου ($q = 100\text{kPa}$)

Η απόκριση του εδάφους λόγω διάρρηξης ρήγματος μακριά από την κατασκευή καθορίζεται από την απόκριση υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Στην περιοχή της κατασκευής αυξάνουν οι κατακόρυφες τάσεις, με αποτέλεσμα τοπική αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αν η κατασκευή βρίσκεται στην περιοχή που θα αναδύονταν η διάρρηξη υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου, τότε η τοπική αύξηση της διατμητικής αντοχής μπορεί να εκτρέψει τη διάρρηξη προς μία από τις άκρες της κατασκευής. Στην προαναφερθείσα αλληλεπίδραση διάρρηξης ρήγματος με την κατασκευή ρόλο παίζουν η σχέση φορτίου – φέρουσα ικανότητα του θεμελίου, καθώς και η αλλαγή στο τασικό πεδίο που επιφέρει η διάρρηξη, ανάλογα με τον τύπο, τη γωνία βύθισης και τη μετατόπιση του ρήγματος.

Για κατασκευή με $q=100\text{kPa}$ στην περιοχή ανάδυσης κανονικού ρήγματος, προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος, χωρίς να επηρεάζεται όμως η αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης (παραμένει μεγαλύτερη εκείνη για «κατακόρυφη» δομή). Επιπλέον, στην «κατακόρυφη» δομή δημιουργείται δευτερογενής αστοχία μορφής πρίσματος υπό το θεμέλιο. Ο λόγος είναι ότι η μείωση των οριζοντίων τάσεων λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος καθιστά τη μειωμένη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου για «κατακόρυφη» δομή σχετικά κρίσιμη, συγκριτικά με το φορτίο της κατασκευής, αλλά δεν συμβαίνει το ίδιο για τη σχετικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα για «οριζόντια» δομή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες καθιζήσεις και στροφές για το θεμέλιο αν εδράζεται σε άμμο με «κατακόρυφη» δομή.

Για κατασκευή με $q=100\text{kPa}$ στο σταθερό τέμαχος, αλλά πολύ κοντά στο ίχνος «κατακόρυφου» ρήγματος, προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος, με αύξηση της αναγκαίας μετατόπισης ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης και για τις 2 δομές. Στην «κατακόρυφη» δομή υπάρχει απαρχή δευτερογενούς αστοχίας μορφής πρίσματος υπό το θεμέλιο, λόγω συγκριτικά μικρότερης φέρουσας ικανότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες καθιζήσεις και στροφές για το θεμέλιο αν εδράζεται σε άμμο με «κατακόρυφη» δομή, αλλά οι διαφορές (λόγω δομής άμμου) στα μεγέθη ενδιαφέροντος για το θεμέλιο δεν είναι σημαντικές.

Για κατασκευή με $q=100\text{kPa}$ στην περιοχή ανάδυσης ανάστροφου ρήγματος, προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης προς το σταθερό και το μετακινούμενο τέμαχος, για την «κατακόρυφη» και την «οριζόντια» δομή, αντίστοιχα. Η αναγκαία μετατόπιση για την ανάδυση του ρήγματος αυξάνει ελαφρώς λόγω της κατασκευής, αλλά παραμένει μικρότερη από εκείνη για «κατακόρυφη» δομή. Η αύξηση των οριζοντίων τάσεων λόγω διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος καθιστά μη-κρίσιμη τη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου (για $q=100\text{kPa}$, τουλάχιστον). Αντιθέτως, το θεμέλιο ανυψώνεται ακολουθώντας το μετακινούμενο τέμαχος, με την «κατακόρυφη» δομή να αποκρίνεται πιο διαστολικά και να οδηγεί και σε συγκριτικά μεγαλύτερες στροφές θεμελίου.

(C) Στην περίπτωση αλληλεπίδρασης διάρρηξης ρήγματος με κατασκευή μεγάλου φορτίου ($q=185\text{kPa}$)

Ποιοτικά ισχύουν πλήρως τα συμπεράσματα επίδρασης της δομής στην απόκριση της άμμου που προέκυψαν με βάση τις προηγούμενες αναλύσεις αλληλεπίδρασης με κατασκευή ίδιου εύρους, στις ίδιες θέσεις, αλλά με μικρότερο φορτίο ($q=100\text{kPa}$). Ποσοτικά όμως, ο διπλασιασμός του φορτίου σε $q=185\text{kPa}$ καθιστά γενικώς πιο κρίσιμο το θέμα προσέγγισης της φέρουσας ικανότητας στην αλληλεπίδραση του θεμελίου με τη διαδιδόμενη διάρρηξη.

Για κατασκευή με $q=185\text{kPa}$ στην περιοχή ανάδυσης κανονικού ρήγματος, προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος, δευτερογενής αστοχία μορφής πρίσματος υπό το θεμέλιο και μη-δημιουργία κατακρημνίσματος και για τις 2 δομές. Δηλαδή, το αυξημένο φορτίο καθιστά κρίσιμη τη φέρουσα ικανότητα και για την «οριζόντια» δομή, και όχι μόνο για την «κατακόρυφη» δομή όπως ισχύει για $q=100\text{kPa}$. Επιπλέον, το αυξημένο φορτίο μεγαλώνει την αναγκαία μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης, με την «κατακόρυφη» δομή να απαιτεί ελαφρά μόνο μεγαλύτερη μετατόπιση. Οι καθιζήσεις θεμελίου αυξάνουν σημαντικά, με την «κατακόρυφη» δομή να δίνει και πάλι μεγαλύτερες τιμές, ενώ οι στροφές γίνονται πρακτικώς ίδιες ανεξαρτήτως δομής.

Για κατασκευή με $q=185\text{kPa}$ στο σταθερό τέμαχος, αλλά πολύ κοντά στο ίχνος «κατακόρυφου» ρήγματος, προκύπτει και για τις 2 δομές εκτροπή της (κύριας) διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος και δημιουργία βαθιάς δευτερεύουσας διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος. Αυτή η κοινή εικόνα διάρρηξης είναι διαφορετική από την, αντίστοιχα κοινή, εικόνα διάρρηξης για $q=100\text{kPa}$, όπου η κύρια διάρρηξη παρέμενε πρακτικώς κατακόρυφη. Αυτό οφείλεται στην περαιτέρω αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους κάτω από το θεμέλιο, που εκτρέπει ομοίως την διάρρηξη, ανεξαρτήτως δομής. Οι ανωτέρω ομοιότητες στη διάρρηξη ανεξαρτήτως δομής οδηγούν σε αντίστοιχες τιμές καθιζήσεων και στροφών θεμελίου.

Για κατασκευή με $q=185\text{kPa}$ στην περιοχή ανάδυσης ανάστροφου ρήγματος, προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης προς το σταθερό και το μετακινούμενο τέμαχος, για την «κατακόρυφη» και την «οριζόντια» δομή, αντίστοιχα. Η αύξηση του φορτίου σε $q=185\text{kPa}$ δεν επαρκεί για να καταστήσει κρίσιμη τη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου σε συνθήκες διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος, όπου αυξάνουν σημαντικά οι οριζόντιες τάσεις. Ούτε επηρεάζει ουσιαστικά την αναγκαία μετατόπιση για την ανάδυση του ρήγματος, η οποία παραμένει λίγο μικρότερη για «κατακόρυφη» δομή. Και πάλι, το θεμέλιο ανυψώνεται ακολουθώντας το μετακινούμενο τέμαχος, με την «κατακόρυφη» δομή να αποκρίνεται πιο διαστολικά και να οδηγεί και σε συγκριτικά μεγαλύτερες στροφές θεμελίου. Λόγω του αυξημένου φορτίου όμως, οι στροφές του θεμελίου είναι μικρότερες κατά μέγεθος απ' ότι για $q=100\text{kPa}$, και οι διαφορές λόγω δομής να είναι λιγότερο έντονες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κριτική επί της ακρίβειας της αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής για διάδοση της διάρρηξης μέσω αμμώδους στρώσης. Η κριτική γίνεται επί των δυνατοτήτων πιθανών καταστατικών προσομοιωμάτων για το έδαφος (εδώ άμμος), με έμφαση στην προσομοίωση ή όχι της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της άμμου. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα ενός σοφιστευμένου ανισοτροπικού προσομοιώματος (S-FR, των Paradimitriou et al. 2019) με εκείνα που προκύπτουν από δύο απλούστερα προσομοιώματα: του απλουστευμένου ισοτροπικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb με χαλάρωση (SS) και ενός πολύπλοκου προσομοιώματος της οικογένειας SANISAND χωρίς επίδραση της δομής (S-R). Επιπλέον, διερευνάται η μέγιστη πιθανή επίδραση της αρχικής δομής μιας άμμου στο πρόβλημα, με χρήση του προσομοιώματος S-FR. Συνολικά η διερεύνηση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, και συγκεκριμένα μέσω του λογισμικού FLAC σε δύο διαστάσεις (θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης). Υπογραμμίζεται πως σε όλες τις αναλύσεις δεν προσομοιώνεται το πρόβλημα διάδοσης σεισμικών κυμάτων, αλλά μόνο το ψευδο-στατικό πρόβλημα της διάδοσης της διάρρηξης από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια μέσω της αμμώδους στρώσης. Στις παραγράφους που ακολουθούν συνοψίζονται, ανά Κεφάλαιο, τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας.

Αρχικά, στο **Κεφάλαιο 3**, τα 2 απλούστερα προσομοιώματα (SS και S-R) βαθμονομήθηκαν ώστε να δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα με το σοφιστευμένο S-FR στις πλέον συνήθεις δοκιμές τριαξονικής θλίψης (TC) σε άμμο με «οριζόντια δομή», ήτοι με επίπεδο απόθεσης κόκκων που σχηματίζει γωνία $\delta=0^\circ$ με την οριζόντια διεύθυνση. Ωστόσο, η χρήση των ως άνω βαθμονομημένων προσομοιωμάτων στην προσομοίωση τριαξονικού εφελκυσμού (TE) της ίδιας άμμου παρουσίασε σημαντικές διαφορές, δηλαδή υπερεκτίμηση της διαστολικότητας εκ μέρους των S-R και SS και την υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της μέγιστης αντοχής της από το S-R και το SS, αντίστοιχα. Η βαθμονόμηση έγινε για άμμο Τογούρα σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$, καθώς αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε σε πείραμα φυγοκεντριστή που αφορά στη διάρρηξη κανονικού ρήγματος (κλίσης 70%) μέχρι κατακόρυφης μετατόπισης 2.1m μέσω στρώσης πάχους 20m της άμμου αυτής με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Διαπιστώθηκε ικανοποιητική προσομοίωση των μετρήσεων της δοκιμής και με τα 3 προσομοιώματα. Αυτό υπονοεί ότι, σε πρώτη ανάγνωση, η χρήση ενός πολύπλοκου S-R, και πολύ περισσότερο ενός σοφιστευμένου προσομοιώματος S-FR στο δεδομένο «απλό» πρόβλημα δεν κρίνεται ως αναγκαία. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού του επιπέδου απόθεσης των κόκκων (γωνία δ) στην απόκριση σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου με χρήση του S-FR. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι σε φόρτιση υπό TC η απόκριση για $\delta=90^\circ$ ομοιάζει σαν η άμμος να είναι «χαλαρότερη» απ' ότι για $\delta=0^\circ$, ενώ το αντίθετο ισχύει για φόρτιση υπό TE, όπου η απόκριση για $\delta=90^\circ$ ομοιάζει σαν η άμμος να είναι «πυκνότερη» απ' ότι για $\delta=0^\circ$.

Για την λεπτομερέστερη διερεύνηση της ακρίβειας της αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος διάδοσης της διάρρηξης ρήγματος, τόσο υπό ελεύθερο πεδίο όσο και με ταυτόχρονη ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης, στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων για διάδοση ρήγματος μέσω στρώσης άμμου Toyoura, πάχους 20m και $D_r=65\%$. Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν τα 3 προσομοιώματα, μετά τη βαθμονόμησή τους να δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα σε TC (βλ. Κεφάλαιο 3). Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις 3 ρηγμάτων, ενός κανονικού κλίσης $\beta=45^\circ$, ενός κανονικού με «κατακόρυφη» κλίση $\beta=85^\circ$ (εν συντομία αποκαλείται «κατακόρυφο») και ενός ανάστροφου κλίσης $\beta=135^\circ (=180 - 45^\circ)$ μέχρι κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος 1.0m. Η τιμή αυτή μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης αντιστοιχεί στο 5% του πάχους της στρώσης και αποδεικνύεται επαρκής για την ανάδυση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια σε όλα τα είδη ρήγματος και ανεξαρτήτως της ύπαρξης επιφανειακής κατασκευής. Στις αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής έγινε προσομοίωση άκαμπτου θεμελίου με δυνατότητα αποκόλλησης, πλάτους $B=4.0\text{m}$, ιδίου φορτίου (100kPa ή 185kPa) για όλα τα είδη ρήγματος. Η τοποθέτηση της κατασκευής έγινε σε διαφορετική θέση ανά είδος ρήγματος, δηλαδή τοποθετήθηκε στην περιοχή ανάδυσης της διάρρηξης υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου, ώστε να διερευνηθεί η μέγιστη δυνατή επίδραση αυτής στη διάρρηξη. Προέκυψε ότι:

- Σε συμφωνία με την έως τώρα βιβλιογραφία, για αναλύσεις διάρρηξης ρήγματος υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου, τα 3 προσομοιώματα δίνουν συγκρίσιμη απόκριση. Οι (μικρές) διαφορές που προκύπτουν λόγω χρήσης καταστατικού προσομοιώματος απλούστερου του S-FR δικαιολογούνται ποιοτικά με βάση τις αποκλίσεις των 3 προσομοιωμάτων σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, ωστόσο σε κάθε περίπτωση δεν κρίνονται ως σημαντικές και δεν δικαιολογούν την χρήση σοφιστευμένου προσομοιώματος.
- Με βάση τις αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής προκύπτει ότι η απόκριση στην περιοχή μακριά από την κατασκευή είναι αντίστοιχη με τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου, και καθορίζεται κυρίως από τη διαστολικότητα του εδάφους όπως αυτή προβλέπεται από το κάθε προσομοίωμα. Αντιθέτως, η απόκριση στην περιοχή της κατασκευής και η πιθανή εκτροπή της διάρρηξης λόγω αυτής καθορίζεται από την αύξηση των τάσεων στο έδαφος που επιβάλλει η τοποθέτησή της και τις συνέπειες που αυτό επιφέρει στη διατμητική αντοχή της άμμου.
- Η διαφορετική φέρουσα ικανότητα του θεμελίου που προκύπτει από χρήση προσομοιωμάτων απλούστερων του S-FR καθορίζει και την απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρρηξη σε όρους (μέσης) καθίζησης και στροφής. Συγκεκριμένα, η προβλεπόμενη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής για τα προσομοιώματα SS και S-R είναι μικρότερη και μεγαλύτερη, αντίστοιχα, από την προβλεπόμενη με το σοφιστευμένο S-FR, και αυτό συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές (μέσης) καθίζησης για τα 2 απλούστερα προσομοιώματα συγκριτικά με το S-FR.
- Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής αναδεικνύει τις αδυναμίες χρήσης απλουστευμένων προσομοιωμάτων. Για παράδειγμα, η υπερεκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας σε φέρουσα ικανότητα (π.χ. εκ μέρους του πολύπλοκου S-

R) ενδέχεται να οδηγήσει σε αδυναμία πρόβλεψης του πρίσματος μορφής σφήνας κάτω από το θεμέλιο, και κατ' επέκταση σε λανθασμένη εκτίμηση της εικόνας της διάρρηξης και υπερεκτίμηση της (μέσης) καθίζησης και στροφής της κατασκευής. Υπογραμμίζεται πως η τιμή του φορτίου για την οποία γίνεται κρίσιμη η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής εξαρτάται από τη διάρρηξη. Για παράδειγμα, σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος στη γειτονιά της κατασκευής προκύπτει μείωση των οριζοντίων τάσεων, με αποτέλεσμα την απομείωση της φέρουσας ικανότητας του θεμελίου, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.

- Οι αναλύσεις αναδεικνύουν την αδυναμία προσομοίωσης του προβλήματος αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής από απλουστευμένα προσομοιώματα, ακόμα και αν αυτά δίνουν «ταυτόσημα» αποτελέσματα στις πλέον συνήθεις δοκιμές TC ή σε αναλύσεις διάρρηξης ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 5** επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 4 με το σοφιστευμένο προσομοίωμα S-FR ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της δομής της άμμου στο πρόβλημα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής. Για τον σκοπό αυτό συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για δύο ακραίες δομές κόκκων της άμμου: εκείνη της προαναφερθείσας «οριζόντιας» δομής ($\delta=0^\circ$) και εκείνης που προκύπτει από την περιστροφή της κατά 90° , ήτοι μιας «κατακόρυφης» δομής ($\delta=90^\circ$). Επισημαίνεται πως στη φύση σπάνια μπορεί να προκύψει $\delta=90^\circ$, οπότε η επιλογή της ως δεύτερης τιμής της γωνίας δ έγινε με στόχο την αποτύπωση της μέγιστης δυνατής απόκλισης. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων λαμβάνεται υπόψη το βιβλιογραφικό εύρημα ότι η φέρουσα ικανότητα επιφανειακού θεμελίου σε άμμο με $\delta=90^\circ$ είναι μικρότερη από εκείνη για $\delta=0^\circ$ (Chaloulos et al. 2019). Η σύγκριση υπέδειξε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, η άμμος με «κατακόρυφη» δομή συμπεριφέρεται μακροσκοπικά ως «χαλαρότερη» συγκριτικά με την ίδια άμμο, ίδιας πυκνότητας με «οριζόντια» δομή. Αυτό οφείλεται στο ότι σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος έχουμε μείωση της (οριζόντιας) σ_3 , δηλαδή φόρτιση που επιφέρει παραμόρφωση μορφής τριαξονικής θλίψης, με την σ_1 κατακόρυφη και συγγραμμική με το διάνυσμα που είναι κάθετο στην αρχικά «οριζόντια» δομή. Συνεπώς, η ανάδυση της διάρρηξης απαιτεί μεγαλύτερες μετατοπίσεις ρήγματος για την δομή με $\delta=90^\circ$. Αντιθέτως, η διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της (οριζόντιας) τάσης, που φέρνει την σ_1 οριζόντια δηλαδή συγγραμμική με το διάνυσμα που είναι κάθετο στην αρχικά «κατακόρυφη» δομή. Συνεπώς, η άμμος με «κατακόρυφη» δομή συμπεριφέρεται μακροσκοπικά ως «πυκνότερη» συγκριτικά με εκείνη «οριζόντιας» δομής και ως εκ τούτου, η ανάδυση της διάρρηξης απαιτεί μικρότερη μετατόπιση ρήγματος. Τέλος, στην περίπτωση διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος, η φόρτιση είναι μορφής απλής διάτμησης (σ_1 υπό οξεία γωνία) με αποτέλεσμα η απόκριση της ίδιας άμμου να έχει πολλές ομοιότητες αν έχει αρχικώς «οριζόντια» ή «κατακόρυφη» δομή.
- Η μείωση των οριζοντίων τάσεων λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος μπορεί για το ίδιο φορτίο κατασκευής να καθιστά τη μειωμένη φέρουσα ικανότητα για «κατακόρυφη» δομή σχετικά κρίσιμη, χωρίς αυτό να προκύπτει για τη σχετικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα για «οριζόντια» δομή. Έτσι μπορεί να προκύψει

αστοχία μορφής σφήνας κάτω από το θεμέλιο στην περίπτωση «κατακόρυφης» δομής, η οποία σε συνδυασμό με τη διάρρηξη να οδηγήσει σε αυξημένη (μέση) καθίζηση και στροφή της κατασκευής.

- Η ύπαρξη κατασκευής στην περιοχή πλησίον της θέσης ανάδυσης «κατακόρυφου» ρήγματος εκτρέπει τη διάρρηξη επί της ίδιας πλευράς της κατασκευής (τουλάχιστον για τα φορτία έως 185kPa), ανεξάρτητα από το αν η δομή της άμμου χαρακτηρίζεται από $\delta=0^\circ$ ή 90° . Επιπλέον, όπως και στο κανονικό ρήγμα, το ίδιο φορτίο κατασκευής ενδέχεται να είναι περισσότερο κρίσιμο στην περίπτωση προσανατολισμού δομής $\delta=90^\circ$ με αποτέλεσμα (ελαφρώς) μεγαλύτερες στροφές και (μέσες) καθιζήσεις συγκριτικά με εκείνες για $\delta=0^\circ$. Υπογραμμίζεται ότι, σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές που προκύπτουν για τις 2 ακραίες τιμές προσανατολισμού δομής είναι μικρότερες συγκριτικά με εκείνες για κανονικό ρήγμα, ακριβώς όπως συμβαίνει και για ελεύθερο πεδίο.
- Για την περίπτωση αλληλεπίδρασης ανάστροφου ρήγματος-κατασκευής, η διαφορετική φέρουσα ικανότητα λόγω προσανατολισμού της δομής της άμμου δεν αποτελεί τόσο κρίσιμο παράγοντα, τουλάχιστον όχι για εξαιρετικά μεγάλα φορτία θεμελίου (έως 185kPa). Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του φορτίου μειώνει τη (μέση) καθίζηση και στροφή του θεμελίου με την «κατακόρυφη» δομή να εξακολουθεί να εμφανίζει συγκριτικά μεγαλύτερες τιμές στα μεγέθη αυτά.
- Η δομή της άμμου εξελίσσεται σημαντικά μόνο εντός των (πρωτευουσών και δευτερευουσών) ζωνών διάρρηξης, και όπου προσεγγίζεται ασυμπτωτικά η Κρίσιμη Κατάσταση. Όταν η αρχική δομή είναι διαφορετική (π.χ. $\delta = 0^\circ$ και 90°), αυτό έχει επίπτωση και στο πόσο γρήγορα (σε όρους κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος) προσεγγίζεται η Κρίσιμη Κατάσταση εντός των ζωνών διάρρηξης. Συγκεκριμένα, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος, η Κρίσιμη Κατάσταση προσεγγίζεται γρηγορότερα για αρχικά «οριζόντια» δομή, ενώ το αντίθετο ισχύει για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Για «κατακόρυφο» ρήγμα, η Κρίσιμη Κατάσταση προσεγγίζεται το ίδιο γρήγορα για δομές άμμου με $\delta = 0^\circ$ και 90° .
- Η ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής στην περιοχή πλησίον της θέσης ανάδυσης ενός ρήγματος μπορεί να επηρεάσει την απαιτούμενη μετακίνηση για ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια, όμως σε κάθε περίπτωση οι διαφορές που προκύπτουν λόγω διαφορετικού προσανατολισμού της δομής είναι ποιοτικά ανάλογες με εκείνες που παρατηρούνται για την ίδια διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η ακριβής αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής αποτελεί ένα πρόβλημα πολλών παραμέτρων, μερικές εκ των οποίων δεν αποτέλεσαν αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, γίνονται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο:

- Η χρήση του ανισοτροπικού προσομοιώματος S-FR (Papadimitriou et al. 2019) προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς κοκκώδους εδάφους. Ωστόσο, η ακριβέστερη προσομοίωση του προβλήματος

αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής χρήζει βελτίωση ως προς την προσομοίωση της κατασκευής. Δηλαδή θα πρέπει να διερευνηθούν:

(α) η επίδραση της δυνατότητας αποκόλλησης και ολίσθησης του θεμελίου στη διάρρηξη, συγκριτικά με τις παρούσες αναλύσεις όπου το θεμέλιο λόγω του (μεγάλου) φορτίου και του (μικρού) πλάτους του έμεινε «κολλημένο» στο έδαφος.

(β) η επίδραση του ύψους της κατασκευής, καθώς υψίκορμες κατασκευές που έχουν το κέντρο βάρους ψηλά χαρακτηρίζονται από επιπλέον διάθεση για στροφή, λόγω φαινομένων P-Δ, η οποία θα υπογραμμίζεται στις περιπτώσεις όπου συμβαίνει αποκόλληση.

- Πέραν της ακρίβειας, θα ήταν χρήσιμη και η πληρέστερη προσομοίωση του προβλήματος αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, που συνίσταται σε διερεύνηση:

(α) μικρότερων και μεγαλύτερων φορτίων κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, τα μικρότερα φορτία αναμένεται να είναι χρήσιμα σε περιπτώσεις υψίκορμων κατασκευών με δυνατότητες αποκόλλησης και ολίσθησης, ενώ τα μεγαλύτερα φορτία (αν και σχετικώς σπάνια στην πράξη) θα ήταν χρήσιμα για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης στην περίπτωση διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος, ώστε να έρθουν πλησιέστερα αστοχία σε φέρουσα ικανότητα,

(β) ευρύτερων θεμελίων,

(γ) 3Δ συνθηκών διάρρηξης σε αλληλεπίδραση με πεπερασμένων διαστάσεων κατασκευές, όπου πλέον η διάρρηξη είναι υπό γωνία ως προς τους άξονες της θεμελίωσης και οι κατασκευές δεν αυξάνουν τις τάσεις σε μεγάλα βάθη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

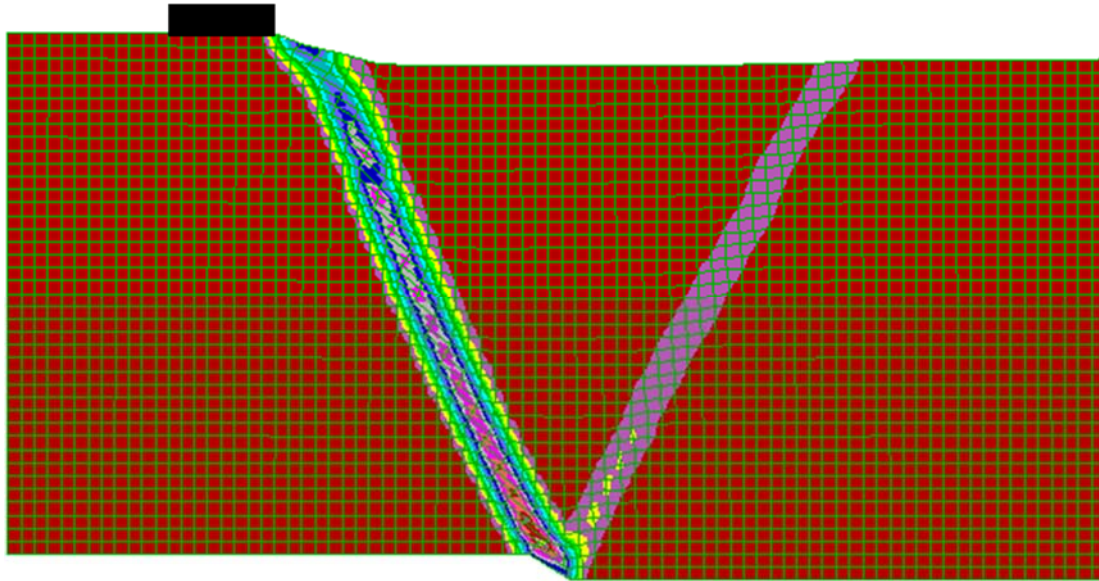
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΑΝΑΣΗΚΩΜΑ ΤΟΥ ΘΕΜΕΛΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής στις οποίες έγινε προσομοίωση ενός άκαμπτου και επιφανειακού θεμελίου πλάτους $B=4\text{m}$, τοποθετημένου στη θέση ανάδυσης της διάρρηξης σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Τονίζεται πως ενώ το θεμέλιο είχε τη δυνατότητα αποκόλλησης ή/και ολίσθησης αυτή δεν παρατηρήθηκε στην πράξη, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο συνδυασμό του σχετικά μικρού πλάτους του θεμελίου και του σχετικά μεγάλου φορτίου του (185 και 100kPa), που έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες δυνάμεις τριβής που κράτησαν το θεμέλιο «κολλημένο» στο έδαφος, παρά την διάδοση της διάρρηξης. Προκειμένου να διερευνηθεί η παραπάνω υπόθεση, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής για διαφορετικά πλάτη και φορτία θεμελίων, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στο παρόν **Παράρτημα**. Υπογραμμίζεται πως μελετήθηκε μόνο η διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$, για διάδοση εντός στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m και σχετικής πυκνότητας $D_r=65\%$ (σε αντιστοιχία με την υπόλοιπη εργασία) και πως το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για τις επιπλέον αναλύσεις αυτές ήταν το SANISAND-FR.

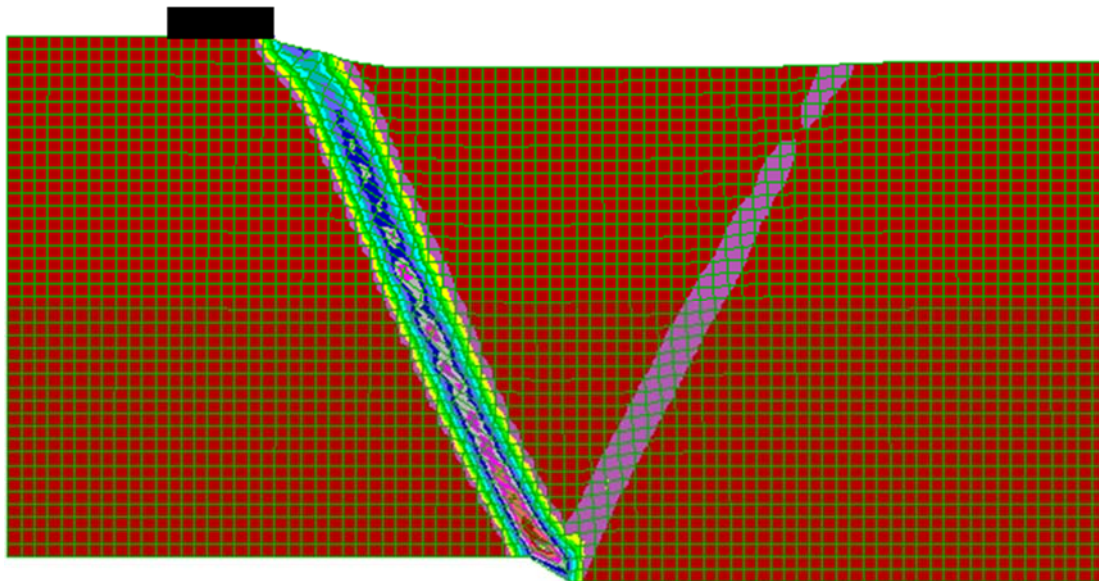
A.1. Αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος - θεμελίου πλάτους $B=4\text{m}$ τοποθετημένου σε απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε είναι εκείνη της αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος ($\beta=45^\circ$) και άκαμπτου θεμελίου πλάτους $B=4\text{m}$ τοποθετημένου στη θέση $C=12\text{m}$. Η περίπτωση αυτή είναι άμεσα συμβατή με τις αναλύσεις που έγιναν έως τώρα, στις οποίες το ίδιο πρόβλημα αλληλεπίδρασης ρήγματος-θεμελίου εξετάστηκε για ελάχιστο φορτίο κατασκευής ίσο με $q=100\text{kPa}$. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της σταδιακής μείωσης του φορτίου της κατασκευής, στα **Σχήματα A.1.1, A.1.2, A.1.3** και **A.1.4** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της στρώσης για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ και φορτίο κατασκευής $q=100, 50$ και 25kPa . Σε πρώτη όψη, η εικόνα των διαρρήξεων φαίνεται να είναι ουσιαστικά η ίδια, δηλαδή παρατηρείται εκτροπή της κύριας διάρρηξης (προς το μετακινούμενο τμήμα) συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο και διάδοση δευτερεύουσας διάρρηξης που αναδύεται στο μετακινούμενο τμήμα δημιουργώντας κατακρήμνισμα. Ελάχιστες διαφορές στο μέγεθος των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων παρατηρούνται εντός της δευτερεύουσας διάρρηξης, χωρίς ωστόσο να κρίνονται ως ουσιώδεις.

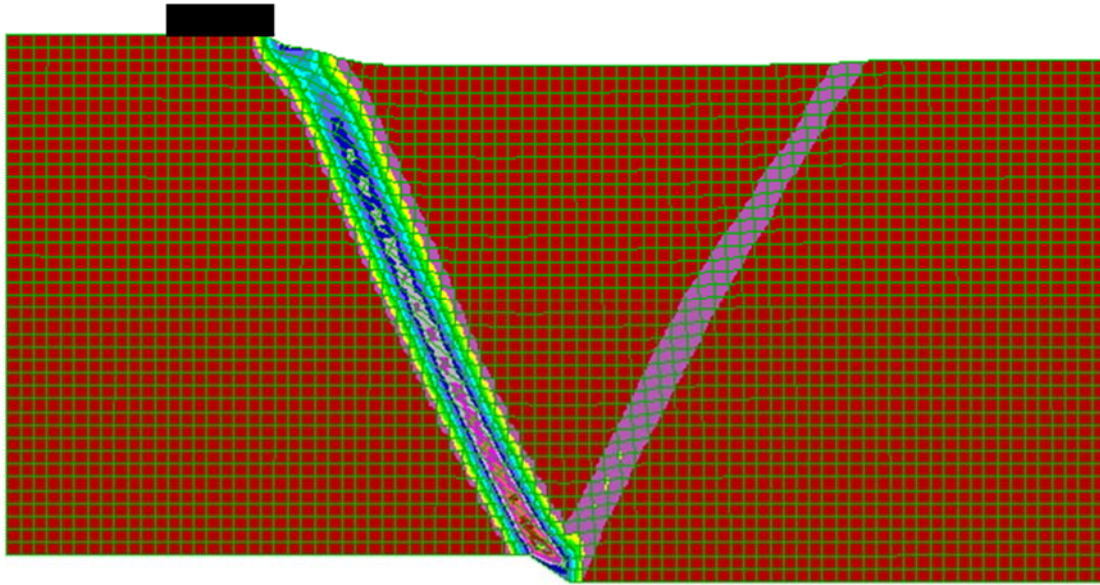
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα A.1.5** παρουσιάζεται και πάλι η εικόνα των συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων, μεγεθυμένη όμως στην περιοχή που βρίσκεται η κατασκευή. Από το σχήμα αυτό προκύπτει πως ενώ η απόκριση του εδάφους φαίνεται να μην επηρεάζεται ουσιαστικά από την μείωση του φορτίου, η ίδια η κατασκευή ανασηκώνεται στην άκρη της, με το ανασήκωμα αυτό να αυξάνει ελαφρώς με την μείωση του φορτίου.



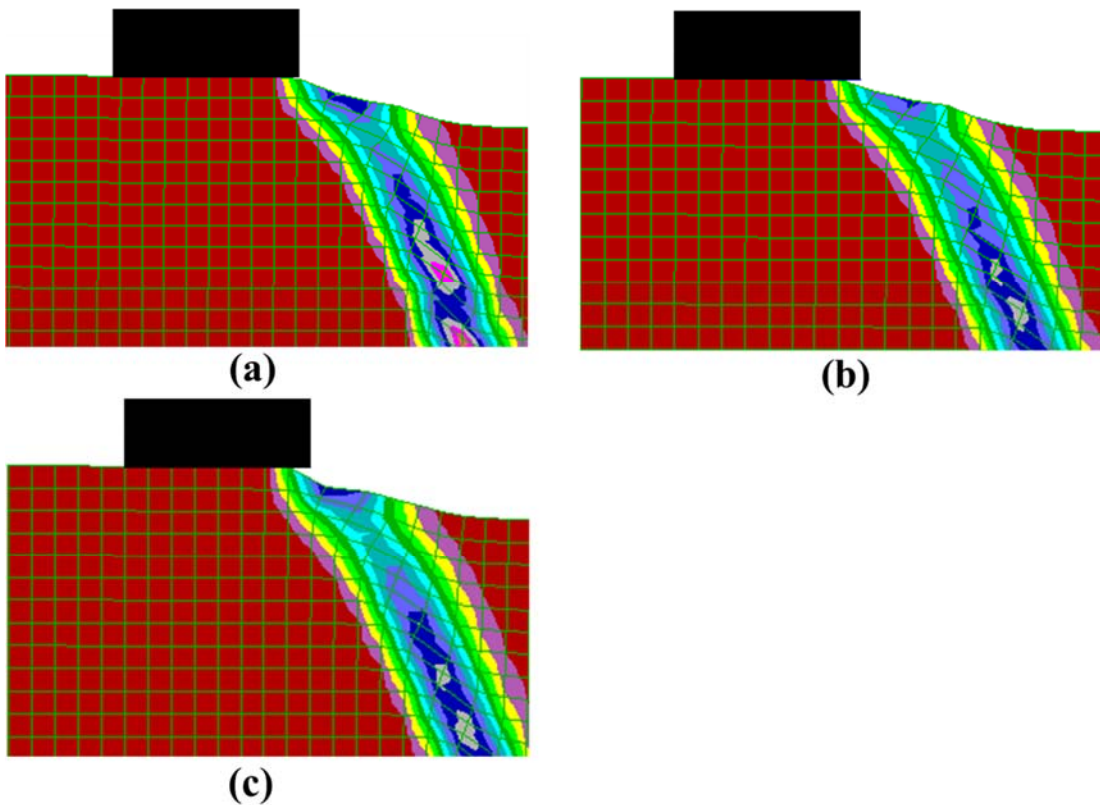
Σχήμα Α.1.1.: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.1.2.: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m$, $q=50kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



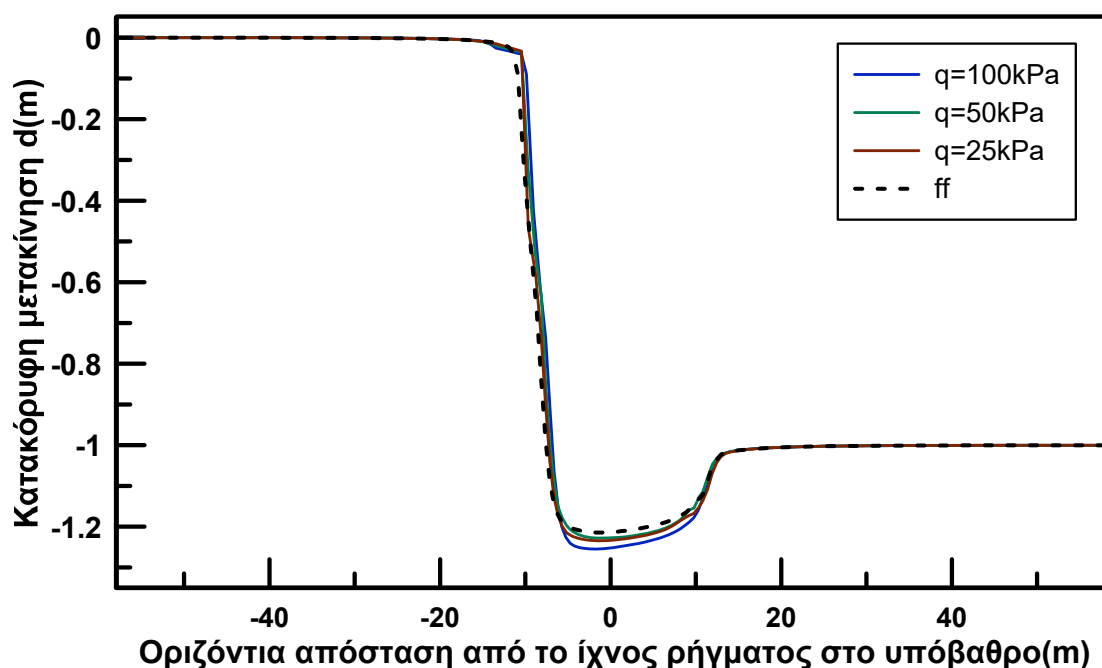
Σχήμα Α.1.3.: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=4m$, $q=25kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.1.4.: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή πλάτους $B=4m$ σε οριζόντια απόσταση $C=12m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο και φορτίου : (a) $q=100kPa$; (b) $q=50kPa$ και (c) $q=25kPa$. (μεγέθυνση στη γειτονία του θεμελίου).

Φαίνεται επομένως πως η μείωση του φορτίου της κατασκευής q επαρκεί ώστε να προκύψει ανασήκωμά της υπό τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος, ακόμα και στην περίπτωση που το πλάτους του θεμελίου είναι αρκετά μικρό (εδώ $B=4\text{m}$).

Παρακάτω, στο **Σχήμα A.1.5** συγκρίνεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος-θεμελίου πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100, 50$ και 25kPa , με εκείνη που προκύπτει για διάδοση του ίδιου ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο. Το Σχήμα αφορά μετατόπιση ρήγματος ίση με $d=1.0\text{m}$ και με βάση αυτό διαπιστώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις η τελική εικόνα προσεγγίζει αρκετά εκείνη του ελευθέρου πεδίου (ff), με την ομοιότητα να αυξάνει όσο μειώνεται το φορτίο q .

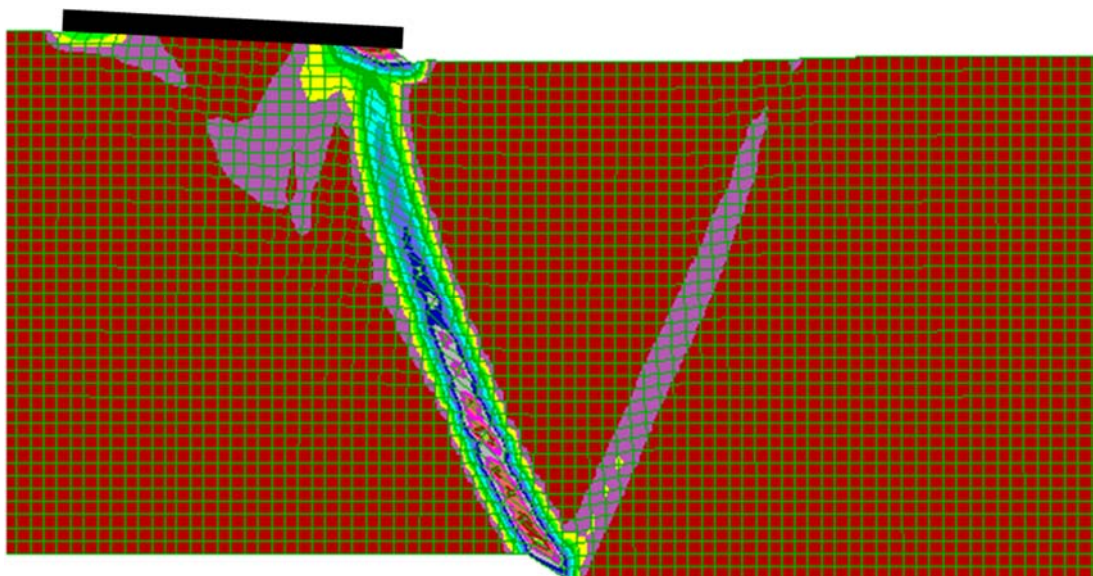


Σχήμα A.1.5 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=4\text{m}$ και φορτίου $q=100, 50$ και 25kPa σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

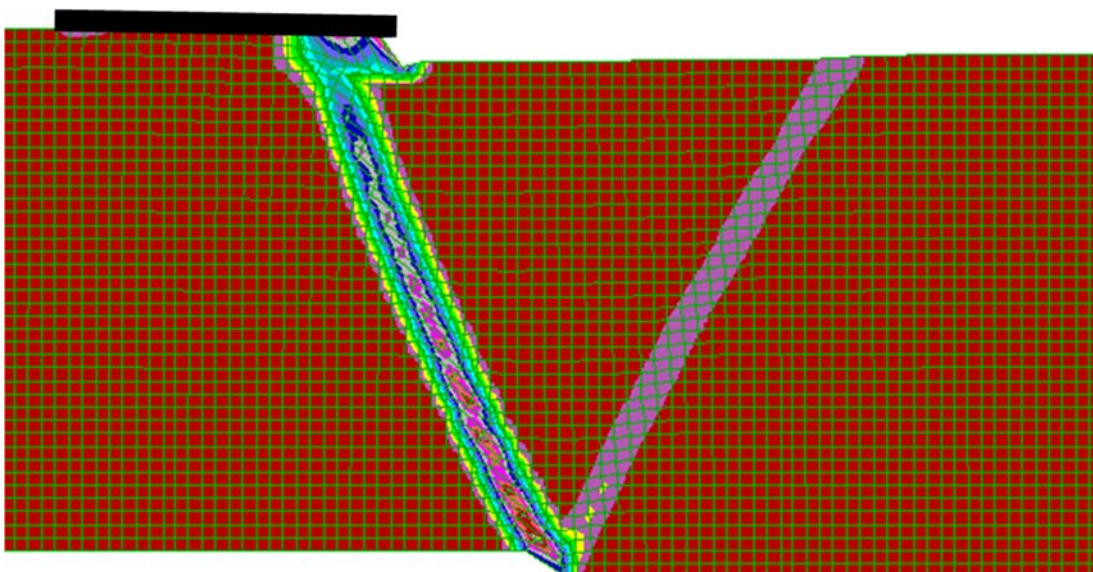
A.2. Αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος - θεμελίου πλάτους $B=12.5\text{m}$ τοποθετημένου σε απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

Στη συνέχεια της διερεύνησης, εξετάστηκε η προηγούμενη περίπτωση αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος-θεμελίου τοποθετημένου στην θέση $C=12\text{m}$, με μόνη διαφορά την αύξηση του πλάτους του θεμελίου από $B=4\text{m}$ σε $B=12.5\text{m}$. Η αύξηση αυτή έγινε με το σκεπτικό ότι σε αυτές τις αναλύσεις αναμένεται εμφανέστερη η επίδραση της κατασκευής και του ανασηκώματός της, λόγω μεγαλύτερου πλάτους. Στα **Σχήματα A.2.1, A.2.2** και **A.2.3** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της στρώσης για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ και

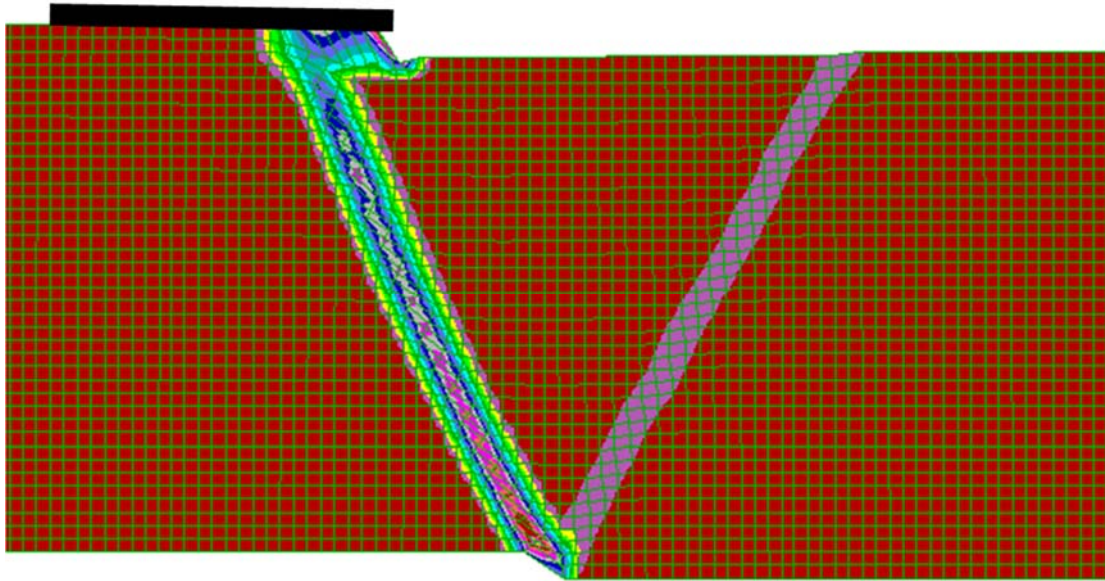
φορτία κατασκευής $q=100, 50$ και 25kPa (όπως ακριβώς έγινε στην παράγραφο Α.1 για το θεμέλιο πλάτους $B = 4\text{m}$).



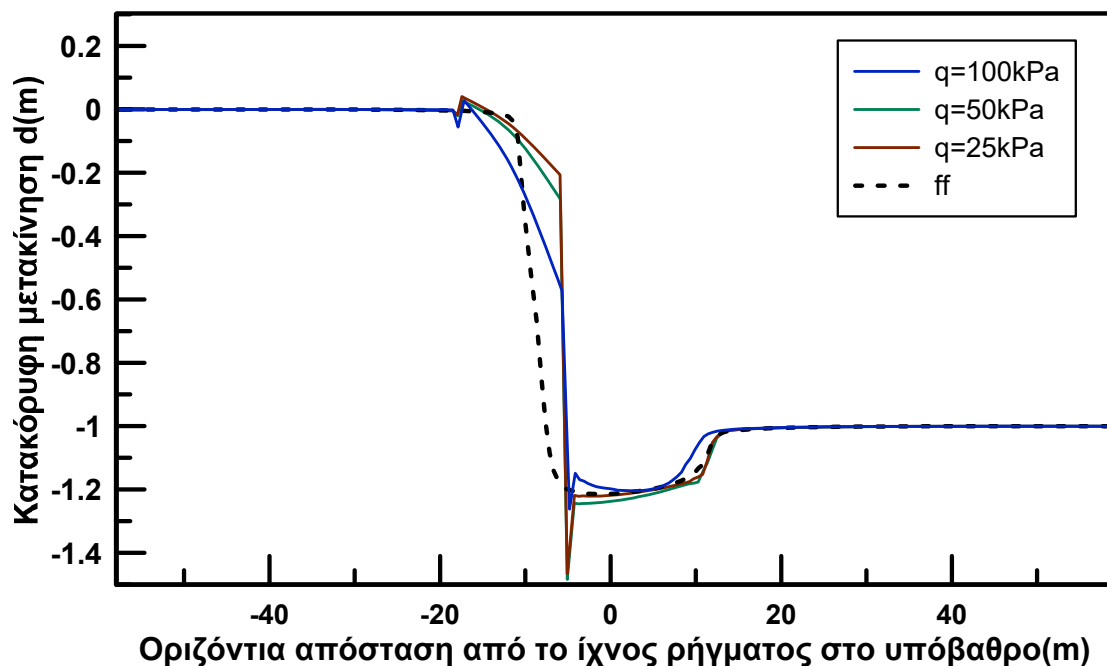
Σχήμα Α.2.1: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=12.5\text{m}$, $q=100\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.2.2: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=12.5\text{m}$, $q=50\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.2.3.: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0\text{m}$ με κατασκευή ($B=12.5\text{m}$, $q=25\text{kPa}$) σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.2.4 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=12.5\text{m}$ και φορτίου $q=100, 50$ και 25kPa σε οριζόντια απόσταση $C=12\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

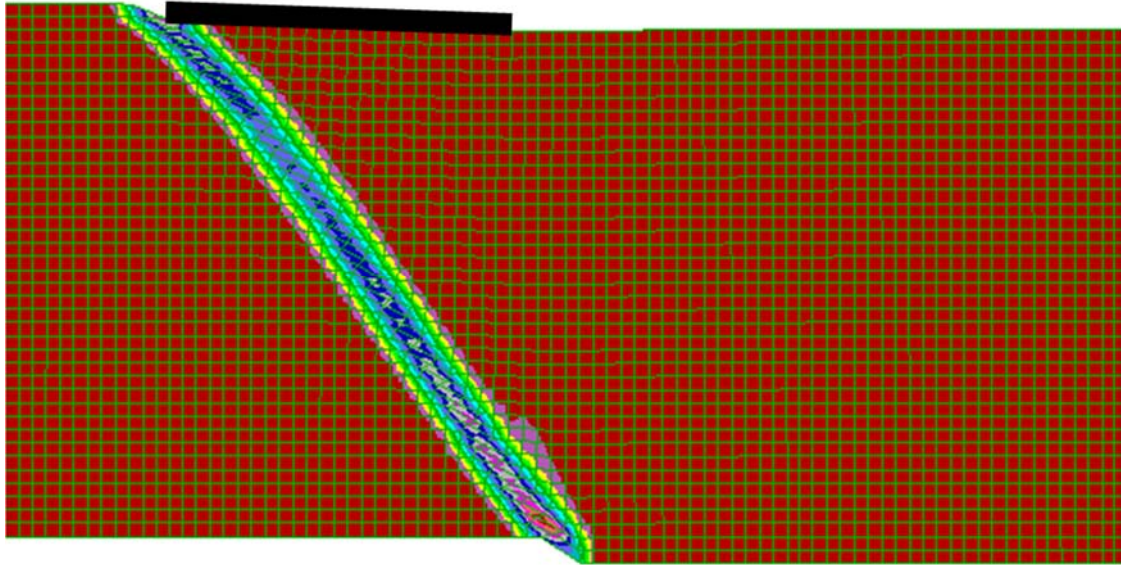
Η μελέτη των σχημάτων αυτών υποδεικνύει σαφέστερη αποκόλληση της άκρης του θεμελίου, όσο μειώνεται το φορτίο. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις προηγούμενες

αναλύσεις θεμελίου πλάτους $B=4\text{m}$ όπου δεν υπήρχε αποκόλληση για φορτίο κατασκευής $q=100\text{kPa}$, με την αύξηση του πλάτους σε $B=12.5\text{m}$ παρατηρείται μικρή αποκόλληση στο δεξί άκρο της κατασκευής, ακόμα και σε αυτό το (σχετικά μεγάλο) φορτίο. Επιπλέον, από αυτές τις αναλύσεις καθίσταται εμφανέστερο πως η μείωση του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζεται σταδιακά η εικόνα της διάρρηξης υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου, με την κύρια διάρρηξη να εκτρέπεται στο δεξί άκρο της κατασκευής και την δευτερεύουσα να εμπεδώνεται σιγά-σιγά στο μετακινούμενο τέμαχος. Η σταδιακή προσέγγιση της διάρρηξης στην εικόνα που έχει για συνθήκες ελευθέρου πεδίου, λόγω μείωσης του φορτίου της κατασκευής αποτυπώνεται λεπτομερέστερα στο **Σχήμα Α.2.4**, όπου απεικονίζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος-θεμελίου πλάτους $B=12.5\text{m}$ (στη θέση $C=12\text{m}$) και κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$.

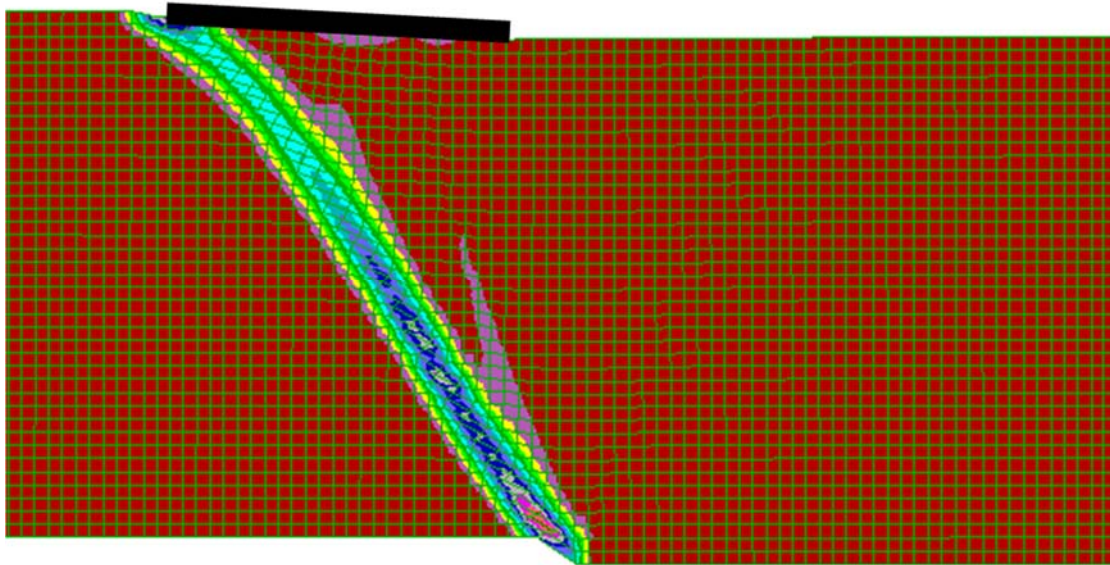
Α.3. Αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος - θεμελίου πλάτους $B=12.5\text{m}$ τοποθετημένου σε απόσταση $C=9\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

Στη συνέχεια, το θεμέλιο πλάτους $B=12.5\text{m}$ μετατοπίστηκε προς το μετακινούμενο τέμαχος, σε απόσταση $C=9\text{m}$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, προκειμένου να διερευνηθεί εάν τα συμπεράσματα που προέκυψαν με βάση την προηγούμενη περίπτωση μεγάλου θεμελίου εξακολουθούν να ισχύουν μετά την αλλαγή της θέσης του. Έτσι, στα **Σχήματα Α.3.1, Α.3.2 και Α.3.3** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για μετατόπιση ρήγματος $d=1.0\text{m}$ και φορτίο κατασκευής ίσο με $q=100, 50$ και 25kPa , αντίστοιχα.

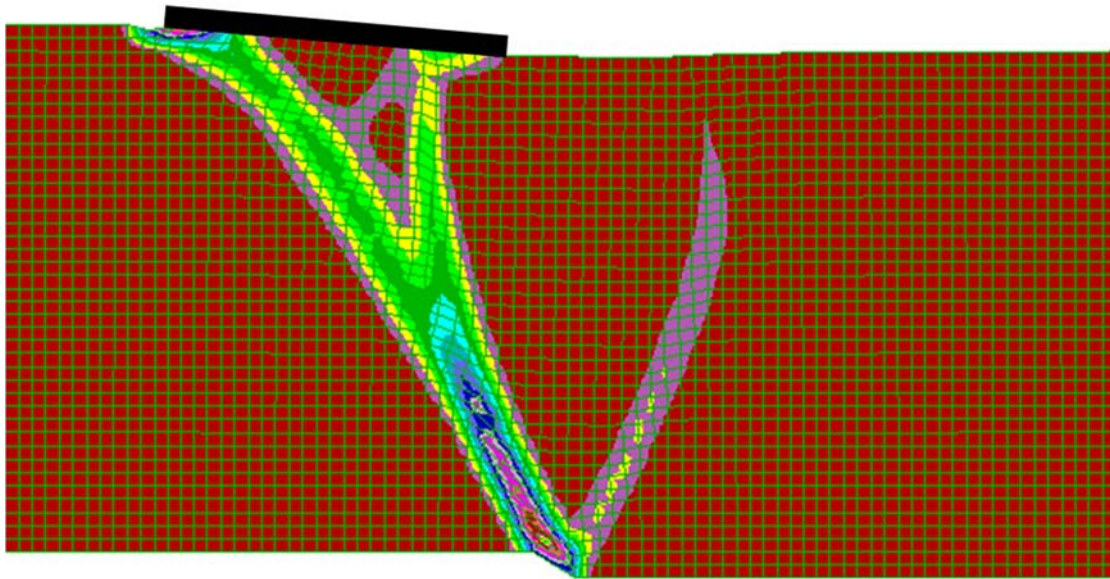
Παρατηρείται πως η αλλαγή της θέσης του θεμελίου έχει ως αποτέλεσμα την εκτροπή της διάρρηξης προς το σταθερό τέμαχος χωρίς δημιουργία δευτερεύουσας διάρρηξης, όταν το φορτίο είναι επαρκώς μεγάλο (π.χ. $q=100\text{kPa}$), δηλαδή μια εικόνα που δεν έχει σχέση με εκείνη του ελευθέρου πεδίου. Όμως, με τη μείωση του προκύπτει μικρότερη εκτροπή της (κύριας) διάρρηξης και ταυτόχρονη ανάδυση δευτερεύουσας διάρρηξης προς το μετακινούμενο τέμαχος. Για φορτίο $q=25\text{kPa}$, δημιουργείται κατακρήμνισμα και η εικόνα της διάρρηξης προσεγγίζει περισσότερο εκείνη της προηγούμενης θέσης του θεμελίου ($C=12\text{m}$) αλλά και του ελευθέρου πεδίου. Σε σχέση με το ανασήκωμα, η κατασκευή εδώ έχει συγκριτικά μικρότερη αποκόλληση απ' ότι για $C = 12\text{m}$. Συγκεκριμένα, για φορτία ίσα με $q=100$ και 50kPa δεν προκύπτει καθόλου ανασήκωμα του θεμελίου, ενώ ελάχιστη αποκόλληση της συμβαίνει όταν το φορτίο μειώνεται στα 25kPa . Για να προσεγγιστεί η εικόνα του ελευθέρου πεδίου θα πρέπει να μειωθεί κι άλλο το φορτίο, δηλαδή σε τιμή μικρότερη από $q=12.5\text{kPa}$ προκειμένου να μην υπάρχει εκτροπή της διάρρηξης και να μοιάζει η εικόνα με εκείνη του ελευθέρου πεδίου, όπως και φαίνεται στο **Σχήμα Α.3.4**.



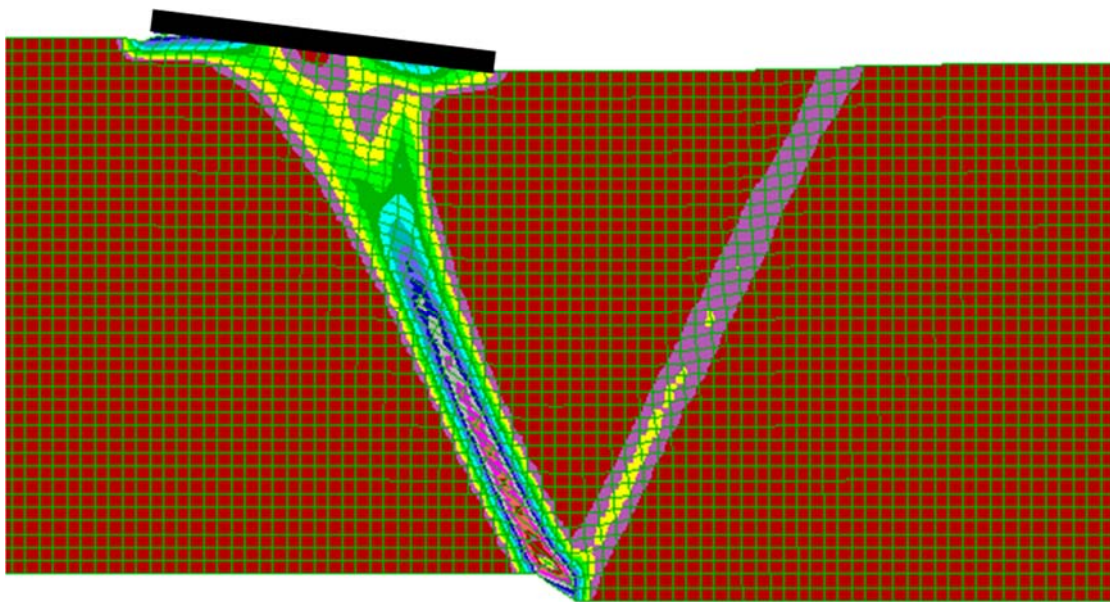
Σχήμα Α.3.1: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=12.5m$, $q=100kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=9m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα Α.3.2: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Τογoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=12.5m$, $q=50kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=9m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



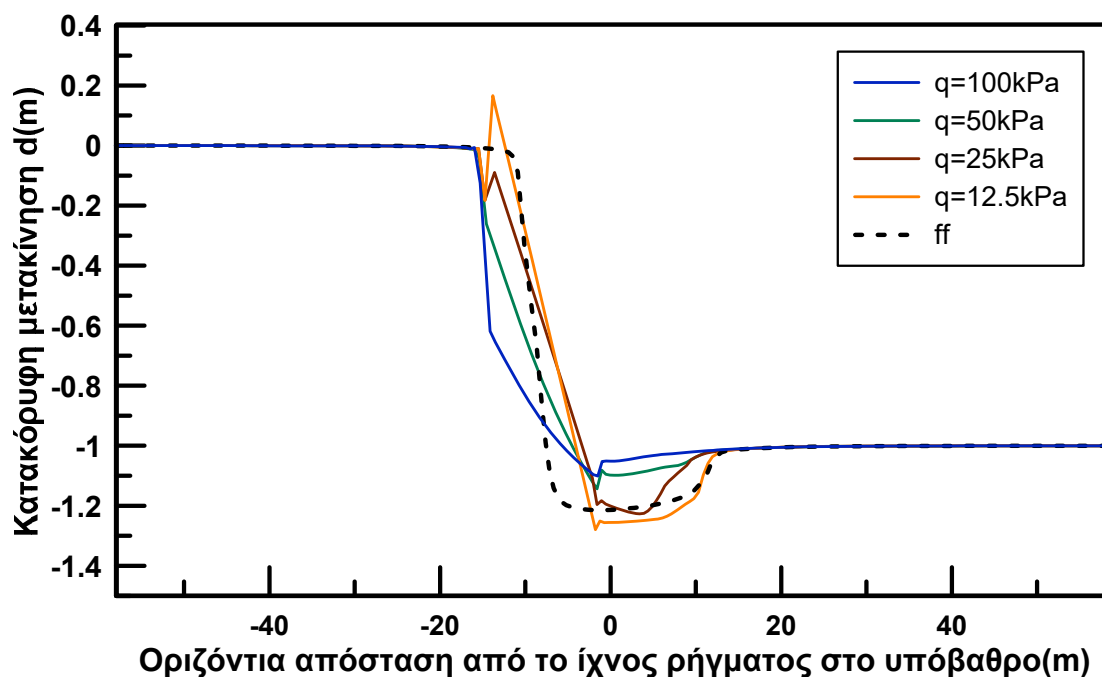
Σχήμα A.3.3: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=12.5m$, $q=25kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=9m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.



Σχήμα A.3.4: Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m με «οριζόντια δομή» κόκκων ($\delta=0^\circ$) και $D_r=65\%$ για διάρρηξη κανονικού ρήγματος $\beta=45^\circ$ με $d=1.0m$ με κατασκευή ($B=12.5m$, $q=12.5kPa$) σε οριζόντια απόσταση $C=9m$ από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο.

Σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες περιπτώσεις στο **Σχήμα A.3.5** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους, για αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος και θεμελίου πλάτους $B=12.5m$, στη θέση $C=9m$ και φορτίου $q=100, 50, 25$ και $12.5kPa$.

Το Σχήμα επιβεβαιώνει την προσέγγιση της εικόνας διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο με την μείωση του φορτίου.



Σχήμα Α.3.5 Παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας $\beta=45^\circ$ και για επιβαλλόμενη μετακίνηση $d = 1.0\text{m}$ για την περίπτωση κατασκευής πλάτους $B=12.5\text{m}$ και φορτίου $q=100, 50, 25$ και 12.5kPa σε οριζόντια απόσταση $C=9\text{m}$ από το ίχνος ρήγματος στο υπόβαθρο.

Α.4. Συμπεράσματα

Μέσω της παραπάνω αδρής διερεύνησης της επίδρασης του φορτίου στην αποκόλληση της κατασκευής στο πρόβλημα αλληλεπίδρασης διάρρηξης κανονικού ρήγματος-θεμελίου προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (Α) Η μείωση του φορτίου της κατασκευής την καθιστά πιο ευαίσθητη σε αποκόλληση κατά την διάρρηξη ρήγματος. Η αύξηση του πλάτους της κατασκευής ενισχύει την πιθανότητα παρατήρησης ανασηκώματος, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει πως δεν μπορεί να συμβεί και σε θεμέλια μικρού σχετικά πλάτους. Συγκριτικά, το φορτίο της κατασκευής φαίνεται να παίζει σημαντικότερο ρόλο στο αν θα προκύψει ανασήκωμα σε σχέση με το πλάτος της, για την ίδια πάντα θέση κατασκευής.
- (Β) Η μείωση του φορτίου της κατασκευής οδηγεί στην προσέγγιση της διάρρηξης που προκύπτει για διάδοση σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου, ακόμα και στις περιπτώσεις θεμελίων μεγάλου πλάτους. Το φορτίο για το οποίο προσεγγίζονται οι συνθήκες ελευθέρου πεδίου είναι συνάρτηση τόσο της θέσης όσο και του πλάτους της κατασκευής και ενδέχεται να είναι αρκετά μικρό (πολύ ελαφρές κατασκευές).

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. (2007b). “Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: part II, analysis of the Kocaeli case histories.” *Bull. Earthquake Eng.*, 5(3),277–301
- Baziar, M. H., Nabizadeh, A., & Jabbari, M. (2014). “Numerical modeling of interaction between dip-slip fault and shallow foundation” *Bull. Earthquake Eng.*, 13(6),1613–1632
- Been, K. and Jefferies, M. G. (1999), “A state parameter for sands”, *Geotechnique*, 35 (2), 99-112
- Berrill J.B. (1983). “Two dimensional analysis of the effect of fault rupture on buildings with shallow foundations.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2(3),156-160.
- 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., 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
- Byrne, P. M., Park, S. S., Beaty, M., Sharp, M., Gonzalez, L., and Abdoun, T. (2004). “Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests.” *Canadian Geotech. J.*,41(2),193–211.
- Cai, Q.P., and Ng, C.W.W. (2016). “Centrifuge modeling of pile-sand interaction induced by normal faulting.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142(10), 04016046
- Chaloulos, Y.K., Papadimitriou, A.G. and Dafalias, Y.F. (2019). “Fabric effects on strip footing loading of anisotropic sand.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(10), 04019068
- Li XS, Dafalias YF (2012). “Anisotropic critical state theory: role of fabric.” *J. Eng. Mech.*, ASCE 138(3),263–275
- Loukidis, D., Bouckovalas, G.D. and Papadimitriou, A.G. (2009). “Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(11-12), 1389-1404.
- Moosavi S.M., Jafari M. K., Kamalian M., Shafiee A. (2010). “Experimental investigation of reverse fault rupture- rigid shallow foundation interaction.” *Int. J. Civ. Eng.*, 8(2),85–98

- Oettle, N. K., and Bray, J. D. (2013a). "Fault rupture propagation through previously ruptured soil." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139:1637–1647.
- Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2016). "Numerical procedures for simulating earthquake fault rupture propagation." *Int. J. Geomech.*, 17(1), 04016025
- Papadimitriou, A.G., Chaloulos, Y.K. & Dafalias (2019), Y.F. "A fabric-based sand plasticity model with reversal surfaces within anisotropic critical state theory." *Acta Geotech.* 14, 253–277
- Rokonuzzaman, M., Nahas, A. E., & Sakai, T. (2014). "Experimental validation of a numerical model for the interaction of dip-slip normal fault ruptures, sand deposits, and raft foundations." *J. Geotech. Engrg.*, 9(3), 239–250.
- Scott, R.F., and Schoustra, J.J. (1974). "Nuclear power plant sitting on deep alluvium." *J. Geotech. Engrg. Div.*, 100(4), 449-459
- Skempton A.W., and MacDonald D.H. (1956). "Allowable settlement of buildings". *Proc. ICE*, Part III, Vol. 5., p. 727–68.
- Thelerti P. (2017). "Numerical Simulation of the Fault Rupture Propagation Through Anisotropic Soil", Diploma Thesis, School of Civil Engineering, National Technical Univ., Athens, Greece (in Greek)
- Varela M. (2018): "Numerical Simulation of Fault-Structure Interaction in Anisotropic Soil", Diploma Thesis, School of Civil Engineering, National Technical Univ., Athens, Greece (in Greek)
- Wahls H.E. (1990), "Synthesis of Highway Practice 159: Design and Construction of Bridge Approaches", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.