



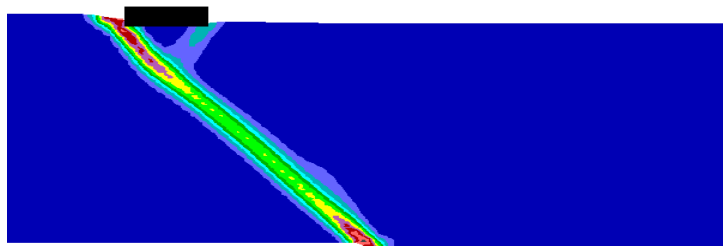
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ  
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ -  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟ ΕΛΑΦΟΣ**

**ΜΑΡΙΑ-ΑΝΘΗ ΒΑΡΕΛΑ**

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



Diploma Thesis

**NUMERICAL SIMULATION OF FAULT -  
STRUCTURE INTERACTION IN  
ANISOTROPIC SOIL**

**MARIANTHI VARELA**

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

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/OCTOBER 2018

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση των σπουδών μου ως Πολιτικός Μηχανικός αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερά μου όνειρα και η πραγματοποίησή της δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τους ανθρώπους που μου στάθηκαν από την αρχή έως το τέλος.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αχιλλέα Παπαδημητρίου, που με την υπομονή και επιμονή του κατάφερα να ολοκληρώσω σωστά και έγκαιρα την διπλωματική μου, επιτυγχάνοντας έτσι τον στόχο μου. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εξαιρετική επικοινωνία και συνεργασία του μέχρι και την τελευταία στιγμή της ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας καθώς και την μεταδοτικότητά του, που με βοήθησε να κατανοήσω πολλά θέματα που αφορούν τον γεωτεχνικό κλάδο του επαγγέλματος.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά όλα τα μέλη της οικογένειάς μου. Από την πρώτη στιγμή που μπήκα στην σχολή μέχρι και την τελευταία μέρα της παρουσίασης της διπλωματικής μου, δεν έχουν σταματήσει να με πειράζουν για το ασταμάτητο διάβασμά μου και το ατελείωτο τρέξιμο, λόγω των υποχρεώσεων της σχολής. Ωστόσο, υπήρξαν το στήριγμά μου και με ενθάρρυναν συνεχώς στις πιεστικές περιόδους της σχολής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες μου, που με το εξαιρετικό τους χιουμορ και με την συνεχή υποστήριξή τους, τόσο σε επίπεδο μαθημάτων όσο και στην ενθάρρυνση της ολοκλήρωσης των σπουδών μου, η φοίτησή μου στην σχολή ολοκληρώνεται με πολλές ευχάριστες αναμνήσεις και όμορφες στιγμές.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής μέσω επιφανειακής στρώσης ανισοτροπικής άμμου. Η διερεύνηση γίνεται με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε 2 διαστάσεις, χρησιμοποιώντας δύο μη-γραμμικά καταστατικά προσομοιώματα: ένα απλουστευμένο ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb με χαλάρωση (σε συμφωνία με την πλειονότητα της σχετικής βιβλιογραφίας) και ένα σοφιστευμένο προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης (SANISAND) που λαμβάνει υπόψη την εξελισσόμενη ανισοτροπία δομής των κόκκων της άμμου. Οι αναλύσεις είναι ψευδοστατικές, η διάρρηξη στο βράχο προσομοιώνεται με σταδιακή επιβολή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στον τύπο και τη γωνία βύθισης του ρήγματος στη βάση και την πλευρά του τμήματος του καννάβου που αντιστοιχεί στο κινούμενο τέμαχος.

Αρχικώς το απλουστευμένο προσομοίωμα βαθμονομήθηκε ώστε να αποδίδει, κατά το δυνατόν, τις προβλέψεις του SANISAND σε στραγγιζόμενες δοκιμές. Στη συνέχεια, διακριβώθηκε ικανοποιητική ακρίβεια από τη χρήση και των δύο προσομοιωμάτων σε προσομοίωση δοκιμής φυγοκεντριστή για τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης χωρίς κατασκευή στην επιφάνεια (δηλαδή σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου). Στη συνέχεια, το ως άνω βαθμονομημένο απλουστευμένο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων για διαφορετικές θέσεις μιας επιφανειακής άκαμπτης κατασκευής (θεμέλιο μορφής λωρίδας, πλάτους  $B=4\text{m}$ ) υπό διάρρηξη κανονικού ( $\beta=45^\circ$ ), «κατακόρυφου» ( $\beta=85^\circ$ ) και ανάστροφου ( $\beta=135^\circ$ ) ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης πάχους 20m. Η διερεύνηση έδειξε ότι αν η κατασκευή βρίσκεται πλησίον της θέσης ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, τότε η διάρρηξη εκτρέπεται. Σε τέτοιες θέσεις όπου η αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής είναι έντονη, μια αύξηση του φορτίου προκαλεί αύξηση της στροφής και της (μέσης) καθίζησης της κατασκευής για κανονικό ρήγμα. Αντίστοιχα αποτελέσματα επιφέρει η αύξηση του φορτίου και στην περίπτωση «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά με την διαφορά ότι εμφανίζεται και εκτροπή της διάρρηξης στην άλλη πλευρά της κατασκευής. Αντιθέτως, για ανάστροφο ρήγμα, η αύξηση του φορτίου κατασκευής μειώνει τόσο τη στροφή όσο και τη (μέση) καθίζηση της κατασκευής, χωρίς εκτροπή της διάρρηξης.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση επιλεγμένων αποτελεσμάτων του απλουστευμένου προσομοιώματος με τα αντίστοιχα αποτελέσματα με χρήση του προσομοιώματος SANISAND για τη συνήθη «οριζόντια» δομή κόκκων (που δημιουργείται με οριζόντιο επίπεδο απόθεσης λόγω βαρύτητας). Η σύγκριση υπέδειξε ότι υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου το απλουστευμένο προσομοίωμα προσφέρει αντίστοιχες προβλέψεις με το σοφιστευμένο σε διαρρήξεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά απαιτεί συγκριτικά μικρότερη μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος. Όμως, ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους οδηγεί τα δύο προσομοιώματα να δίνουν διαφορετική εικόνα εκτροπής της διάρρηξης συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο για τις περιπτώσεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος.

Αντίθετα, για κατασκευή υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, τα δύο προσομοιώματα δίνουν συγκρίσιμη εικόνα διάρρηξης, με το απλουστευμένο να απαιτεί, και πάλι, μικρότερη μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυσή της. Συνολικά, οι αναλύσεις με το

απλουστευμένο προσομοίωμα ποσοτικά μάλλον υπερεκτιμούν τις καθιζήσεις της κατασκευής υπό διάρρηξη κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά έχουν αποδεκτή ακρίβεια για ανάστροφο ρήγμα. Σε όρους στροφής της κατασκευής, το απλουστευμένο προσομοίωμα προβλέπει λανθασμένα απομείωση της στροφής για μεγάλες μετατοπίσεις κανονικού ρήγματος, ενώ αντίθετα για «κατακόρυφο» ρήγμα οι προβλέψεις είναι συγκρίσιμες με εκείνες του σοφιστευμένου προσομοιώματος. Επίσης, το απλουστευμένο προσομοίωμα υπερεκτιμά την ευεργετική επίδραση του φορτίου της κατασκευής στη στροφή της υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.

Τέλος, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα SANISAND έγινε μελέτη του εύρους της πιθανής επίδρασης του προσανατολισμού της δομής των κόκκων στην αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής. Η μελέτη έγινε με σύγκριση αποτελεσμάτων για αρχικώς «οριζόντια» δομή κόκκων, με αποτελέσματα αναλύσεων για αρχικώς «κατακόρυφη» δομή κόκκων, δηλαδή τον προσανατολισμό που προκύπτει αν η «οριζόντια» δομή κόκκων περιστραφεί κατά 90°. Οι συγκρίσεις αυτές υπέδειξαν ότι για κατασκευή με μικρό φορτίο, η θέση ανάδυσης της κύριας διάρρηξης κανονικού ρήγματος δεν επηρεάζεται από τον προσανατολισμό δομής των κόκκων. Ωστόσο, για «κατακόρυφη» δομή κόκκων, παρατηρούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις κάτω από την κατασκευή, ενώ η ανάδυση της διάρρηξης απαιτεί μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος. Σε «κατακόρυφο» ρήγμα, η διάρρηξη αναδύεται στην ίδια πλευρά της κατασκευής με μικρό φορτίο και για τους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων. Σε ανάστροφο ρήγμα, για την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής κόκκων η διάρρηξη εκτρέπεται και αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής με μικρό φορτίο, χωρίς να υπάρχει ανάπτυξη δευτερεύουσας διάρρηξης, και απαιτεί μικρότερη κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος για ανάδυση της διάρρηξης. Επιπλέον, η αύξηση του φορτίου κατασκευής εκτρέπει τη διάρρηξη κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος προς το σταθερό τέμαχος δημιουργώντας δευτερεύουσες διαρρήξεις κάτω από την κατασκευή, και για τους δύο αρχικούς προσανατολισμούς κόκκων. Αντιθέτως, το φορτίο κατασκευής δε διαφαίνεται να επηρεάζει τη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος και για τους δύο αρχικούς προσανατολισμούς δομής κόκκων, ένα αποτέλεσμα μη-επίδρασης που αποδίδεται στο ότι η επιλεγείσα χαρακτηριστική θέση κατασκευής δεν προκαλεί έντονη αλληλεπίδραση με τη διάρρηξη (είχε επιλεγεί με βάση το απλουστευμένο προσομοίωμα) και στο ότι απαιτείται μεγαλύτερη μετατόπιση για την ανάδυση διάρρηξης σε ανάστροφα ρήγματα συγκριτικά με τους άλλους τύπους ρηγμάτων.

Συμπερασματικά, το πρόβλημα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, και στην πράξη απαιτεί εκτέλεση εξειδικευμένων αναλύσεων για κάθε περίπτωση, καθώς επηρεάζεται από το είδος και τη μετατόπιση του ρήγματος, τα χαρακτηριστικά της αμμώδους στρώσης (πάχος, σχετική πυκνότητα, ανισοτροπία), αλλά και τα χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής (διαστάσεις, ακαμψία, θέση ως προς το ίχνος του ρήγματος). Όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία, τα σοφιστευμένα προσομοιώματα προσφέρουν αυξημένη ακρίβεια συγκριτικά με τα απλουστευμένα προσομοιώματα που προσφέρονται προς χρήση σε όλους τους εμπορικούς κώδικες πεπερασμένων στοιχείων ή/και διαφορών. Επιπλέον, οι τρέχουσες υπολογιστικές δυνατότητες καθιστούν τις αναλύσεις με σοφιστευμένα προσομοιώματα απολύτως ρεαλιστικές επιλογές που θα πρέπει να έχουν προτεραιότητα στην έρευνα και την πράξη.

## ABSTRACT

The scope of this work is the numerical investigation of the fault-structure interaction through a surface layer of anisotropic sand. The investigation is performed with the finite difference method in 2 dimensions, using two non-linear constitutive models: a simplified elasto-plastic Mohr-Coulomb model with strain softening capabilities (in agreement with most of the related published literature) and a sophisticated Critical State model (named SANISAND) that accounts for the evolving anisotropy of the sand fabric. The analyses are pseudo-static and the fault displacement that corresponds to the type and the dip angle of the fault is gradually applied at the base and the side of the footwall section of the mesh.

Initially, the simplified model was calibrated to provide similar predictions to what the SANISAND model does in simulations of drained element tests. Then, satisfactory accuracy was obtained by the use of both models in the simulation of a centrifuge test related to the rupture of a normal fault through a sand layer without a structure at the ground surface (free field conditions). In the sequel, the thus-calibrated simplified model was used in a series of parametric analyses for different locations of a rigid structure (strip footing of width  $B=4\text{m}$ ) at the ground surface of a 20m thick sand layer, undergoing rupture of normal (dip angle  $\beta=45^\circ$ ), an (almost) vertical ( $\beta=85^\circ$ ) and a reverse fault ( $\beta=135^\circ$ ). The investigation revealed that if the structure is near the location where the rupture surfaces under free field conditions, the rupture is diverted. At such locations where the fault-structure interaction is intense, an increase of the structural load imposes an increase of the rotation and the (mean) settlement of the structure induced by a normal fault rupture. Similar effects of load increase are obtained under “vertical” fault rupture, with the difference being a diversion of the rupture to the other side of the structure. On the contrary, structural load increase for a reverse fault, reduces the rotation and the (mean) settlement of the structure without a diversion of the rupture.

In the sequel, selected results from using the simplified model are compared to the respective results from using the sophisticated SANISAND model for the usual “horizontal” sand fabric, i.e. the fabric with a horizontal deposition plane under gravity. The comparison shows that under free field conditions the simplified model provides similar results with the sophisticated model for the cases of normal and “vertical” fault rupture, while it requires comparatively smaller fault displacement for surfacing of a reverse fault rupture. However, the existence of a structure at the ground surface leads the two models to predict different rupture diversions in comparison to free field conditions for the cases of normal and “vertical” faults. On the contrary, for a structure under displacement of a reverse fault the two models give comparable ruptures, with the simplified model requiring again smaller fault displacement for rupture surfacing. On the whole, the analyses with the simplified model generally overestimate (mean) structure settlements under normal and “vertical” fault ruptures, but provide acceptable accuracy for the reverse fault. In terms of structure rotation, the simplified model erroneously predicts a reduction of rotation angle for large normal fault displacements, while for “vertical” faults its predictions are comparable to those of the sophisticated model. Also, the simplified model overestimates the beneficial effect of the structural load on its rotation under reverse fault rupturing.

Finally, the SANISAND model was used to study the range of potential effects of the sand fabric orientation on fault-structure interaction. The study was performed by comparing the results for an initially “horizontal” sand fabric to those from analyses for an initially “vertical” sand fabric, i.e. the fabric orientation that appears via a rotation of the “horizontal” fabric by 90°. These comparisons show that for a lightly loaded structure the location of the primary normal fault rupture surfacing is not affected by the sand fabric orientation. However, for “vertical” sand fabric, secondary ruptures appear under the structure, while the rupture surfacing requires larger fault displacement. For a “vertical” fault, the rupture surfaces on the same side of the lightly loaded structure for both sand fabric orientations. For a reverse fault, in the case of “vertical” sand fabric the rupture deviates and appears on the left side of the lightly loaded structure and for smaller fault displacement, without the appearance of a secondary rupture. In addition, an increase of the structural load deviates the rupture of normal and “vertical” faults towards the stationary block and creates secondary ruptures under the structure, for both sand fabric orientations. On the contrary, the structural load does not seem to affect the reverse fault rupture for both initial sand fabric orientations, a result that is attributed to the selected location of the structure (that was selected on the basis of the analyses with the simplified model) and to the fact that reverse faults require more displacement to rupture all the way to the ground surface in comparison to the other types of faults.

In conclusion, the problem of fault-structure interaction is very complicated, thus requiring case-specific analyses, since it is affected by the type and displacement of the fault, the characteristics of the sand layer (thickness, relative density, anisotropy) and the characteristics of the structure itself (dimensions, stiffness, location with respect to the fault trace). As deduced from this work, sophisticated models provide increase accuracy in comparison to simplified models that are offered in all commercial finite element or finite difference codes. In addition, currently available computational capabilities make analyses with sophisticated models realistic options that should have priority in research and practice.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

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

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

2.1 Επί τόπου παρατηρήσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.....	3
2.2 Πειραματικές προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.....	3
2.3 Αριθμητικές προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.....	6

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΚΑΙ ΣΟΦΙΣΤΕΥΜΕΝΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ**

3.1 Εισαγωγή.....	9
3.2 Αρχές προσομοιώματος SANISAND.....	9
3.2.1 Γενικά.....	9
3.2.2 Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής A.....	10
3.2.3 Επίδραση του A στη διαστολικότητα.....	11
3.2.4 Ακρίβεια SANISAND στην προσομοίωση.....	13
3.3 Απλουστευμένη καταστατική προσομοίωση.....	14
3.4 Προσομοίωση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμόδους στρώσης.....	16

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΣ ΕΛΑΦΟΣ**

4.1 Εισαγωγή.....	21
4.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος με την κατασκευή στη θέση C=12m.....	24
4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με την κατασκευή στη θέση C=3m.....	33



<b>4.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με την κατασκευή στη θέση C=16m.....</b>	<b>41</b>
<b>4.5 Επίδραση αύξησης του φορτίου κατασκευής.....</b>	<b>49</b>
4.5.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος με κατασκευές διαφορετικού φορτίου... .....	49
4.5.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με κατασκευές διαφορετικού φορτίου.....	53
4.5.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατασκευές διαφορετικού φορτίου. .....	57
<b>4.6 Συμπεράσματα.....</b>	<b>61</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΗ ΣΤΡΩΣΗ**

<b>5.1 Εισαγωγή .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 Διάρρηξη κανονικού ρηγμάτος .....</b>	<b>64</b>
5.2.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου.....	64
5.2.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής.....	67
<b>5.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρηγμάτος .....</b>	<b>70</b>
5.3.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου.....	70
5.3.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής.....	72
<b>5.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.....</b>	<b>76</b>
5.4.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου.....	76
5.4.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής.....	78
<b>5.5 Επίδραση φορτίου κατασκευής .....</b>	<b>82</b>
5.5.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος.....	82
5.5.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος .....	86
5.5.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος .....	91
<b>5.6 Συμπεράσματα.....</b>	<b>96</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΗ ΣΤΡΩΣΗ**

<b>6.1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Διάρρηξη κανονικού ρήγματος</b>	<b>100</b>
<b>6.3</b>	<b>Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος</b>	<b>105</b>
<b>6.4</b>	<b>Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος</b>	<b>109</b>
<b>6.5</b>	<b>Επίδραση φορτίου κατασκευής</b>	<b>114</b>
6.5.1	Διάρρηξη κανονικού ρήγματος	114
6.5.2	Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος	119
6.5.3	Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος	124
<b>6.6</b>	<b>Εξέλιξη καθίζησης και στροφής κατασκευής με τη μετατόπιση ρήγματος</b>	<b>129</b>
6.6.1	Διάρρηξη κανονικού ρήγματος	129
6.6.2	Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος	119
6.6.3	Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος	132
<b>6.7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>138</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

<b>7.1</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>141</b>
<b>7.2</b>	<b>Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b>	<b>144</b>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Αντικείμενο

Η διάδοση της διάρρηξης ενός ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης είναι ένα πρόβλημα Πολιτικού Μηχανικού που απασχολεί την τεχνική έρευνα, καθώς η δόμηση πλησίον ενεργών ρηγμάτων επιτρέπεται μόνο μετά από ειδική μελέτη. Έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες έρευνες ότι η θέση ανάδυσης της διάρρηξης διαφοροποιείται ανάλογα το πάχος και τον τύπο (συνεκτικό ή μη-συνεκτικό) του εδάφους, καθώς και η ιστορία της φόρτισής του (προστερευοποίηση, πυκνότητα). Το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο περίπλοκο, αν υπάρχει (επαρκώς βαριά ή/και δύσκαμπτη) κατασκευή στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς η διάδοση της διάρρηξης επηρεάζεται από τη θέση, το φορτίο, τη δυσκαμψία και το πλάτος της κατασκευής. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση αυτού του προβλήματος αρχικώς με τη χρήση απλουστευμένου προσομοιώματος και στη συνέχεια με τη χρήση σοφιστευμένου προσομοιώματος που λαμβάνει υπόψη του την ανισοτροπία του εδάφους. Οι προσομοιώσεις αυτές στοχεύουν στη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ρήγματος – κατασκευής σε ισοτροπικό και κυρίως ανισοτροπικό έδαφος, δίνοντας τη δυνατότητα να διερευνηθεί και το σχετικό λάθος από τη χρήση απλουστευμένων προσομοιωμάτων.

#### 1.2 Διάρθρωση

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την αλληλεπίδραση ρήγματος με επιφανειακό θεμέλιο, με χρήση επί τόπου παρατηρήσεων, πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι αρχές του σοφιστευμένου προσομοιώματος SANISAND που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και η ακρίβειά του στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου και της διάρρηξης κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης χωρίς επιφανειακό θεμέλιο (από δοκιμή φυγοκεντριστή). Επίσης, παρουσιάζεται η ακρίβεια στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους και της ίδιας δοκιμής φυγοκεντριστή με χρήση ενός απλουστευμένου προσομοιώματος, δηλαδή ενός ελαστοπλαστικού προσομοιώματος με (χαλάρωση) Strain Softening (SS).

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 4** εξετάζεται η επίδραση του φορτίου και της θέσης επιφανειακού άκαμπτου θεμελίου στην διάδοση τριών ειδών ρήγματος (κανονικού, κατακόρυφου και ανάστροφου) μέσω αμμώδους στρώσης με τη χρήση απλουστευμένου προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, διερευνάται η ανάδυση της διάρρηξης για κάθε θέση θεμελίου, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η σχετιζόμενη απόκριση του θεμελίου (καθίζηση, στροφή).

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται χρήση του σοφιστευμένου προσομοιώματος SANISAND για την αλληλεπίδραση ρήγματος – κατασκευής, για διάφορες θέσεις θεμελίου και για τα τρία είδη ρήγματος. Επιπλέον, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του απλουστευμένου προσομοιώματος (από το Κεφάλαιο 4) με εκείνα του σοφιστευμένου προσομοιώματος για «οριζόντια δομή» κόκκων της αμμώδους στρώσης, για τις θέσεις θεμελίου με την εντονότερη επίδραση στην διάρρηξη των ρηγμάτων.

Ακολουθεί το **Κεφάλαιο 6**, όπου μελετάται η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας της άμμου στην αλληλεπίδραση της διάδοσης του ρήγματος (μέσω αμμόδους στρώσης) με το επιφανειακό θεμέλιο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται πάλι το σοφιστευμένο προσομοίωμα SANISAND και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για δύο έντονα διαφορετικές αρχικές δομές κόκκων, μια όπως προκύπτει από την βαρύτητα («οριζόντια δομή», από το Κεφάλαιο 5) και τη δομή που προκύπτει αν περιστραφεί η οριζόντια δομή κατά  $90^\circ$  («κατακόρυφη δομή»).

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

#### **2.1 Επί τόπου παρατηρήσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής**

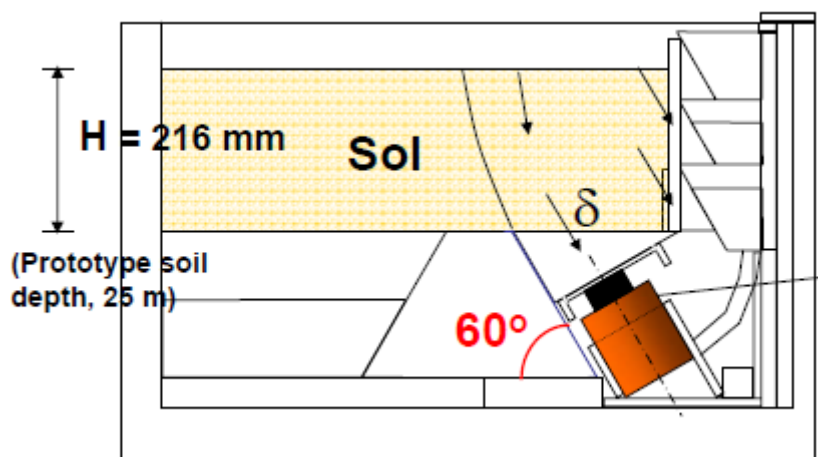
Οι καταστροφικοί σεισμοί το 1999 στην Τουρκία (Kocaeli, Düzce) και στην Ταιβάν (Chi-Chi), προσφέροντας πολυάριθμα περιστατικά καταστροφικών επιπτώσεων επιφανειακής διάρρηξης μεγάλου μεγέθους, έστρεψαν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας εκ νέου στο θέμα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής (π.χ. Anastasopoulos 2005, Anastasopoulos and Gazetas 2007). Η διάρρηξη των ρηγμάτων διαπέρασε αρκετές κατασκευές, εκ των οποίων άλλες κατέρρευσαν και άλλες καταστράφηκαν μερικώς. Ωστόσο, πολλές κατασκευές υπέστησαν ελάχιστες βλάβες κατά την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια. Συγκεκριμένα, σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι η διάρρηξη εξετράπη προκειμένου να αποφύγει την ανάδυσή της στην επιφάνεια ακριβώς κάτω από τις κατασκευές. Σε άλλες περιπτώσεις, η καταστροφή των κατασκευών ήταν ουσιαδής, χωρίς όμως την ύπαρξη οποιασδήποτε δημιουργίας κατακρημνίσματος κοντά στις συγκεκριμένες κατασκευές. Έτσι, η παρουσία κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους πιθανόν να μεταβάλλει την πορεία διάρρηξης ενός ρήγματος από την βάση της εδαφικής στρώσης έως την επιφάνεια. Διαφαίνεται ότι η ακαμψία και το βάρος της κατασκευής είναι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν και σε πλήρη εκτροπή της ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια. Επιπλέον, η απόκριση μιας κατασκευής δεν εξαρτάται μόνο από την θέση της ως προς το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, αλλά επηρεάζεται και από την εκτροπή της ίδιας της διάρρηξης λόγω της ύπαρξής της. Επομένως, γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην διάρρηξη ενός ρήγματος από το υπόβαθρο του εδάφους και στην επιφανειακή κατασκευή. Αυτά τα θέματα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής έχουν μελετηθεί τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, και ενδεικτικές σχετικές εργασίες παρουσιάζονται στις 2 ακόλουθες παραγράφους.

#### **2.2 Πειραματικές προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής**

Η μελέτη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής έχει απασχολήσει ιστορικά πολλές ερευνητικές ομάδες οι οποίες το προσέγγισαν πειραματικά. Εδώ παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες εξ' αυτών, το αντικείμενο των οποίων έχει στενή σχέση με τον τύπο των αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

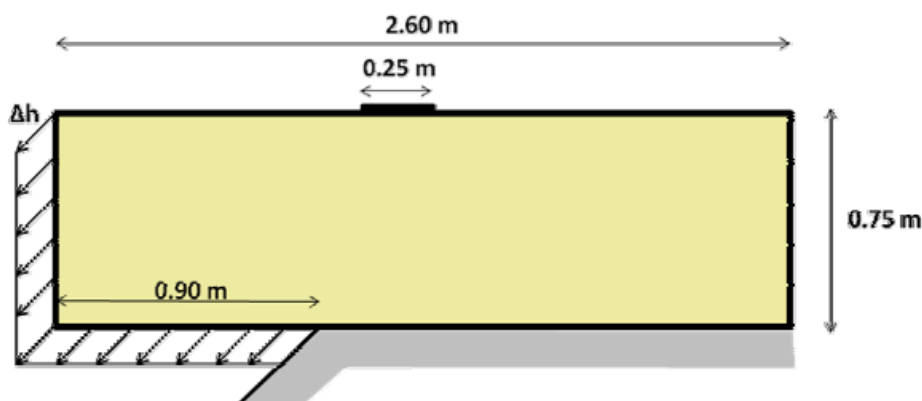
Οι Bransby et al (2008a, 2008b) μελέτησαν την αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος κλίσης  $\beta=60^\circ$  και επιφανειακής κατασκευής, μέσω πειραματικής προσομοίωσης σε φυγοκεντριστή. Η εδαφική στρώση που χρησιμοποιήθηκε είχε πάχος  $H=216\text{mm}$ , για την προσομοίωση πραγματικού πάχους εδάφους  $H=25\text{m}$ , όπου αποτελούταν από άμμο Fontainebleau, με σχετική πυκνότητα  $D_r=60\%$ . Ως κατασκευή θεωρήθηκε ένα άκαμπτο θεμέλιο, πλάτους  $B=10\text{m}$ , και μελετήθηκε η επιρροή του στην διάρρηξη του ρήγματος, για δύο διαφορετικά φορτία,  $q=91\text{kPa}$  και  $q=37\text{kPa}$ . Η κατασκευή τοποθετήθηκε στην θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο. Ύστερα από μετατόπιση του ρήγματος, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση του άκαμπτου και βαρύ θεμελίου, η

διάρρηξη εκτρέπεται και το θεμέλιο αναπτύσσει στροφή. Η τοποθέτηση του ελαφρύτερου ( $q=37\text{kPa}$ ) θεμελίου, εκτρέπει την διάρρηξη του ρήγματος και ενώ παρατηρείται ότι στρέφεται εντονότερα έναντι του βαρύτερου φορτίου ( $q=91\text{kPa}$ ), συμπεραίνοντας ότι η στροφή της κατασκευής εξαρτάται από το στατικό της φορτίο. Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.



**Σχήμα 2.1** Διάταξη πειράματος προσομοίωσης αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος κλίσης  $\beta=60^\circ$  και επιφανειακής κατασκευής, για μετατόπιση ρήγματος  $\delta$  και για πάχος εδαφικής στρώσης  $H=216\text{mm}$ . (Bransby et al. 2008a).

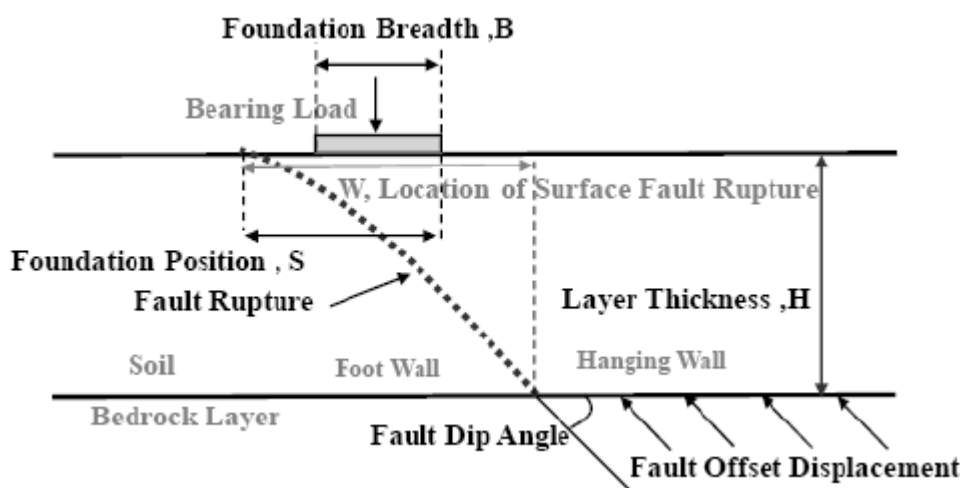
Οι Αναστασόπουλος κ. α. (2008) μελέτησαν και κατασκεύασαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής ΕΜΠ πειραματική διάταξη για την προσομοίωση της διάδοσης διάρρηξης διαμέσου πυκνού αμμώδους εδαφικού σχηματισμού βάθους  $30\text{m}$  και πυκνότητας  $D_r=80\%$ , υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους  $B=10\text{m}$  και στατικού φορτίου  $q=20\text{kPa}$ . Η προσομοίωση αυτού του προβλήματος έγινε μέσω της χρήσης λεπτόκοκκης χαλαζιακής άμμου (Longstone M34) με πάχος  $H=0.75\text{m}$  και την τοποθέτηση πλάκας αλουμινίου πλάτους  $B=25\text{cm}$  ως κατασκευής, σε πείραμα που δεν έγινε σε φυγοκεντρική ( $1g$  model testing). Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη προσομοίωση.



**Σχήμα 2.2** Διάταξη πειράματος προσομοίωσης αλληλεπίδρασης κανονικού ρήγματος κλίσης  $\beta=45^\circ$  και επιφανειακής κατασκευής πλάτους  $B=25\text{cm}$  (Αναστασόπουλος κ.α. 2008).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα δείχνουν ότι η διάρρηξη εκτρέπεται λόγω της ύπαρξης της κατασκευής στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Παράλληλα, παρατηρήθηκε απώλεια στήριξης στην αριστερή άκρη του θεμελίου και για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος, αποκόλληση στο δεξί άκρο της κατασκευής. Επίσης, η κατασκευή στρέφεται έντονα λόγω της εκτροπής της διάρρηξης του ρήγματος.

Μια ακόμη πειραματική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε από τους Moosavi et al. (2010), όπου μελετήθηκε η αλληλεπίδραση ανάστροφου ρήγματος και επιφανειακής κατασκευής όχι σε φυγοκεντρική (1g model testing). Πιο αναλυτικά, το είδος του ρήγματος είναι το ανάστροφο με κλίση  $\beta=135^\circ$  και ως εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκε η άμμος Firsozkooh πυκνότητας  $D_r=85\%$  και πάχους  $H=20\text{cm}$ . Ένα άκαμπτο θεμέλιο πλάτους  $B=50\text{mm}$  τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους για την προσομοίωση εδαφικής κατασκευής. Η γεωμετρία της πειραματικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3).



**Σχήμα 2.3** Γεωμετρία του πειράματος προσομοίωσης της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος κλίσης  $\beta=135^\circ$  υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους  $B=50\text{mm}$  (Moosavi et al 2010).

Το θεμέλιο στο παρόν πείραμα τοποθετήθηκε σε διάφορες θέσεις και με διαφορετικό φορτίο σε κάθε επανάληψη. Συγκεκριμένα, τα φορτία ανωδομής του θεμελίου ήταν  $q=1.25\text{kPa}$ ,  $q=3.75\text{kPa}$  και  $q=8.75\text{kPa}$ , ενώ οι θέσεις τοποθέτησης του θεμελίου προσδιορίζονταν από τον λόγο  $S/B$ , όπου έλαβε τις τιμές  $S/B=1,2,3$  και  $4$ . Ύστερα από την πραγματοποίηση του πειράματος για τους ανωτέρω συνδυασμούς, τα συμπεράσματα που εξάγονται δείχνουν ότι τόσο το φορτίο όσο και η θέση της κατασκευής επηρεάζουν την θέση ανάδυσης της διάρρηξης του ανάστροφου ρήγματος. Παράλληλα, η θέση στην οποία εκτρέπεται η διάρρηξη επηρεάζει με την σειρά του την ακεραιότητα του θεμελίου. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση του θεμελίου είτε στο σταθερό τέμαχος είτε μακριά από την θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, το θεμέλιο δεν επηρεάζει την διάρρηξη και επομένως δεν επηρεάζεται η ακεραιότητά του.



### 2.3 Αριθμητικές προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής

Η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά της θεμελίωσης λόγω διάρρηξης ενός ρήγματος έως την επιφάνεια του εδάφους είναι απαραίτητη για την προστασία των κατασκευών. Η αριθμητική προσομοίωση μπορεί να είναι μια μέθοδος εύκολης διερεύνησης της πορείας διάδοσης ενός ρήγματος, ωστόσο θα πρέπει να επικυρωθεί με ορισμένες πειραματικές δοκιμές. Μόνο όταν επικυρωθεί η αριθμητική μέθοδος, η παραμετρική μελέτη μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση τέτοιων φαινομένων.

Οι Jabbarly et al. (2012) προσομοίωσαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων την αλληλεπίδραση κανονικού ρήγματος κλίσης  $\beta=45^\circ$  και ανάστροφου ρήγματος κλίσης  $\beta=135^\circ$  με επιφανειακή κατασκευή. Οι αναλύσεις έγιναν με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb με χαλάρωση, με τις γωνίες διαστολικότητας  $\psi$  και τριβής  $\phi$  να μειώνονται με την αύξηση της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους, όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

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

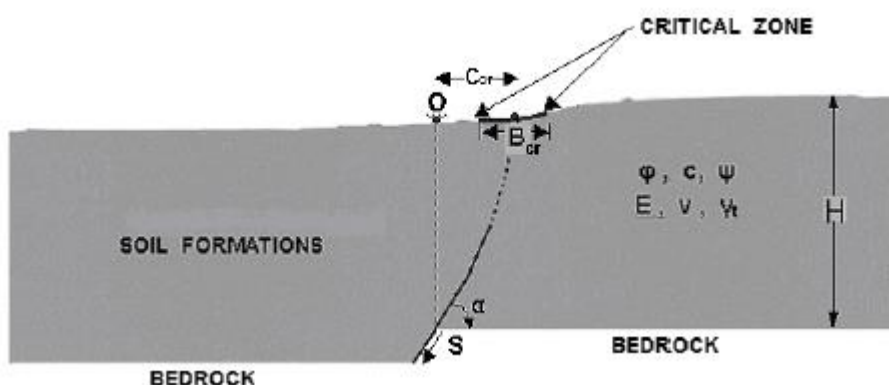
όπου  $\varphi_p$  και  $\varphi_{res}$ = μέγιστη και παραμένουσα (ή κρίσιμη) γωνία τριβής και  $\psi_p$ = μέγιστη γωνία διαστολής,  $\gamma_f^p$ =πλαστική οκταεδρική διατμητική τάση στο τέλος της χαλάρωσης. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την δεδομένη αριθμητική προσομοίωση ήταν το ABAQUS.

Το πάχος της εδαφικής στρώσης ήταν  $H=25m$  για το κανονικό ρήγμα και  $H=15m$  για το ανάστροφο ρήγμα. Οι παράμετροι της κατασκευής που μελετήθηκαν ως προς την επιρροή τους στην αλληλεπίδραση της κατασκευής με τα δύο είδη ρηγμάτων, ήταν το πλάτος  $B$ , το φορτίο ανωδομής  $q$  και η θέση  $s$  της κατασκευής. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα πλάτη  $B=10m$  και  $25m$  για το κανονικό και  $B=10m$  και  $15m$  για το ανάστροφο, συνδυάζοντας τα παράλληλα με τα φορτία  $q=37kPa$  και  $91kPa$ . Η κατασκευή τοποθετήθηκε σε διαφορετικές θέσεις  $s$  για κάθε τύπο ρήγματος ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έδειξαν ότι η αύξηση του φορτίου της κατασκευής μειώνει την στροφή της και εκτρέπει την διάρρηξη μακριά από την κατασκευή, και στις δύο περιπτώσεις ρηγμάτων. Ακόμη, αποδείχθηκε ότι η θέση της κατασκευής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν κατασκευάζεται θεμέλιο κοντά σε ένα ρήγμα. Η τοποθέτηση της κατασκευής κοντά στην θέση ανάδυσης της διάρρηξης οδηγεί σε αυξημένη στροφή της ίδιας της κατασκευής.

Οι Anastasopoulos et al. (2008) μελέτησαν την αλληλεπίδραση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος με κλίση  $\beta=45^\circ$  και  $\beta=60^\circ$  με επιφανειακή κατασκευή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το προσομοίωμα της ανάλυσης ήταν ελαστοπλαστικό ιστροπικό Mohr-Coulomb με χαλάρωση, ενώ το πάχος της εδαφικής στρώσης  $H=0.25$  και  $0.5$  του πλάτους  $B$  της κατασκευής. Για την

κατασκευή, μελετήθηκαν οι παράμετροι του πλάτους, με τιμές  $B=10\text{m}$  και  $20\text{m}$ , του φορτίου  $q$  της ανωδομής και της απόστασης  $s$  από την θέση ανάδυσης υπό ελεύθερο πεδίο. Όσον αφορά τα εδαφικά υλικά εξετάστηκαν δύο κατηγορίες άμμου, μία χαλαρή με γωνία τριβής  $\varphi = 30^\circ$ , παραμένουσα γωνία τριβής  $\varphi_{\text{res}} = 30^\circ$ , γωνία διαστολικότητας  $\psi = 5^\circ$  και μια πυκνή άμμος αντίστοιχα με  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_{\text{res}} = 30^\circ$  και  $\psi=15^\circ$ . Επιπλέον η διατμητική παραμόρφωση διαρροής  $\gamma_y$  παρέμεινε σταθερή είτε στο 1.5% είτε στο 5% και για τις δύο άμμους και η  $\gamma_f$  σταθερή στο 5% και στις δύο περιπτώσεις άμμου. Για το κανονικό ρήγμα, παρατηρήθηκε ότι το φορτίο ανωδομής παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση της κατασκευής. Συγκεκριμένα, αλλάζει το τασικό πεδίο κάτω από την κατασκευή, εκτρέποντας έτσι την διάρρηξη του ρήγματος και παράλληλα μειώνοντας την στροφή της κατασκευής. Ακόμη, η θέση της κατασκευής είναι βασικός παράγοντας μεταβολής της ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια. Τα συμπεράσματα αυτά παρατηρήθηκε ότι αφορούν αντίστοιχα και την περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος.

Ακόμη, οι Athanasopoulos et al. (2007) μελέτησαν την αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής για τις περιπτώσεις του κανονικού και ανάστροφου ρήγματος, με την κλίση του ρήγματος να λαμβάνει τιμές από  $45^\circ$  έως  $80^\circ$  και από  $20^\circ$  έως  $50^\circ$  αντίστοιχα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός ελαστο-πλαστικού μοντέλου με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb χωρίς χαλάρωση. Η προσομοίωση του φαινομένου έγινε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS v.7. Η μετατόπιση  $S$  του εκάστοτε ρήγματος κυμαινόταν από 0.2% έως 5% του πάχους  $H$  της εδαφικής στρώσης. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν υπό την τοποθέτηση κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης, που είχε χαρακτηριστικά ενός οπλισμένου θεμελίου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επιρροή του φορτίου ανωδομής  $q$  της κατασκευής και του πλάτους  $b$ , με την τελευταία παράμετρο να παίρνει τις ίδιες τιμές με το πάχος  $H$  της εδαφικής στρώσης ( $b/H=1$ ). Στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζονται σχηματικά οι παράμετροι που μελετήθηκαν στην παρούσα αριθμητική προσομοίωση. Το συμπέρασμα στο οποίο οδήγησε η διερεύνηση αυτή ήταν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ της διάρρηξης των ρηγμάτων και κατασκευής δίπλα στο ρήγμα, μειώνει την παραμόρφωση της θεμελίωσης της κατασκευής (συγκρινόμενη πάντα με το ελεύθερο πεδίο). Η εργασία προτείνει μάλιστα και διαγράμματα σχεδιασμού για τον προσδιορισμό των αναμενόμενων παραμορφώσεων της κατασκευής.



**Σχήμα 2.4** Γεωμετρία της διάδοσης ρήγματος κλίσης  $\alpha$  υπό την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής πλάτους  $B$ , για το πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Athanasopoulos et al (2007).



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΚΑΙ ΣΟΦΙΣΤΕΥΜΕΝΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

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

Ακόμα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του προσομοιώματος SANISAND ώστε να γίνει κατανοητή η χρήση του στο πλαίσιο της εργασίας, καθώς και η ακρίβειά του στην προσομοίωση της άμμου Toyoura, με μια ομάδα τιμών σταθερών ανεξαρτήτως σχετικής πυκνότητας και επιπέδου τάσεων.

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

#### **3.2 Αρχές προσομοιώματος SANISAND**

##### *3.2.1 Γενικά*

Πρόκειται για ένα απλό ανισοτροπικό προσομοίωμα για άμμους το οποίο βασίζεται στη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης (ACST), η οποία έχει πρόσφατα προταθεί από τους Li & Dafalias (2012). Ειδικότερα, αυτή η θεώρηση συνδυάζεται με ένα προσομοίωμα από την πλατφόρμα καταστατικών προσομοιωμάτων του SANISAND, ακρωνύμιο της απλής (Simple) ανισοτροπικής (ANIsotropic) άμμου (SAND). Η πλατφόρμα αυτή στηρίζεται σε καινοτόμες έρευνες των Manzari & Dafalias (1997) και των Li & Dafalias (2000), οι οποίοι συσχέτισαν την επίδραση των συνόρων και της διόγκωσης των επιφανειών του προσομοιώματος μέσω της παραμέτρου κατάστασης  $\psi$  (Been and Jefferies 1985). Αυτή η πρωτότυπη ιδέα επέτρεψε την προσομοίωση της συμπεριφοράς της άμμου ανεξαρτήτως των αρχικών συνθηκών, με ένα απλό σύστημα μεταβλητών, το οποίο έκτοτε υιοθετήθηκε από ένα μεγάλο αριθμό ελαστο-πλαστικών προσομοιωμάτων τα οποία συνίστανται στην οικογένεια προσομοιωμάτων SANISAND. Στην παρούσα εργασία, εισάγεται επιπλέον ένα νέο στοιχείο της ACST, η Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής  $A$ , η οποία τροποποιεί

την παράμετρο κατάστασης  $\psi$  και καθορίζει εκ νέου την παράμετρο κατάστασης διαστολικότητας  $\zeta$ , που αντιπροσωπεύει την εξελισσόμενη ανισοτροπία της δομής.

### 3.2.2 Παράμετρος Ανισοτροπίας Δομής $A$

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

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

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

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

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

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

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

με  $c$  συμβολίζεται ο ρυθμός εξέλιξης της μικρο-δομής κατά την διάρκεια της φόρτισης,  $L$  είναι ο δείκτης φόρτισης (με  $L > 0$  να υποδηλώνει μη-μηδενικές πλαστικές παραμορφώσεις) και το σύμβολο  $\langle \cdot \rangle$  να είναι οι αγκύλες Macauley για τις οποίες ισχύει  $\langle L \rangle = L$  όταν  $L > 0$  και  $\langle L \rangle = 0$  όταν  $L \leq 0$ . Με βάση τη Σχέση (1), και επειδή  $0 <$

$F_{in} < 1$  (το  $F$  είναι μέτρο ενός τανυστή και είναι μη-αρνητικό), για μια οριζόντια δομή κόκκων (σύμφωνη με τη βαρύτητα) φορτίζοντας προς την κατεύθυνση της τριαξονικής θλίψης, το  $F$  αυξάνεται (εφόσον  $N = 1$  συνεπάγεται  $\dot{F} > 0$ ) και ως αποτέλεσμα αυξάνεται και η τιμή του  $A$  από την αρχική θετική τιμή  $A = A_{in} = F_{in} > 0$  στην μέγιστη τιμή του στην Κρίσιμη Κατάσταση υπό τριαξονική θλίψη, δηλαδή σε  $A = 1.0$ . Αντίστοιχα, φορτίζοντας ένα έδαφος με οριζόντια δομή κόκκων (σύμφωνη με τη βαρύτητα) προς την κατεύθυνση του τριαξονικού εφελκυσμού, αρχικά προκύπτει μείωση του  $F$  (εφόσον  $N = -1$  που συνεπάγεται  $\dot{F} < 0$ ) και ως αποτέλεσμα αυξάνεται προοδευτικά αλγεβρικά η τιμή του όρου  $A$  (λόγω του  $N = -1$ ) από την αρχική αρνητική τιμή του  $A = A_{in} = -F_{in}$  σε  $A = 0$  και στη συνέχεια σε  $A = 1.0$ . Με άλλα λόγια, η μονοτονική φόρτιση σε τριαξονικό εφελκυσμό χωρίς μεταβολή στην κατεύθυνση της φόρτισης, τελικά αναδιατάσσει την κατεύθυνση της μικρο-δομής  $\mathbf{n}_F$  προς την κατεύθυνση της φόρτισης  $\mathbf{n}$  (κατά τον τριαξονικό εφελκυσμό), και έτσι ισχύει  $N = 1$  και ο όρος  $F$  αντίστοιχα πλησιάζει την μέγιστη τιμή του, που είναι και πάλι 1.0. Ύστερα προκύπτει  $\dot{F} = 0$  (λόγω του ότι  $N = F$  στην Σχέση (3)), ενώ η επίτευξη του  $A = 1.0$  σημαίνει και πάλι επίτευξη της Κρίσιμης Κατάστασης, αλλά τώρα υπό φόρτιση σε τριαξονικό εφελκυσμό.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η κατάσταση που περιγράφεται από τη συνθήκη  $A = 1.0$ , έχει προταθεί από τους Li & Dafalias (2012) ως η τρίτη αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη Κρίσιμης Κατάστασης, που συμπληρώνει τις άλλες δύο συνθήκες της ισοτροπικής Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης, που σχετίζεται με την κρίσιμη τιμή του αποκλίνοντα λόγου τάσεων  $\eta = M$  και τις κρίσιμες τιμές του δείκτη πόρων  $e = e_c$ . Έτσι λοιπόν, η Κρίσιμη Κατάσταση σύμφωνα με την ACST προκύπτει όταν και μόνο όταν τις ακόλουθες τρεις (3) συνθήκες:

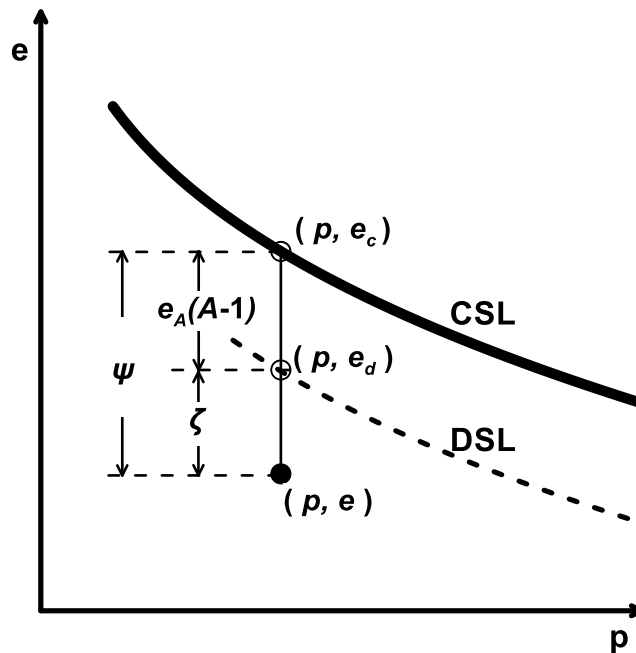
1. Σταθερές αποκλίνουσες τάσεις ( $p = 0, q = 0$ ), και ο αποκλίνων λόγος των τάσεων  $\eta = q/p = M$ , όπου  $M$  ο αποκλίνων λόγος των τάσεων στη Κρίσιμη Κατάσταση,
2. Συσσώρευση αποκλίνουσας παραμόρφωσης (αποκλίνουσα  $\epsilon_q \neq 0$ ) υπό σταθερό όγκο, με τον δείκτη πόρων  $e = e_c$ , όπου  $e_c$  ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση, και
3. Κρίσιμη κατάσταση της μικρο-δομής, όταν  $A = 1$ .

### 3.2.3 Επίδραση του $A$ στη διαστολικότητα

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

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

όπου  $e_c$  είναι ο κρίσιμος δείκτης πόρων επί της CSL για το αντίστοιχο  $p$ ,  $\psi = (e - e_c)$  είναι η παράμετρος κατάστασης των Been & Jefferies (1985),  $A$  είναι η παράμετρος FAV της Σχέσης (2), και η ποσότητα  $-e_A(A-1)$  απεικονίζει την εκάστοτη κατακόρυφη παράλληλη μετατόπιση της γραμμής DSL ως προς τη σταθερή γραμμή CSL (**Σχήμα 3.1**). Ο όρος  $e_A$  (σταθερά του προσομοιώματος) ποσοτικοποιεί αυτή τη μετατόπιση. Υπογραμμίζεται ότι με  $\zeta > 0$  και  $\zeta < 0$  αντίστοιχα, αποτυπώνεται η τάση για μείωση και αύξηση όγκου του εδάφους, ακριβώς όπως συμβαίνει στην ισοτροπική Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης με  $\psi > 0$  και  $\psi < 0$ . Επιπλέον, η γραμμή DSL (που μετατοπίζεται) ταυτίζεται με τη μοναδική και σταθερή CSL μόνο όταν  $A = 1.0$ , δηλαδή στην Κρίσιμη Κατάσταση, και επομένως μόνο τότε  $\zeta = \psi = 0$ .

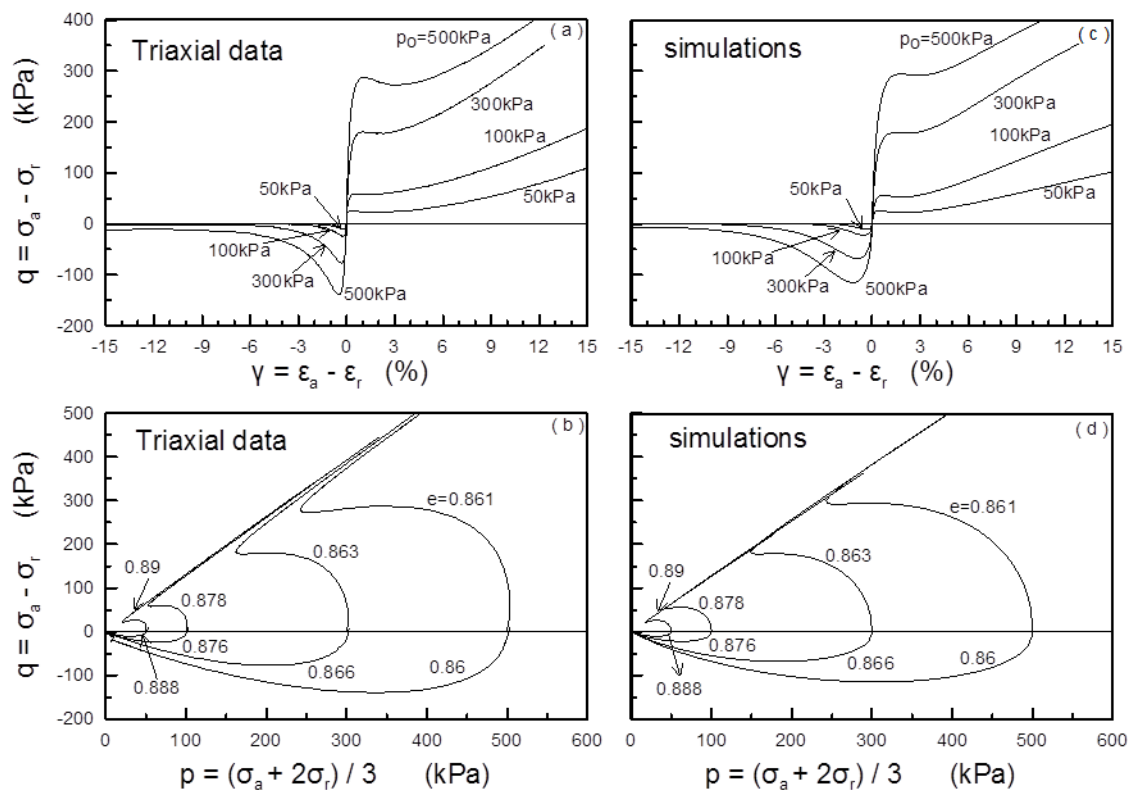


**Σχήμα 3.1** Σχηματική αποτύπωση των παραμέτρων κατάστασης  $\zeta$  και  $\psi$  και ορισμός DSL και CSL στο χώρο  $e$ - $p$  (Li and Dafalias 2012)

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

### 3.2.4 Ακρίβεια SANISAND στην προσομοίωση

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



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

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



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

### 3.3 Απλουστευμένη καταστατική προσομοίωση

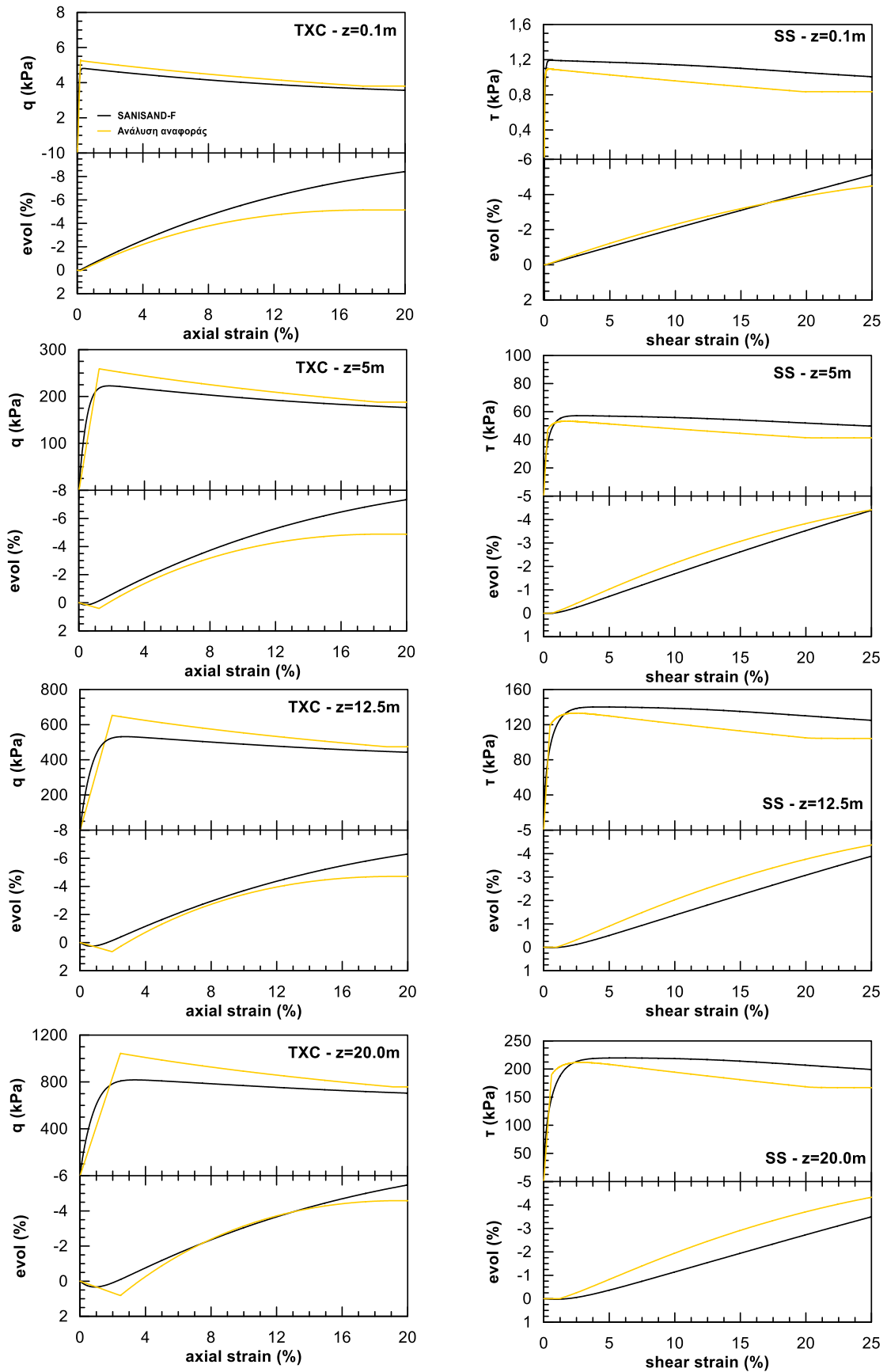
Εδώ παρουσιάζεται η βαθμονόμηση ενός απλουστευμένου καταστατικού προσομοιώματος, ώστε να δίνει προβλέψεις συγκρίσιμες με εκείνες του σοφιστευμένου SANISAND σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης και απλής διάτμησης σε άμμο Toyoura υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Η βαθμονόμηση αυτή στηρίζεται στην παραδοχή ότι καθώς το SANISAND προβλέπει πολύ ικανοποιητικά την απόκριση της άμμου Toyoura (βλ. παράγραφο 3.2), αν το απλουστευμένο παρουσιάζει συγκρίσιμες προβλέψεις εδώ, τότε μπορεί να θεωρηθεί συγκρίσιμα ακριβές.

Το απλουστευμένο προσομοίωμα είναι το ελαστοπλαστικό με χαλάρωση (Strain Softening, ή SS χάριν συντομίας. Οι αρχικές συνθήκες των δοκιμών τριαξονικής θλίψης αντιστοιχούν σε σημεία διαφορετικού βάθους μιας στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m, δηλαδή της άμμου σε ένα πείραμα φυγοκεντριστή των Cai et al. (2016) το οποίο προσομοιώνεται στην παράγραφο 3.4.

Αρχικά, με βάση το προσομοίωμα SS πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε επίπεδο στοιχείου (1m x 1m), εξετάζοντας για τέσσερα διαφορετικά βάθη  $z(\text{m})$  την συμπεριφορά του εδάφους σε δύο δοκιμές: τριαξονικής συμπίεσης (TXC) και απλής διάτμησης (SS). Έτσι, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του προσομοιώματος SS προέκυψε μία βέλτιστη βαθμονόμηση, η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως «ανάλυση αναφοράς», που συγκρινόταν καλά με την αντίστοιχη πρόβλεψη του προσομοιώματος SANISAND για διατμητικές παραμορφώσεις 10% - 20%, δηλαδή τις μεγάλες τιμές παραμορφώσεων που αναμένονται μέσα σε ζώνες διάτμησης (shear bands). Η διαδικασία αυτή οδήγησε στις εξής παραμέτρους:

- Μέγιστη γωνία τριβής  $\phi_p=39.5^\circ$
- Παραμένουσα γωνία τριβής  $\phi_{res}=34^\circ$
- Μέγιστη γωνία διαστολικότητας  $\psi=15^\circ$
- Πλαστική παραμόρφωση έως την «Κρίσιμη Κατάσταση»  $e_q^p=20\%$  ( $\phi=\phi_{res}$ ,  $\psi=0$ )
- Μέτρο ελαστικότητας Young  $E(\text{kPa})=9500 \cdot z(\text{m})^{0.5}$
- Λόγος Poisson:  $\nu=0.33$ .

Παρακάτω συγκρίνονται τα αποτελέσματα του προσομοιώματος SS με την αντίστοιχη συμπεριφορά κατά SANISAND για τις δοκιμές εδαφικού στοιχείου. Σε κάθε διάγραμμα (**Σχήμα 3.3**) απεικονίζεται για κάθε δοκιμή και για κάθε βάθος  $z$  η ογκομετρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής - διατμητικής παραμόρφωσης καθώς και οι σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων για τριαξονική συμπίεση (αριστερά) και απλή διάτμηση (δεξιά). Η βαθμονόμηση αυτή προέκυψε από τη Θελερίτη (2017).



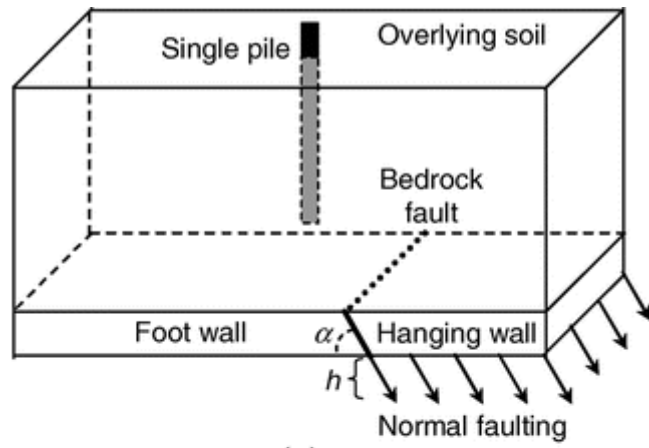
**Σχήμα 3.3** Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων και ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (TXC, αριστερά) και απλής διάτμησης (δεξιά) εδαφικών στοιχείων σε διάφορα βάθη από  $z=0.1\text{m}$  έως  $z=20\text{m}$ , για το προσομοίωμα SANISAND και την ανάλυση αναφοράς του προσομοιώματος SS.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 3.3**, παρατηρείται ότι η ογκομετρική παραμόρφωση του απλουστευμένου προσομοιώματος είναι ίδια και ανεξάρτητη του βάθους. Αυτό σημαίνει ότι στο προσομοίωμα SS δεν λαμβάνεται υπόψη η σχετική επίδραση της ενεργούς τάσης στη διαστολικότητα. Παράλληλα, όσον αφορά τη μέση αντοχή του εδαφικού στοιχείου κατά SS σε όλα τα βάθη z, στη τριαξονική συμπίεση φαίνεται να υπερεκτιμάται και στην απλή διάτμηση να υποεκτιμάται. Αντιθέτως, όσον αφορά στη μέση διαστολικότητα φαίνεται να υποεκτιμάται στην τριαξονική συμπίεση και να υπερεκτιμάται στην απλή διάτμηση, συγκριτικά πάντα με το προσομοίωμα SANISAND που θεωρείται ότι προσφέρει τη βέλτιστη ακρίβεια.

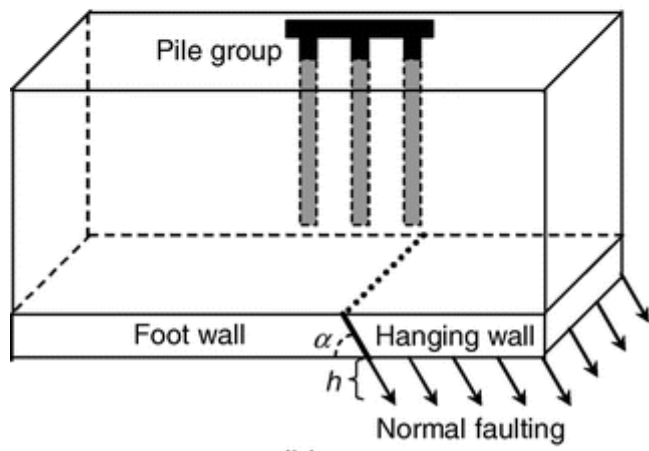
Τέλος, όπως παρατηρείται και στο **Σχήμα 3.3**, στην περίπτωση της απλής διάτμησης η συμπεριφορά του προσομοιώματος SS δεν διαφέρει έντονα από τα αποτελέσματα του ακριβέστερου SANISAND, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα στην περίπτωση της τριαξονικής συμπίεσης. Συνεπώς, το απλουστευμένο προσομοίωμα, με αυτή τη βαθμονόμηση, μπορεί να θεωρηθεί ως επαρκώς ακριβές για ένα πρόβλημα συνοριακών συνθηκών με ανάπτυξη ζωνών διάτμησης (όπου η απόκριση είναι σαν την απλή διάτμηση) όπως η διάδοση της διάρρηξης ρήγματος μέσα από αμμώδη στρώση.

### **3.4 Προσομοίωση διάρρηξης ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης**

Στην παρούσα παράγραφο συγκρίνονται οι προσομοιώσεις του σοφιστευμένου SANISAND και του απλουστευμένου SS με τις μετρήσεις του πειράματος φυγοκεντριστή των Cai et al. (2016) που αφορά στη διάδοση διάρρηξης ενός κανονικού ρήγματος γωνίας  $70^\circ$  μέσω αμμώδους στρώσης άμμου Toyoura πάχους 20m. Οι λεπτομέρειες αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στη Θελερίτη (2017). Εδώ παρουσιάζεται μόνο οι διαστάσεις του «κουτιού» πειράματος Cai et al(2016) στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.4**), οι οποίες είναι συμβατές με τις διαστάσεις του κοινού καννάβου πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε με τα δύο προσομοιώματα.

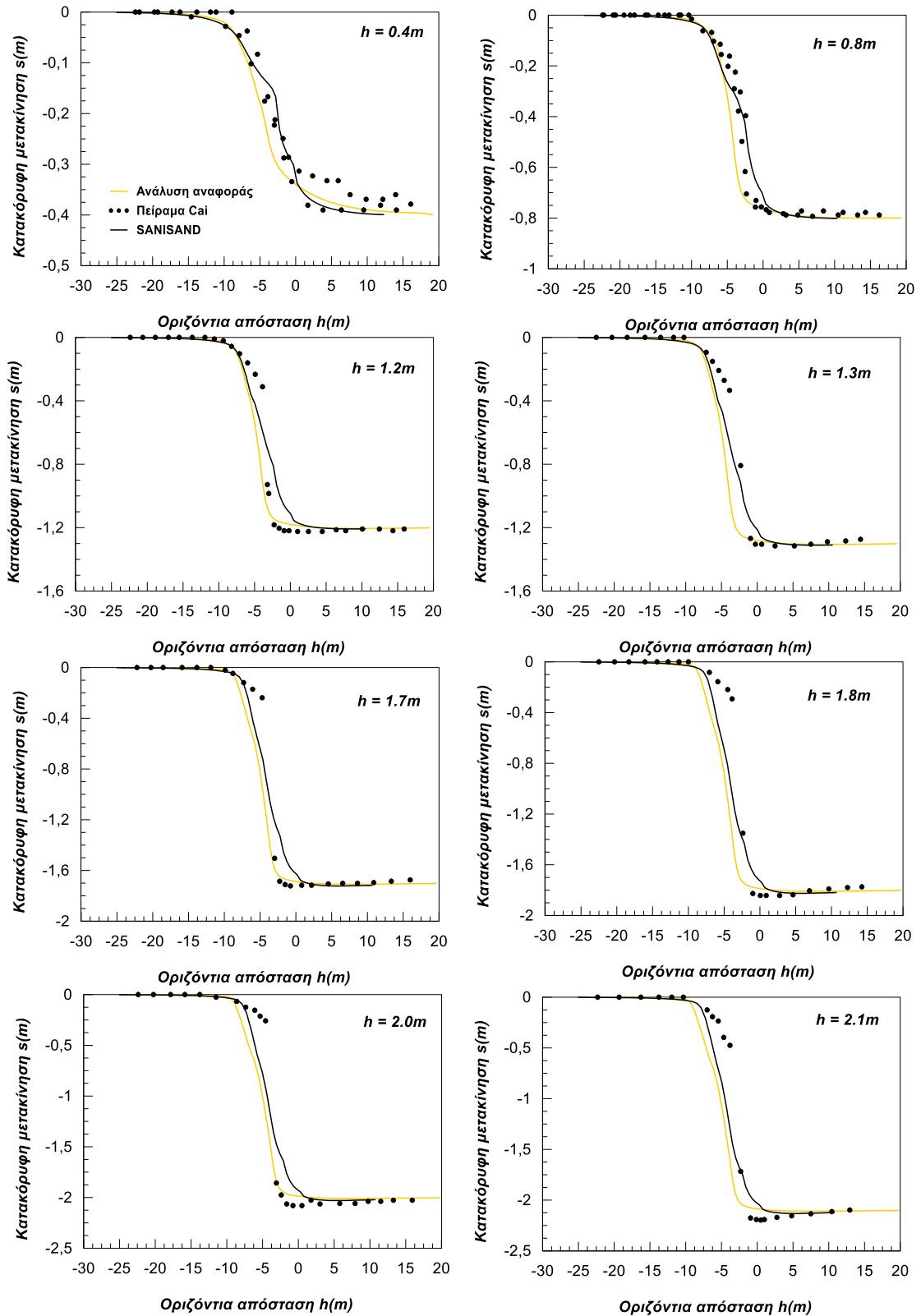


(a)



(b)

Σχήμα 3.4 Πειραματική διάταξη φυγοκεντρική των Cai et al. (2016).



**Σχήμα 3.5** 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 SANISAND και SS.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μετρήσεων – προβλέψεων, σε 8 υποσχήματα που αντιστοιχούν στα 8 βήματα επιβολής της μετατόπισης του υπερκείμενου τεμάχους κατά την πειραματική διαδικασία. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα του **Σχήματος 3.5**, όπου απεικονίζεται, για κάθε βήμα της μετατόπισης στο υπόβαθρο, η παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια τόσο από αναλύσεις όσο και από το πείραμα των Cai et al (2016). Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα διαγράμματα του **Σχήματος 3.5** είναι ότι οι προσομοιώσεις με το SS προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και την ανάλυση με το ακριβές προσομοίωμα SANISAND. Αναμενόμενα, τα αποτελέσματα του SANISAND παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια όσον αφορά στην παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους στο πείραμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### **ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται αριθμητικά η αλληλεπίδραση διαφορετικών ειδών ρηγμάτων (κανονικό, «κατακόρυφο», ανάστροφο) με άκαμπτη κατασκευή στην επιφάνεια αμμώδους εδάφους με αρχική ομοιόμορφη πυκνότητα  $D_r=65\%$ . Η προσομοίωση αυτή έγινε με τη χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος με χαλάρωση (strain softening), όπως βαθμονομήθηκε στο Κεφάλαιο 3. Σε όλες τις περιπτώσεις, το έδαφος αποτελείται από μία επίπεδη ομοιόμορφη στρώση άμμου (αρχικής σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$ ), πάχους  $H = 20m$  που υπέρκειται στρώσης βράχου. Η διεπιφάνεια βράχου-εδάφους είναι επίσης οριζόντια, και εκεί συντελείται η διάρρηξη του ρήγματος, η διάδοση της οποίας μέσα από την αμμώδη στρώση μελετάται εδώ.

Τα ρήγματα που διερευνήθηκαν είχαν τρεις διαφορετικές γωνίες βύθισης  $\beta$  ως προς την οριζόντιο και συγκεκριμένα: α) κανονικό ρήγμα με γωνία  $\beta = 45^\circ$ , ένα ανάστροφο με γωνία  $\beta = 135^\circ$  (δηλαδή γωνίας βύθισης  $45^\circ$  όπως και το κανονικό, αλλά με αντίθετης φοράς μετατόπιση) και ένα «κατακόρυφο» με γωνία  $\beta = 85^\circ$ . Επισημαίνεται ότι η επιλογή για γωνία  $\beta = 85^\circ$  αντί για της «ορθότερης»  $\beta = 90^\circ$  έγινε για αριθμητικούς λόγους, καθώς η «ορθότερη» γωνία οδηγεί σε δυσχερή εφαρμογή της διάρρηξης στο υπόβαθρο (έντονη στρέβλωση καννάβου) όταν αυτή φτάνει σε μεγάλες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης  $d$ , ενώ η απόκλιση στα αποτελέσματα που αφορούν στη διάδοση της διάρρηξης και την παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια κρίνεται πρακτικώς αμελητέα.

Η πυκνότητα του καννάβου του προσομοιώματος δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκτασή του. Ειδικότερα, παρουσιάζει μία πύκνωση στην περιοχή πέριξ του κέντρου του καννάβου (όπου εντοπίζεται το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο και όπου ορίζεται οριζόντια απόσταση ίση με το μηδέν), όπου το πάχος των στοιχείων είναι  $0.5m$  (συμβατό με τη βαθμονόμηση στο Κεφάλαιο 3). Η πύκνωση αυτή αφορά τα ρήγματα κανονικό ( $\beta=45^\circ$ ) και «κατακόρυφο» ( $\beta=85^\circ$ ), ενώ διαφοροποιείται για το ανάστροφο ρήγμα, όπου η διάρρηξη αναδύεται προς το σταθερό τέμαχος. Συγκεκριμένα, στις προκαταρκτικές αναλύσεις με ανάστροφο ρήγμα ( $\beta=135^\circ$ ) παρατηρήθηκε ότι η διάρρηξη αναδύεται σε σημεία εκτός πυκνού καννάβου. Επομένως, η πύκνωση μετατοπίστηκε προς το σταθερό τέμαχος προκειμένου όλη η διάρρηξη να είναι εντός του πυκνού καννάβου. Συνολικά περιλαμβάνονται 5.600 στοιχεία, γεγονός που τον καθιστά έναν ικανοποιητικά πυκνό για την συγκεκριμένη ανάλυση κάρναβο, που έχει πάχος  $20m$  (όσο η αμμώδης στρώση) και συνολικό πλάτος  $80m$  (ώστε να αποφεύγεται επίδραση ορίων του καννάβου στη διάρρηξη). Επιπλέον, η βάση του καννάβου είναι διαιρεμένη σε δύο τμήματα, ένα εκ των οποίων παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια της διάρρηξης (υποκείμενο σταθερό τέμαχος- footwall) και το υπόλοιπο (υπερκείμενο τέμαχος- hanging wall) που υλοποιεί μετακινούμενο σε βήματα τη διάρρηξη στο υπόβαθρο. Συνεπώς, για την προσομοίωση του ρήγματος επιβάλλονται σταδιακά μετατοπίσεις κόμβων της βάσης του κάρναβου που αντιστοιχούν στο υπερκείμενο τέμαχος, που έχουν διεύθυνση παράλληλη με την εκάστοτε γωνία  $\beta$  του ρήγματος, ενώ



στα πλευρικά όρια του καννάβου επιτρέπεται η ελεύθερη κατακόρυφη ολίσθηση. Μάλιστα, στην παρούσα εργασία επιβλήθηκαν πέντε (5) στάδια μετατόπισης, τα εξής: **d = 0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m και 1.0m**, που αντιστοιχούν σε 1%, 2%, 3%, 4% και 5% του πάχους της εδαφικής στρώσης.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω ρήγματα, διερευνήθηκε η αλληλεπίδρασή τους με την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Ως κατασκευή, θεωρήθηκε ένα «πέδιλο» μορφής λωρίδας πλάτους  $B=4\text{m}$  και στατικού φορτίου  $q=90\text{kPa}$ . Η επίδραση του πλάτους της κατασκευής δεν διερευνήθηκε στην παρούσα εργασία, σε αντίθεση με τη θέση της (που διερευνήθηκε λεπτομερώς) και με το φορτίο της (που διερευνήθηκε ενδεικτικά). Συγκεκριμένα, η κατασκευή τοποθετήθηκε σε θέσεις διαφορετικές για κάθε ρήγμα, με την επιλογή να σχετίζεται με τη θέση ανάδυσσης της διάρρηξής του κάθε ρήγματος στην επιφάνεια υπό ελεύθερο πεδίο (**free field**), όταν δηλαδή δεν υπάρχει κατασκευή. Συγκεκριμένα, οι αρχικές θέσεις της κατασκευής βρίσκονται μακριά από την θέση ανάδυσσης υπό ελεύθερο πεδίο και στο σταθερό τέμαχος, και με σταδιακή μετατόπιση της κατασκευής προς το κινούμενο τέμαχος διερευνήθηκε ποιες θέσεις και ποιο τρόπο επηρεάζουν σημαντικά τη ανάπτυξη του ρήγματος, και πως αυτή επηρέασε την καθίζηση και τη στροφή της κατασκευής.

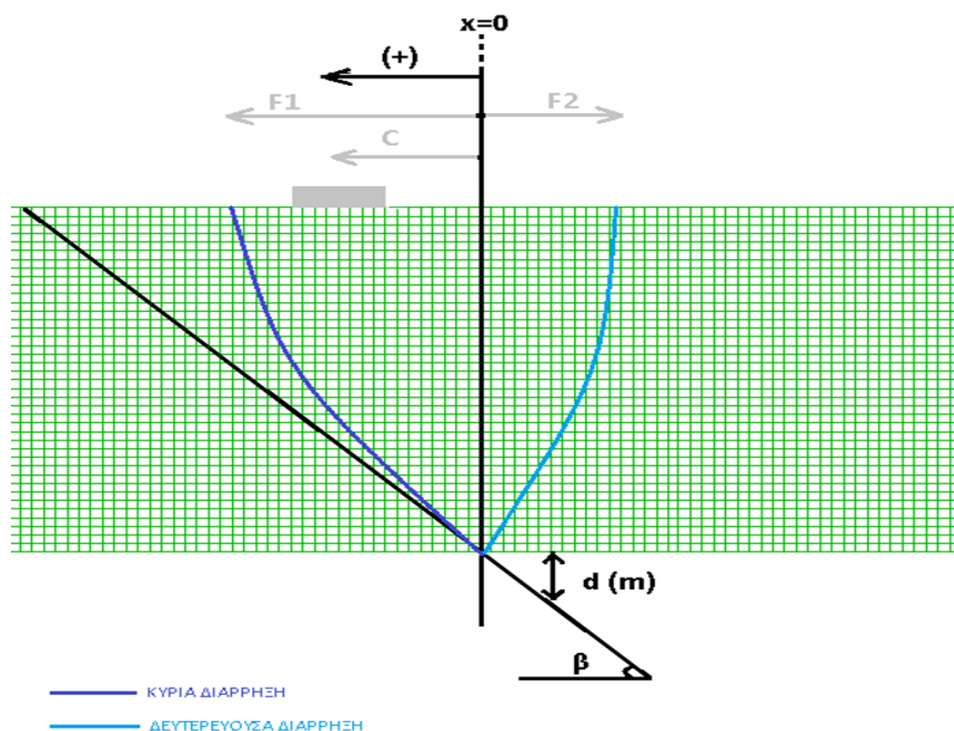
Για τον προσδιορισμό της εκάστοτε θέσης της κατασκευής χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς η κατακόρυφη προβολή του ρήγματος από το υπόβαθρο της εδαφικής στρώσης στην επιφάνεια ( $\mathbf{x=0}$ ). Πιο αναλυτικά, ορίζεται ως **C** η απόσταση του κέντρου της κατασκευής από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο (από τη θέση με  $x=0$ ), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.A. Η θέση της κατασκευής δεξιά από τον άξονα  $x=0$ , ορίζεται ως θετική, ενώ αριστερά του άξονα ως αρνητική. Πάνω στο σημείο κατακόρυφης προβολής η απόσταση **C** ισούται με μηδέν ( $\mathbf{C=x=0}$ ). Με στόχο την αποφυγή ανάλυσης απεριόριστων θέσεων της κατασκευής, απαιτείται περιορισμός των θέσεων τοποθέτησης της κατασκευής. Για να επιτευχθεί αυτό, παρουσιάζονται παρακάτω οι χαρακτηριστικές ευθείες των ρηγμάτων σε μια εδαφική στρώση. Ορίζονται η ευθεία προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια (**H/tanβ**), η κατακόρυφη προβολή του ( $\mathbf{x=0}$ ) καθώς και οι εκάστοτε διαρρήξεις (κύρια και δευτερεύουσα) των ρηγμάτων. Η κατασκευή τοποθετείται στοχευμένα στις θέσεις που ορίζονται από την ευθεία προβολή μέχρι την κατακόρυφη προβολή. Αυτές οι θέσεις ορίστηκαν στα πρώτα στάδια των αναλύσεων, καθώς θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει επιρροή της κατασκευής πέρα από την κατακόρυφη προβολή. Τα αποτελέσματα όμως των αναλύσεων για κάθε ρήγμα ξεχωριστά έδειξαν ότι πέρα από την κατακόρυφη προβολή, η κατασκευή συνεχίζει να επηρεάζει διαφορετικά το κάθε ρήγμα. Επομένως, οι τελικές θέσεις της κατασκευής ορίστηκαν από την ευθεία προβολή του κάθε ρήγματος στην επιφάνεια, μέχρι την θέση που η επίδραση της κατασκευής είναι αμελητέα, ακόμη και πέρα από την κατακόρυφη προβολή προς το κινούμενο τέμαχος (ειδικά όταν υπάρχει κατακρήμνισμα, λόγω δευτερεύουσας διάρρηξης).

Επιπλέον, μελετήθηκε ενδεικτικά η επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην διάρρηξη του ρήγματος καθώς και στην απόκριση της κατασκευής. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τρία (3) διαφορετικά φορτία κατασκευής, το αρχικό φορτίο **q=90kPa**, ένα διπλάσιο φορτίο του αρχικού **q=180kPa** και τέλος το τριπλάσιο του αρχικού **q=270kPa**. Ύστερα από διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής πλάτους  $B=4\text{m}$  για την εύρεση του φορτίου αστοχίας (**Q<sub>ult</sub>=1400kPa**), υπολογίστηκε ο

συντελεστής ασφαλείας που αντιστοιχεί στα τρία φορτία. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής ασφαλείας FS υπολογίστηκε ως το πηλίκο του οριακού φορτίου της κατασκευής με πλάτος  $B=4\text{m}$  προς το εκάστοτε φορτίο  $q$  ( $FS = Q_{\text{ult}}/q$ ) και ισούται με  $FS=15.5$  για το αρχικό φορτίο,  $FS=7.8$  για το διπλάσιο και  $FS=5.2$  για το τριπλάσιο φορτίο της κατασκευής.

Τέλος, αναφέρεται ότι η συμπεριφορά της κατασκευής λόγω της αλληλεπίδρασής της με την διάρρηξη των ρηγμάτων παρουσιάζεται με την μορφή διαγραμμάτων επίδρασης της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος  $d$  στη γωνία στροφής κατασκευής ( $\theta$ ), στην καθίζηση ( $s$ ) και στην κανονικοποιημένη καθίζηση προς την κατακόρυφη μετατόπιση ( $s/d$ ) του ρήγματος. Για τη στροφή των κατασκευών έχει καθιερωθεί ως αποδεκτή τιμή της γωνίας στροφής επιφανειακών θεμελίων για ελέγχους λειτουργικότητας η γωνία  $\theta = 0.286^\circ$ . Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε εφαπτομένη της γωνίας της κατασκευής ίση με  $1/200$  ( $\tan\theta=1/200$  και  $\tan\theta=\theta$  για μικρές γωνίες, επομένως  $\theta=0,286^\circ$ ) που θεωρείται ως άνω όριο επιτρεπόμενης στροφής (Whals et al. 1990), λιγότερο συντηρητικά από το  $1/500$  του Skempton (1956). Στην περίπτωση των καθιζήσεων αναφέρεται ότι όταν η καθίζηση της κατασκευής είναι προς τα κάτω θεωρείται θετική (+), ενώ προς τα πάνω όπως στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος θεωρείται αρνητική (-). Οι καθιζήσεις κανονικοποιούνται ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος  $d$  για να αποδοθεί η σχετική σημαντικότητά τους και μόνο, και όχι επειδή μια τιμή  $s/d = 1.0$  σχετίζεται με αποδεκτή ή όχι απόκριση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται ξεχωριστά τα βασικά αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης για τους διαφορετικούς τύπους ρηγμάτων και για τις θέσεις κατασκευών με την εντονότερη επιρροή σε καθένα από αυτά τα ρήγματα.

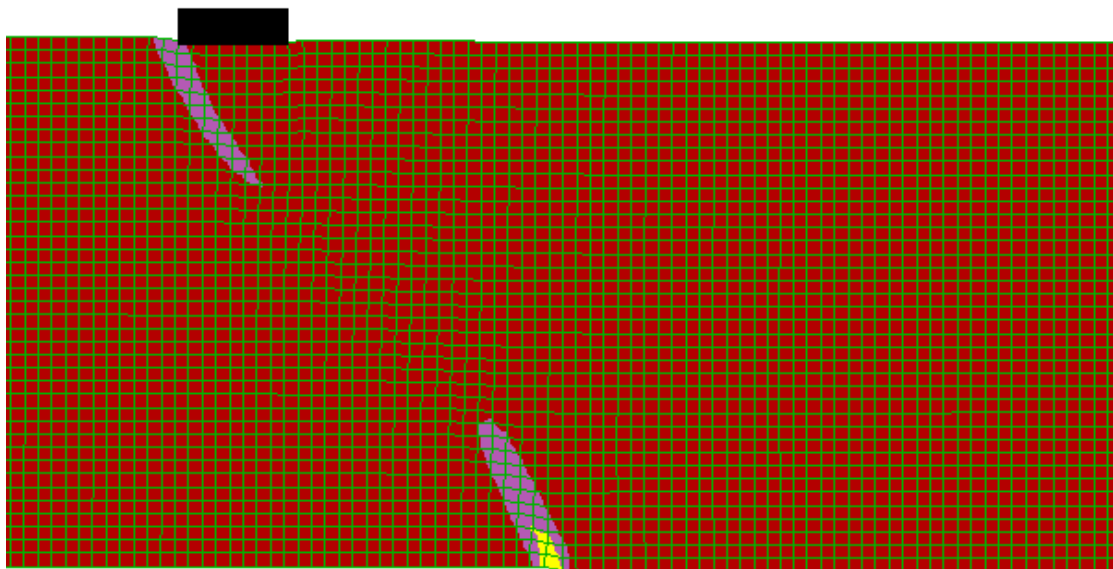
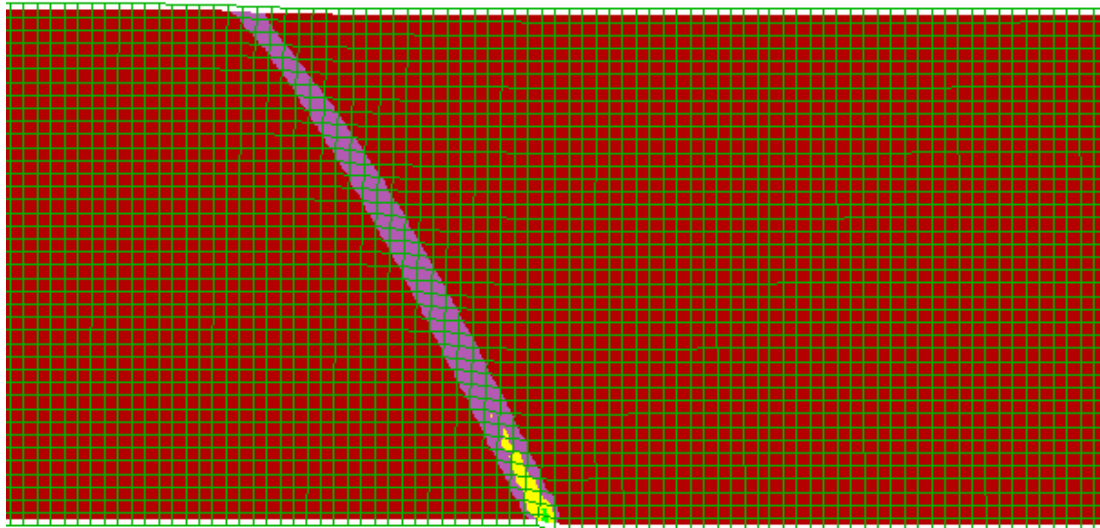


Σχήμα 4.Α Απλουστευμένη σχηματική απεικόνιση διάρρηξης ρήγματος και επεξήγηση συμβόλων.

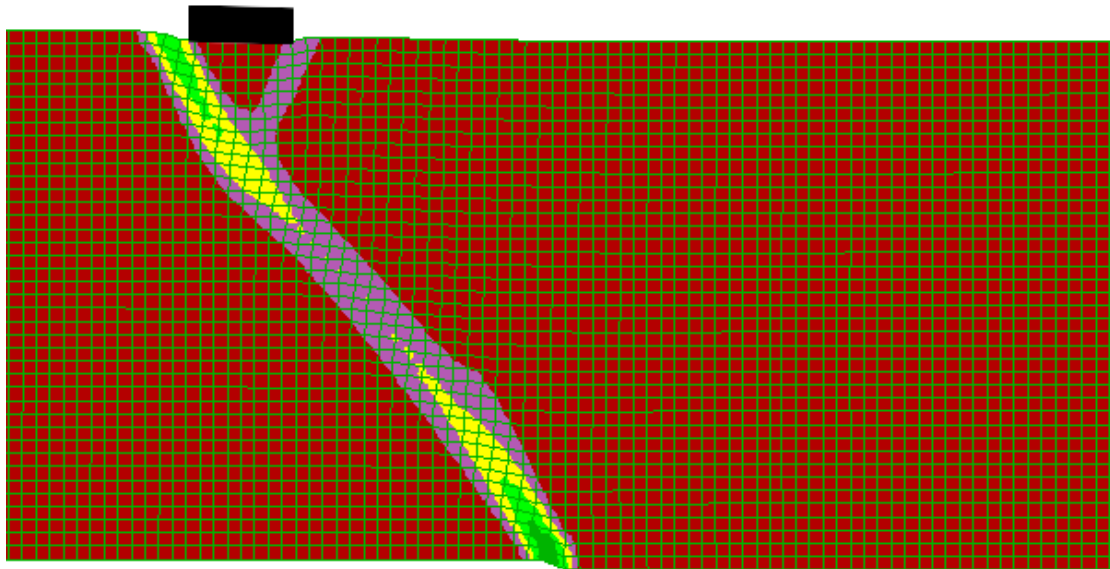
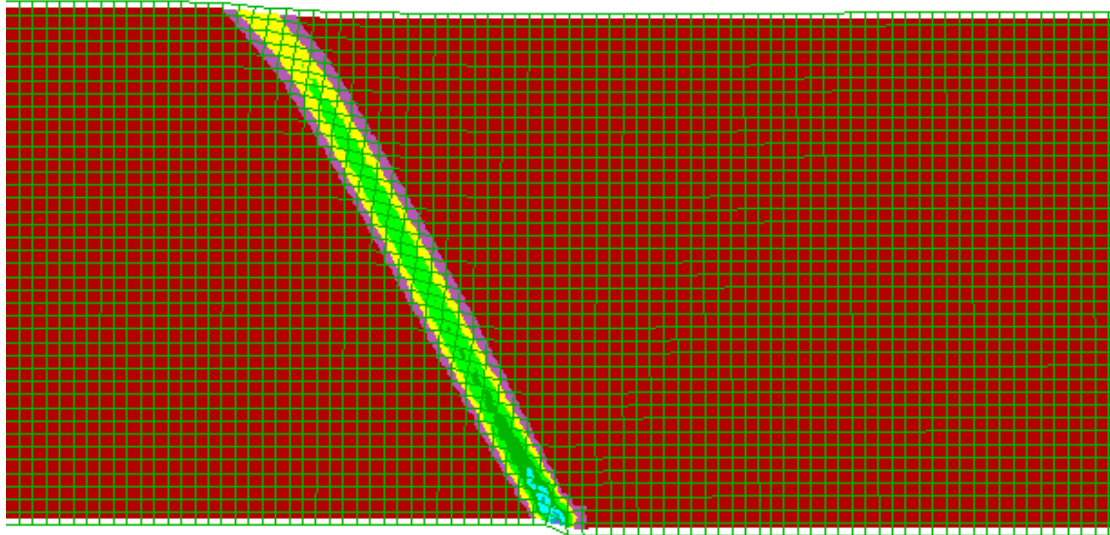
## 4.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος με την κατασκευή στη θέση C=12m

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης της διάρρηξης κανονικού ρήγματος γωνίας  $45^\circ$  και κατασκευής, τοποθετημένης στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 4.1** έως **4.5** που ακολουθούν απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση της εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφες μετακινήσεις **d = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m**, αντίστοιχα. Σε κάθε σχήμα (και κάθε αντιστοιχούσα μετατόπιση ρήγματος d), το άνω μέρος παρουσιάζει τη διάρρηξη στο ελεύθερο πεδίο, ενώ το κάτω τη διάρρηξη υπό την ύπαρξη κατασκευής στην θέση **C=12m**. Η θέση αυτή της κατασκευής επιλέχθηκε από τις δώδεκα (12) συνολικά θέσεις της κατασκευής για κανονικό ρήγμα που εξετάστηκαν, καθώς παρουσιάζει την εντονότερη επίδραση πάνω στην διάρρηξη του ρήγματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κέντρο της κατασκευής βρίσκεται ακριβώς πάνω στην θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο.

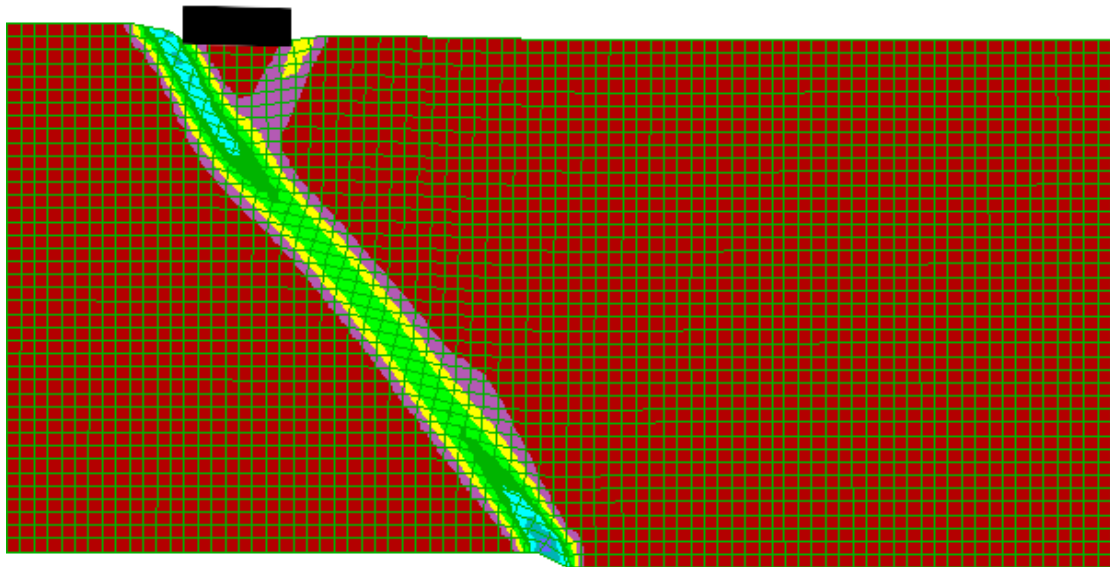
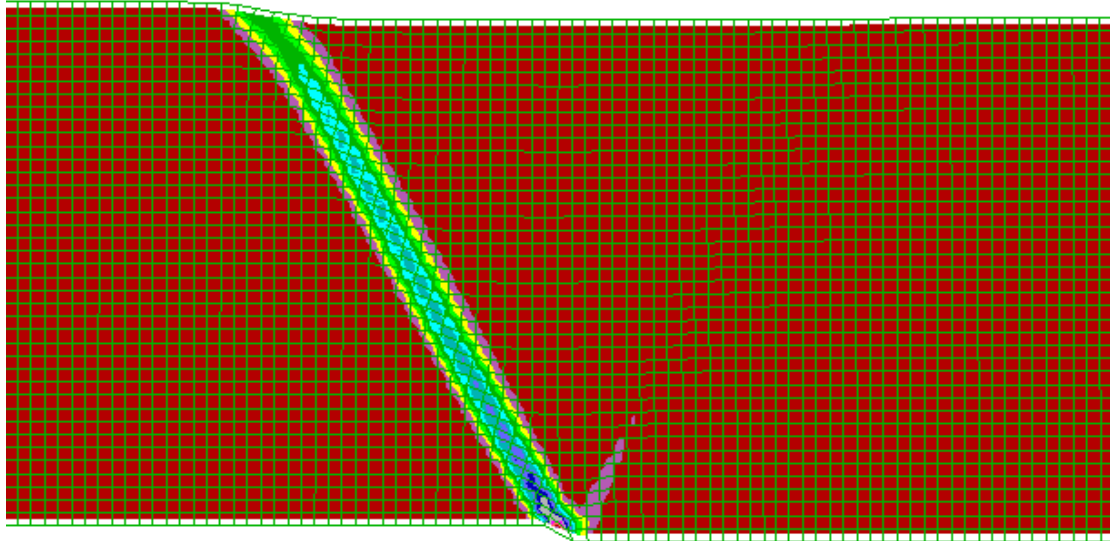
Με βάση τα Σχήματα αυτή, η επίδραση της κατασκευής στη διάδοση της διάρρηξης είναι εμφανής από τα πρώτα κιόλας στάδια κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος ( $d=0.2m$ ). Για  $d = 0.4m$  προκύπτει εκτροπή της διάρρηξης του ρήγματος και της θέσης ανάδυσής της έναντι της αρχικής υπό ελεύθερο πεδίο, καθώς η διάρρηξη μετατοπίζεται στα αριστερά της κατασκευής (προς το ακίνητο τέμαχος). Για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος  $d = 1.0m$  η εκτροπή έχει ολοκληρωθεί, ενώ δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη προς την άλλη πλευρά της κατασκευής μικρού βάθους. Η δευτερεύουσα αυτή διάρρηξη περί την κατασκευή δεν επιτρέπει τη δημιουργία ευμεγέθους κατακρημνίσματος εντός του κινούμενου τεμάχους που παρατηρείται στην ανάλυση ελευθέρου πεδίου.



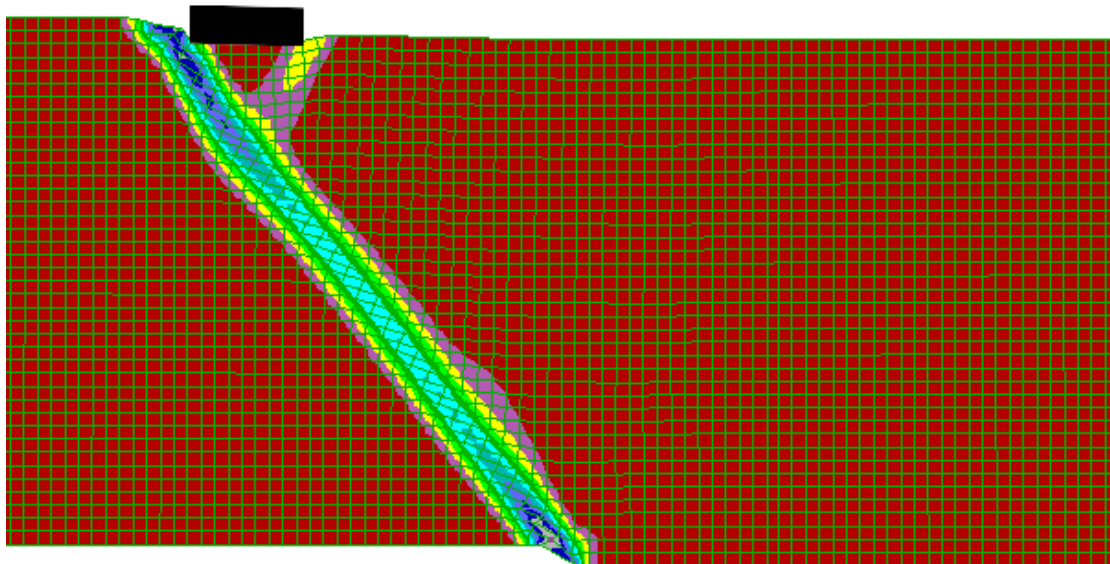
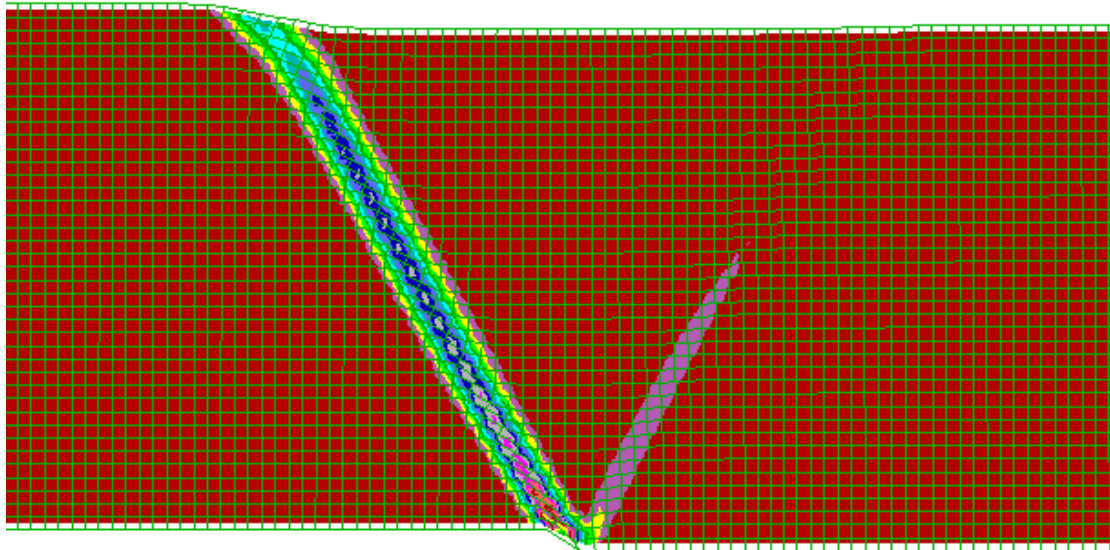
**Σχήμα 4.1** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωσης εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2m$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



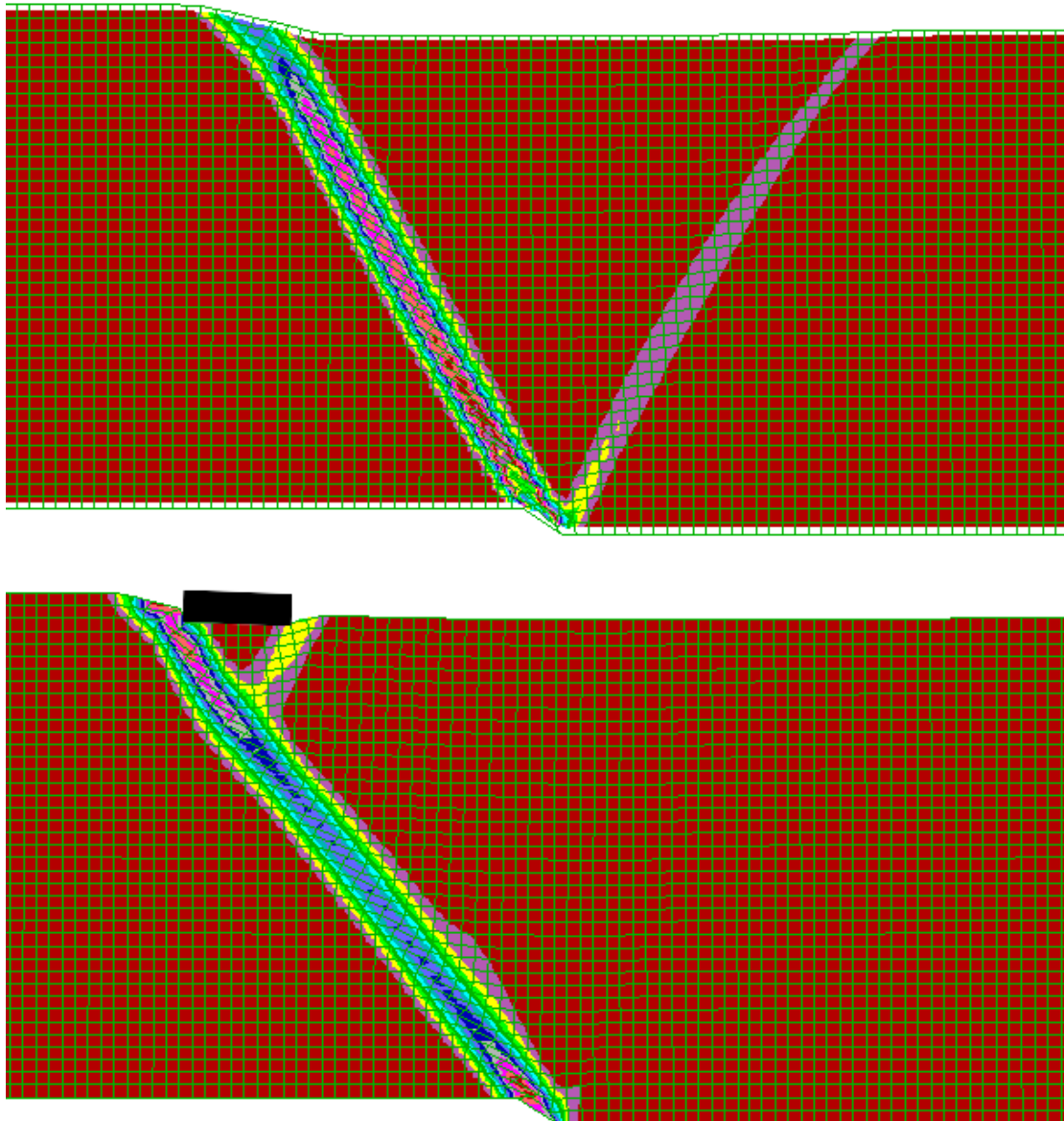
**Σχήμα 4.2** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.4\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



**Σχήμα 4.3** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωσης εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.6m$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



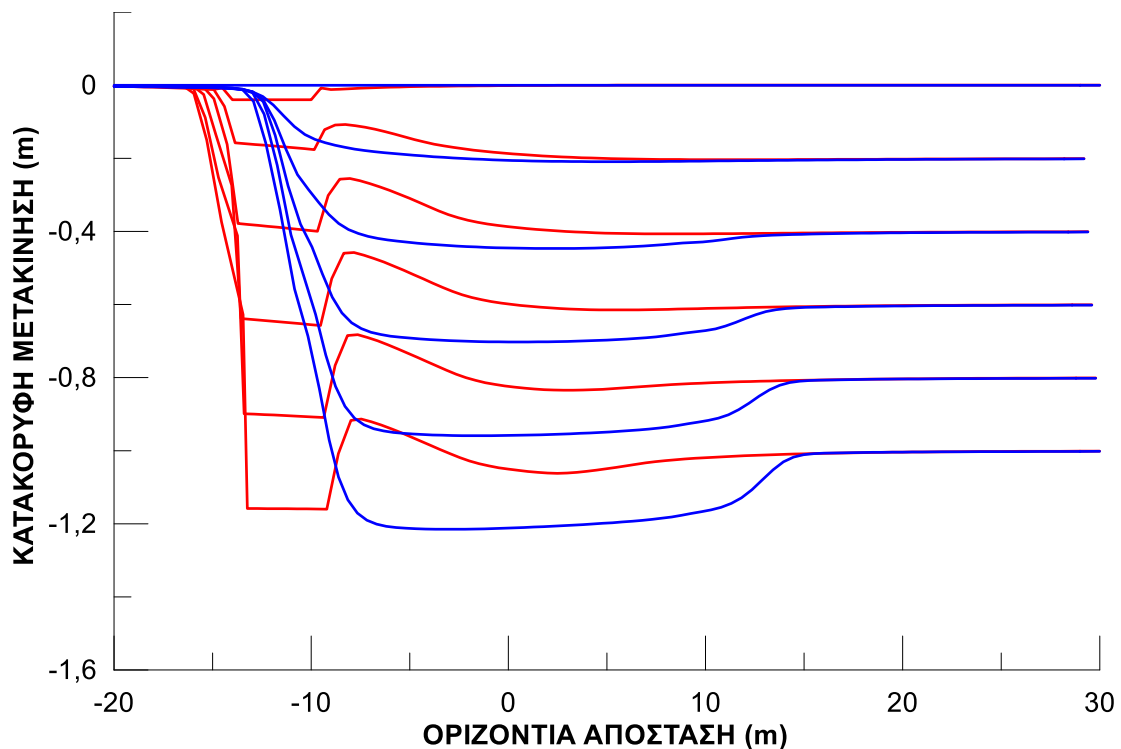
**Σχήμα 4.4** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωσης εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.8\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



**Σχήμα 4.5** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωσης εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).

Η επίδραση της κατασκευής στην παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια γίνεται σαφέστερη στο **Σχήμα 4.6**, όπου συγκρίνεται η εδαφική επιφάνεια στο ελεύθερο πεδίο (**μπλε**) και υπό την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης (**κόκκινο**) για τα πέντε βήματα κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος από  $d = 0.2$  έως  $1.0\text{m}$ . Όπως προκύπτει, η κατασκευή εκτρέπει τη διάρρηξη του κανονικού ρήγματος προς την άκρη της που είναι προς το σταθερό τέμαχος, ενώ αποτρέπει τη δημιουργία ευμεγέθους κατακρημνίσματος, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί μια δεύτερη διάρρηξη ακριβώς κάτω από το δεξί του άκρο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η διαστολή του εδάφους στο κινούμενο τέμαχος όταν υπάρχει η κατασκευή, σε αντιδιαστολή προς το κατακρημνισμό που παρουσιάζεται άνευ αυτής στις ίδιες θέσεις.





**Σχήμα 4.6** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.

Υπογραμμίζεται εδώ ότι η επιλογή πλήρους παρουσίασης αυτής της θέσης κατασκευής ( $C=12\text{m}$ ) έγινε κατόπιν σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ και των υπόλοιπων θέσεων κατασκευής που αναλύθηκαν για διάρρηξη κανονικού ρήγματος, με κριτήριο την εντονότερη επιρροή στην ανάδυση της διάρρηξής του. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει η μελέτη της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής και για τις υπόλοιπες θέσεις κατασκευής που αναλύθηκαν. Η μελέτη αυτή γίνεται εδώ ως προς τα μεγέθη κύριου ενδιαφέροντος για τον Πολιτικό Μηχανικό, δηλαδή της γωνίας στροφής της κατασκευής ( $\theta$ ) και της καθίζησής της, μετά από κανονικοποίηση ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος ( $s/d$ ).

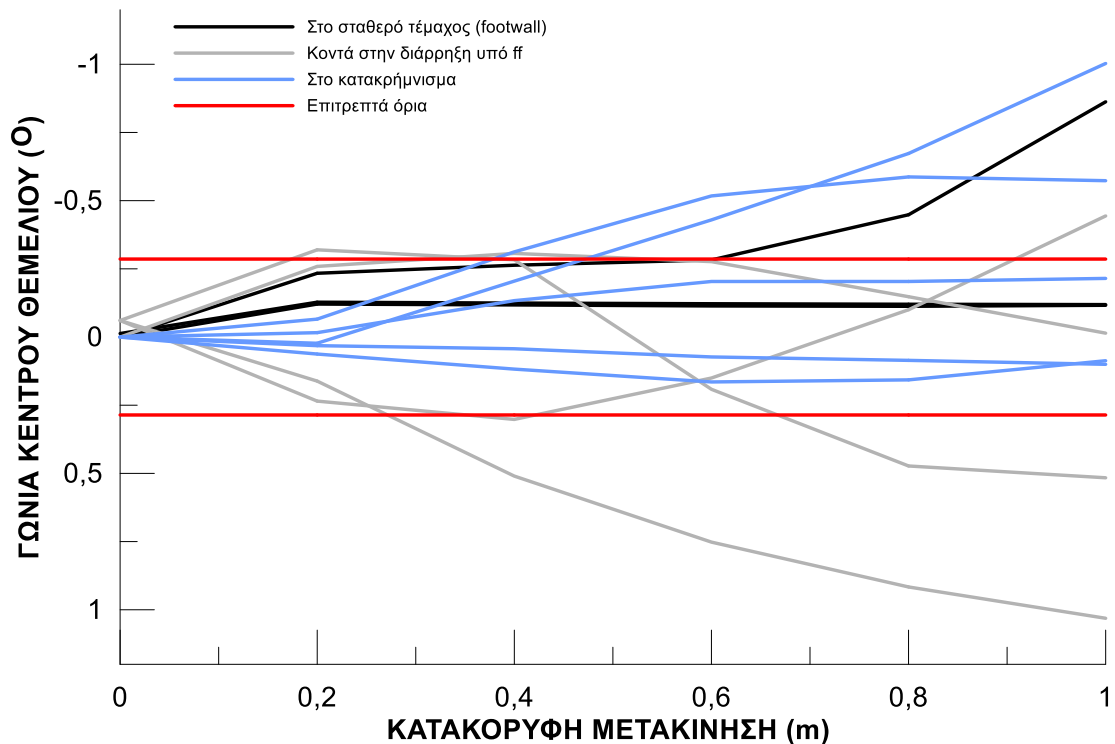
Χάριν συντομίας, τα αναλυτικά αποτελέσματα σε όρους συσσωρευμένων διατμητικών παραμορφώσεων ( $ssi$ ) για όλες αναλυθείσες θέσεις κατασκευής παρουσιάζονται σε **Παραρτήματα**.

Έτσι, στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  κανονικού ρήγματος στην γωνία στροφής της κατασκευής για όλες τις θέσεις της. Οι θέσεις της κατασκευής κατηγοριοποιούνται ως προς την θέση που βρίσκεται ακριβώς πάνω στην διάρρηξη του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίου ( $C=12\text{m}$ ). Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι γενικώς η στροφή της κατασκευής αυξάνει με τη μετατόπιση του κανονικού ρήγματος, και ότι η θέση της κατασκευής καθορίζει αν θα έχει αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη στροφή. Σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως θέσης,

μετατοπίσεις ρήγματος έως  $d = 0.2\text{m}$  οδηγούν σε «αποδεκτές» στροφές. Καμπύλες με διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε θέσης κατασκευής στο σταθερό τέμαχος (μαύρες,  $C = 18, 16\text{m}$ ), κοντά στη διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (γκρι,  $C = 14$  έως  $8\text{m}$ ) και στο κατακρήνισμα (γαλάζιες,  $C = 6$  έως  $-4\text{m}$ ). Η ομαδοποίηση αυτή υποδεικνύει ότι σε θέσεις κατασκευής στο κατακρήνισμα οι γωνίες στροφής είναι γενικώς αρνητικές (αριστερόστροφες), ενώ για θέσεις πλησίον της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο ή προς το σταθερό τέμαχος οι γωνίες στροφής είναι θετικές (δεξιόστροφες).

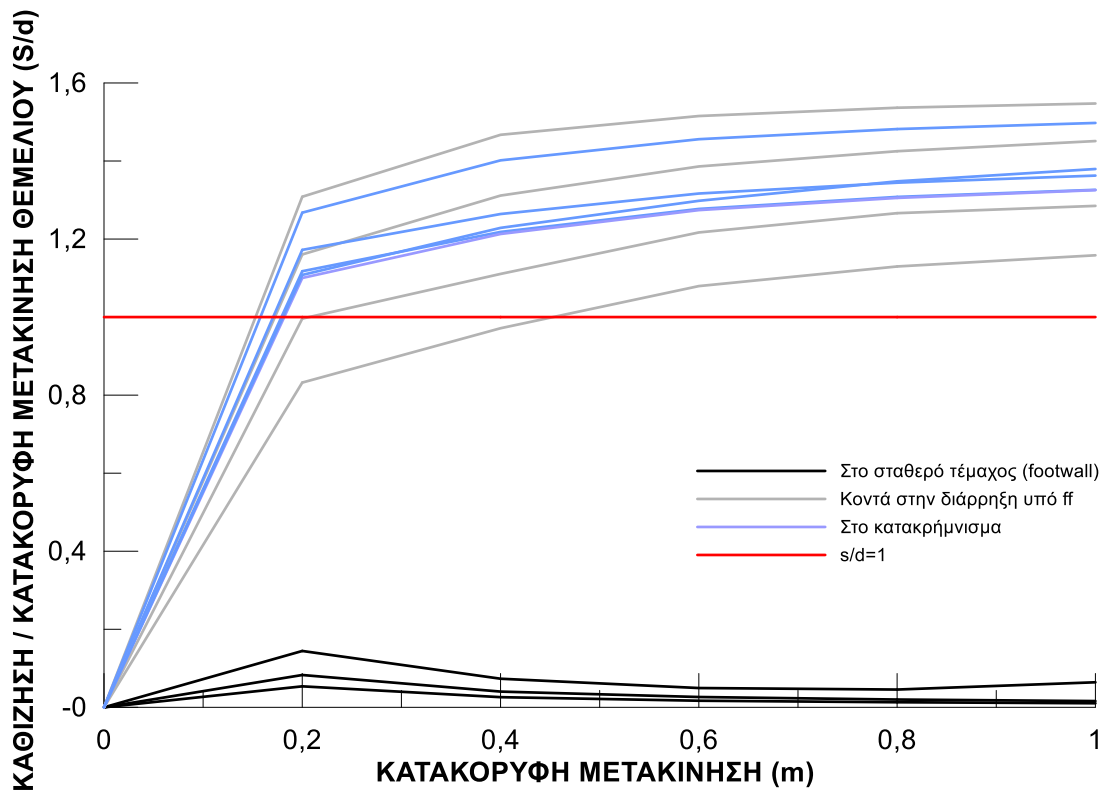
Πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις  $C=18\text{m}$  και  $C=16\text{m}$  έχουν μηδαμινή επίδραση στην ανάδυση της διάρρηξης του κανονικού ρήγματος και οι γωνίες στροφής της κατασκευής είναι σταθερές και εντός επιτρεπτών σε όλες τις κατακόρυφες μετακινήσεις του ρήγματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκονται μακριά από την θέση ανάδυσης υπό ελεύθερο πεδίο και έτσι δεν την παρεμποδίζουν. Η επιρροή της ύπαρξης της κατασκευής αρχίζει να εμφανίζεται στην θέση  $C=14\text{m}$  από την κατακόρυφη διάρρηξη του ρήγματος. Η θέση αυτή είναι ακριβώς δίπλα στην διάρρηξη του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο και επηρεάζει ελαφρώς την διάρρηξη. Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.1 έως 4.6, η εντονότερη αλληλεπίδραση προκύπτει για τοποθέτηση της κατασκευής στη θέση  $C=12\text{m}$ , η οποία βρίσκεται ακριβώς πάνω στο σημεία ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο. Παρόλα αυτά, η κατασκευή στη θέση  $C=12\text{m}$  δεν παρουσιάζει τόσο έντονη στροφή σε σχέση με τη θέση  $C=14\text{m}$ , καθώς στην πρώτη εξισορροπείται από την αβαθή δευτερεύουσα διάρρηξη (βλ. Σχήματα 4.1 έως 4.5). Για αυτό το λόγο, η γωνία που στρέφεται η κατασκευή είναι εντός των «αποδεκτών» ορίων. Στην θέση  $C=10\text{m}$ , η στροφή της κατασκευής ξεφεύγει από τα επιτρεπτά όρια για  $d > 0.6\text{m}$ , καθώς η επιρροή της κύριας διάρρηξης μειώνεται αισθητά και η κατασκευή επηρεάζεται πλέον μόνο από την δευτερεύουσα διάρρηξη. Η κατασκευή στην θέση  $C=8\text{m}$  βρίσκεται ακριβώς αριστερά από το κατακρήνισμα και η επιρροή της δευτερεύουσας διάρρηξης είναι έντονη.

Από την θέση  $C=6\text{m}$  και για τις υπόλοιπες θέσεις με μικρότερη τιμή  $C$ , η κατασκευή βρίσκεται εντός του κατακρημνίσματος. Στη θέση αυτή γίνεται αντιληπτή η επιρροή και πάλι της κύριας διάρρηξης, καθώς παρατηρείται ότι η επίδραση της δευτερεύουσας εξασθενεί ενώ τείνει να αναδυθεί στο ίδιο σημείο με την δευτερεύουσα διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο. Στην θέση  $C=6\text{m}$  και για  $d > 0.9\text{m}$  η γωνία της κατασκευής βρίσκεται εκτός επιτρεπτών ορίων, ενώ για την θέση  $C=4\text{m}$  αυτό ισχύει σε μικρότερη μετατόπιση, δηλαδή για  $d > 0.4\text{m}$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι θέσεις  $C=2\text{m}$  και  $C=-2\text{m}$ , που ενώ επηρεάζονται από διαφορετικές διαρρήξεις, δευτερεύουσα και κύρια διάρρηξη αντίστοιχα, είναι συμμετρικές και αντίθετες ως προς την στροφή της κατασκευής. Η κατασκευή σε αυτές τις θέσεις στρέφεται ελάχιστα και εντός «αποδεκτών» ορίων, ενώ η θέση  $C=0\text{m}$  παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την θέση  $C=2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.7** Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στη γωνία στροφής κατασκευής πλάτους 4m (με  $q = 90\text{kPa}$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από -4m έως 18m από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμώδους στρώσης πάχους  $H=20\text{m}$  με  $D_r = 65\%$ .

Μια ακόμη χρήσιμη σύγκριση είναι το πως οι διαφορετικές θέσεις της κατασκευής επηρεάζει την κανονικοποιημένη καθίζηση ( $s/d$ ) της κατασκευής, υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Αυτή η σύγκριση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8**, όπου και πάλι χρησιμοποιείται η ίδια κατηγοριοποίηση θέσεων κατασκευής στο σταθερό τέρμαχος (μαύρες καμπύλες), κοντά στη διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (γκρι καμπύλες) και στο κατακρήνισμα (γαλάζιες καμπύλες). Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει σαφώς ότι για θέσεις στο σταθερό τέρμαχος, οι (κανονικοποιημένες) καθιζήσεις είναι μηδαμινές (έως  $0.15d$ ), αντίθετα από τις θέσεις πλησίον της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο και στο κατακρήνισμα, όπου για  $d > 0.4\text{m}$  οι καθιζήσεις υπερβαίνουν τις μετατοπίσεις του ρήγματος στο υπόβαθρο ( $s/d > 1$ ). Πιο συγκεκριμένα, από την θέση **C=12m** και καθώς η κατασκευή μετακινείται δεξιά και πριν το κατακρήνισμα (μέχρι την θέση  $C=6\text{m}$ ), ο λόγος αυτός τείνει να γίνει ίσος με το **1.6** ( $s/d=1.6$ ). Την στιγμή που η κατασκευή μπαίνει στο κατακρήνισμα, ο λόγος αυτός μειώνεται σταδιακά καθώς η κατασκευή απομακρύνεται και η επιρροή των διαρρήξεων ελαχιστοποιείται.



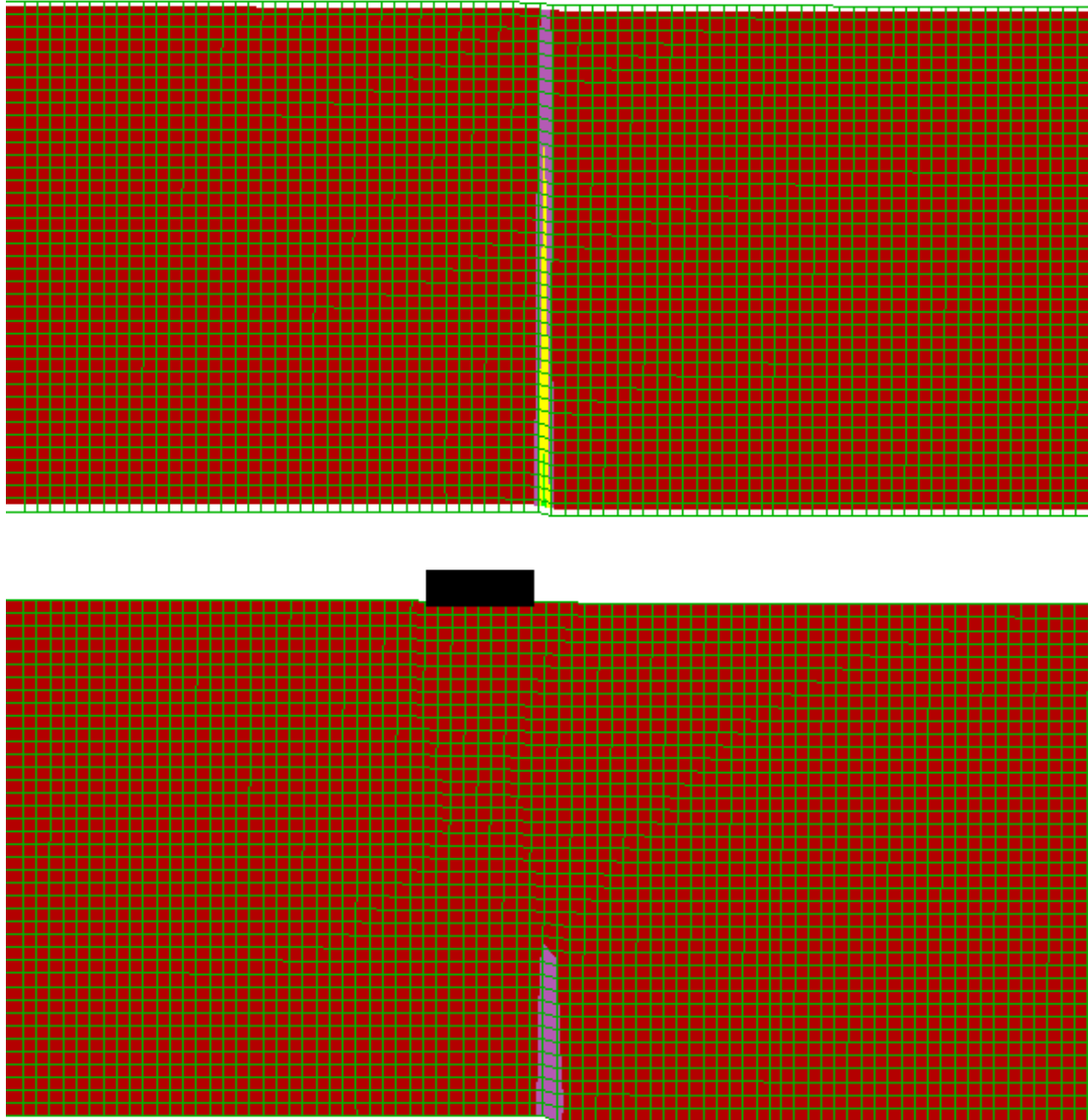
**Σχήμα 4.8** Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση ( $s/d$ ) κατασκευής πλάτους 4m (με  $q = 90\text{kPa}$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από -4m έως 18m από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμώδους στρώσης πάχους  $H=20\text{m}$  με  $D_r = 65\%$ .

### 4.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με κατασκευή στη θέση $C=3\text{m}$

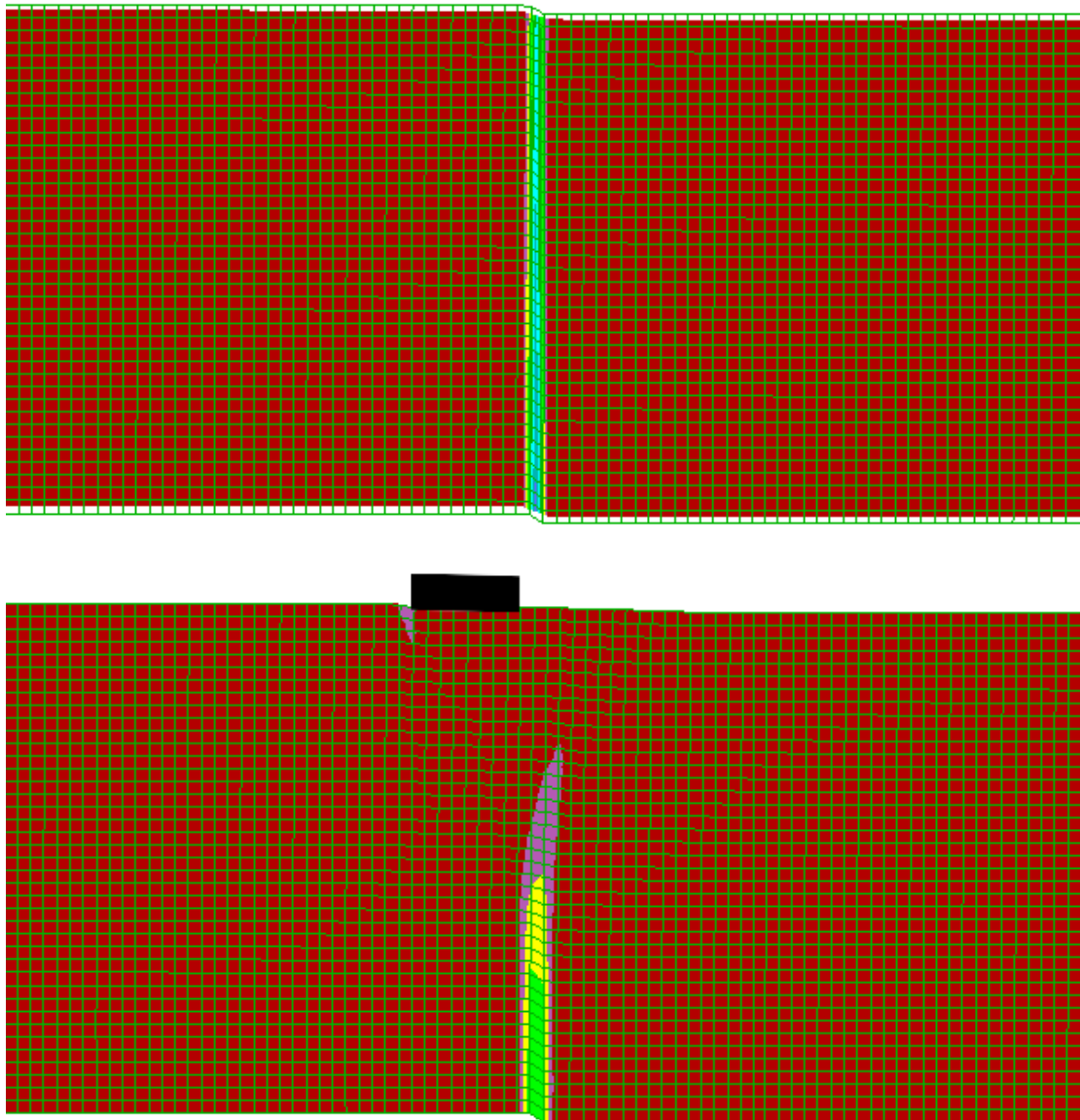
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης της διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας  $85^\circ$  και κατασκευής, τοποθετημένης στην επιφάνεια της αμμώδους στρώσης. Όπως και για κανονικό ρήγμα, πρόκειται για άκαμπτη κατασκευή με πλάτος  $B=4\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$ . Στα **Σχήματα 4.9 έως 4.13** που ακολουθούν απεικονίζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση της εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφες μετακινήσεις  $d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$ , αντίστοιχα. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ της διάρρηξης του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο (free field) και εκείνης υπό την ύπαρξη κατασκευής στην θέση  $C=3\text{m}$ , δηλαδή πιο κοντά στο ίχνος του ρήγματος απ' ό,τι για κανονικό ρήγμα. Η θέση αυτή της κατασκευής επιλέχθηκε από τις δώδεκα (12) συνολικά θέσεις της κατασκευής για «κατακόρυφο» ρήγμα που αναλύθηκαν, καθώς παρουσιάζει την εντονότερη επίδραση πάνω στην διάρρηξη.

Η ύπαρξη της κατασκευής κατά τα πρώτα μέτρα κατακόρυφης μετατόπισης ( $d<0.4\text{m}$ ) δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη διάρρηξη του ρήγματος, εκτός από το γεγονός ότι αναπτύσσονται μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της ζώνης διάρρηξης όταν υπάρχει κατασκευή. Για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.6\text{m}$  παρατηρείται ότι η πορεία που ακολουθεί η διάρρηξη για να αναδυθεί διαφοροποιείται έναντι εκείνης στο ελεύθερο πεδίο. Η ανάδυση γίνεται σε σημείο μακριά από την κατασκευή, ενώ

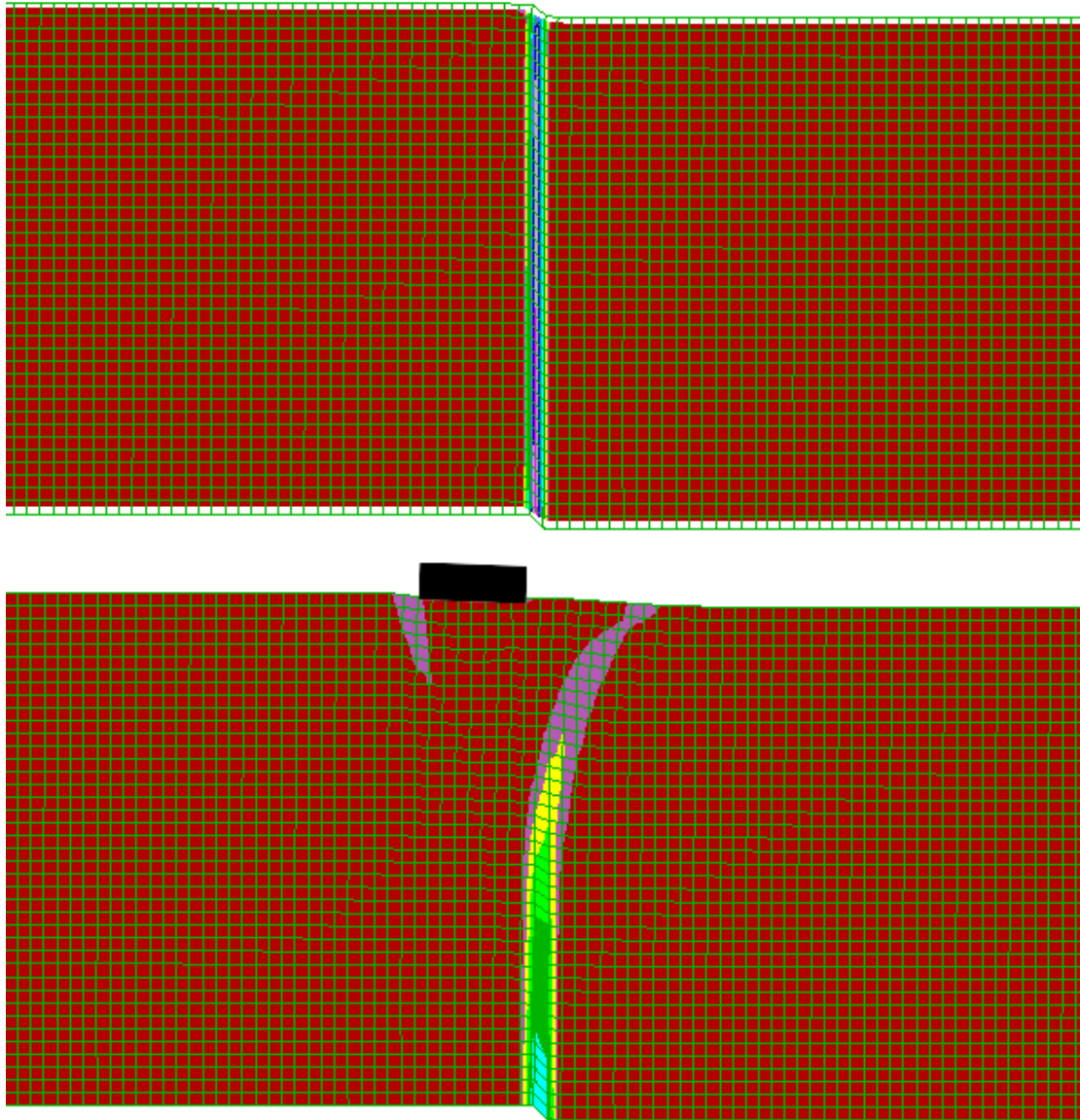
ταυτόχρονα παρατηρείται η δημιουργία δευτερεύουσας διάρρηξης ακριβώς κάτω από το αριστερό άκρο της κατασκευής.



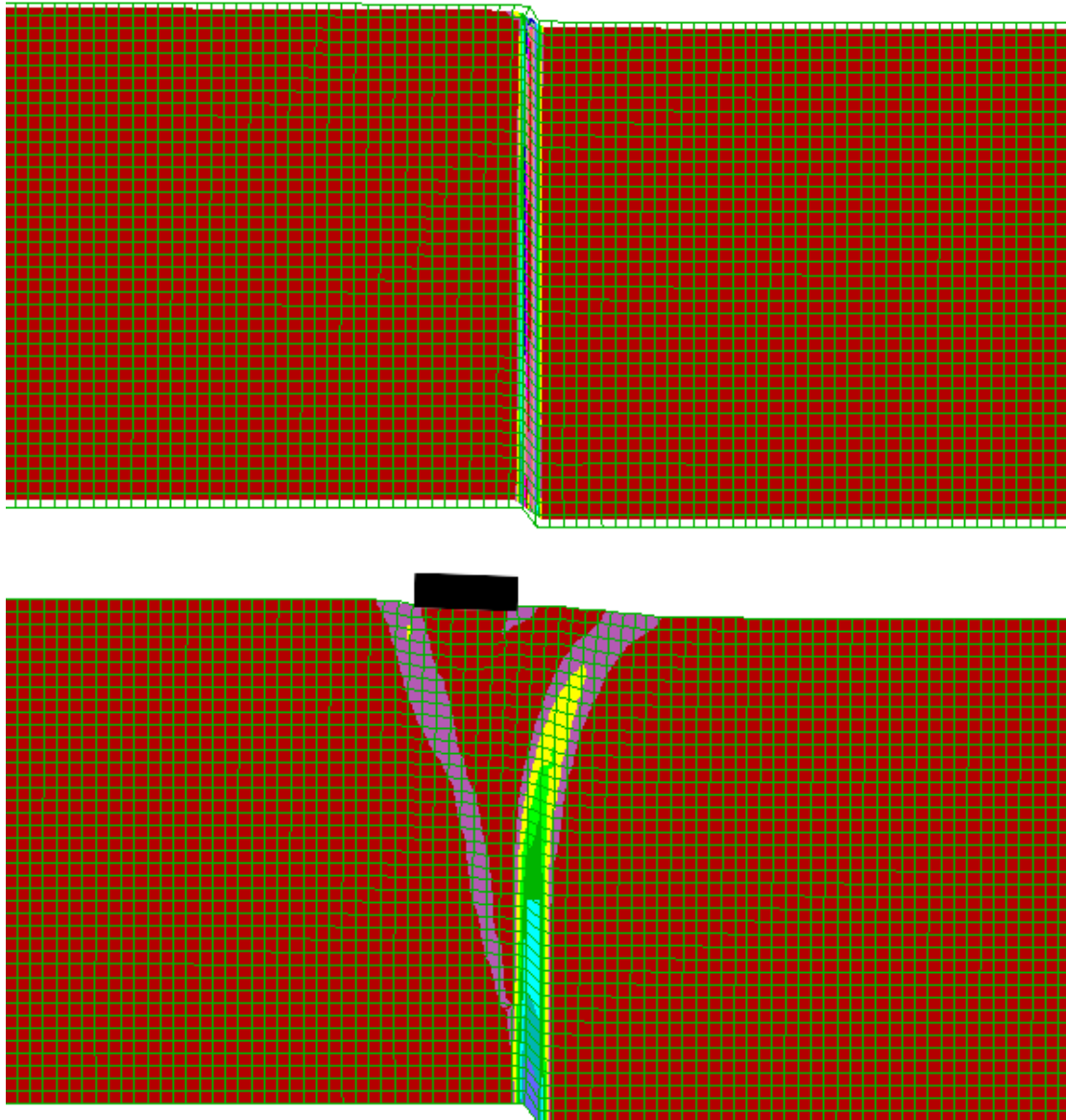
**Σχήμα 4.9** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



**Σχήμα 4.10** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.4\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).

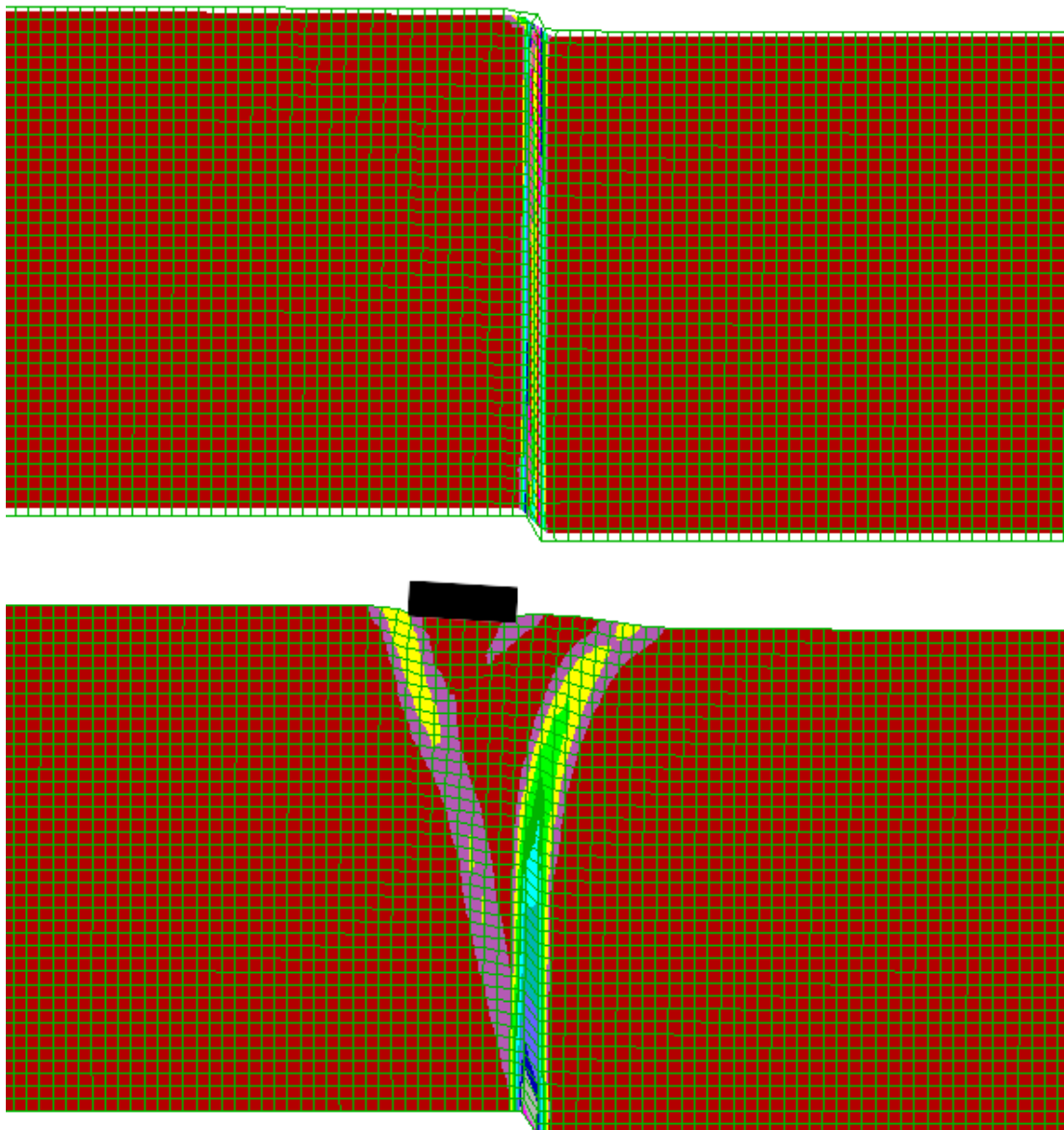


**Σχήμα 4.11** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.6\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



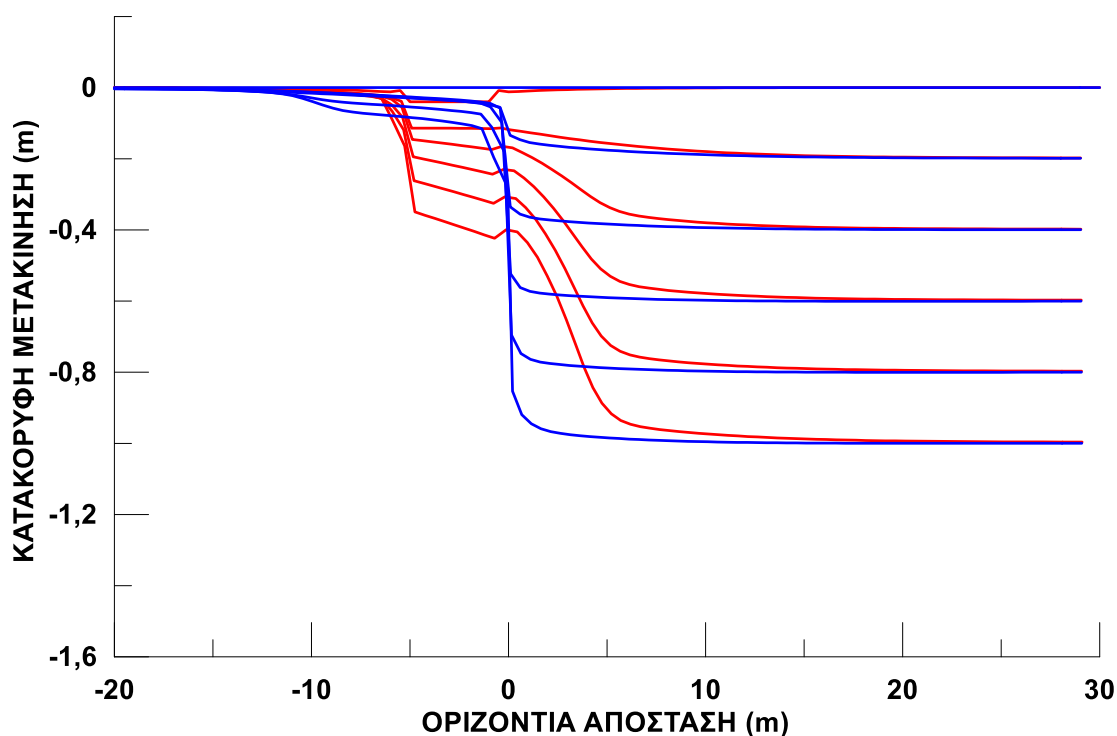
**Σχήμα 4.12** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.8\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).





**Σχήμα 4.13** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).

Η επιρροή της συγκεκριμένης θέσης της κατασκευής γίνεται αντιληπτή και από το παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 4.14**), όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για την διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (**μπλε**) και υπό την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης (**κόκκινο**). Παρατηρείται ότι η διάρρηξη στην περίπτωση του ελεύθερου πεδίου έχει πιο απότομη κλίση στην επιφάνεια από αυτή που δημιουργείται λόγω αλληλεπίδρασης με την κατασκευή, και έτσι επηρεάζεται μικρότερο εύρος της επιφάνειας του εδάφους.



**Σχήμα 4.14** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.

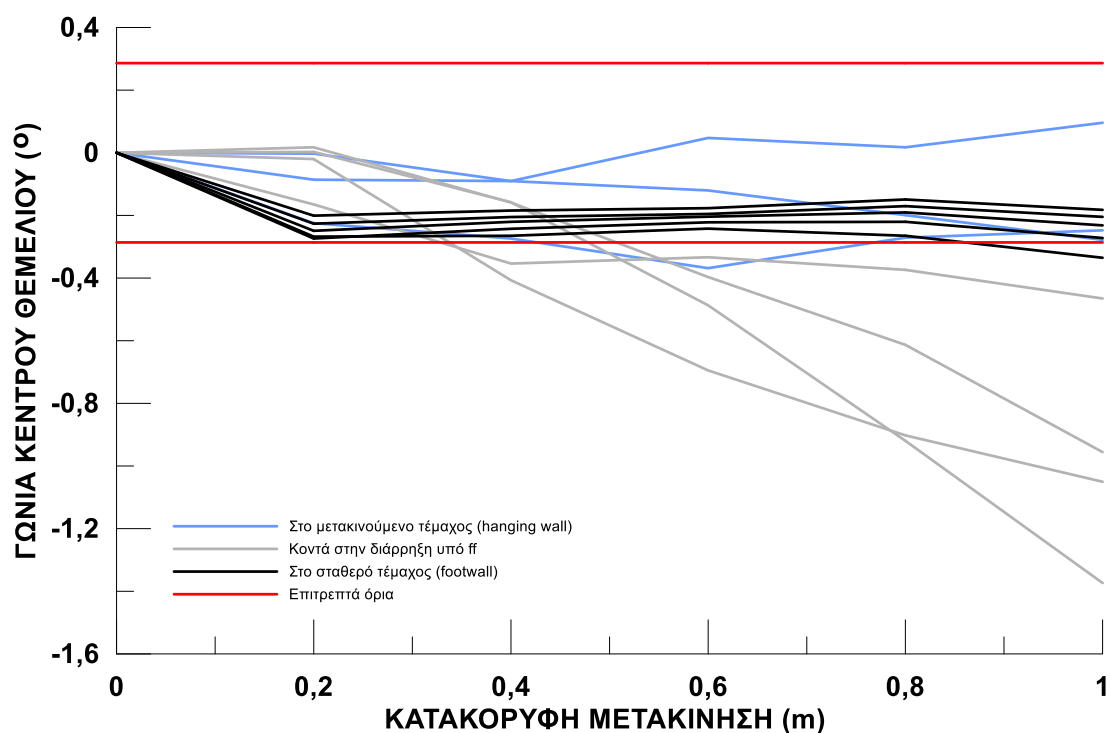
Οι υπόλοιπες αναλυθείσες θέσεις της κατασκευής επιδρούν διαφορετικά στην διάδοση του διάρρηξης διαμέσου της αμμόδους στρώσης. Χάριν πληρότητας, τα αποτελέσματα των αναλύσεων για όλες τις θέσεις της κατασκευής παρουσιάζονται στο τέλος της εργασίας (**Παράρτημα**), ενώ στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση της κατασκευής για κάθε επιλεγμένη θέσεις με το ρήγμα υπό την μορφή διαγραμμάτων στροφής ( $\theta$ ) και κανονικοποιημένης καθίζησης ( $s/d$ ) της κατασκευής με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος ( $d$ ).

Έτσι, στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος στην γωνία στροφής της κατασκευής για όλες τις θέσεις της. Οι θέσεις της κατασκευής κατηγοριοποιούνται ως προς την θέση που παρουσιάζει την εντονότερη επιρροή στην διάρρηξη του ρήγματος ( $C=3\text{m}$ ). Σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως θέσης, μετατοπίσεις ρήγματος έως  $d = 0.4\text{m}$  οδηγούν σε «αποδεκτές» στροφές. Οι καμπύλες με διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε θέσης κατασκευής στο σταθερό τέμαχος (**μαύρες**,  $C = 9$  έως  $5\text{m}$ ), κοντά στη διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (**γκρι**,  $C = 4$  έως  $1\text{m}$ ) και στο μετακινούμενο τέμαχος (**γαλάζιες**,  $C = 0$  έως  $-2\text{m}$ ).

Η ομαδοποίηση αυτή υποδεικνύει ότι σε θέσεις κατασκευής πλησίον της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο είναι αρνητικές (αριστερόστροφες) και εκτός «αποδεκτών» ορίων, ενώ σε απόσταση από το ίχνος του ρήγματος (τόσο στο σταθερό τμήμαχος όσο και στο μετακινούμενο τμήμαχος) η κατασκευή στρέφεται κυρίως εντός «αποδεκτών» ορίων.

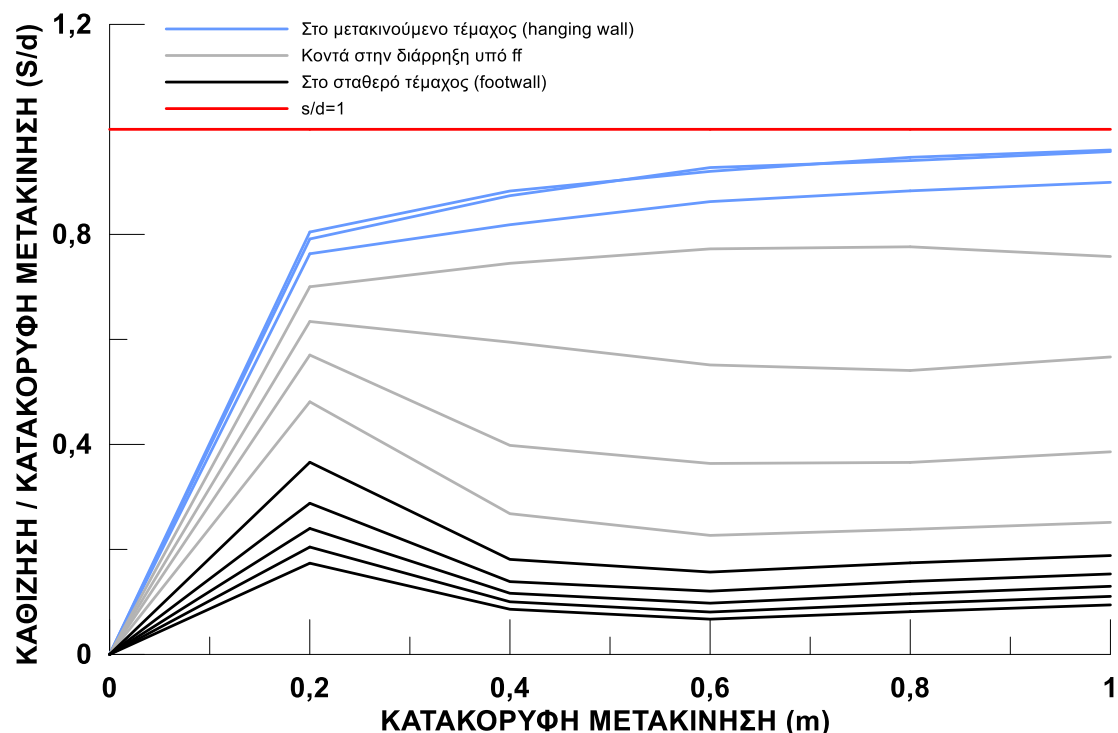
Πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις κατασκευής που είναι μακριά από αυτό το σημείο ( $C=9\text{m}$  έως  $C=5\text{m}$ ) είναι εντός «αποδεκτών» ορίων και οι γωνίες στροφής αυξάνονται σταδιακά. Όσο πλησιάζει η κατασκευή την κατακόρυφη προβολή του ρήγματος από το οριζόντιο επίπεδο ( $x=0$ ), η γωνία στροφής της κατασκευής αυξάνει και ξεπερνάει τα «αποδεκτά» όρια για μικρότερες κατακόρυφες μετακινήσεις. Συγκεκριμένα, για τις θέσεις  $C=4\text{m}$  και  $C=3\text{m}$ , οι γωνίες είναι εκτός ορίων για  $d=0.4\text{m}$ , ενώ για τις θέσεις  $C=2\text{m}$  και  $C=1\text{m}$ , οι γωνίες βγαίνουν εκτός ορίου για  $d=0.6\text{m}$ . Από την θέση  $C=1\text{m}$  και για τις υπόλοιπες θέσεις δεξιά από αυτήν, η κατασκευή πλέον βρίσκεται στο σταθερό υποκείμενο τμήμαχος.

Η πορεία που ακολουθεί η διάρρηξη με την μετατόπιση της κατασκευής είναι αρχικά κανονική ανάδυση στην δεξιά πλευρά της κατασκευής χωρίς καμιά αλλαγή μέχρι η κατασκευή να φτάσει στην θέση  $C=5\text{m}$ . Η εκτροπή της διάρρηξης από την αριστερή πλευρά της κατασκευής συμβαίνει στην θέση  $C=4\text{m}$  και γίνεται πιο έντονη στην θέση  $C=3\text{m}$ , δημιουργώντας ταυτόχρονα και μια δευτερεύουσα διάρρηξη. Καθώς η κατασκευή προχωράει προς το σταθερό τμήμαχος, η διάρρηξη συνεχίζει και αναδύεται από την αριστερή πλευρά του μέχρι την κανονική της ανάδυση για  $C=-2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.15** Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στη γωνία στροφής κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  (με  $q=90\text{kPa}$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από  $-2\text{m}$  έως  $9\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμώδους στρώσης πάχους  $H=20\text{m}$  με  $D_r=65\%$ .

Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος στην καθίζηση της κατασκευής, κανονικοποιημένη ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση (Σχήμα 4.16). Όπως αναμενόταν, όσο η θέση της κατασκευής πλησιάζει από το σταθερό τείχος προς το ίχνος ρήγματος και μετά πηγαίνει προς το μετακινούμενο τείχος, η κανονικοποιημένη καθίζηση αυξάνει. Μάλιστα οι μέγιστες κανονικοποιημένες καθιζήσεις έχουν περίπου επιτευχθεί ήδη από μετατόπιση  $d = 0.2\text{m}$ , για τις περισσότερες θέσεις κατασκευής, αλλά σε όλες τις περιπτώσεις, η μέγιστη καθίζηση είναι μικρότερη από την επιβαλλόμενη μετατόπιση  $d$  ( $s/d < 1$ ).

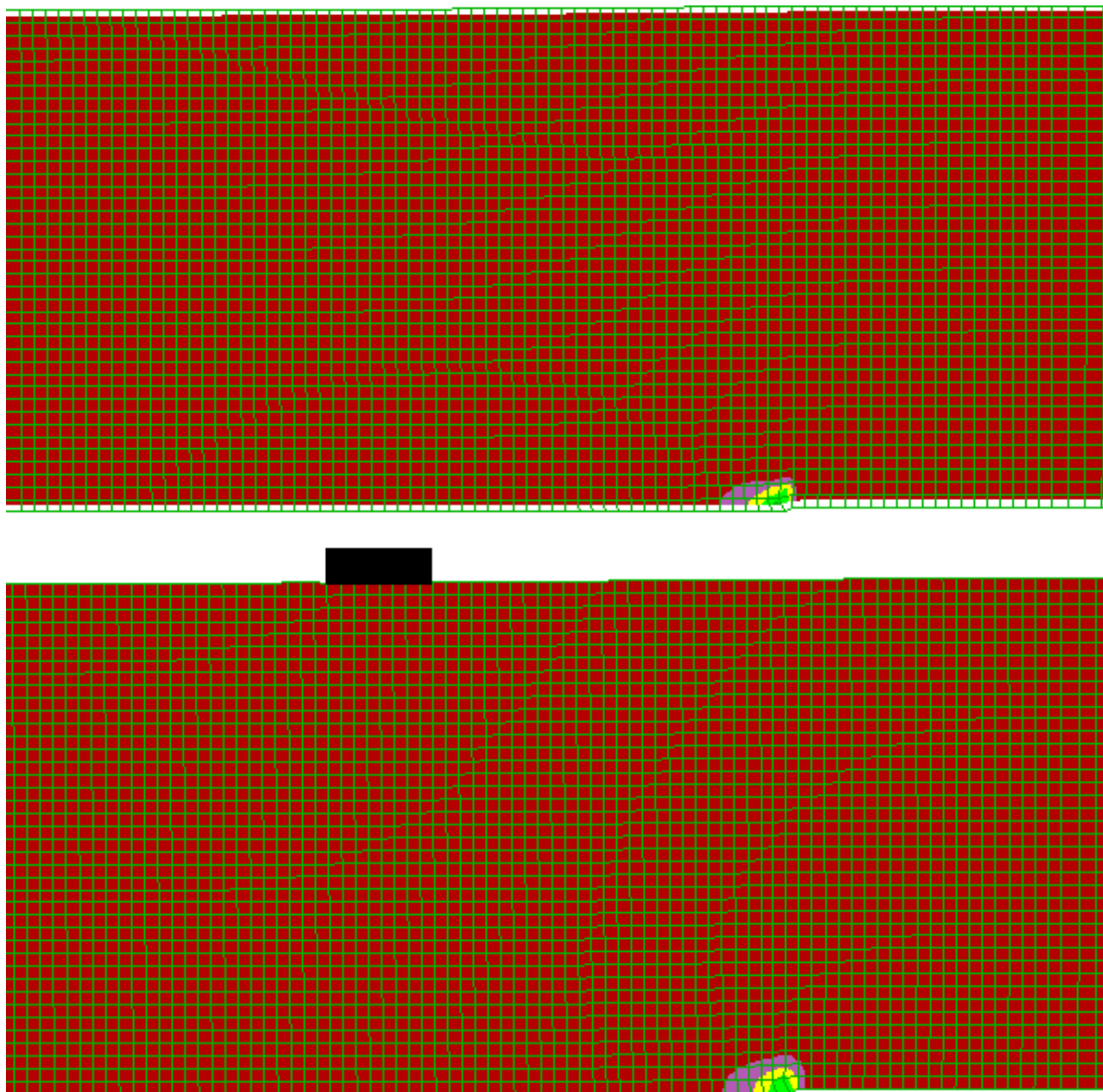


Σχήμα 4.16 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση ( $s/d$ ) κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  (με  $q=90\text{kPa}$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από  $-2\text{m}$  έως  $9\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμώδους στρώσης πάχους  $H=20\text{m}$  με  $Dr=65\%$ .

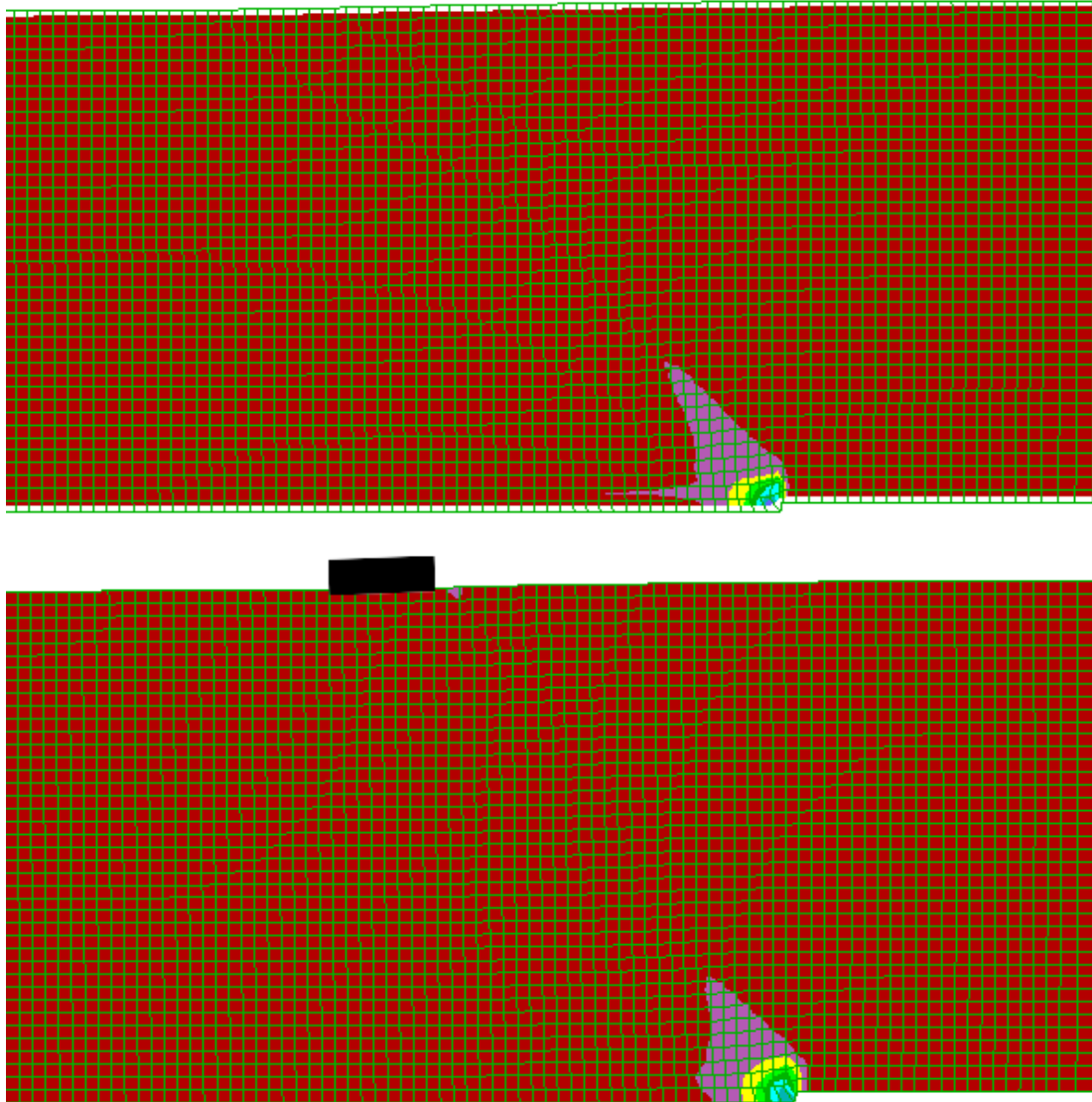
#### 4.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατασκευή στη θέση $C=16\text{m}$

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος γωνίας  $135^\circ$  και κατασκευής, τοποθετημένης στην επιφάνεια της αμμώδους στρώσης. Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους, πρόκειται για άκαμπτη κατασκευή με πλάτος  $B=4\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$ . Για το συγκεκριμένο τύπο ρήγματος ( $\beta = 135^\circ$ ), η θέση που εμφανίζει την μεγαλύτερη επιρροή είναι η  $C=16\text{m}$  από την κατακόρυφη προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια, δηλαδή η πλέον μακρινή από το ίχνος συγκριτικά με ό,τι παρατηρήθηκε για κανονικό και «κατακόρυφο» ρήγμα, καθώς σε ανάστροφο ρήγμα το ρήγμα εκτρέπεται προς το σταθερό τείχος.

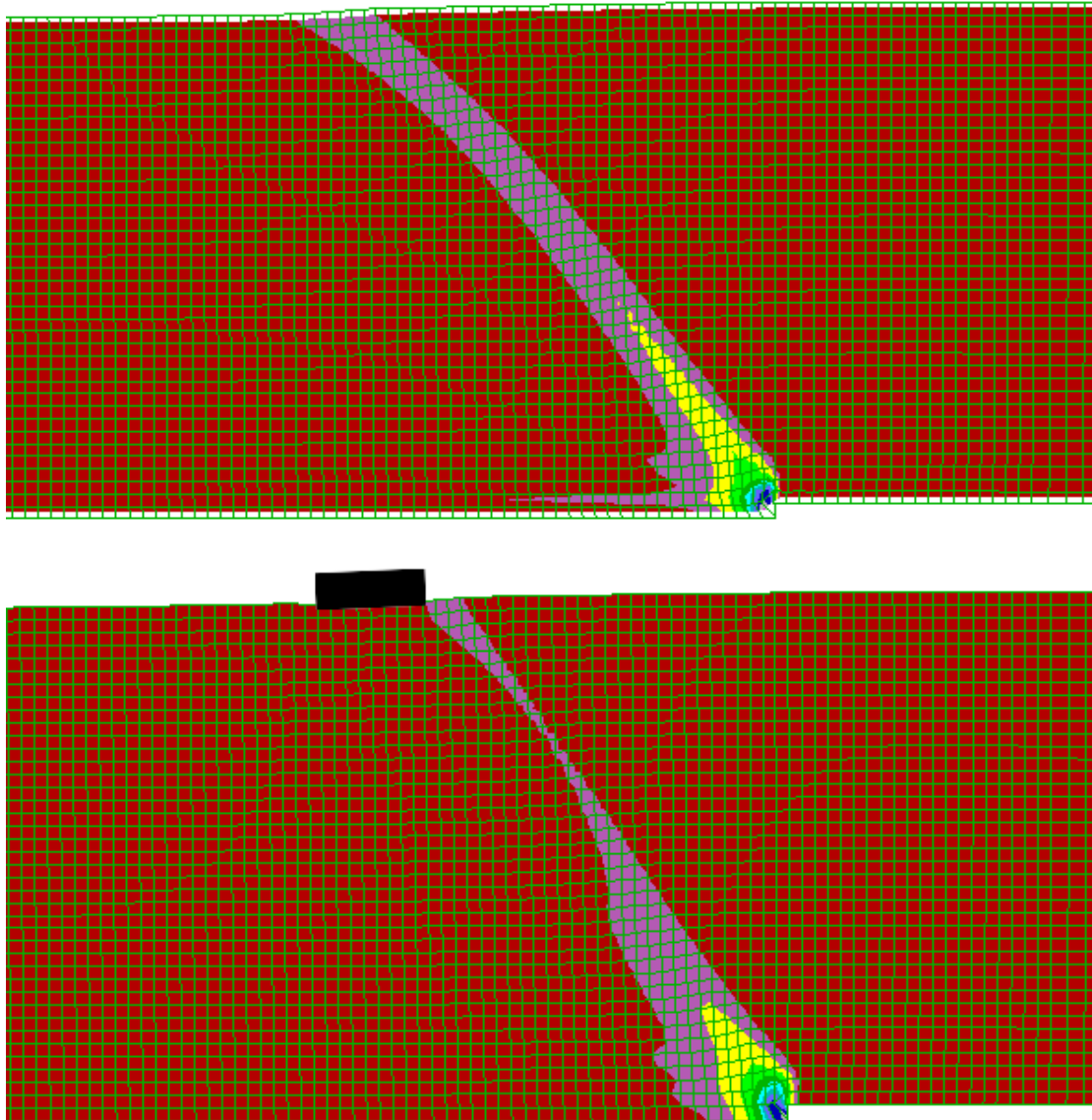
Η ανάδυση του ανάστροφου ρήγματος είναι πιο «αργή» από τα άλλα δύο είδη ρηγματίων (κανονικό, «κατακόρυφο»), δηλαδή συγκριτικά χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να αναδυθεί στην επιφάνεια, και αυτό είναι κοινός τόπος στη βιβλιογραφία (π.χ. Αναστασόπουλος 2006, Loukidis et al. 2009). Επομένως, η αλληλεπίδραση κατασκευής-ρήγματος στη διάρρηξη γίνεται εμφανής μόνο για κατακόρυφη μετατόπιση μεγαλύτερη ή ίση των 0.6m ( $d > 0.6m$ ), δηλαδή αφού αναδυθεί το ρήγμα στο ελεύθερο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, για  $d=0.6m$ , το ρήγμα εκτρέπεται αρχικώς προς την δεξιά πλευρά της κατασκευής, όμως για  $d=0.8m$  μετά δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη προς την αριστερή πλευρά της κατασκευής. Στη συνέχεια, για  $d=1.0m$ , η διάρρηξη εμπεδώνεται κυρίως στη δευτερεύουσα διάρρηξη, η οποία αποκρίνεται ως η σημαντικότερη εκ των δύο.



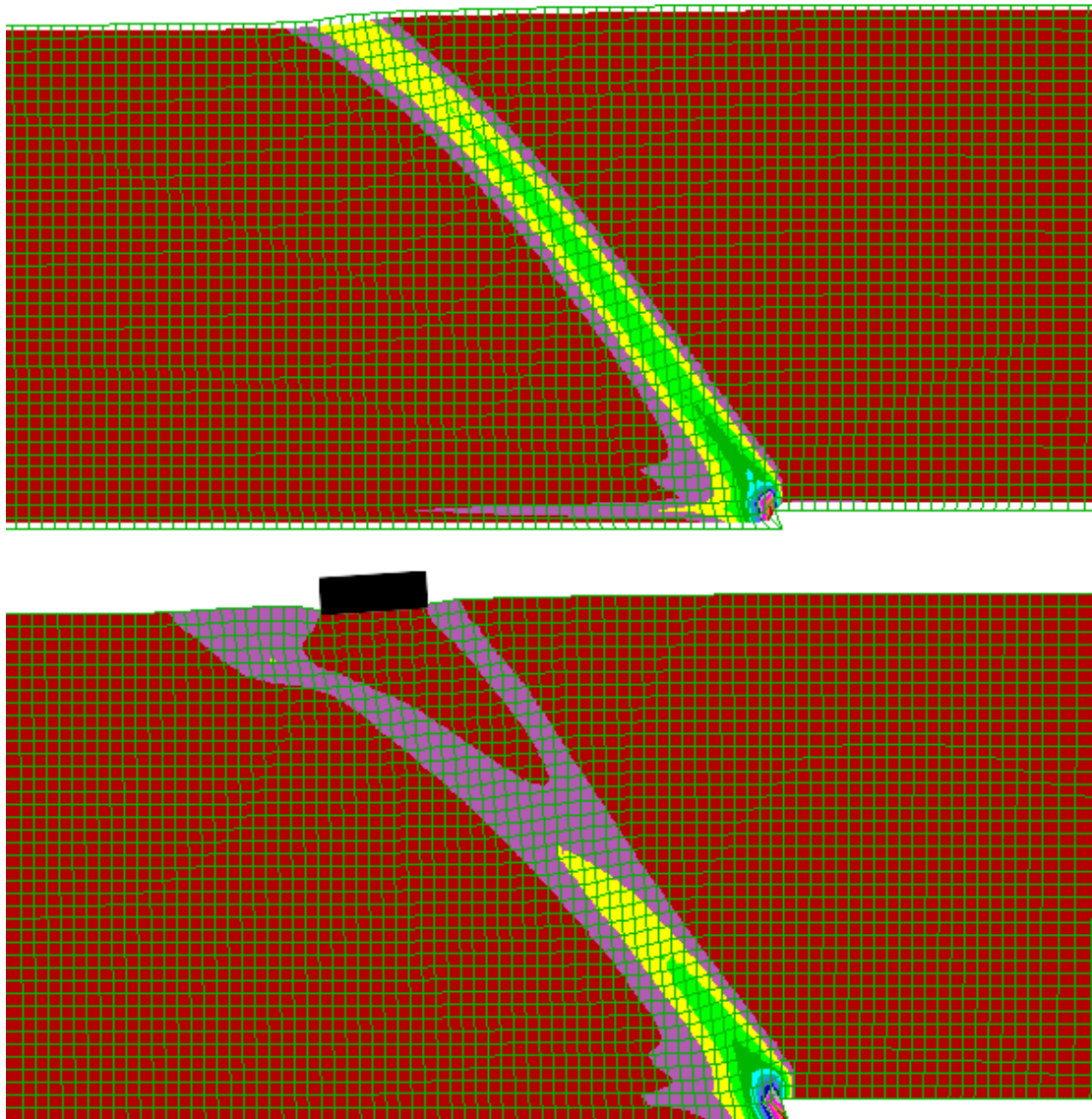
**Σχήμα 4.17** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2m$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



**Σχήμα 4.18** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.4\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).

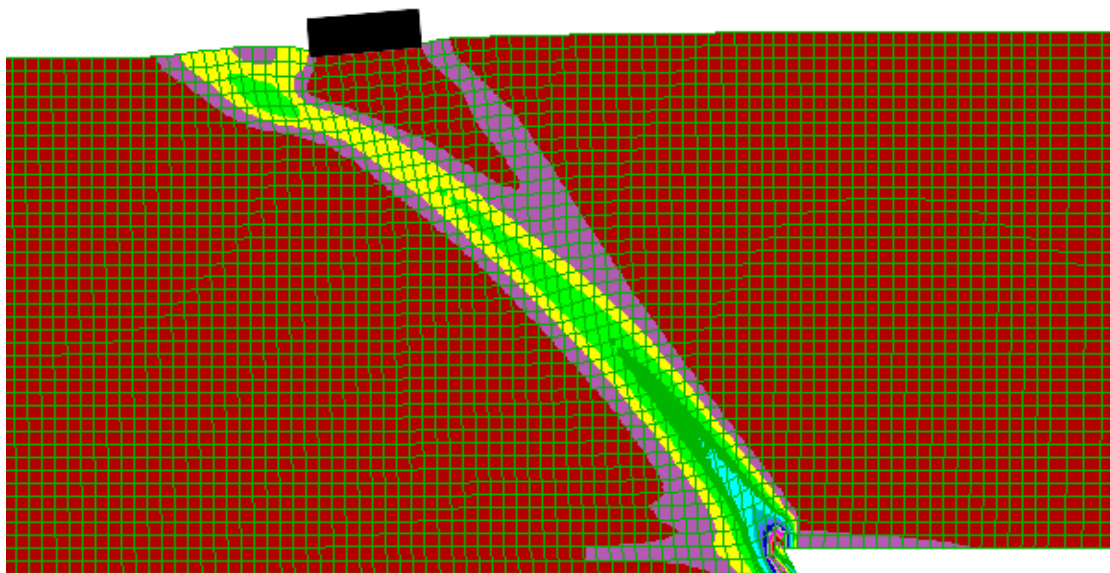
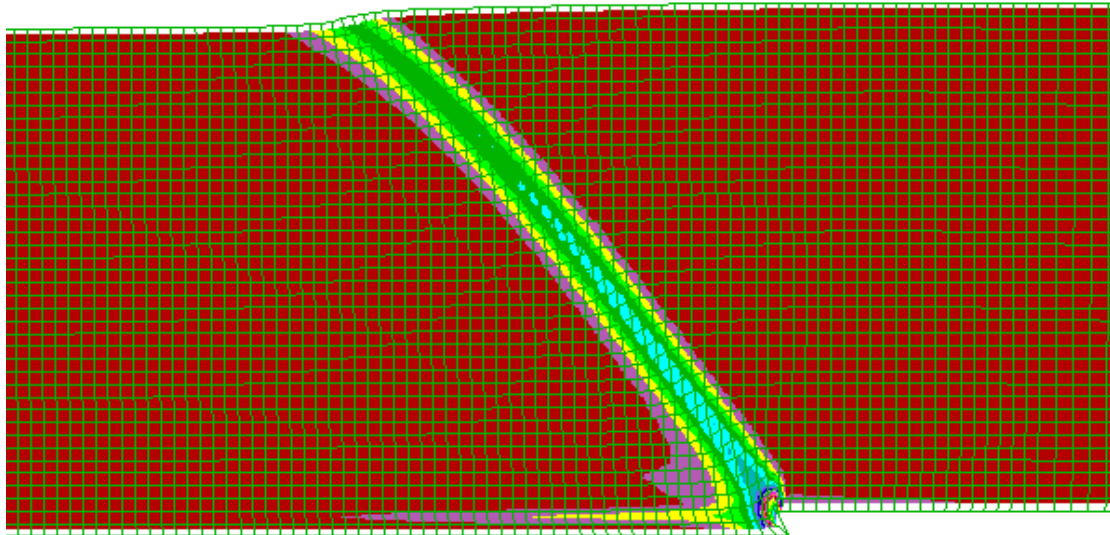


**Σχήμα 4.19** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.6\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).



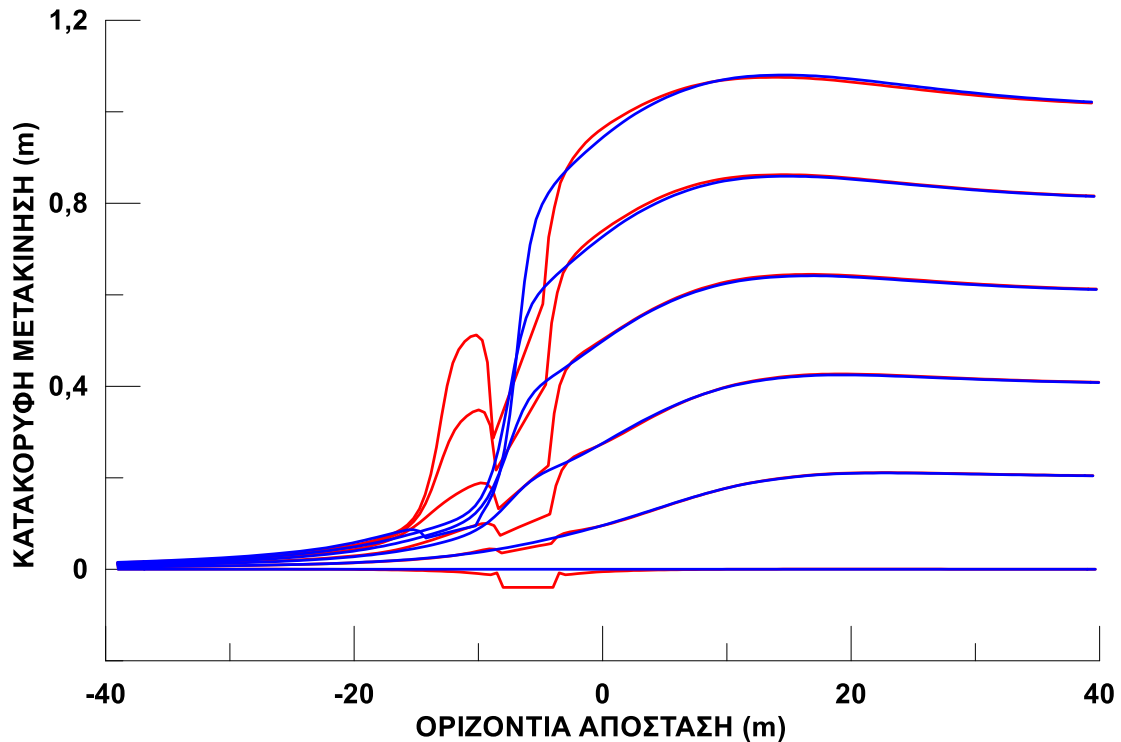
**Σχήμα 4.20** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.8\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).





**Σχήμα 4.21** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , για ελεύθερο πεδίο (άνω) και για θέση κατασκευής πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος (κάτω).

Η επιρροή της συγκεκριμένης θέσης της κατασκευής γίνεται αντιληπτή και από το παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 4.22**). Το διάγραμμα παρουσιάζει την παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους για την διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (**μπλε**) και υπό την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης (**κόκκινο**). Παρατηρείται ότι η διάρρηξη που προκύπτει λόγω κατασκευής εμφανίζει σημαντική διαστολή (αύξηση όγκου) αριστερά από την κατασκευή όπου εμποδώνεται η διάρρηξη για  $d > 0.8\text{m}$ . Κατά τα άλλα, δεξιά από την κατασκευή, η παραμορφωμένη επιφάνεια δείχνει σχεδόν ανεπηρέαστη από την ύπαρξή της.

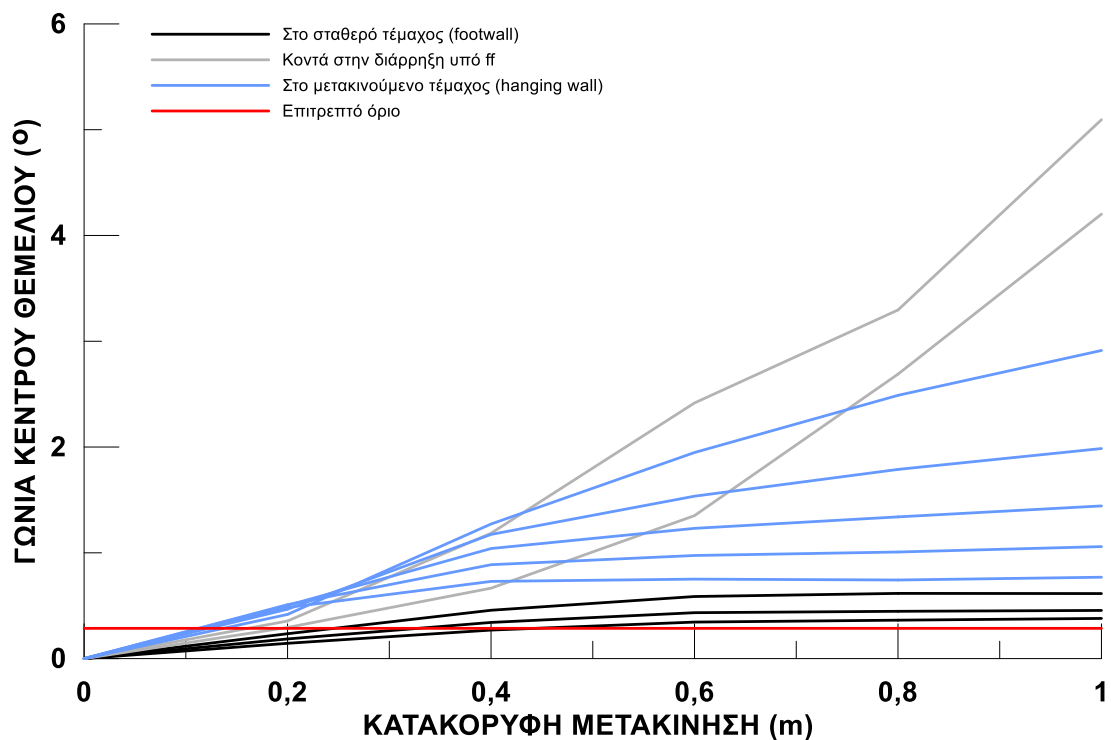


**Σχήμα 4.22** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.

Χάριν συντομίας, τα αποτελέσματα των αναλύσεων για όλες τις θέσεις της κατασκευής για ανάστροφο ρήγμα ( $135^\circ$ ) παρουσιάζονται στο τέλος της εργασίας (**Παράρτηματα**). Η τοποθέτηση της κατασκευής ξεκίνησε από μια θέση μακριά από την κατακόρυφη προβολή του ρήγματος στην επιφάνεια και με μηδενική επιρροή και μετατοπιζόταν δεξιά ανά  $2\text{m}$ . Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη γωνία στροφής της κατασκευής για όλες τις θέσεις που αναλύθηκαν, καθώς και η καθίζησή της (κανονικοποιημένη ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος).

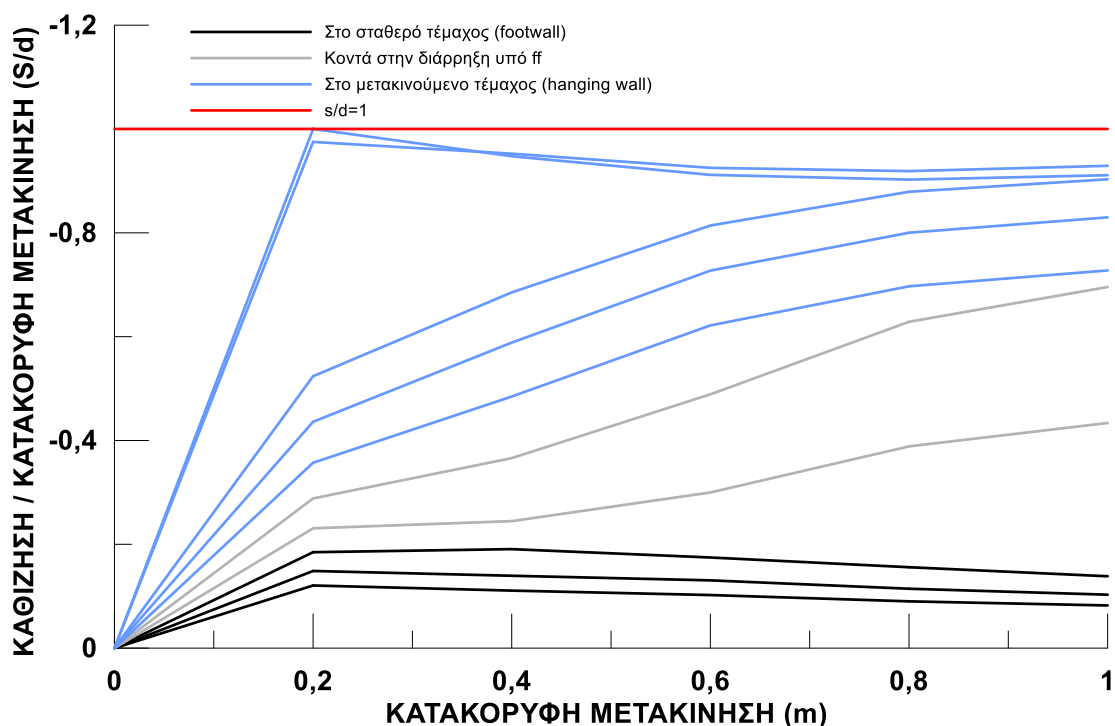
Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  ανάστροφου ρήγματος στην γωνία στροφής της κατασκευής για όλες τις θέσεις που αναλύθηκαν. Οι θέσεις της κατασκευής κατηγοριοποιούνται ως προς την θέση που βρίσκεται ακριβώς πάνω στην διάρρηξη του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίου ( $C=16\text{m}$ ). Έτσι, οι καμπύλες με διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε θέσεις κατασκευής στο σταθερό τμήμα (**μαύρες**,  $C = 22$  έως  $18\text{m}$ ), κοντά στη διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο (**γκρι**,  $C = 16, 14\text{m}$ ) και στο μετακινούμενο τμήμα (**γαλάζιες**,  $C = 12$  έως  $4\text{m}$ ). Η ομαδοποίηση αυτή δείχνει πως για θέσεις στο σταθερό τμήμα η κατασκευή στρέφεται κοντά στα «επιτρεπτά» όρια. Καθώς πλησιάζει την διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο, οι γωνίες στροφής της κατασκευής αυξάνονται έντονα, μέχρι η κατασκευή να απομακρυνθεί προς το μετακινούμενο τμήμα, όπου οι γωνίες στροφής μειώνονται σταδιακά και τείνουν να γίνουν ίσες με τις αντίστοιχες στο σταθερό τμήμα. Σε κάθε περίπτωση, οι στροφές είναι αριστερόστροφες και για  $d > 0.4\text{m}$ , είναι εκτός αποδεκτών ορίων, ανεξαρτήτως θέσης.

Πιο αναλυτικά, για τις θέσεις που είναι στο σταθερό τέρμαχος και μακριά από το σημείο ανάδυσης υπό ελεύθερο πεδίο ( $C=22$  έως  $C=18m$ ), οι γωνίες της κατασκευής βρίσκονται εντός ορίου. Η σημαντική επιρροή της διάρρηξης στην απόκριση της κατασκευής ξεκινά στη θέση  $C=18m$ , αλλά γίνεται αισθητική στην θέση  $C=16m$ . Η κατασκευή σε αυτήν την θέση βρίσκεται πάνω στην θέση διάρρηξης του ρήγματος στην επιφάνεια υπό ελεύθερο πεδίο και στρέφεται έντονα. Ομοίως και για την θέση  $C=14m$ , όπου η γωνία της κατασκευής παίρνει την μέγιστη τιμή της (περί τις  $5^\circ$ ). Από αυτή την θέση όμως και πιο δεξιά προς το μετακινούμενο τέρμαχος, η γωνία της κατασκευής μειώνεται ξανά, καθώς η κατασκευή απομακρύνεται από το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο και η αλληλεπίδραση βαίνει μειούμενη.



**Σχήμα 4.23** Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στη γωνία στρόφης κατασκευής πλάτους 4m (με  $q=90kPa$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από 4m έως 22m από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμόδους στρώσης πάχους  $H=20m$  με  $Dr=65\%$ .

Το διάγραμμα καθιζήσεων της κατασκευής για ανάστροφο ρήγμα ακολουθεί αντίστοιχη λογική με τα διαγράμματα καθιζήσεων για κανονικό και «κατακόρυφο» ρήγμα. Συγκεκριμένα, για απομακρυσμένες θέσεις ( $C=22m$  έως  $C=18m$ ) στο σταθερό τέρμαχος, οι καθιζήσεις είναι πολύ μικρές. Όταν η κατασκευή πλησιάζει σταδιακά την θέση ανάδυσης του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, οι καθιζήσεις αυξάνονται. Η αύξηση αυτή δεν είναι απότομη, καθώς για κάθε κατακόρυφη μετατόπιση υπάρχει μια σταδιακή αύξηση των καθιζήσεων. Οι θέσεις που βρίσκονται στο υπερκείμενο τέρμαχος ( $C=6m$  και  $C=4m$ ), ο λόγος καθίζησης κατασκευής προς κατακόρυφη μετατόπιση τείνει να γίνει ίσος με την μονάδα ( $s/d=1$ ), δηλαδή οι καθιζήσεις να εξισωθούν με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος.



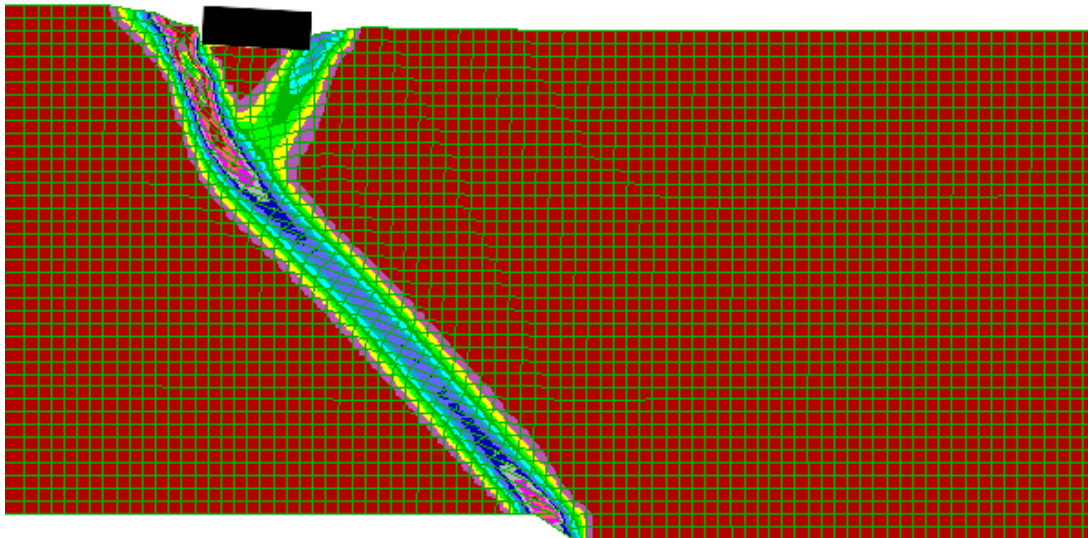
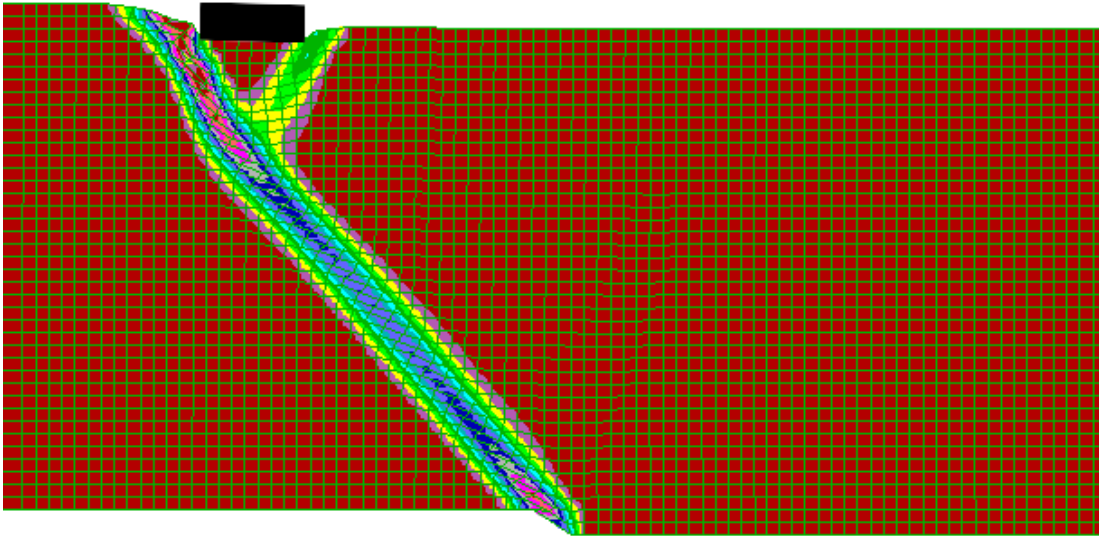
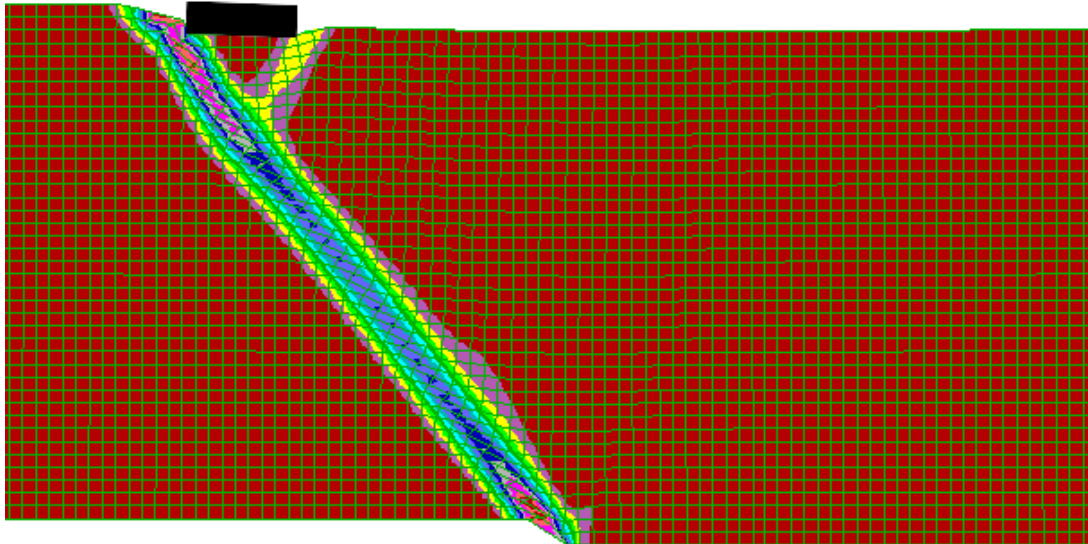
**Σχήμα 4.24** Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στην κανονικοποιημένη καθίζηση ( $s/d$ ) κατασκευής πλάτους 4m (με  $q=90\text{kPa}$ ) που βρίσκεται σε διάφορες αποστάσεις  $C$  από 4m έως 22m από το ίχνος του ρήγματος επί της επιφάνειας αμμόδους στρώσης πάχους  $H=20\text{m}$  με  $D_r=65\%$ .

#### 4.5 Επίδραση αύξησης του φορτίου κατασκευής

Στην συγκεκριμένη παράγραφο μελετάται η επιρροή που έχει το φορτίο της κατασκευής στην διάρρηξη ρηγμάτων διαφορετικού τύπου. Συγκεκριμένα, για κάθε μία από τις θέσεις μέγιστης επιρροής που εντοπίστηκαν ανά τύπο ρήγματος στις παραγράφους 4.2 έως 4.4, το φορτίο της κατασκευής αυξάνεται εδώ από  $q = 90\text{kPa}$  σε τιμή διπλάσια ( $q=180\text{kPa}$ ) και τριπλάσια ( $q=270\text{kPa}$ ). Οι νέες αναλύσεις έγιναν με την ίδια μεθοδολογία όπως και εκείνες των παραγράφων 4.2 έως 4.4, με εξαίρεση το φορτίο κατασκευής που επιβάλλεται πριν ξεκινήσει η μετατόπιση ρήγματος στο βράχο. Τα λεπτομερή αποτελέσματα των νέων αναλύσεων βρίσκονται στο **Παράρτημα** και στις παρακάτω παραγράφους συγκρίνονται τα αποτελέσματα μόνο για τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση κάθε ρήγματος ( $d=1.0\text{m}$ ), όπου και αναμένονται οι μέγιστες διαφοροποιήσεις λόγω φορτίου κατασκευής.

##### 4.5.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος με κατασκευές διαφορετικών φορτίων

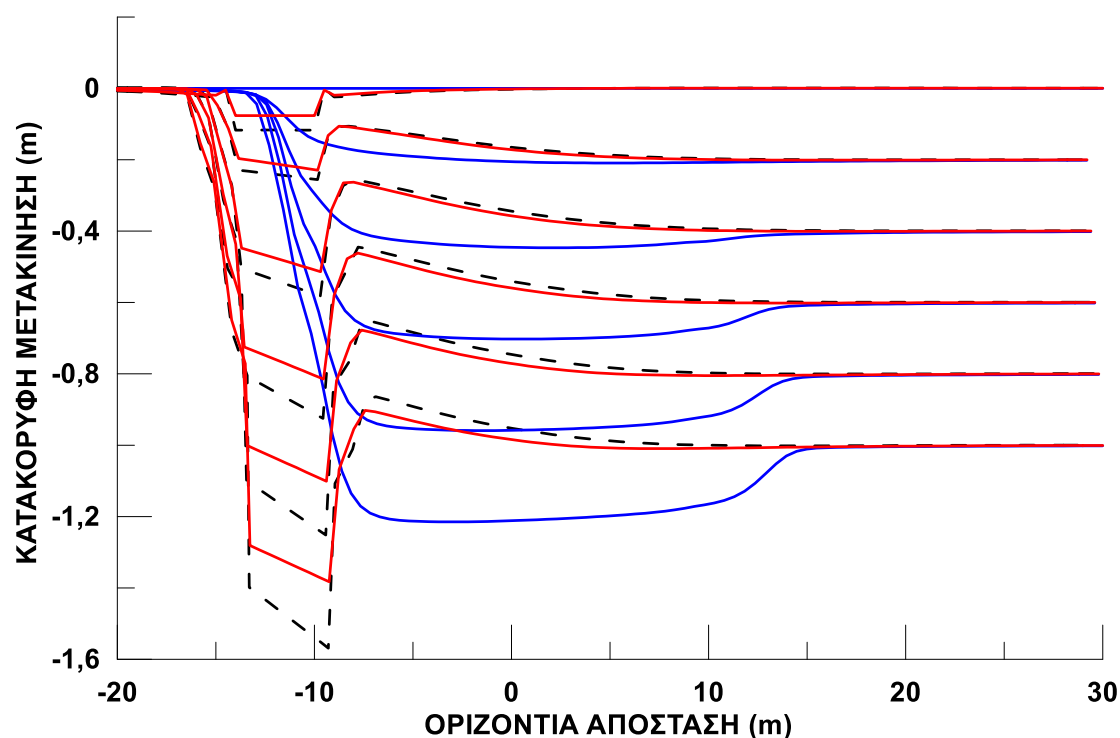
Στο **Σχήμα 4.25** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις στην αμμόδη στρώση θεμελίωσης κατασκευών με φορτίο  $q = 90\text{kPa}$  (άνω),  $180\text{kPa}$  (μέση),  $270\text{kPa}$  (κάτω), όταν αυτές υπόκεινται σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta = 45^\circ$ ) με τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ . Σε όλες τις περιπτώσεις, η κατασκευή είναι τοποθετημένη στη θέση  $C=12\text{m}$ , η όποια έχει εκτιμηθεί ως έχουσα τη μέγιστη επιρροή στη διάρρηξη, τουλάχιστον για φορτίο  $q = 90\text{kPa}$  με βάση την παράγραφο 4.2.



**Σχήμα 4.25** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση αμμώδους στρώσης σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , για θέση κατασκευής με  $C=12\text{m}$  και φορτίο:  $q=90\text{kPa}$  (πάνω),  $q=180\text{kPa}$  (μέση) και  $q=270\text{kPa}$  (κάτω).

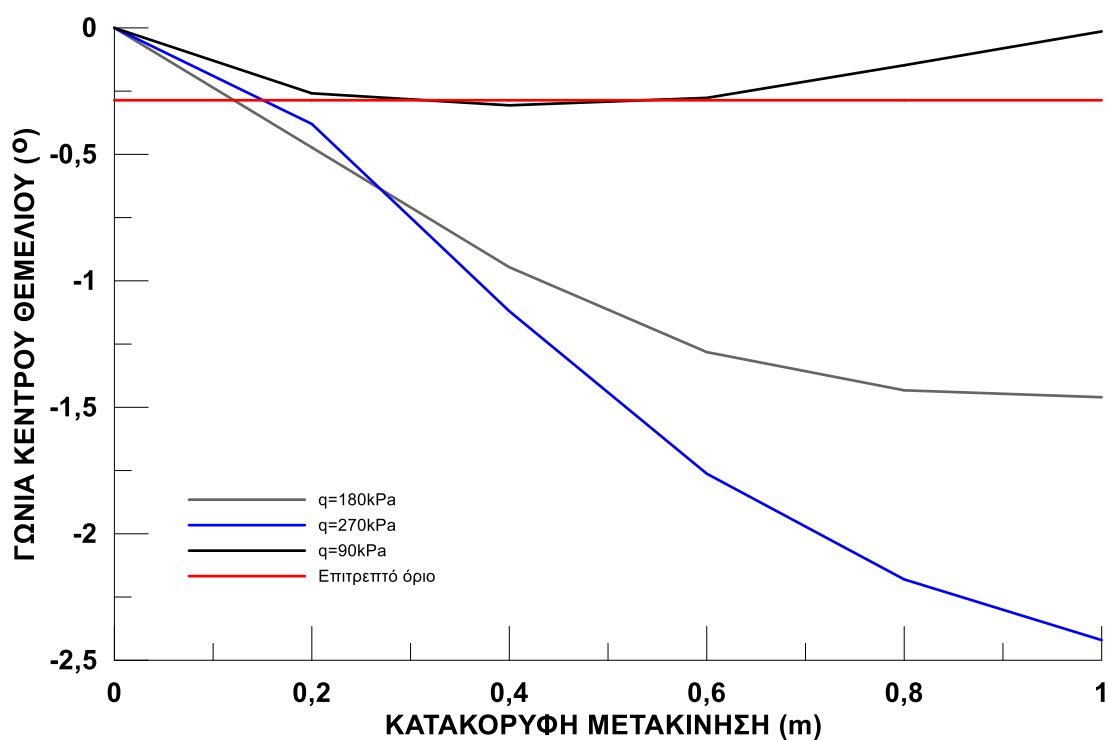
Με βάση το **Σχήμα 4.25** δεν προκύπτουν ποιοτικές διαφοροποιήσεις στη διάδοση της διάρρηξης λόγω διαφορετικού φορτίου κατασκευής, μόνο ποσοτικά οι διατμητικές παραμορφώσεις εντός των ζωνών ολίσθησης γίνονται πιο έντονες όσο αυξάνει το φορτίο κατασκευής, ενώ διαφαίνονται αλλαγές στη στροφή και στην καθίζηση της κατασκευής.

Παρακάτω, στο **Σχήμα 4.26** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμόδους στρώσης υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta = 45^\circ$ ) για υπό ελεύθερο πεδίο (**μπλε**), αλλά και υπό την ύπαρξη κατασκευής με αυξημένο φορτίο και συγκεκριμένα για  $q=180\text{kPa}$  (**κόκκινη**) και  $q=270\text{kPa}$  (**μαύρη**). Προκειμένου το παρακάτω σχήμα να είναι κατανοητό, περιλαμβάνει μόνο τα μεγαλύτερα φορτία και είναι συγκρίσιμο με το **Σχήμα 4.6** που περιλαμβάνει το μικρό φορτίο. Η επίδραση του φορτίου είναι ποσοτικά σημαντική και εντοπίζεται κυρίως στην εντονότερη αύξηση της καθίζησης και της στροφής της κατασκευής με την κατακόρυφη μετατόπιση του κανονικού ρήγματος.

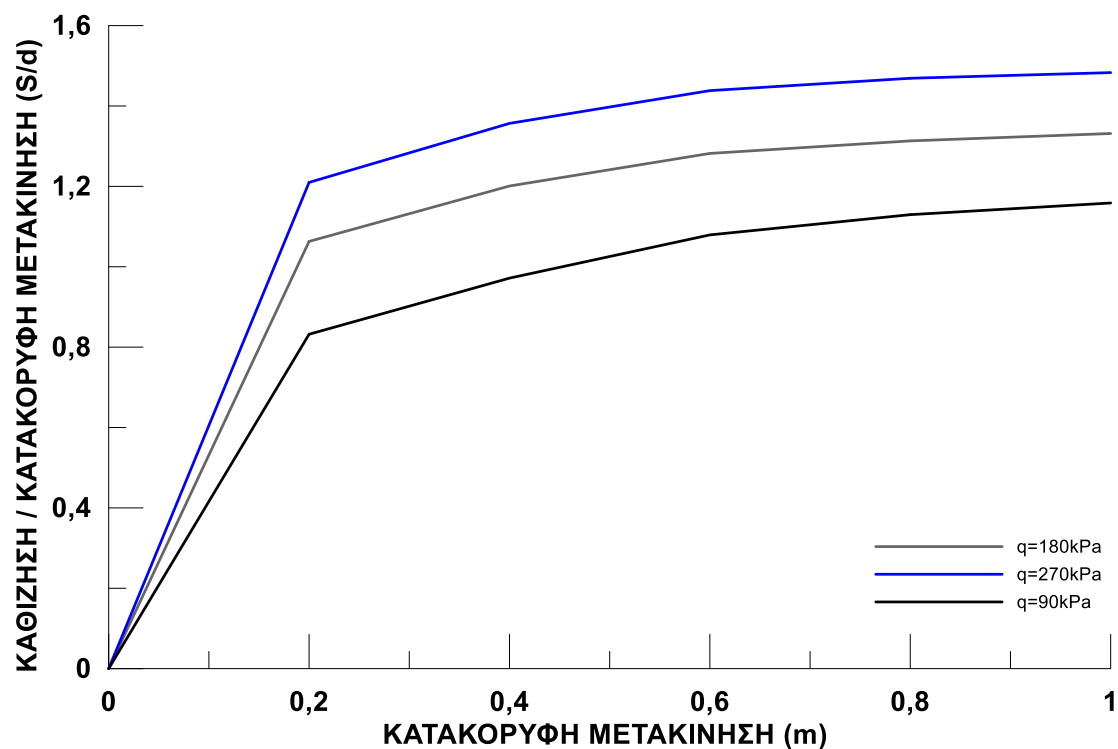


**Σχήμα 4.26** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για κατασκευή (πλάτους  $4\text{m}$  σε θέση με απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος) με φορτία  $q=180\text{kPa}$  και  $q=270\text{kPa}$ .

Για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αύξησης του φορτίου της κατασκευής στην απόκρισή της υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta = 45^\circ$ ), τα **Σχήματα 4.27** και **4.28** παρουσιάζουν την επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  του ρήγματος στη στροφή και την κανονικοποιημένη καθίζηση της κατασκευής όταν φέρει τρία (3) διαφορετικά φορτία:  $q = 90, 180$  και  $270 \text{ kPa}$ .



Σχήμα 4.27 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στη γωνία στροφής κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .



Σχήμα 4.28 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στην (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.27** παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  του ρήγματος στη γωνία στροφής της κατασκευής με καμπύλες διαφορετικού χρώματος:  $q = 90\text{kPa}$  (**μαύρο**),  $q = 180\text{kPa}$  (**γκρι**) και  $q = 270\text{kPa}$  (**μπλε**). Όπως προκύπτει, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής αυξάνει ραγδαία τη στροφή της κατασκευής, και ειδικά για σχετικά μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος. Μάλιστα, ενώ για  $q = 90\text{kPa}$  εμφανίζει πρακτικώς «αποδεκτές» στροφές ανεξαρτήτως της μετατόπισης  $d$ , για μεγαλύτερα φορτία, οι στροφές γίνονται μη-αποδεκτές ακόμη και για  $d < 0.2\text{m}$ . Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.28** παρουσιάζεται η επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  του ρήγματος στην κανονικοποιημένη καθίζηση της κατασκευής με καμπύλες διαφορετικού χρώματος:  $q = 90\text{kPa}$  (**μαύρο**),  $q = 180\text{kPa}$  (**γκρι**) και  $q = 270\text{kPa}$  (**μπλε**). Αντίστοιχα με τη στροφή, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής αυξάνει και την κανονικοποιημένη καθίζησή της, ενώ τα μεγαλύτερα φορτία οδηγούν σε καθιζήσεις μεγαλύτερες από τη μετατόπιση του ρήγματος, ακόμη και για μικρές τιμές μετατόπισης  $d = 0.20\text{m}$ .

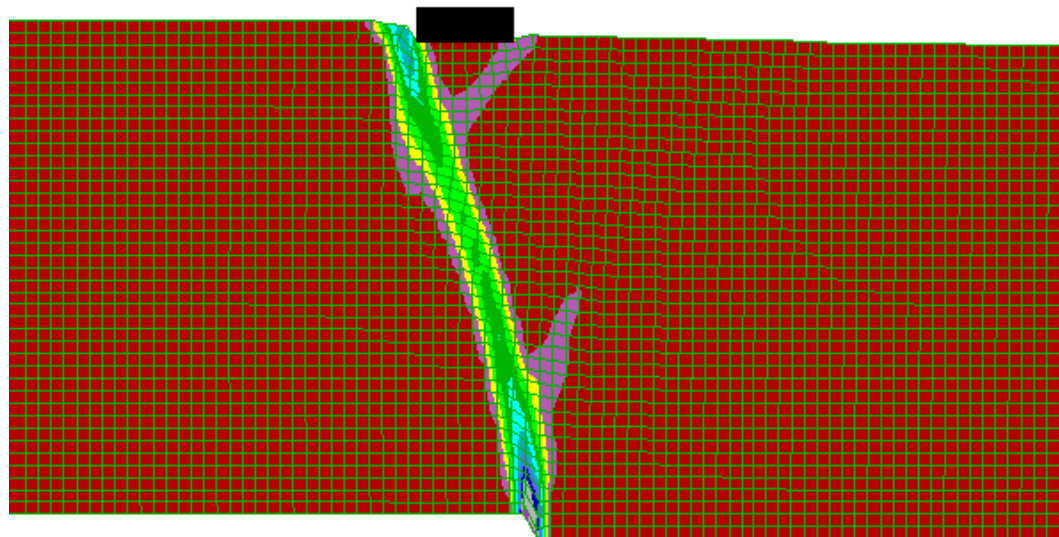
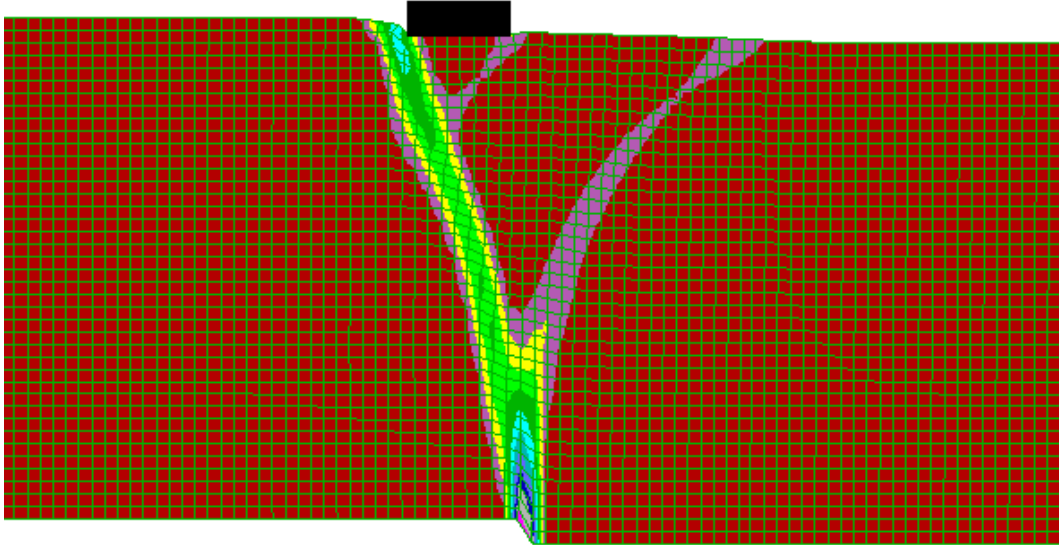
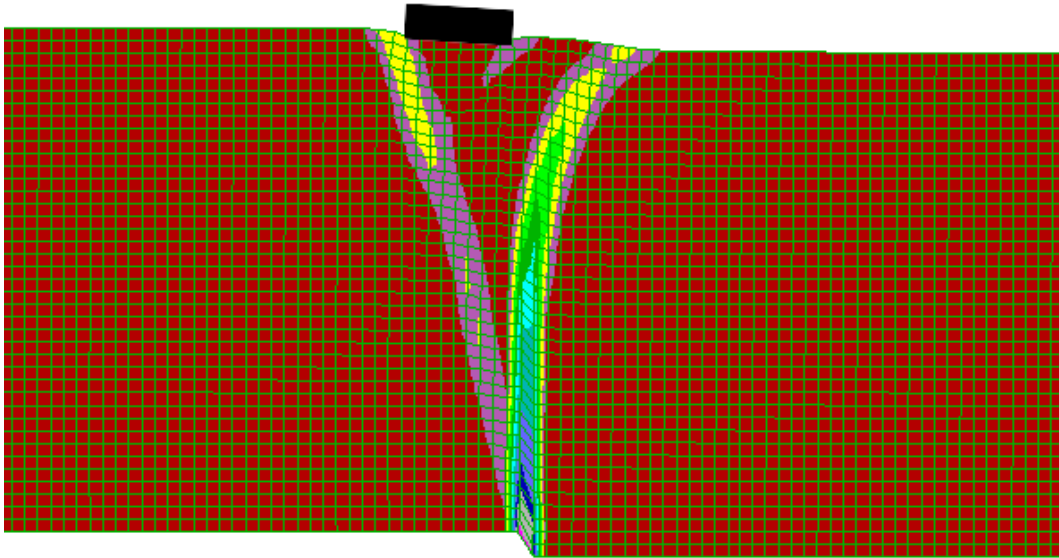
#### 4.5.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με κατασκευές διαφορετικών φορτίων

Στο **Σχήμα 4.29** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός της αμμώδους στρώσης που προκύπτουν από τις αναλύσεις των τριών διαφορετικών φορτίων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $85^\circ$ ) και για τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ . Η κατασκευή είναι τοποθετημένη στη θέση  $C=3\text{m}$ , δηλαδή όπου εντοπίζεται η πιο έντονη επιρροή στην διάρρηξη (για  $q=90\text{kPa}$ ).

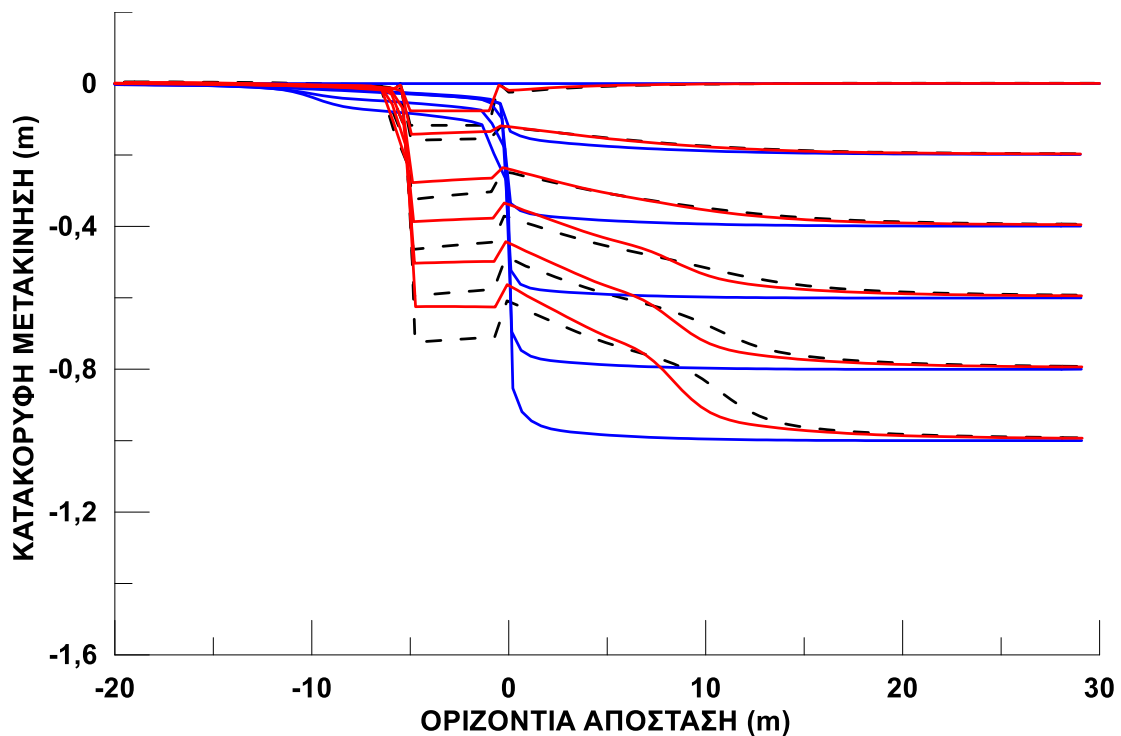
Για την περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος, η εικόνα της διάρρηξης είναι τελείως διαφορετική ανάλογα με το φορτίο της κατασκευής. Συγκεκριμένα, για το μικρό φορτίο ( $q=90\text{kPa}$ ) η διάρρηξη εκτρέπεται από την κατασκευή κυρίως προς το κινούμενο τέμαχος (δεξιά), ενώ δημιουργείται μια δευτερεύουσα διάρρηξη στο αριστερό άκρο της κατασκευής. Διπλασιάζοντας το φορτίο ( $q=180\text{kPa}$ ) η κύρια διάρρηξη εκτρέπεται προς τα αριστερά της κατασκευής, ενώ δημιουργείται και δευτερεύουσα διάρρηξη στη δεξιά πλευρά της κατασκευής. Ο τριπλασιασμός του φορτίου ( $q=270\text{kPa}$ ) δίνει μια παρόμοια εικόνα με αυτή του διπλάσιου φορτίου, αλλά οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι πιο έντονες στην πρωτεύουσα διάρρηξη και η δευτερεύουσα (στα δεξιά της κατασκευής) είναι πιο σαφώς σχηματισμένη.

Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.30** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της εδαφικής στρώσης υπό ελεύθερο πεδίο (**μπλε**) αλλά και υπό την ύπαρξη κατασκευής με αυξημένο φορτίο και συγκεκριμένα για  $q=180\text{kPa}$  (**κόκκινη**) και  $q=270\text{kPa}$  (**μαύρη**). Προκειμένου το παρακάτω σχήμα να είναι κατανοητό, περιλαμβάνει μόνο τα μεγαλύτερα φορτία και συγκρίνεται αντίστοιχα με το **Σχήμα 4.14** που περιλαμβάνει την παραμορφωμένη επιφάνεια για  $q=90\text{kPa}$ . Παρατηρείται ότι υπάρχει εκτροπή της διάρρηξης στην αριστερή πλευρά της κατασκευής και ταυτόχρονα δημιουργείται ένα ανασήκωμα στην δεξιά πλευρά της.



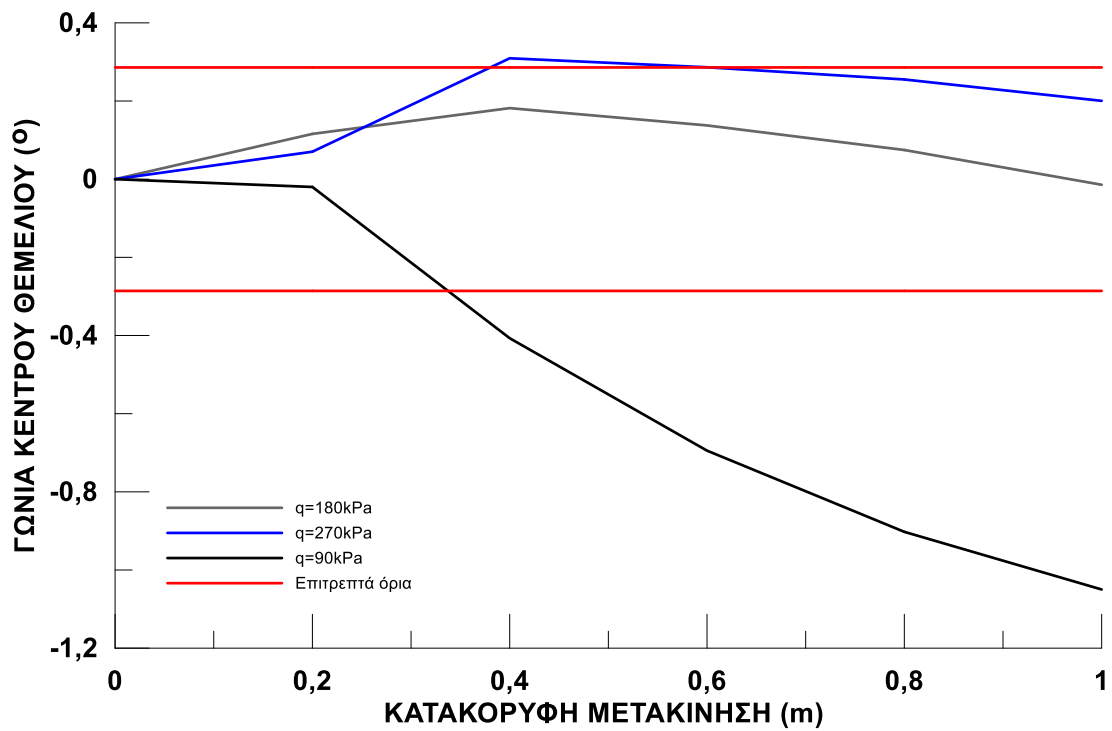


**Σχήμα 4.29** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0m$ , για θέση κατασκευής  $C=3m$  και φορτίο:  $q=90kPa$  (πάνω),  $q=180kPa$  (μέση) και  $q=270kPa$  (κάτω).

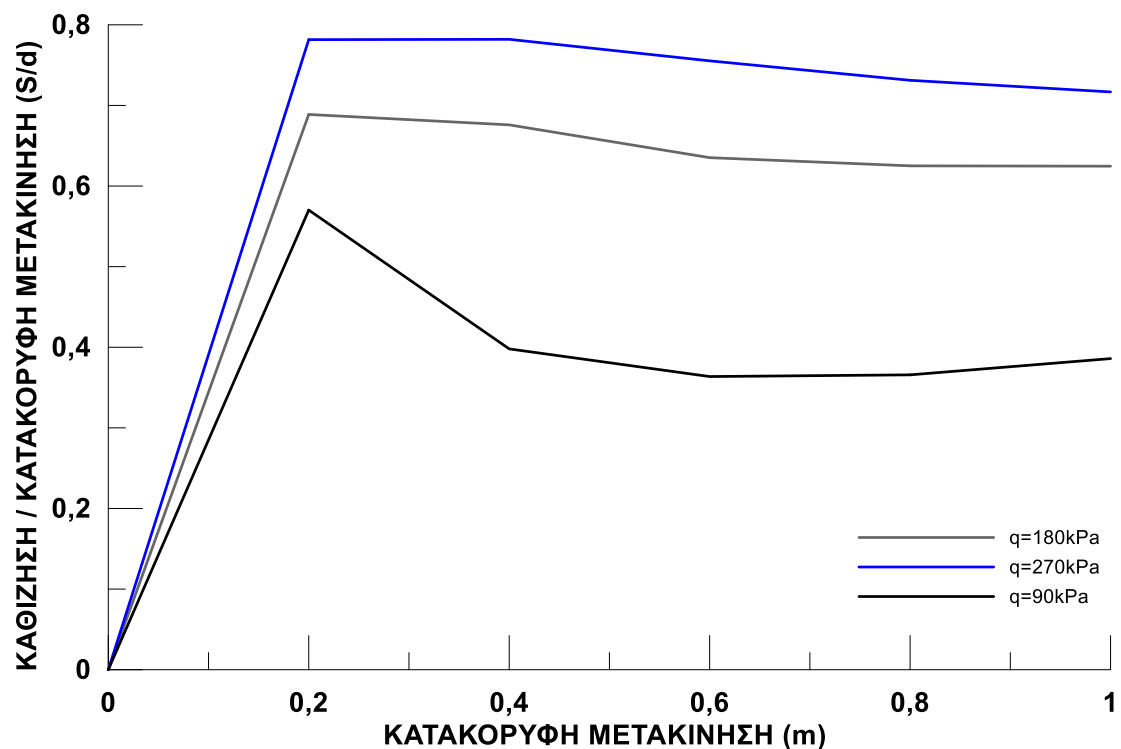


**Σχήμα 4.30** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για κατασκευή (πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος) με φορτία  $q=180\text{kPa}$  και  $q=270\text{kPa}$ .

Η επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην απόκρισή της ως προς τη στροφή και την κανονικοποιημένη καθίζηση παρουσιάζονται στα **Σχήματα 4.31** και **4.32**, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.31** παρουσιάζεται η γωνία στροφής της κατασκευής με τη μετατόπιση του «κατακόρυφου» ρήγματος όταν το φορτίο είναι  $q=90\text{kPa}$  (**μαύρο**),  $q=180\text{kPa}$  (**γκρι**) και  $q=270\text{kPa}$  (**μπλε**), ενώ η ίδια χρωματική κλίμακα χρησιμοποιείται και στο **Σχήμα 4.32** για την κανονικοποιημένη καθίζηση. Σύμφωνα με τα προηγούμενα σχήματα, για  $q=90\text{kPa}$  η κύρια διάρρηξη αναδύεται στη δεξιά πλευρά της κατασκευής (για μεγάλες μετατοπίσεις), ενώ για  $q=180\text{kPa}$  και  $270\text{kPa}$  αναδύεται στην αριστερή πλευρά. Αυτή η διαφοροποίηση έχει αποτυπώνεται και στην επίδραση του φορτίου στη στροφή της κατασκευής, όπου για  $q=90\text{kPa}$  οι στροφές είναι αρνητικές (δεξιόστροφες) και αυξάνουν με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος, ενώ για  $q=180\text{kPa}$  και  $270\text{kPa}$  είναι μικρές και θετικές (αριστερόστροφες) και δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη μετατόπιση του ρήγματος. Αντιθέτως, οι κανονικοποιημένες καθιζήσεις αυξάνουν συστηματικά με την αύξηση του φορτίου, αλλά οι κανονικοποιημένες τιμές τους μένουν περίπου σταθερές για μετατοπίσεις ρήγματος μεγαλύτερες από  $0.2\text{m}$ .



Σχήμα 4.31 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στη γωνία στροφής κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .

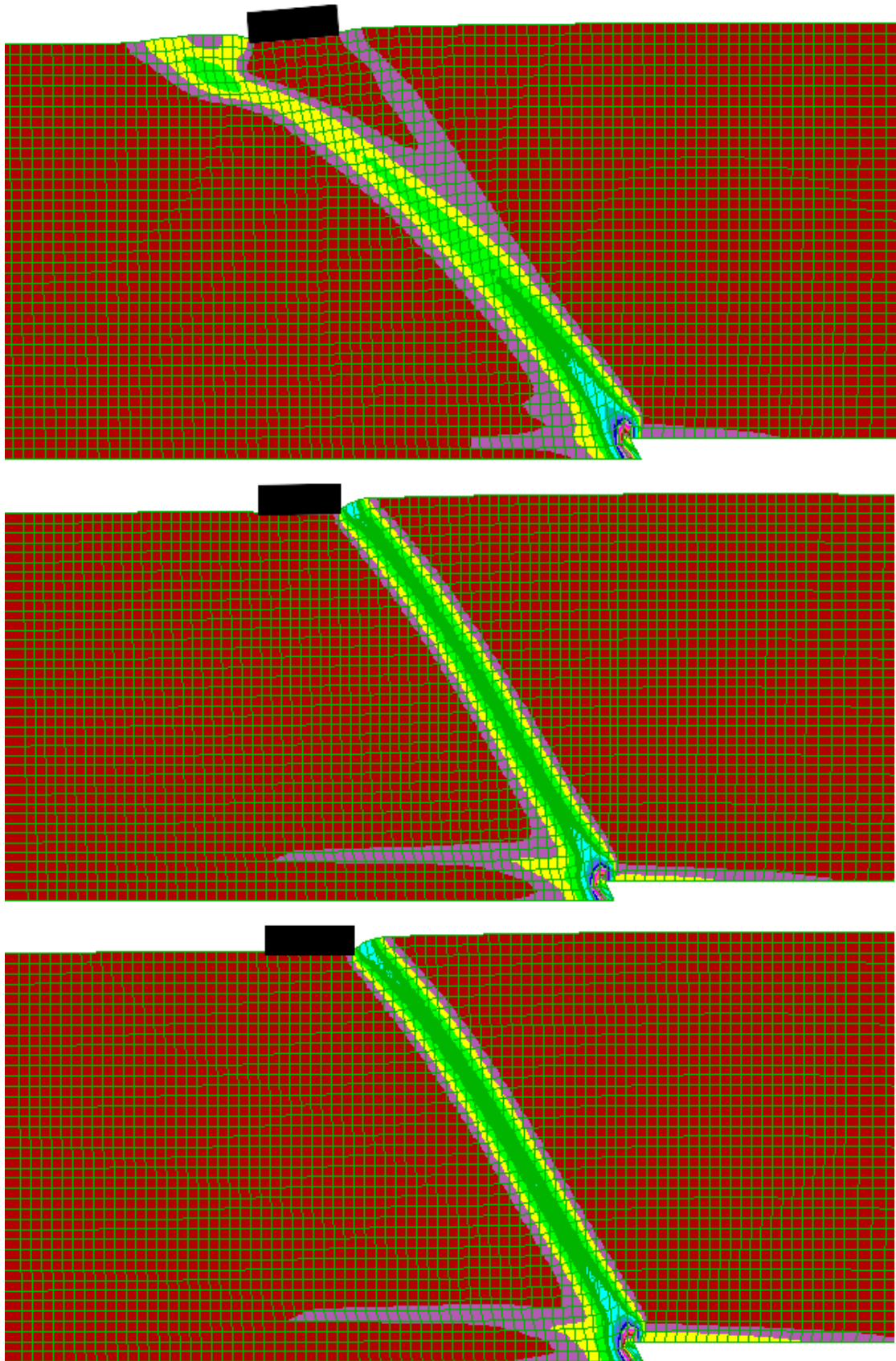


Σχήμα 4.32 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στην (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .

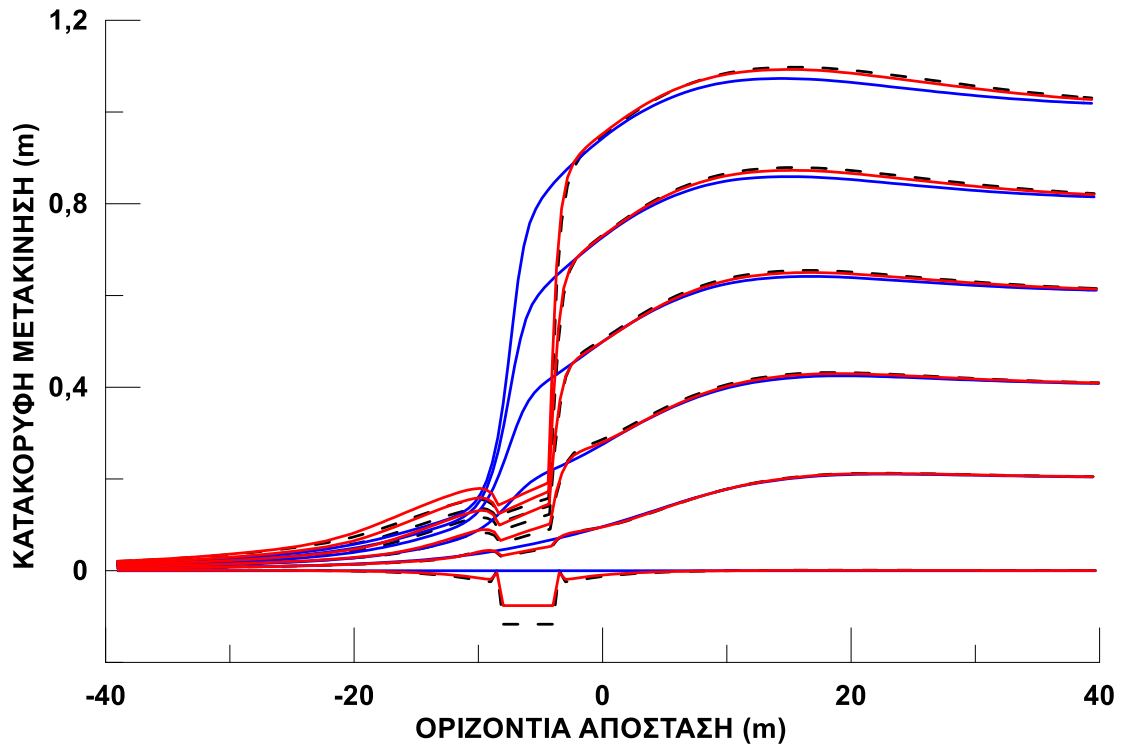
#### 4.5.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατασκευές διαφορετικών φορτίων

Στο **Σχήμα 4.33** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις που προκύπτουν για τις περιπτώσεις με κατασκευή με τα ίδια τρία διαφορετικά φορτία υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ) και για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0m$ . Η κατασκευή είναι τοποθετημένη στη θέση **C=16m**, μια θέση όπου η επιρροή στη διάρρηξη του ρήγματος είναι η πιο έντονη (τουλάχιστον για  $q=90kPa$ ). Αντίστοιχα με ότι παρατηρήθηκε και για «κατακόρυφο» ρήγμα, το φορτίο της κατασκευής αλλάζει τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος. Συγκεκριμένα, για  $q=90kPa$ , το ρήγμα αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ για μεγαλύτερα φορτία αυτό συμβαίνει στη δεξιά πλευρά της.

Πιο λεπτομερής μελέτη των ανωτέρω γίνεται στο **Σχήμα 4.34**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της εδαφικής στρώσης υπό ελεύθερο πεδίο (**μπλε**) αλλά και υπό την ύπαρξη κατασκευής με αυξημένο φορτίο και συγκεκριμένα για  $q=180kPa$  (**κόκκινη**) και  $q=270kPa$  (**μαύρη**). Προκειμένου το παρακάτω σχήμα να είναι ευκρινές, περιλαμβάνει μόνο τις καμπύλες για μεγαλύτερα φορτία κατασκευής και συγκρίνεται και με το **Σχήμα 4.22** που περιλαμβάνει την καμπύλη για το μικρότερο φορτίο  $q=90kPa$ . Η διάρρηξη του ρήγματος για τα μεγαλύτερα φορτία κατασκευής γίνεται στη θέση ανάδυσης υπό ελεύθερο πεδίο, ελάχιστα μετατοπισμένη προς τα δεξιά, ενώ η επιφάνεια του εδάφους δεξιά της διάρρηξης και αριστερά της κατασκευής δεν φαίνεται να επηρεάζεται τόσο έντονα όπως στην περίπτωση του φορτίου  $q=90kPa$ .



**Σχήμα 4.33** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , για θέση κατασκευής  $C=16\text{m}$  και φορτίο:  $q=90\text{kPa}$  (πάνω),  $q=180\text{kPa}$  (μέση) και  $q=270\text{kPa}$  (κάτω).

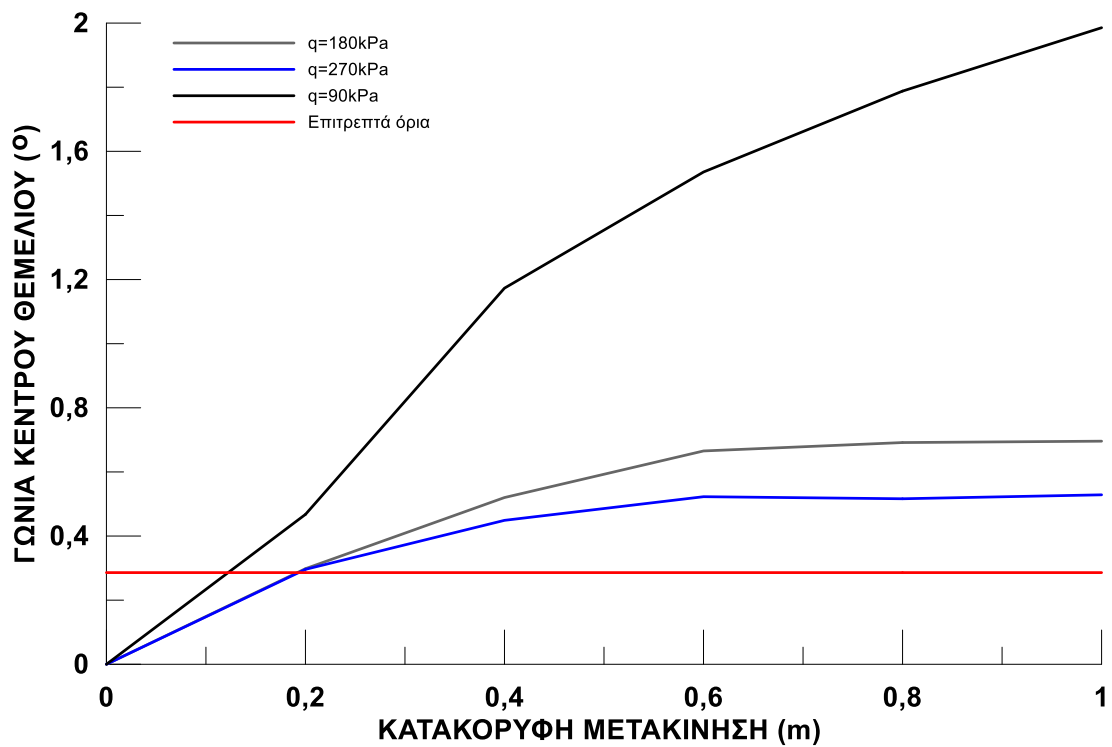


**Σχήμα 4.34** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για κατασκευή (πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος) και με φορτία  $q=180\text{kPa}$  και  $q=270\text{kPa}$ .

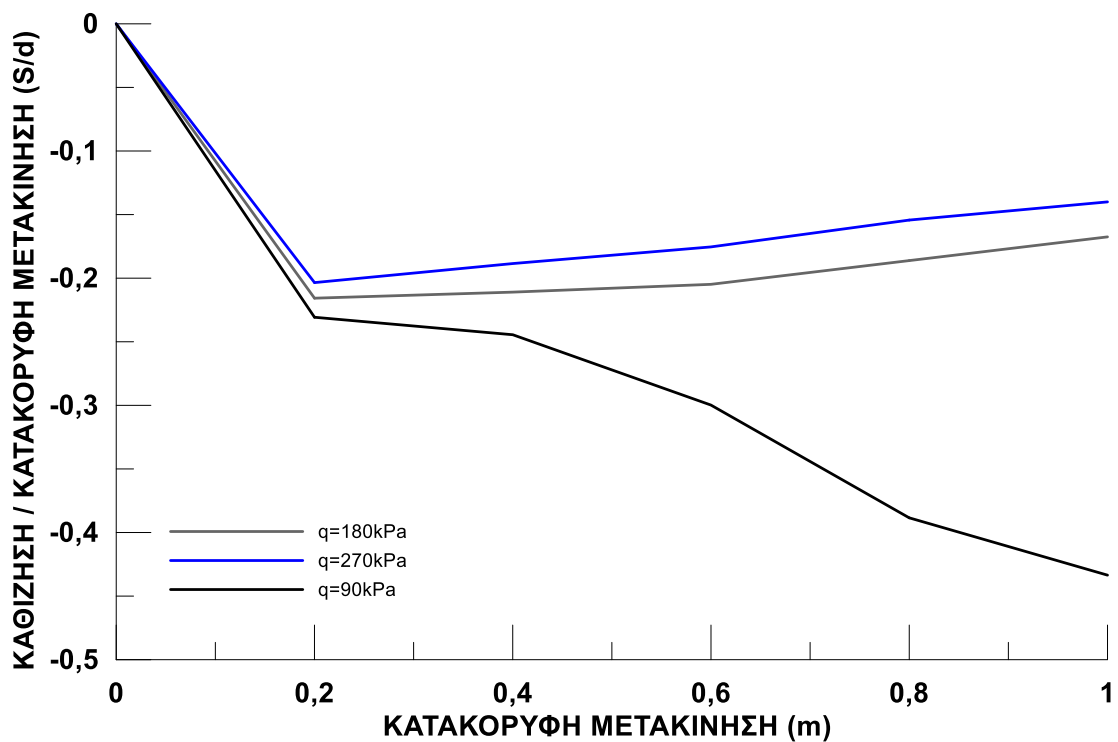
Η επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην απόκρισή της ως προς τη στροφή και την κανονικοποιημένη καθίζηση παρουσιάζονται στα **Σχήματα 4.35** και **4.36**, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.35** παρουσιάζεται η γωνία στροφής της κατασκευής με τη μετατόπιση του ανάστροφου ρήγματος όταν το φορτίο είναι  $q=90\text{kPa}$  (**μαύρο**),  $q=180\text{kPa}$  (**γκρι**) και  $q=270\text{kPa}$  (**μπλε**), ενώ η ίδια χρωματική κλίμακα χρησιμοποιείται και στο **Σχήμα 4.36** για την κανονικοποιημένη καθίζηση. Όπως προκύπτει, η επίδραση του φορτίου της κατασκευής στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος έχει αντίθετα αποτελέσματα από αυτά για τους άλλους τύπους ρηγμάτων (κανονικό, «κατακόρυφο»).

Πιο αναλυτικά, η κατασκευή όταν επηρεάζεται από την διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος στρέφεται αριστερόστροφα. Η φορά της στροφής αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι το μετακινούμενο τμήμα κινείται προς τα πάνω και όχι προς τα κάτω όπως στα προηγούμενα δύο ρήγματα. Επομένως, όταν το φορτίο της κατασκευής αυξηθεί προβάλλει μεγαλύτερη «αντίσταση» στο να στραφεί εξαιτίας της διάρρηξης και η γωνία στροφής του μειώνεται. Αυτό αποτυπώνεται στο **Σχήμα 4.35**, με τη μείωση της θετικής γωνία στροφής με το φορτίο κατασκευής.

Αντίστοιχα, το μεγαλύτερο φορτίο της κατασκευής επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα και στις κανονικοποιημένες καθιζήσεις της. Με μικρό φορτίο  $q=90\text{kPa}$ , η κατασκευή ανασηκώνεται λόγω της κατακόρυφης μετατόπισης του ανάστροφου ρήγματος προς τα πάνω (αρνητικές καθιζήσεις), αλλά αυξανόμενου του φορτίου η κατασκευή «αντιστέκεται» περισσότερο στο ανασήκωμα.



Σχήμα 4.35 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στη γωνία στροφής κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .



Σχήμα 4.36 Επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στην (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται σε απόσταση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα διάφορα επιβαλλόμενα φορτία κατασκευής  $q$ .

## 4.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής για την τοποθέτηση της κατασκευής σε διαφορετικές επιλεγμένες θέσεις ανά είδος ρήγματος, για τα τρία είδη ρηγμάτων και για χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος. Ακόμα, εξετάστηκε η επίδραση του μεγέθους φορτίου κατασκευής στην διάρρηξη των ρηγμάτων, για μία χαρακτηριστική θέση κατασκευής ανά είδος ρήγματος. Τέλος, παρουσιάστηκαν οι επιδράσεις της θέσης κατασκευής και του φορτίου κατασκευής στην εξέλιξη της (μέσης) καθίζησης και στροφής της κατασκευής με την αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης του ρήγματος, ξεχωριστά για κάθε τύπο ρήγματος. Με βάση αυτά, τα αποτελέσματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

### A. Στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος (45°):

(α) Η τοποθέτηση της κατασκευής μακριά από το σημείο διάρρηξης υπό ελεύθερο φορτίο στις θέσεις  $C=18m$  έως  $C=16m$  δεν επηρεάζει την θέση ανάδυσης της διάρρηξης. Η θέση της κατασκευής με απόσταση  $C=14m$  από το ίχνος του ρήγματος εισάγει για πρώτη φορά την επιρροή της κατασκευής στην διάρρηξη. Η διάρρηξη εκτρέπεται όμως πλήρως όταν η κατασκευή τοποθετηθεί πάνω στην θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, δηλαδή στην θέση  $C=12m$ . Ακόμη, παρατηρείται ότι όσο η κατασκευή προχωράει προς το κατακρήμνισμα, δηλαδή πιο δεξιά από την θέση διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή της στην δευτερεύουσα διάρρηξη έναντι της κύριας διάρρηξης.

(β) Η κατασκευή στο σταθερό τμήμα στρέφεται με θετική γωνία στροφής (δεξιόστροφα), όπως και στην περίπτωση της θέσης της κατασκευής κοντά στην διάρρηξη υπό ελεύθερο πεδίο. Η κατασκευής εντός του κατακρημνίσματος στρέφεται με αρνητική γωνία (αριστερόστροφα), καθώς επηρεάζεται εντονότερα από την δευτερεύουσα διάρρηξη. Η στροφή της κατασκευής είναι εντός «επιτρεπτών» ορίων για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2m$ . Η διαφοροποίηση της θέσης κατασκευής επηρεάζει και το μέγεθος της στροφής της κατασκευής και το αν είναι «αποδεκτή», για κατακόρυφες μετακινήσεις  $d>0.2m$ .

(γ) Κατά την πορεία της κατασκευής από το σημείο διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο προς το κατακρήμνισμα, παρατηρείται ότι ο λόγος των καθιζήσεων προς την κατακόρυφη μετατόπιση τείνει να γίνει ίσος με 1.6 ( $s/d=1.6$ ).

(δ) Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής για την χαρακτηριστική θέση της κατασκευής ( $C=12m$ ) για το κανονικό ρήγμα, προκαλεί αύξηση της γωνίας στροφής της κατασκευής καθώς και της καθίζησής του. Η θέση ανάδυσης της κύριας και δευτερεύουσας διάρρηξης δεν μεταβάλλεται στην περίπτωση των διαφορετικών φορτίων κατασκευής, παρατηρούνται όμως εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις όσο αυξάνεται το φορτίο.

### B. Στην περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος (85°):

(α) Οι θέσεις που επηρεάζουν έντονα τη διάρρηξη του «κατακόρυφου» ρήγματος βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο διάρρηξης του ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, ενώ η τοποθέτηση της κατασκευής μακριά και εντός του σταθερού τμήματος δεν επηρεάζει



καθόλου την διάρρηξη. Η εκτροπή της διάρρηξης συμβαίνει στην θέση  $C=4m$  όπου αρχίζει να διαμορφώνεται και μια δευτερεύουσα διάρρηξη, ενώ στην θέση  $C=3m$  η εκτροπή είναι ίδια, αλλά η δευτερεύουσα διάρρηξη πιο έντονη. Καθώς η κατασκευή πλησιάζει το μετακινούμενο τέμαχος, η διάρρηξη αναδύεται από την άλλη πλευρά της κατασκευής, χωρίς εμφάνιση δευτερεύουσας διάρρηξης.

(β) Η κατασκευή πάνω στο σταθερό τέμαχος στρέφεται εντός «επιτρεπτών» ορίων. Όσο πλησιάζει η κατασκευή την κατακόρυφη προβολή (ίχνος) του ρήγματος από το υπόβαθρο, η γωνία στροφής του αυξάνει και ξεπερνάει τα αποδεκτά όρια, για όλο και μικρότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος. Τέλος, κατά την μετάβασή της στο μετακινούμενο τέμαχος, η καθίζηση της κατασκευής τείνει να εξισωθεί με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος ( $s/d=1$ ).

(γ) Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής τοποθετημένης στην χαρακτηριστική θέση για την περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος, προκαλεί αύξηση της καθίζησής της υπό τη διάρρηξη. Η γωνία στροφής αρχικά μειώνεται με τον διπλασιασμό του φορτίου ( $q=180kPa$ ) και ύστερα αυξάνεται με την τελική αύξηση του φορτίου ( $q=270kPa$ ). Η διάρρηξη στα δύο μεγαλύτερα φορτία αναδύεται από την άλλη πλευρά της κατασκευής έναντι της αρχικής θέσης ανάδυσης υπό το αρχικό φορτίο.

#### **Γ. Στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ):**

(α) Η τοποθέτηση της κατασκευής στο σταθερό τέμαχος δεν επηρεάζει την θέση ανάδυσης της διάρρηξης. Κοντά στην θέση της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, η κατασκευή εκτρέπει την ανάδυση της διάρρηξης στην αριστερή πλευρά της. Καθώς η κατασκευή μετακινείται προς το κινούμενο τέμαχος, η επιρροή της στην διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος μειώνεται σταδιακά.

(β) Η κατασκευή μακριά από την διάρρηξη στρέφεται εντός αποδεκτών ορίων. Όσο η κατασκευή πλησιάζει το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, τόσο πιο έντονα στρέφεται και οι γωνίες στροφής της ξεπερνούν κατά πολύ τα «αποδεκτά» όρια. Όταν η κατασκευή αρχίζει να απομακρύνεται από αυτό το σημείο, τότε οι γωνίες στροφής μειώνονται σημαντικά και τείνει να εξισωθούν με τις αντίστοιχες στο σταθερό τέμαχος, παραμένοντας όμως «μη-αποδεκτές».

(γ) Η (κανονικοποιημένη) καθίζηση της κατασκευής παρατηρείται ότι τείνει να εξισωθεί με την κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος ( $s/d=1$ ), όσο η κατασκευή μετατοπίζεται προς το κινούμενο τέμαχος.

(δ) Η επίδραση της αύξησης του φορτίου κατασκευής σε ανάστροφο ρήγμα είναι διαφορετική απ' ό τι για κανονικό ή «κατακόρυφο» ρήγμα. Συγκεκριμένα, αυξάνοντας το φορτίο της κατασκευής τοποθετημένης στην χαρακτηριστική της θέση ( $C=16m$ ), επέρχεται μείωση τόσο στην καθίζηση όσο και στην γωνία στροφής της κατασκευής. Η ανάδυση της διάρρηξης δεν εκτρέπεται στην περίπτωση της αύξησης του φορτίου κατασκευής και αναδύεται κανονικά στην θέση διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, για μεγάλα φορτία κατασκευής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΗ ΣΤΡΩΣΗ**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν Κεφάλαιο διερευνάται η ακρίβεια χρήσης του απλουστευμένου προσομοιώματος σε προβλήματα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής, συγκριτικά πάντα με το σοφιστευμένο προσομοίωμα. Στην πράξη διερευνάται αν η ικανοποιητική συμφωνία στις προβλέψεις των δύο προσομοιωμάτων (με βαθμονόμηση για «οριζόντια δομή» κόκκων) στα επίπεδα του εδαφικού στοιχείου και του πειράματος φυγοκεντριστή των Cai et al. (2016) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 εξακολουθεί να απαντάται και σε προβλήματα αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής.

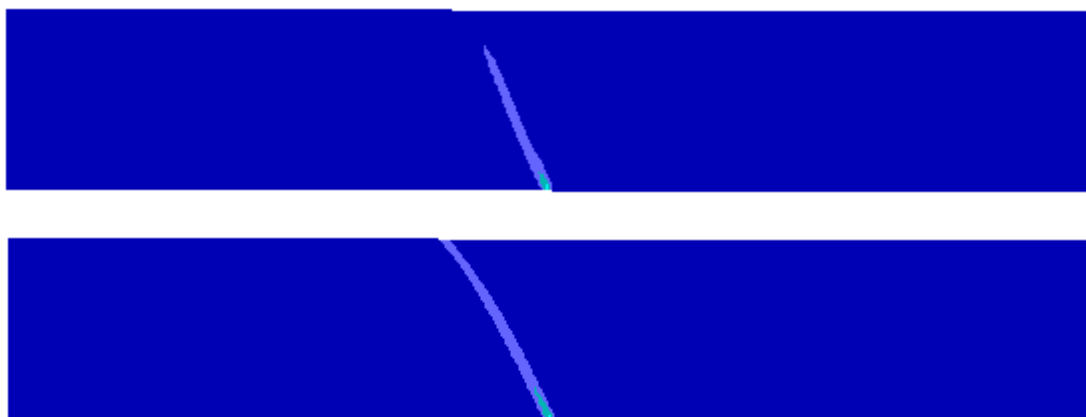
Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διάρρηξη ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης με «οριζόντια» δομή, τόσο με όσο και χωρίς άκαμπτη κατασκευή στην επιφάνεια του εδάφους (θεώρηση ελευθέρου πεδίου). Πιο συγκεκριμένα, με αυτή τη μικρο-δομή ως δεδομένη, πέρα από τις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου, επαναλαμβάνονται εδώ οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 4 για τις λεγόμενες χαρακτηριστικές θέσεις κατασκευής ανά είδος ρήγματος και συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους. Δηλαδή, για κάθε είδος ρήγματος μελετήθηκε μια μόνο θέση κατασκευής και συγκεκριμένα αυτή με την μεγαλύτερη επιρροή στην αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής, με βάση τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 με χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος. Οι αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα SANISAND που παρουσιάζονται εδώ έγιναν με τον ίδιο κάρναβο, τις ίδιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες με τις αναλύσεις που έκαναν χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος στο Κεφάλαιο 4.

Στις παραγράφους που ακολουθούν συγκρίνονται τα αποτελέσματα διάρρηξης για «οριζόντια» μικρο-δομή κόκκων με τα αποτελέσματα του απλουστευμένου προσομοιώματος για αρχική τιμή πυκνότητας ( $D_r = 65\%$ ) και συγκεκριμένες θέσεις κατασκευής ανά είδος ρήγματος. Οι βαθμονομήσεις των 2 προσομοιωμάτων είναι ίδιες με αυτές που ελέγχθηκαν και βρέθηκαν συμβατές στο Κεφάλαιο 3. Χάριν συντομίας, το απλουστευμένο προσομοίωμα με χαλάρωση (strain softening) θα ονομάζεται SS, ενώ το σοφιστευμένο με το όνομά του.

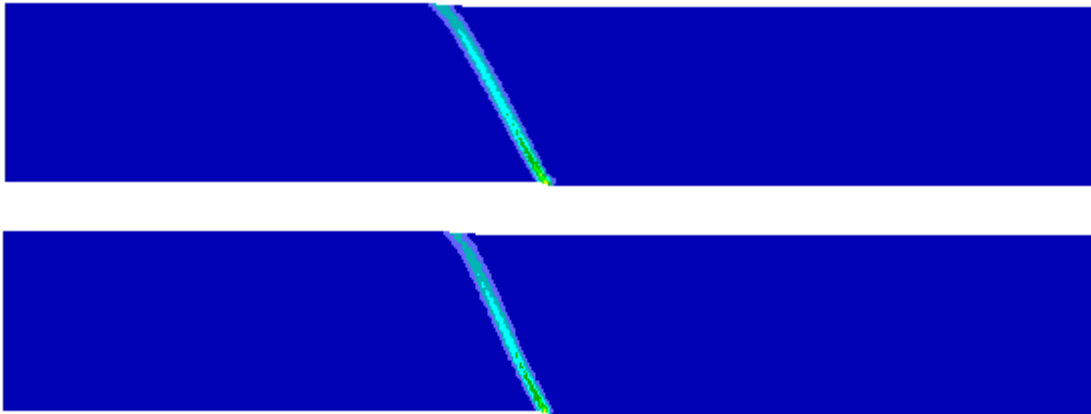
## 5.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

### 5.2.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου

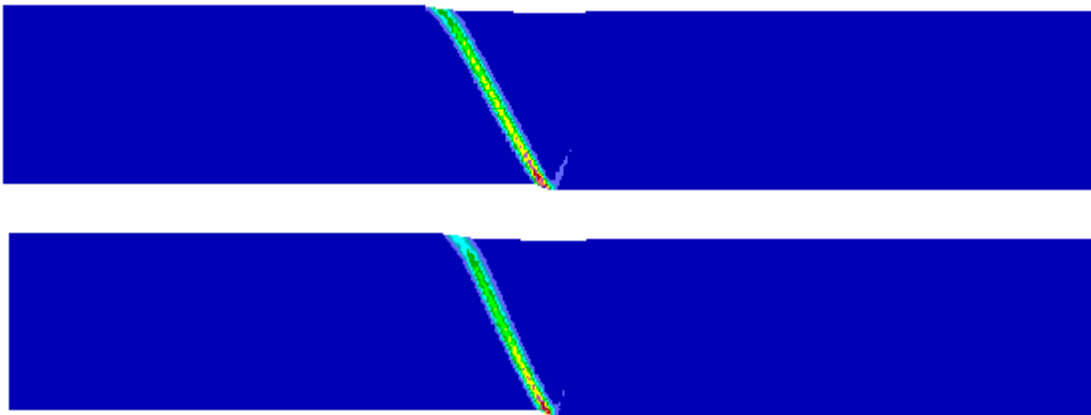
Στην συγκεκριμένη παράγραφο συγκρίνονται τα αποτελέσματα του απλουστευμένου προσομοιώματος και του σοφιστευμένου προσομοιώματος για «οριζόντια δομή» των κόκκων του εδάφους, προκειμένου να μελετηθεί κατά πόσο αυτά τα δύο προσομοιώματα οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Για να επιτευχθεί αυτό, παρουσιάζονται πρώτα στα **Σχήματα 5.1 έως 5.5** οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους με βάση τα δύο προσομοιώματα για διάρρηξη χωρίς την ύπαρξη κατασκευής (**free field**), και για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, οι διαφορές είναι πολύ μικρές, ειδικά για μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος. Στη μικρή μετατόπιση ( $d=0.2\text{m}$ ) το σοφιστευμένο προσομοίωμα παρουσιάζει πλήρως αναδυμένη διάρρηξη, ενώ στο απλουστευμένο η διάρρηξη δεν έχει αναδυθεί πλήρως. Αντιθέτως, στην τελική κατακόρυφη μετατόπιση ( $d=1.0\text{m}$ ) παρατηρείται ότι στο απλουστευμένο προσομοίωμα, η δευτερεύουσα διάρρηξη είναι ελάχιστα πιο απομακρυσμένη από την κύρια διάρρηξη, σε αντίθεση με την περίπτωση του σοφιστευμένου προσομοιώματος, όπου η δευτερεύουσα διάρρηξη είναι πιο κοντά στην κύρια. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα δύο προσομοιώματα δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.



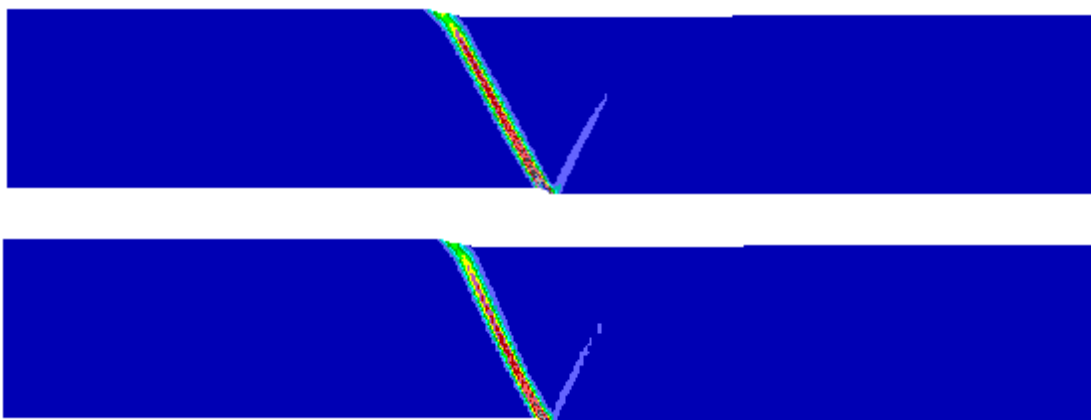
**Σχήμα 5.1** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



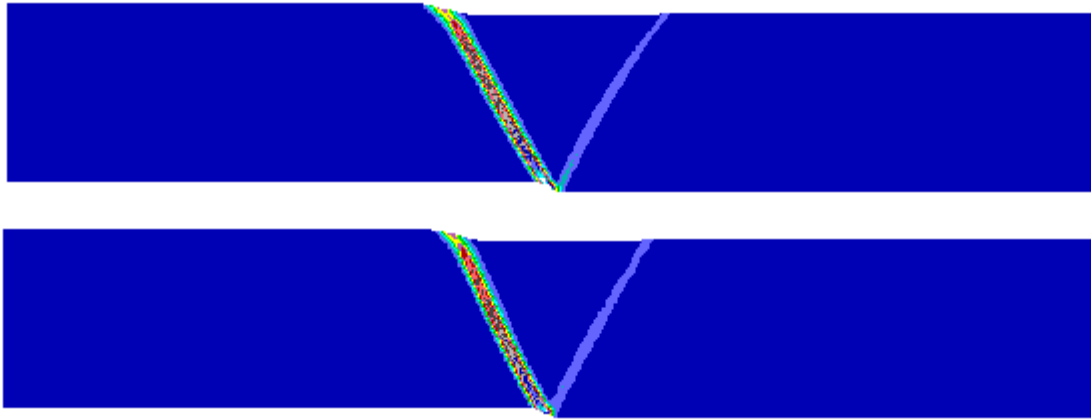
**Σχήμα 5.2** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.3** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

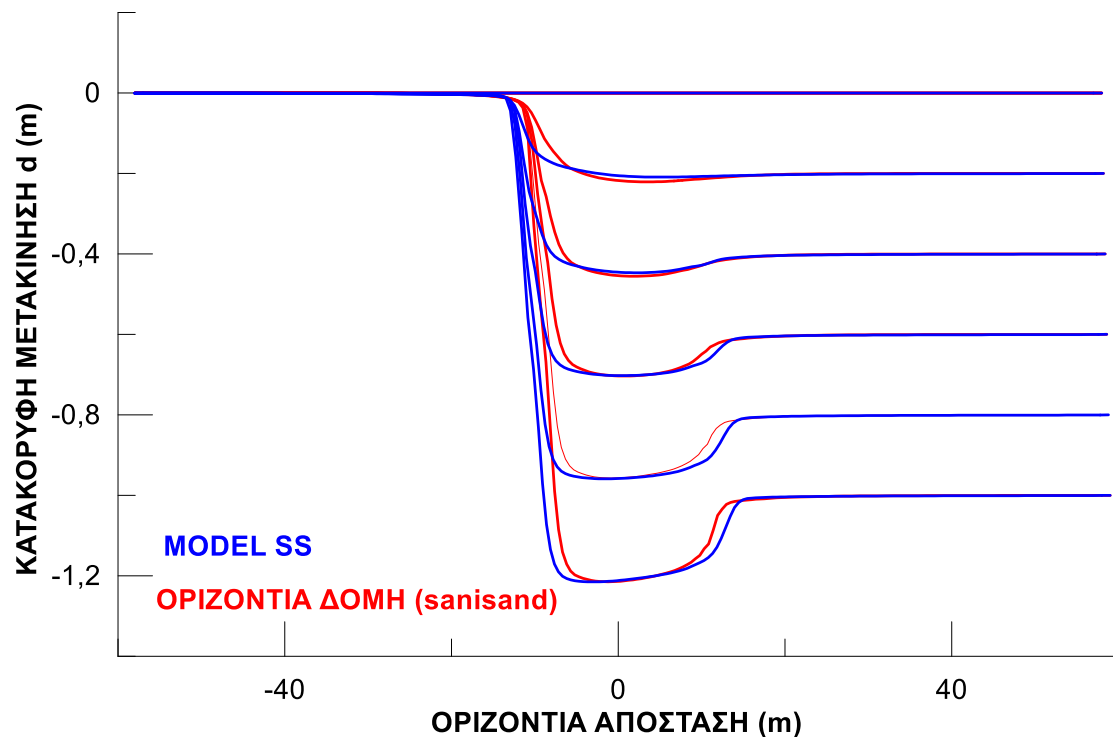


**Σχήμα 5.4** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.5** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

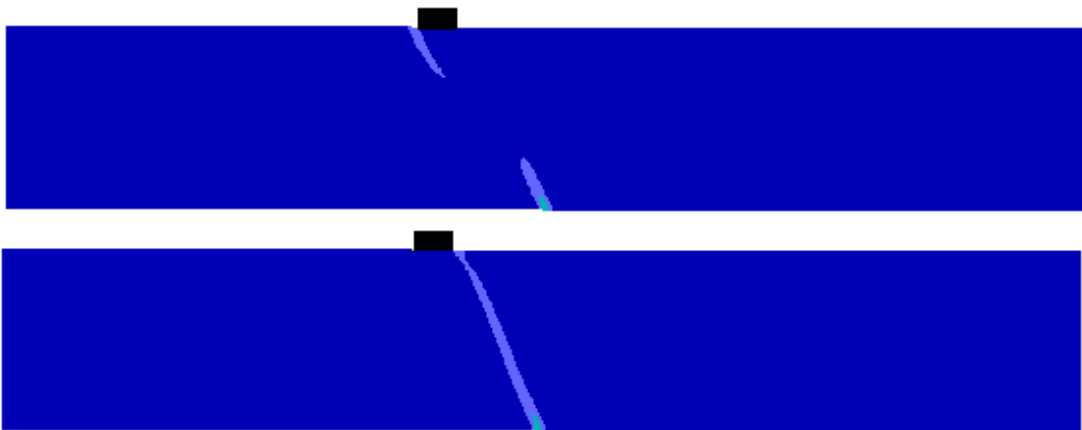
Στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους με βάση τα αποτελέσματα των δύο προσομοιωμάτων. Από το σχήμα διαπιστώνεται ότι υπάρχει ελάχιστη διαφορά στην θέση ανάδυσης της δευτερεύουσας διάρρηξης, όπου για το προσομοίωμα SS η δευτερεύουσα είναι πιο απομακρυσμένη από την κύρια διάρρηξη. Αντίστοιχα, παρατηρείται μια μικρή απόκλιση στις θέσεις ανάδυσης της κύριας διάρρηξης, οδηγώντας σε ελαφρώς πιο πλατύ κατακρήμνισμα για το προσομοίωμα SS. Επομένως, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο, τα δύο προσομοιωμάτων οδηγούν σε πρακτικώς ασήμαντες διαφορές.



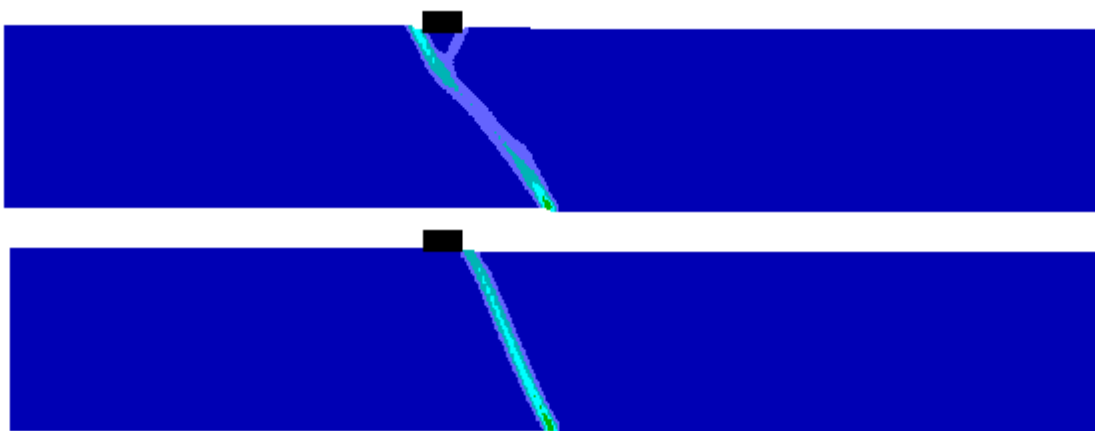
**Σχήμα 5.6** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).

### 5.2.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής

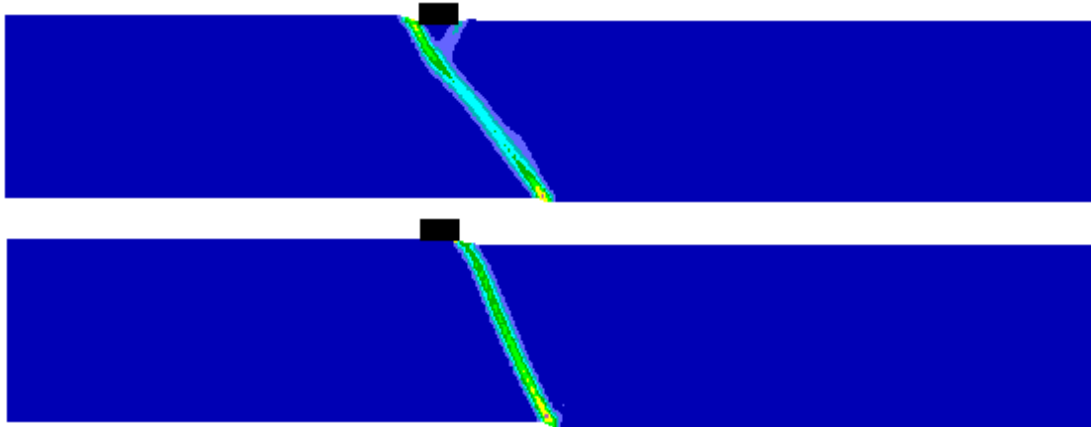
Στα Σχήματα 5.7 έως 5.11 παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση της εδαφικής στρώσης για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $45^\circ$ ) με ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης στην θέση  $C=12m$  με βάση αναλύσεις για απλουστευμένο και σοφιστευμένο προσομοίωμα. Αντίθετα με ό,τι προκύπτει για ελεύθερο πεδίο, εδώ παρατηρούνται έντονες διαφορές στα αποτελέσματα χρήσης των δύο προσομοιωμάτων. Μάλιστα, ακόμη και για μικρή κατακόρυφη μετατόπιση ( $d=0.2m$ ), γίνεται φανερό ότι η πορεία που θα ακολουθήσει η διάρρηξη για να αναδυθεί στην επιφάνεια είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, η χρήση του προσομοιώματος SS δείχνει ότι η διάρρηξη εκτρέπεται και αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής (βλ και Κεφάλαιο 4). Ωστόσο, η εικόνα της διάρρηξης με την χρήση του σοφιστευμένου προσομοιώματος δείχνει ότι η διάρρηξη αναδύεται στην δεξιά πλευρά της κατασκευής. Επομένως, οι αναλύσεις με τα δύο προσομοιώματα δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα και λανθασμένη εικόνα στην περίπτωση του απλουστευμένου προσομοιώματος, καίτοι συμφωνούν στην εικόνα διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο.



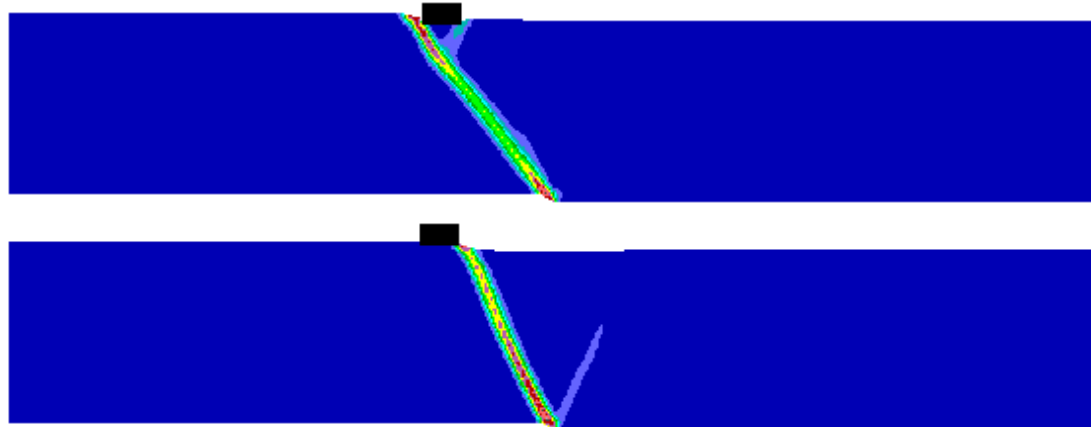
Σχήμα 5.7 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.2m$  με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=12m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (πάνω) και SANISAND (κάτω).



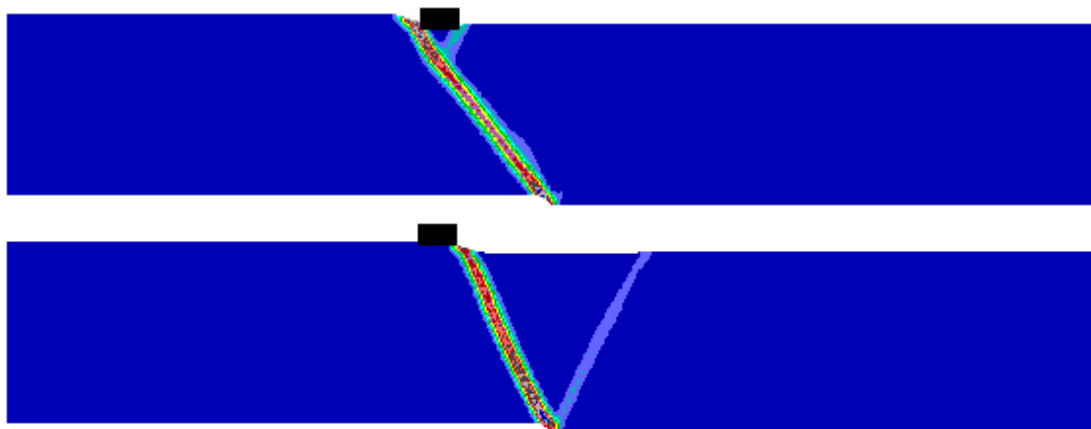
Σχήμα 5.8 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.4m$  με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=12m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (πάνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.9** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.6m$  με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=12m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (πάνω) και SANISAND (κάτω).

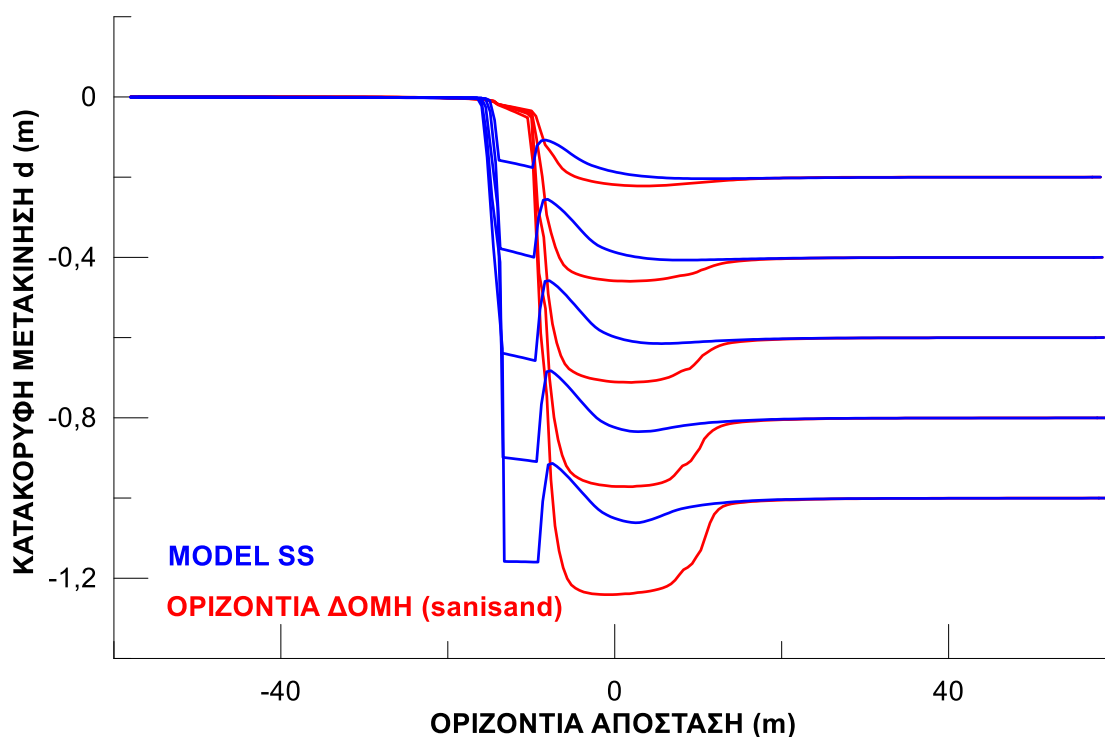


**Σχήμα 5.10** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.8m$  με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=12m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (πάνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.11** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=1.0m$  με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=12m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (πάνω) και SANISAND (κάτω).

Οι διαφορές στα αποτελέσματα χρήσης των δύο προσομοιωμάτων γίνονται σαφέστερες στο **Σχήμα 5.12**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με το απλουστευμένο προσομοίωμα (**μπλε**) συγκρινόμενη με εκείνη με το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» κόκκων (**κόκκινο**). Παρατηρείται ότι λόγω της ανάπτυξης δευτερεύουσας διάρρηξης κάτω από το δεξί άκρο της κατασκευής για την περίπτωση του απλουστευμένου προσομοιώματος, δεν δημιουργείται κατακρήμνισμα, αντίθετα με ό,τι προκύπτει στην ανάλυση με το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» λόγω ανάπτυξης βαθιάς δευτερεύουσας διάρρηξης. Οι διαφορές αυτές κρίνονται πολύ σημαντικές, ειδικά δεδομένης της σχεδόν συμφωνίας τους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου.



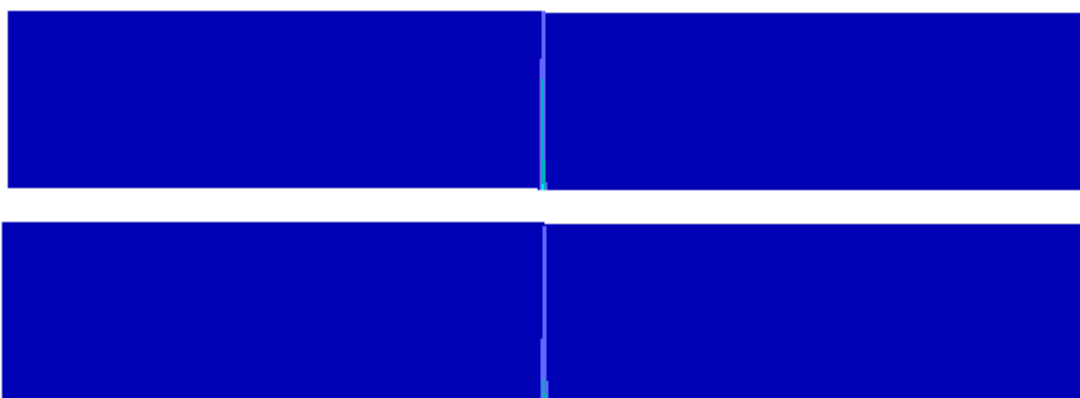
**Σχήμα 5.12** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).



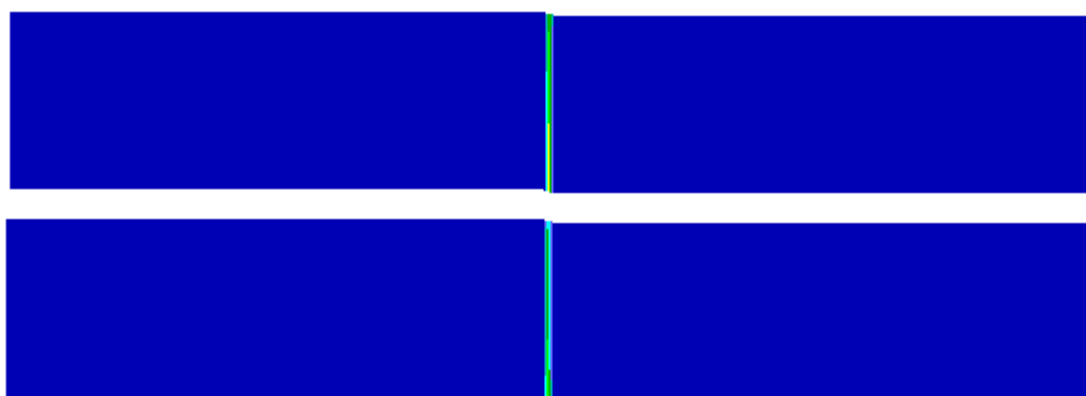
### 5.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

#### 5.3.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου

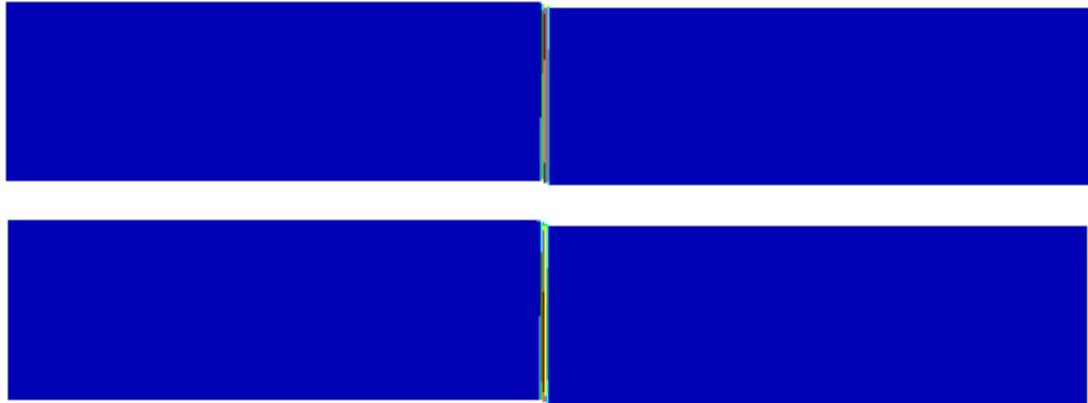
Στα Σχήματα 5.13 έως 5.17 παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους με βάση τα δύο προσομοιώματα για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος χωρίς την ύπαρξη κατασκευής (**free field**), και για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων είναι σχεδόν ίδια, με μόνη τους διαφορά την εντονότερη ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων στην ανάλυση του απλουστευμένου προσομοιώματος. Επομένως, τα δύο προσομοιώματα αναλύουν με αντίστοιχη ακρίβεια την διάρρηξη του «κατακόρυφου» ρήγματος, χωρίς την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους.



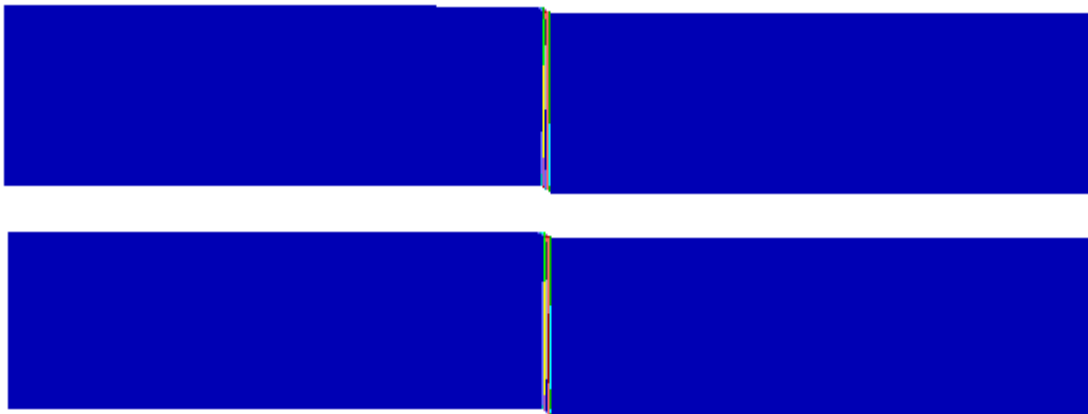
**Σχήμα 5.13** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



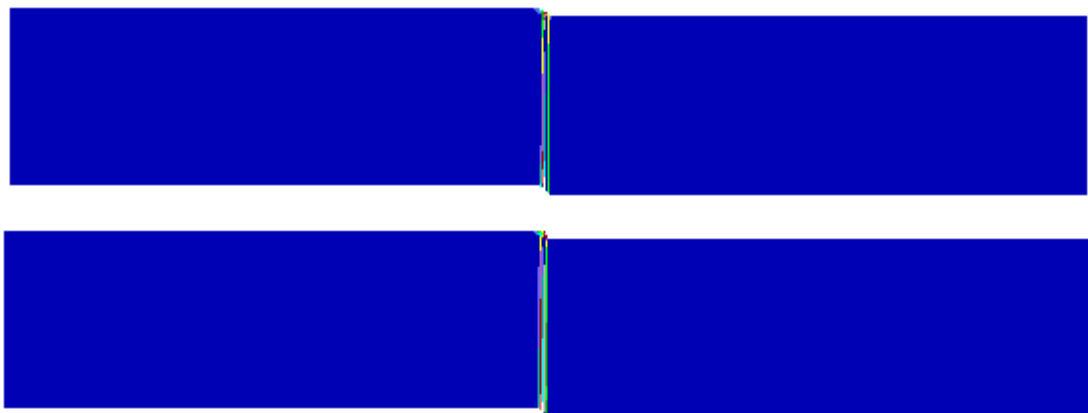
**Σχήμα 5.14** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.15** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

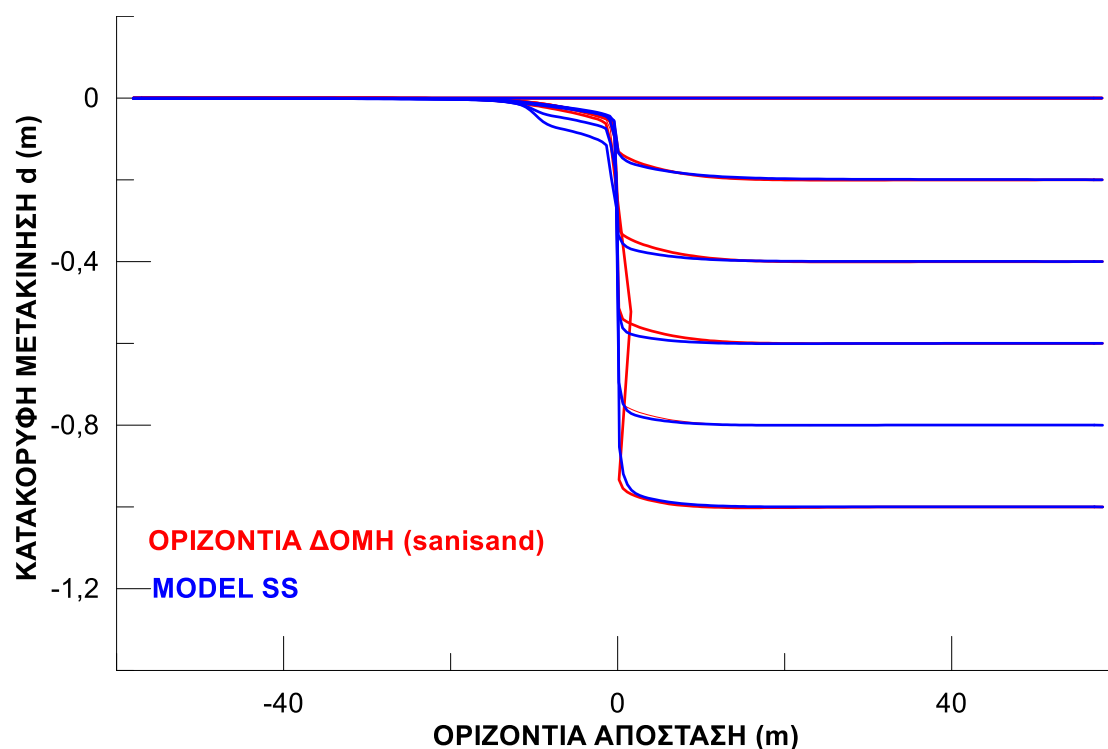


**Σχήμα 5.16** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.17** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$  υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και στο **Σχήμα 5.18**. Όπως προκύπτει, η επιφάνεια της αμμώδους στρώσης παραμορφώνεται πρακτικώς ταυτόσημα στις αναλύσεις και με τα δύο προσομοιώματα για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο.

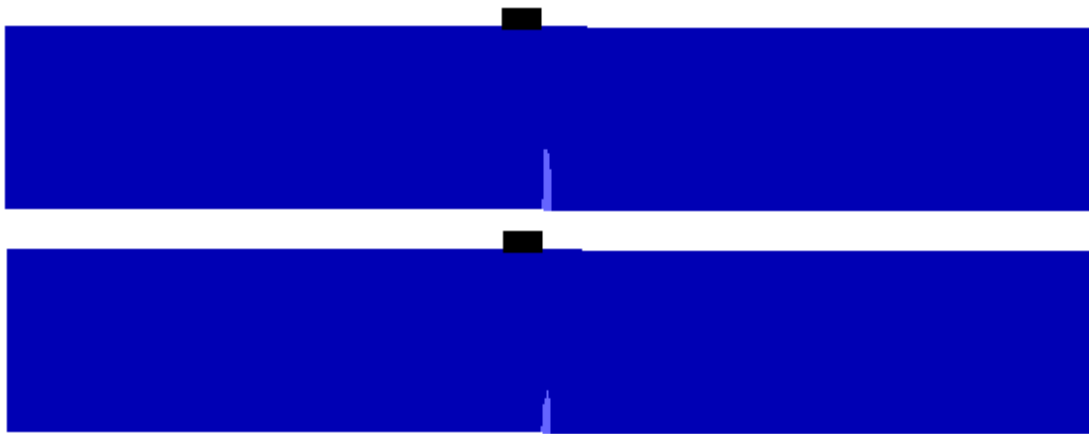


**Σχήμα 5.18** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).

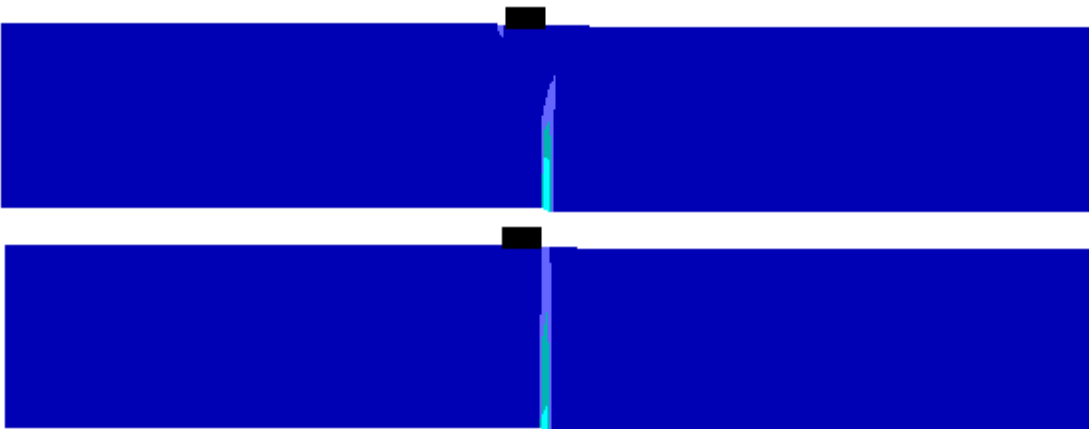
### 5.3.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής

Στα **Σχήματα 5.19** έως **5.23** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση της εδαφικής στρώσης για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $85^\circ$ ) με ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης στη θέση  $C=3\text{m}$ , με βάση αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα. Οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα χρήσης των δύο προσομοιωμάτων για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γίνονται ουσιώδεις για κατακόρυφη μετατόπιση μεγαλύτερη των  $0.4\text{m}$  ( $d > 0.4\text{m}$ ), αλλά είναι λιγότερο έντονες απ' ό,τι στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος.

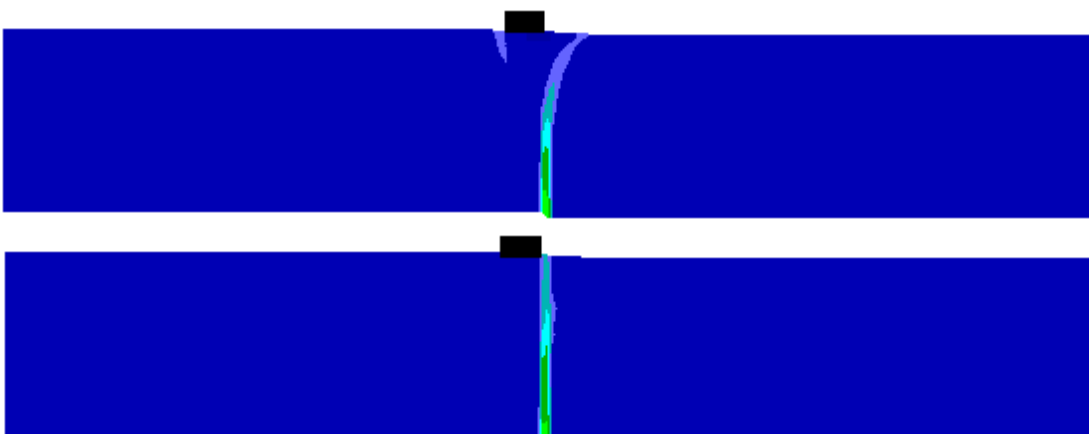
Πιο συγκεκριμένα, στο απλουστευμένο προσομοίωμα, η διάρρηξη εκτρέπεται και αναδύεται λίγο πιο μακριά από το σημείο διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο. Ταυτόχρονα, παρατηρείται δημιουργία δευτερεύουσας διάρρηξης στο αριστερό άκρο της κατασκευής. Στην περίπτωση του σοφιστευμένου προσομοιώματος για «οριζόντια δομή» δεν υπάρχει εκτροπή, καθώς η διάρρηξη αναδύεται κανονικά, ενώ στη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση ( $d=1.0\text{m}$ ) ξεκινάει ο σχηματισμός μιας δευτερεύουσας διάρρηξης. Επομένως, οι αναλύσεις με τα δύο αυτά προσομοιώματα δίνουν ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα, με την ορθότερη να θεωρείται, κατά τεκμήριο, εκείνου με το σοφιστευμένο προσομοίωμα.



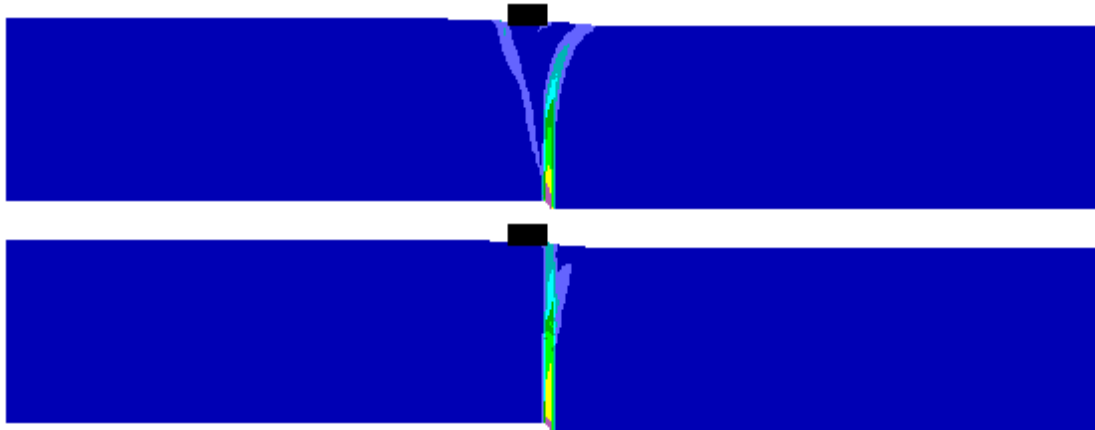
**Σχήμα 5.19** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



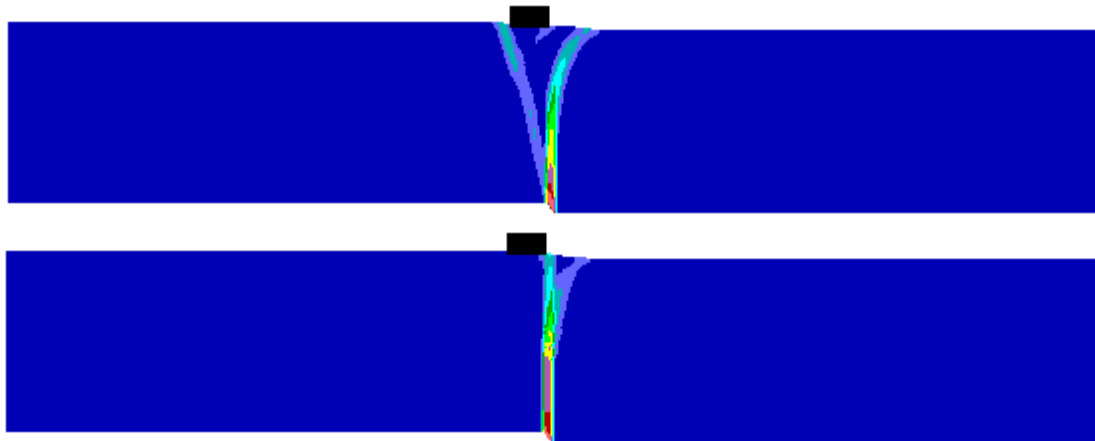
**Σχήμα 5.20** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.21** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

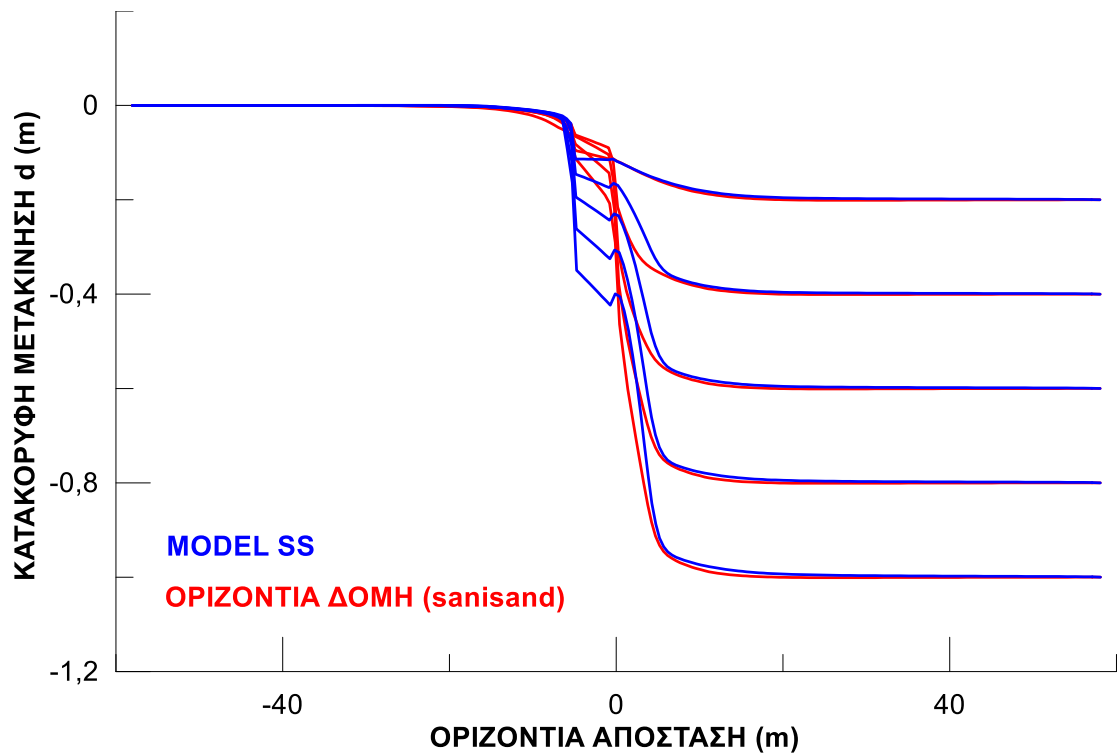


**Σχήμα 5.22** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.23** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

Οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο προσομοιωμάτων γίνονται σαφέστερες στο **Σχήμα 5.24**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμώδους στρώσης, από την ανάλυση με το απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε) και με το σοφιστευμένο για «οριζόντια δομή» (κόκκινο). Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του σοφιστευμένου προσομοιώματος η διάρρηξη δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη της κατασκευής και αναδύεται κανονικά στην επιφάνεια, σε αντίθεση με την περίπτωση του απλουστευμένου προσομοιώματος όπου η επίδραση της κατασκευής είναι πιο έντονη.



**Σχήμα 5.24** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) σοφιστεμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).

## 5.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

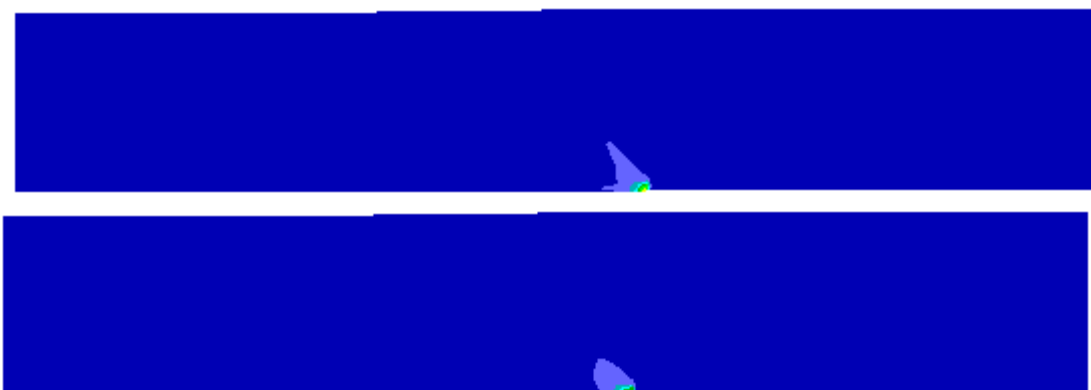
### 5.4.1 Απόκριση ελεύθερου πεδίου

Στα **Σχήματα 5.25 έως 5.29** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, υπό ελεύθερο πεδίο, με χρήση του απλουστευμένου (SS) και του σοφιστευμένου προσομοιώματος (SANISAND). Τα διαφορετικά σχήματα αντιστοιχούν σε διαφορετική κατακόρυφη μετατόπιση **d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8 και 1.0m**.

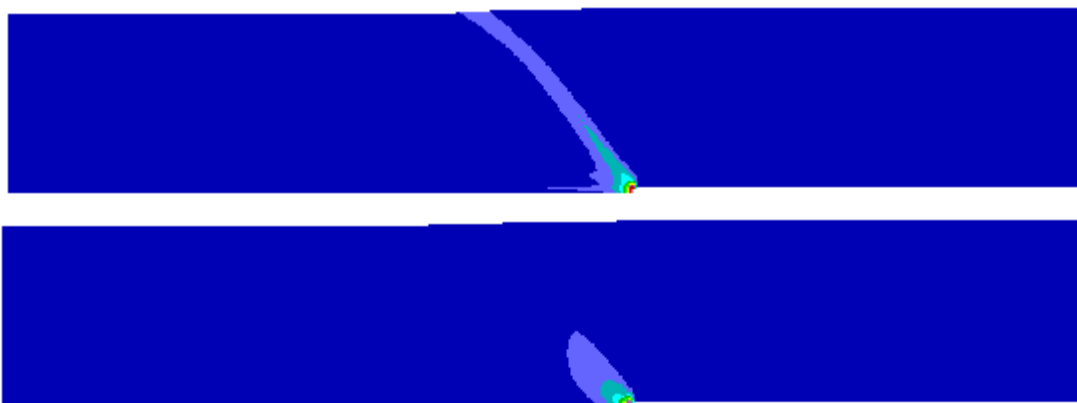
Οι διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων εμφανίζονται για μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις ( $d > 0.6\text{m}$ ). Παρατηρείται ότι για  $d = 0.6\text{m}$ , στην περίπτωση του απλουστευμένου προσομοιώματος η διάρρηξη έχει αναδυθεί, σε αντίθεση με το σοφιστευμένο προσομοίωμα όπου η διάρρηξη δεν έχει φτάσει ακόμη στο μέσο της στρώσης. Αυξανομένης της μετατόπισης, η διάρρηξη αναδύεται και για το σοφιστευμένο προσομοίωμα, και καταλήγει λίγο πιο αριστερά απ' ό,τι στην ανάλυση με το απλουστευμένο προσομοίωμα.



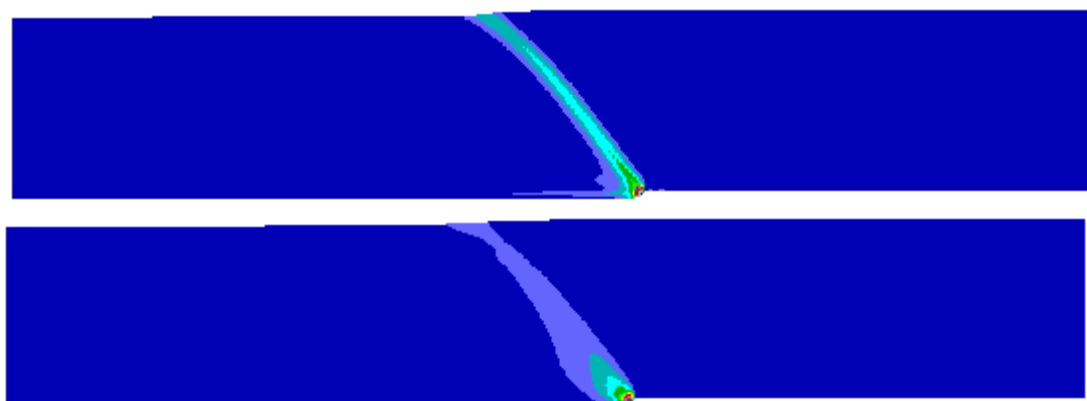
**Σχήμα 5.25** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με **d=0.2m**, υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



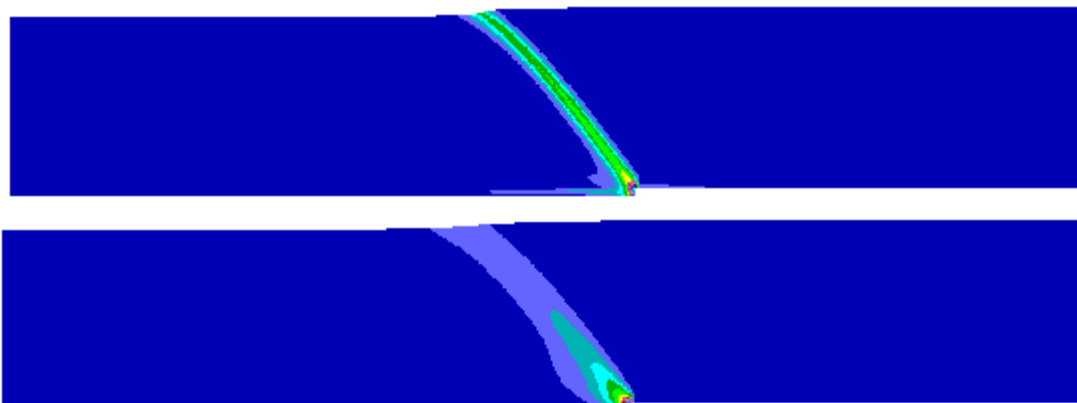
**Σχήμα 5.26** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με **d=0.4m**, υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.27** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.6m$ , υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



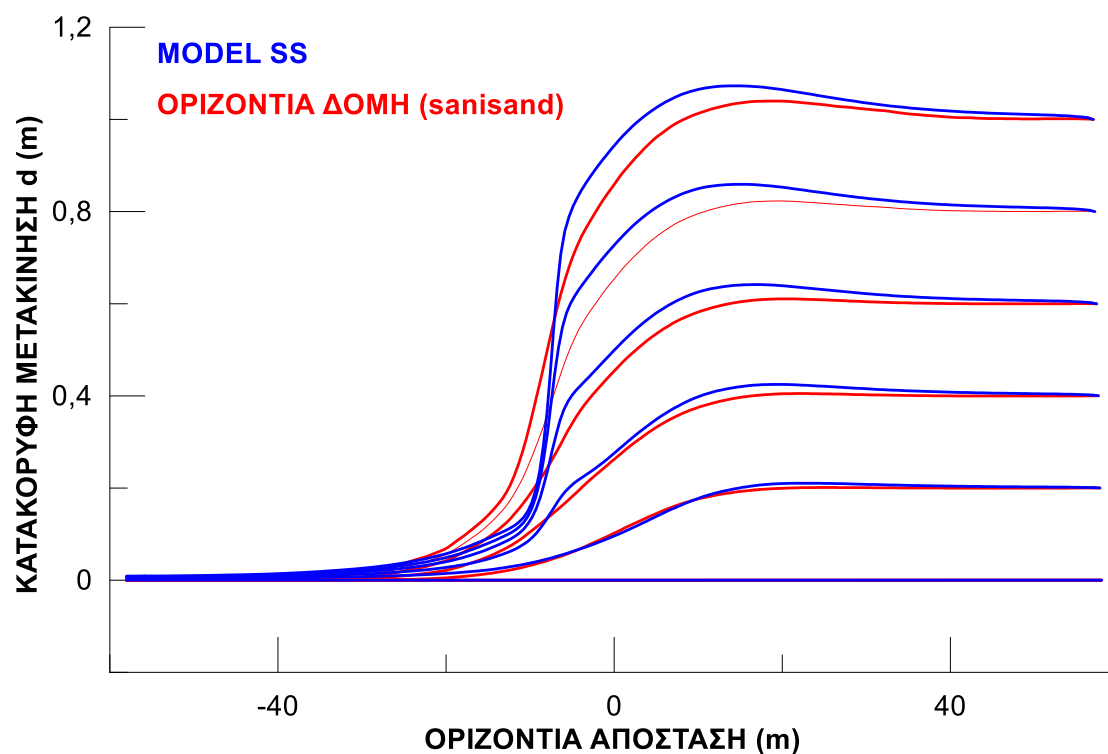
**Σχήμα 5.28** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.8m$ , υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.29** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=1.0m$ , υπό ελεύθερο πεδίο, από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



Στο **Σχήμα 5.30** παρουσιάζεται η παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους για την περίπτωση του απλουστευμένου και σοφιστευμένου προσομοιώματος, στις αναλύσεις διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος υπό ελεύθερο πεδίο. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι οι επιφανειακές κλίσεις είναι πιο έντονες στην ανάλυση με το απλουστευμένο προσομοίωμα, καθώς η διάρρηξη αναδύεται πιο δεξιά και εμφανίζεται πιο έντονη διαστολή του εδάφους στο κινούμενο τέμαχος.



**Σχήμα 5.30** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για ελεύθερο πεδίο και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).

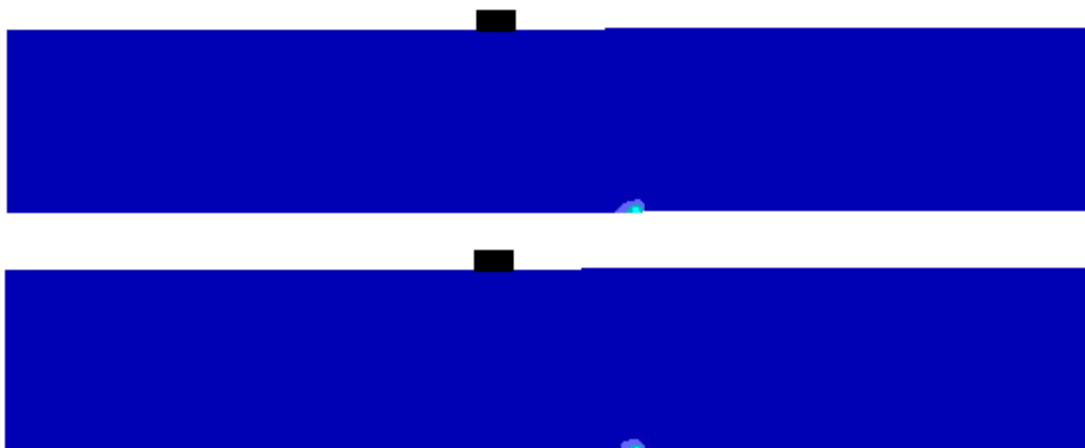
#### 5.4.2 Απόκριση με αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής

Στα **Σχήματα 5.31 έως 5.35** παρουσιάζεται η συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση της εδαφικής στρώσης για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ) με ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια της στρώσης στη θέση **C=16m**, με βάση αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα. Τα διαφορετικά σχήματα αντιστοιχούν σε διαφορετική κατακόρυφη μετατόπιση **d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8 και 1.0m**.

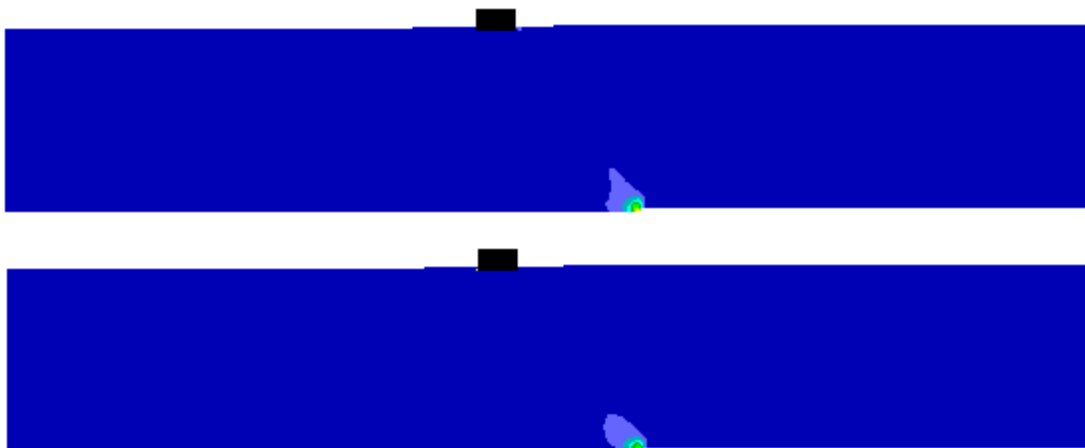
Στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ), τα αποτελέσματα είναι ίδια για κατακόρυφη μετατόπιση μικρότερη έως  $0.4\text{m}$ , ενώ οι όποιες διαφορές παρουσιάζονται για μεγάλες μετατοπίσεις. Παρόλα αυτά, η θέση στην οποία αναδύεται η διάρρηξη είναι ίδια, ανεξαρτήτως προσομοιώματος, δηλαδή η κύρια διάρρηξη αναδύεται στα αριστερά της κατασκευής ενώ υπάρχει δευτερεύουσα που αναδύεται στα δεξιά της.

Οι διαφορές αποτυπώνονται στις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός των ζωνών διάτμησης, οι οποίες είναι μικρότερες στην περίπτωση του σοφιστευμένου

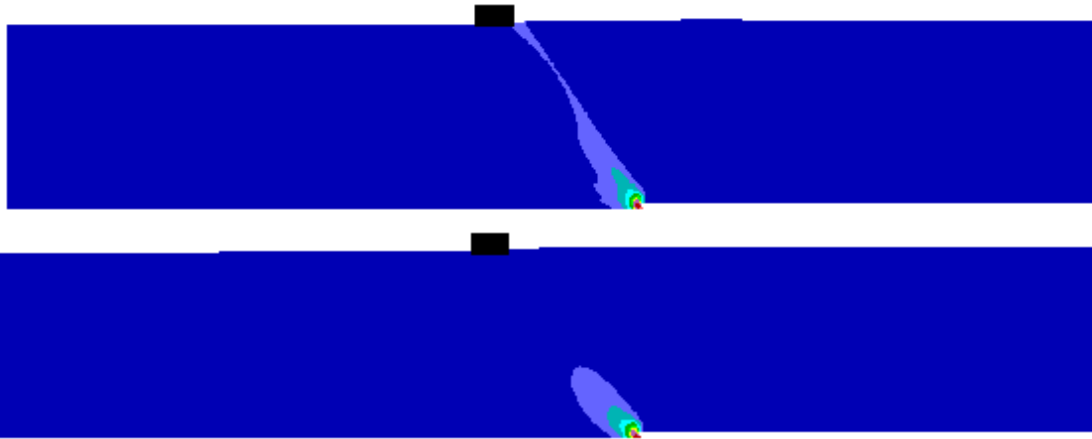
προσομοιώματος, για το οποίο η ανάδυση της διάρρηξης δεν είναι πλήρης για τη μέγιστη μετατόπιση ρήγματος  $d=1.0\text{m}$ . Αυτό αποδίδει το γνωστό από τη βιβλιογραφία συμπέρασμα ότι χρειάζονται πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις ρήγματος για την ανάδυση διαρρήξεων ανάστροφων ρηγμάτων, συγκριτικά με ό,τι χρειάζεται για κανονικά και «ανάστροφα» (π.χ. Αναστασόπουλος 2006, Loukidis et al 2007). Σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων κρίνονται πιο έντονες, απ' ό,τι παρατηρείται για το ελεύθερο πεδίο.



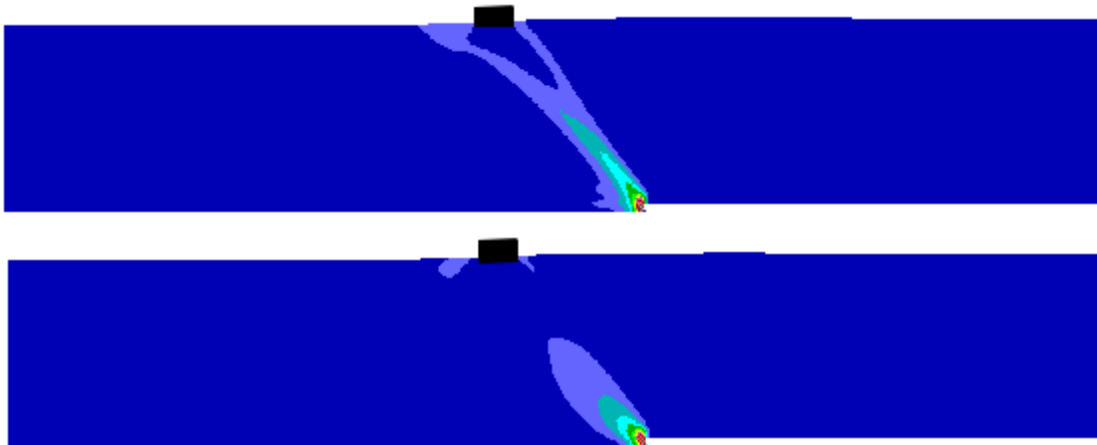
**Σχήμα 5.31** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



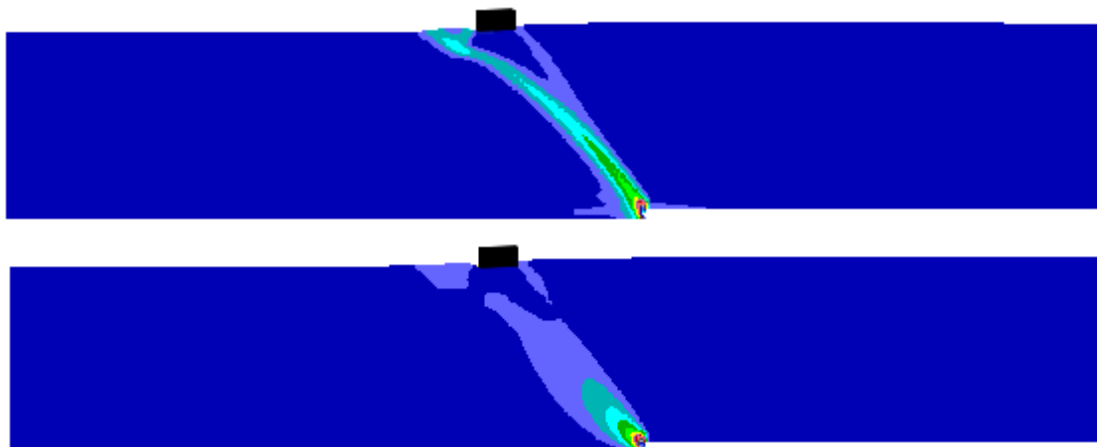
**Σχήμα 5.32** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.33** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.6m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=16m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

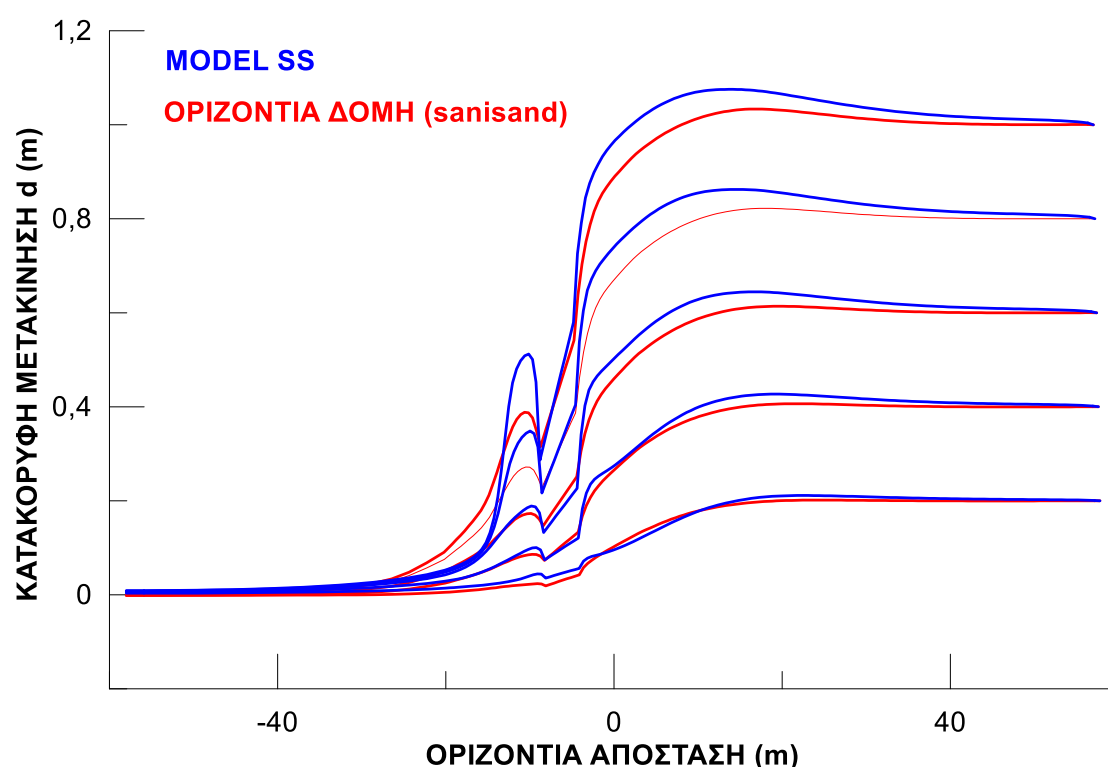


**Σχήμα 5.34** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.8m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=16m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).



**Σχήμα 5.35** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=1.0m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=16m$ , από ανάλυση με προσομοίωμα SS (άνω) και SANISAND (κάτω).

Οι διαφορές των δύο προσομοιωμάτων γίνονται εντονότερα αντιληπτές στο **Σχήμα 5.36**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμώδους στρώσης με κατασκευή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα (**μπλε**) και με το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» (**κόκκινο**). Παρατηρείται πως το απλουστευμένο δίνει παρόμοια αποτελέσματα με το σοφιστευμένο προσομοίωμα και οι διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα προσομοιώματα είναι συγκριτικά μικρότερες, απ' ό,τι εμφανίζουν για τους άλλους τύπους ρηγμάτων (κανονικό, «κατακόρυφο»). Επισημαίνεται, ότι το απλουστευμένο προσομοίωμα παρουσιάζει εντονότερη διαστολή αριστερά και δεξιά από την κατασκευή, ενώ το σοφιστευμένο επηρεάζει μεγαλύτερο εύρος της επιφάνειας προς το ακίνητο τμήμα (όπως και στις αναλύσεις ελευθέρου πεδίου).



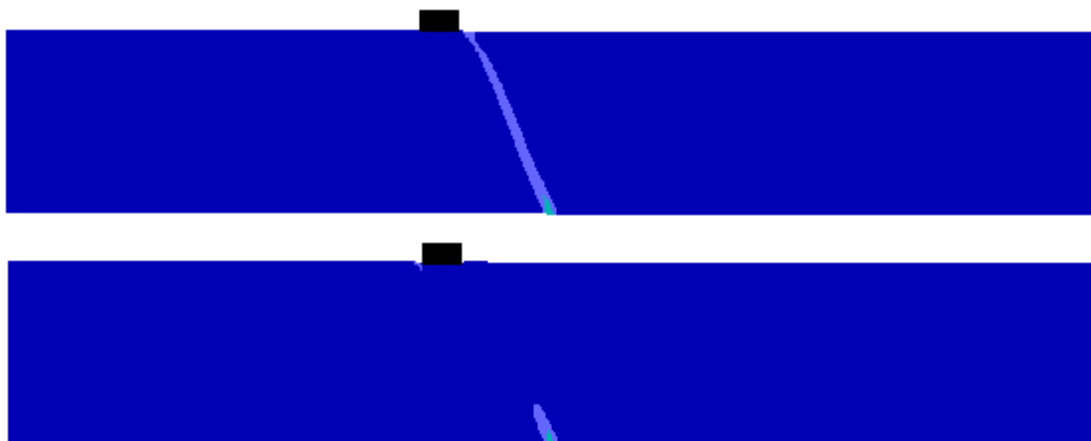
**Σχήμα 5.36** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) απλουστευμένο προσομοίωμα (μπλε γραμμή), β) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή).

## 5.5 Επίδραση φορτίου κατασκευής

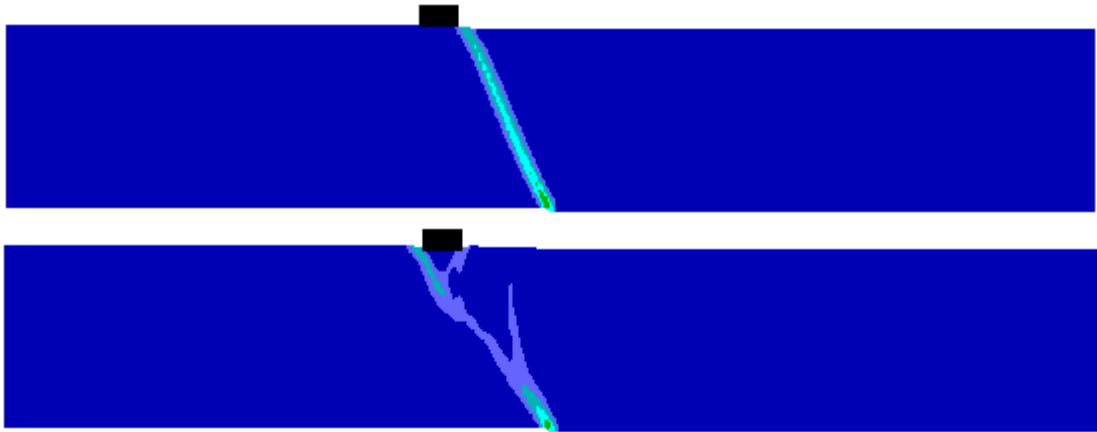
Σε αυτή την παράγραφο μελετάται η επίδραση που έχει μια βαρύτερη κατασκευή στην διάρρηξη ενός ρήγματος, με χρήση μόνο του σοφιστευμένου προσομοιώματος για «οριζόντια δομή». Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για δύο διαφορετικά φορτία ( $q=90\text{kPa}$  και  $q=180\text{kPa}$ ), αντίστοιχα με όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4 με χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος.

### 5.5.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

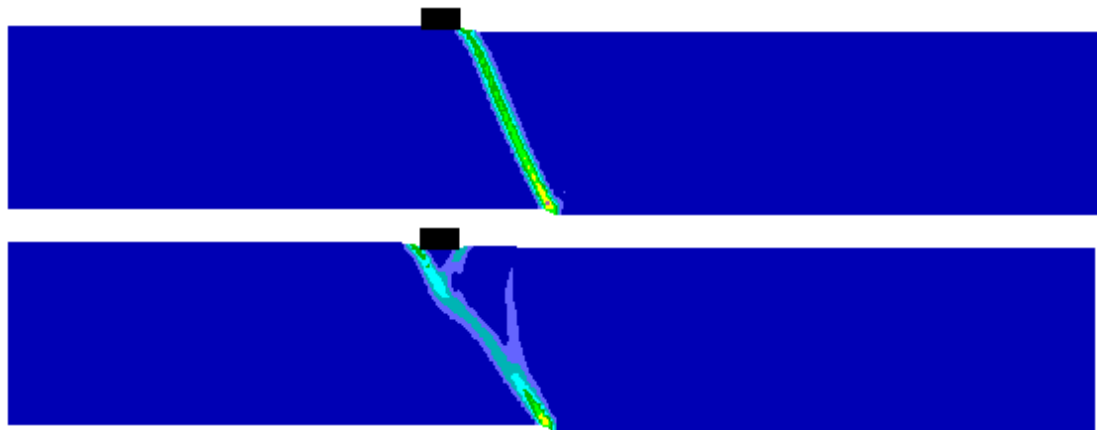
Στα **Σχήματα 5.37** έως **5.41** συγκρίνονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για φορτία κατασκευής  $q = 90$  και  $180\text{kPa}$ , κατά τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος με  $d = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Για οριζόντια δομή εδάφους, η αύξηση του φορτίου μεταβάλλει τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια. Για  $q=90\text{kPa}$  η θέση ανάδυσης είναι στα δεξιά της κατασκευής ήδη από  $d=0.2\text{m}$ , ενώ για  $q=180\text{kPa}$  η θέση ανάδυσης εκτρέπεται στα αριστερά (για  $d=0.4\text{m}$ ), ενώ δημιουργείται και τοπική δευτερεύουσα διάρρηξη προς τα δεξιά της κατασκευής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι και για τα 2 φορτία δημιουργείται βαθιά δευτερεύουσα διάρρηξη και κατακρήμνισμα, που είναι πιο ευρύ και σαφές για  $q=90\text{kPa}$ .



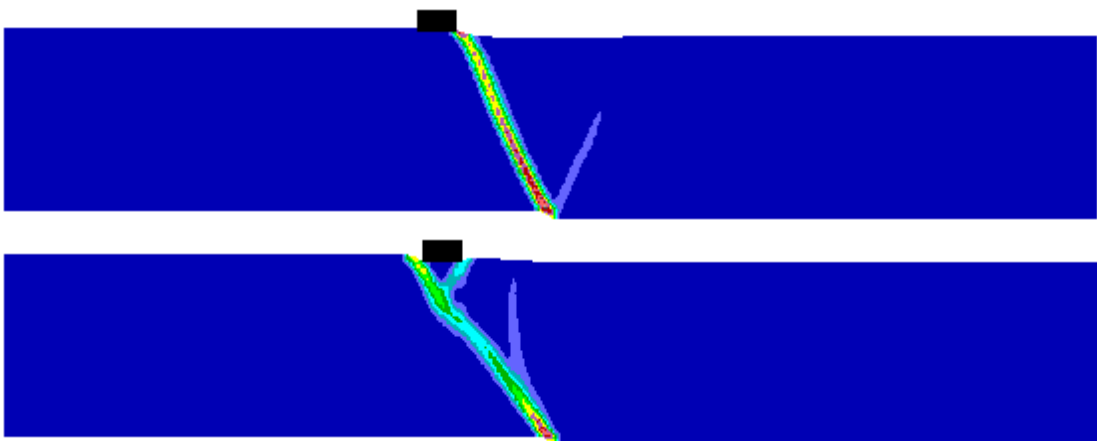
**Σχήμα 5.37** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



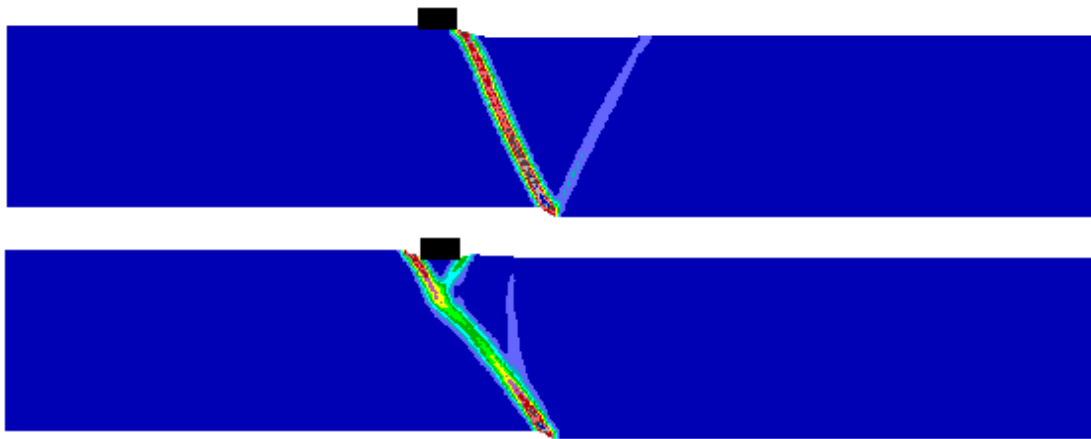
**Σχήμα 5.38** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.4m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



**Σχήμα 5.39** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.6m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

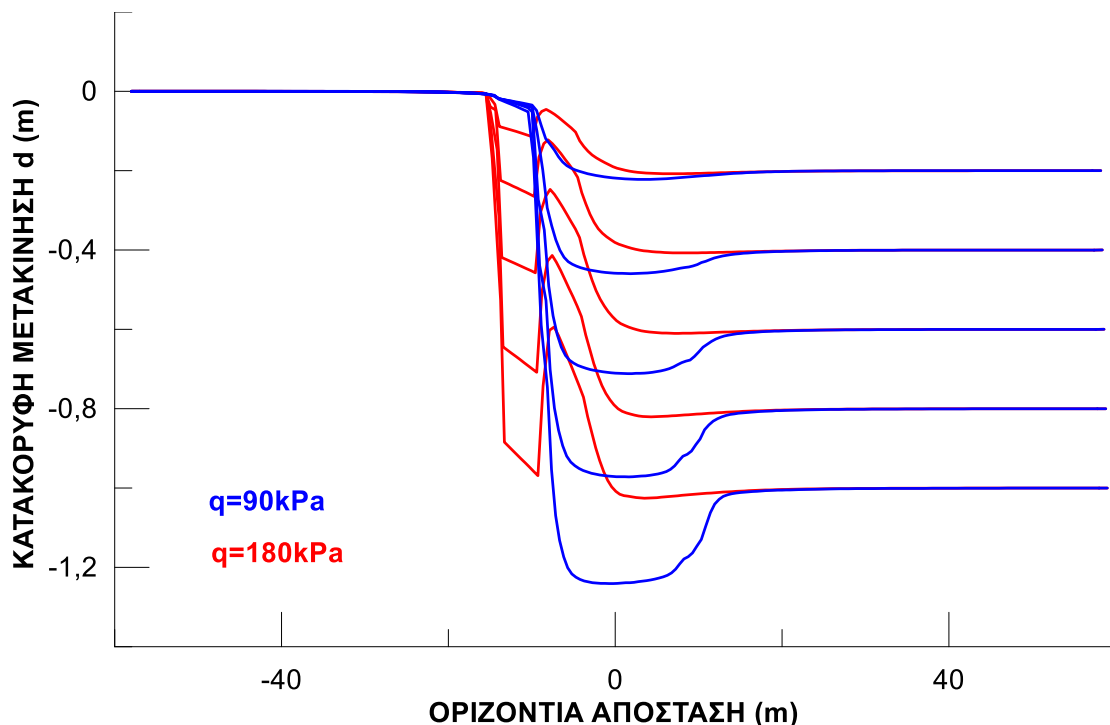


**Σχήμα 5.40** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.8m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



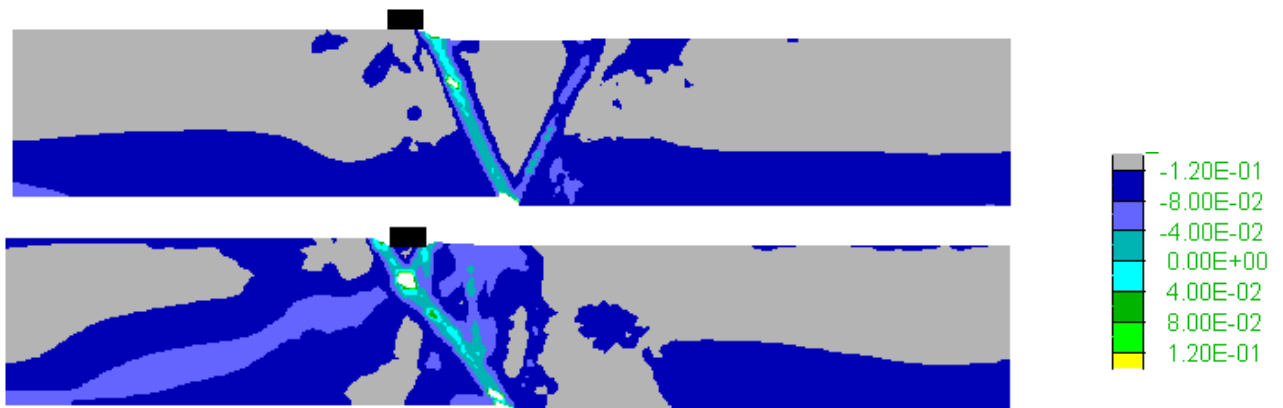
**Σχήμα 5.41** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

Η επίδραση του φορτίου γίνεται ευκρινέστερη στο **Σχήμα 5.42**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμώδους στρώσης για κατασκευή με  $q=90\text{kPa}$  (**μπλε**) και  $q = 180\text{kPa}$  (**κόκκινο**), υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Στην περίπτωση του  $q=90\text{kPa}$ , δημιουργείται ένα πλατύ κατακρήμνισμα ανάμεσα στην κύρια και στην δευτερεύουσα διάρρηξη, το οποίο δεν σχηματίζεται για  $q=180\text{kPa}$ . Ακόμη, είναι εμφανής η εκτροπή της διάρρηξης λόγω της αύξησης του φορτίου της κατασκευής, προς τα αριστερά της κατασκευής.

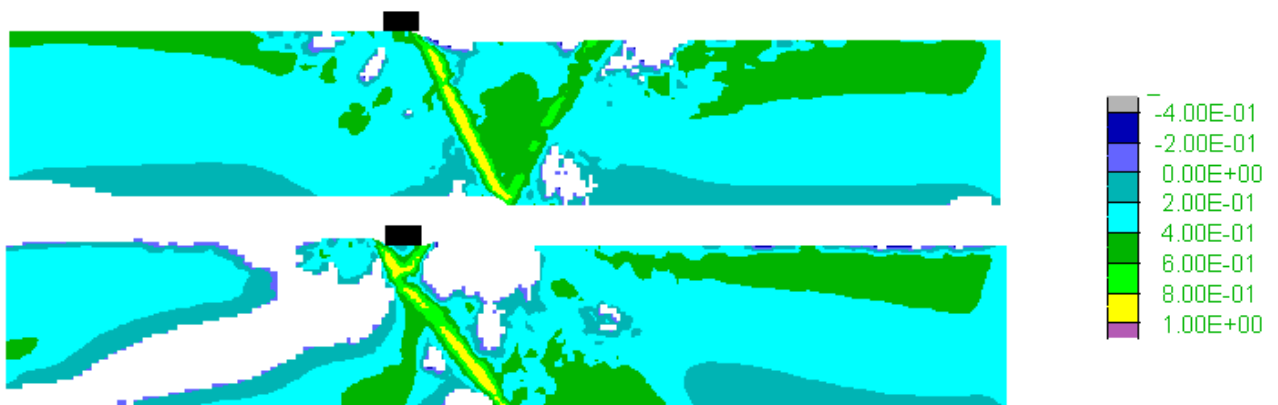


**Σχήμα 5.42** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για οριζόντια δομή και για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (μπλε γραμμή), β) φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (κόκκινη γραμμή).

Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.43** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη κανονικού ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=12\text{m}$  και για φορτία  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω). Επίσης, στα **Σχήματα 5.44, 5.45 και 5.46** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A$ , η παράμετρος  $N$  σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και ο μέτρο του τανυστή δομής  $F$  για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και φορτίων κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0$ ,  $F=N=1$ ). Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις φορτίων κατασκευής, η άμμος εντός της κυρίας διάρρηξης έχει σχεδόν φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του  $q=90\text{kPa}$ , η άμμος βρίσκεται σε Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος της ζώνης διάτμησης, ενώ για  $q=180\text{kPa}$  η άμμος φτάνει σε Κρίσιμη Κατάσταση σε ένα μεγάλο ποσοστό της ζώνης διάτμησης, όπου εντοπίζονται και οι εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα.

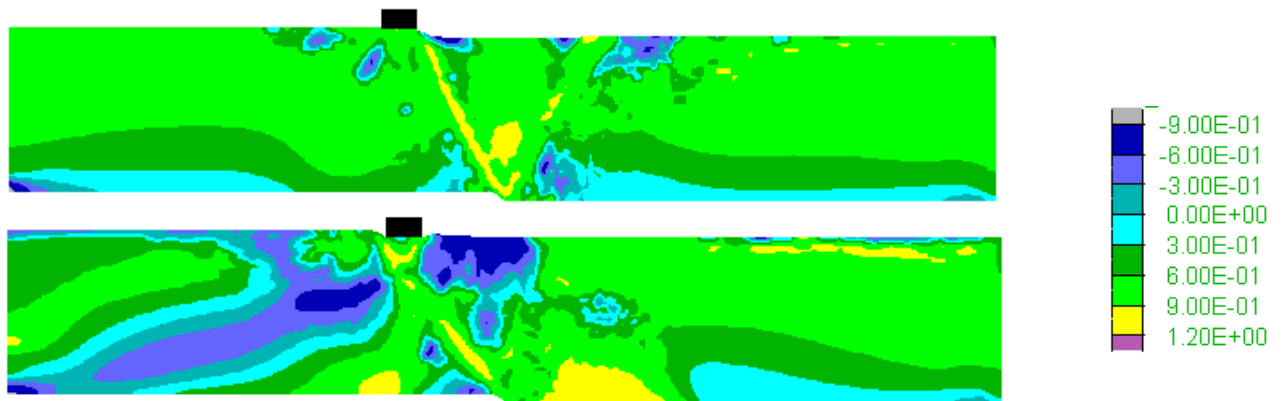


**Σχήμα 5.43** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$ , για οριζόντια δομή, με κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$ , με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας  $\beta=45^\circ$  με μετατόπιση  $d = 1.0\text{m}$ .

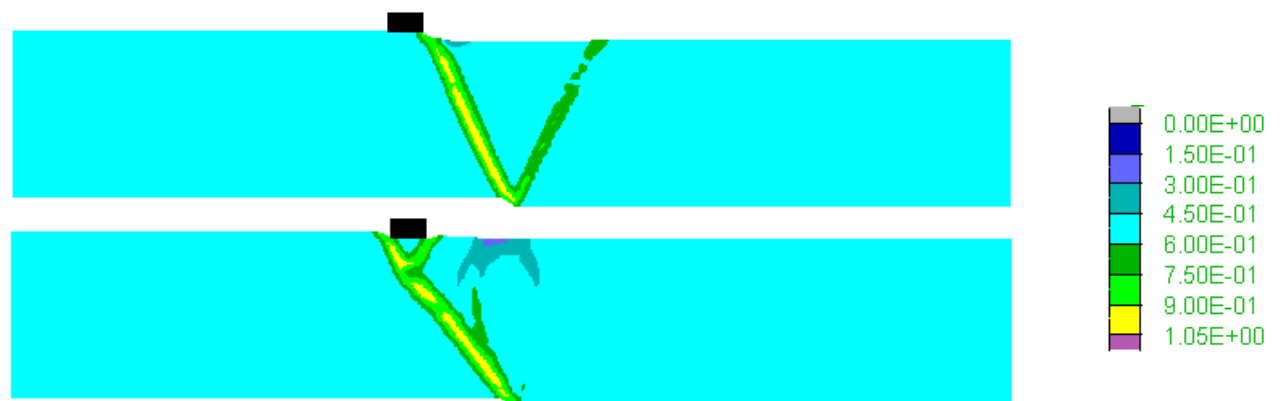


**Σχήμα 5.44** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$ , για οριζόντια δομή, με κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$ , με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας  $\beta=45^\circ$  και για μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .





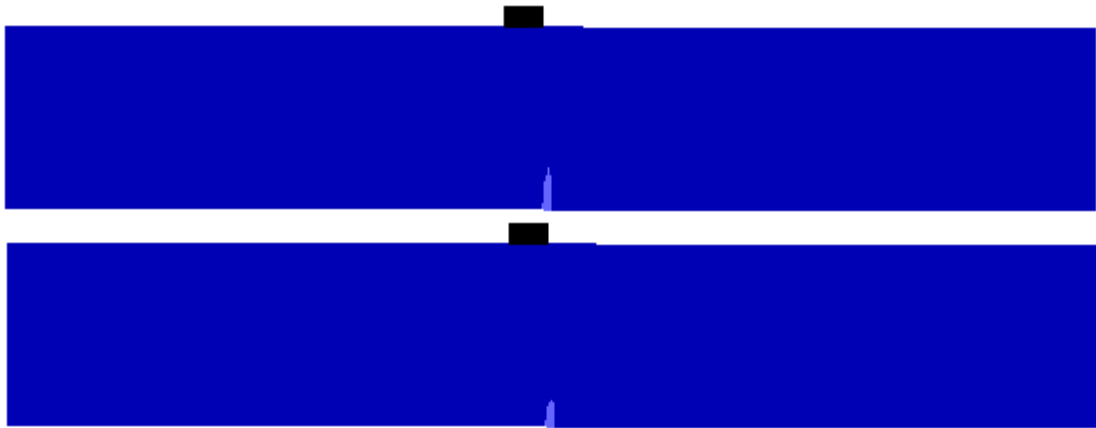
**Σχήμα 5.45** Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  για οριζόντια δομή, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας  $\beta=45^\circ$  με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



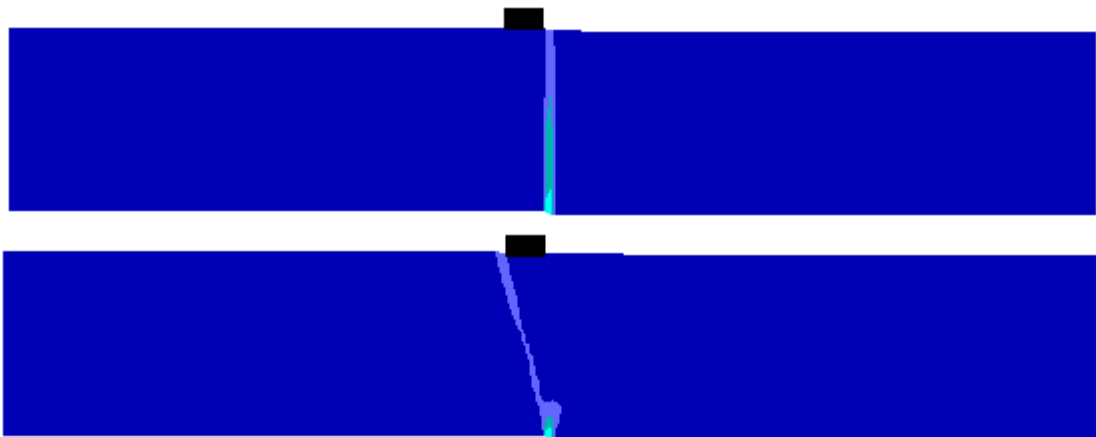
**Σχήμα 5.46** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  για οριζόντια δομή, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη κανονικού ρήγματος γωνίας  $\beta=45^\circ$  με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

### 5.5.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

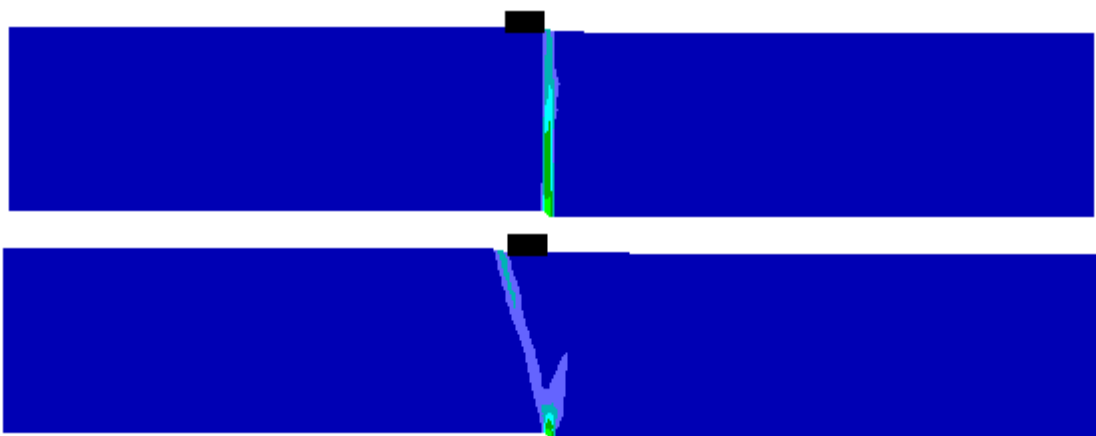
Στα **Σχήματα 5.47** έως **5.51** συγκρίνονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για φορτία κατασκευής  $q = 90$  και  $180\text{kPa}$ , κατά τη διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με  $d = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Για οριζόντια δομή εδάφους, και  $q = 90\text{kPa}$ , η διάρρηξη αναδύεται στη δεξιά πλευρά της κατασκευής, ενώ για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , παρατηρείται η αρχή δημιουργίας αβαθούς δευτερεύουσας διάρρηξης. Ο διπλασιασμός του φορτίου της κατασκευής ( $q=180\text{kPa}$ ) έχει ως αποτέλεσμα την εκτροπή της διάρρηξης του ρήγματος. Ήδη από κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.4\text{m}$  παρατηρείται εκτροπή προς την αριστερή πλευρά της κατασκευής, η οποία για  $d=1.0\text{m}$  συνοδεύεται από αβαθή δευτερεύουσα διάρρηξη προς τη δεξιά πλευρά της και από βαθιά τριτεύουσα διάρρηξη προς το κινούμενο τέμαχος.



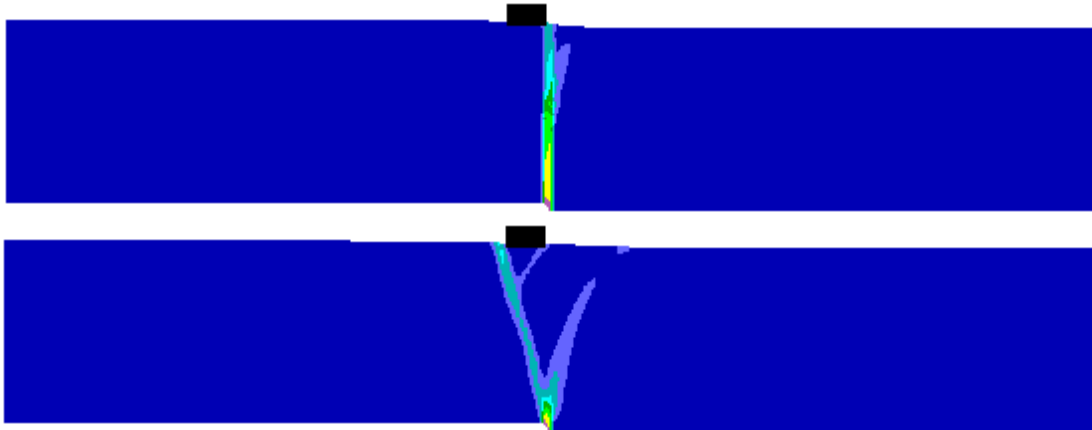
**Σχήμα 5.47** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κατακόρυφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



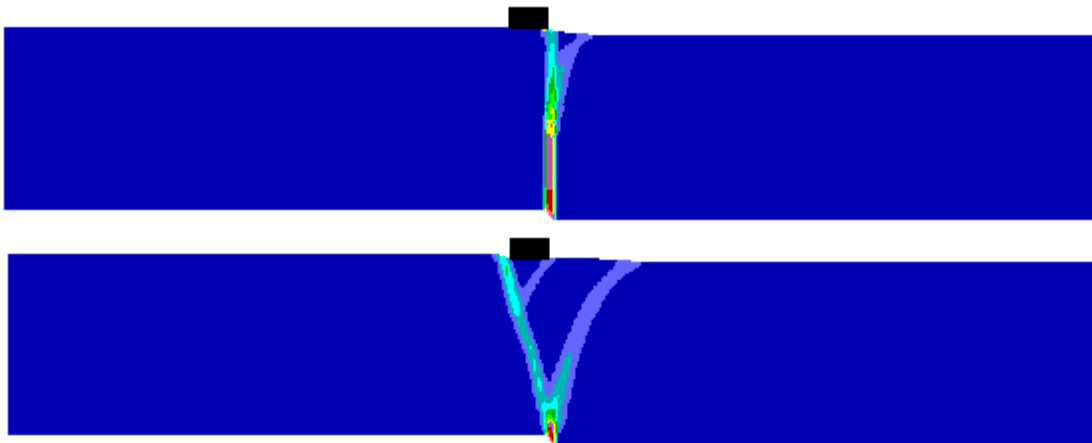
**Σχήμα 5.48** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κατακόρυφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



**Σχήμα 5.49** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κατακόρυφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

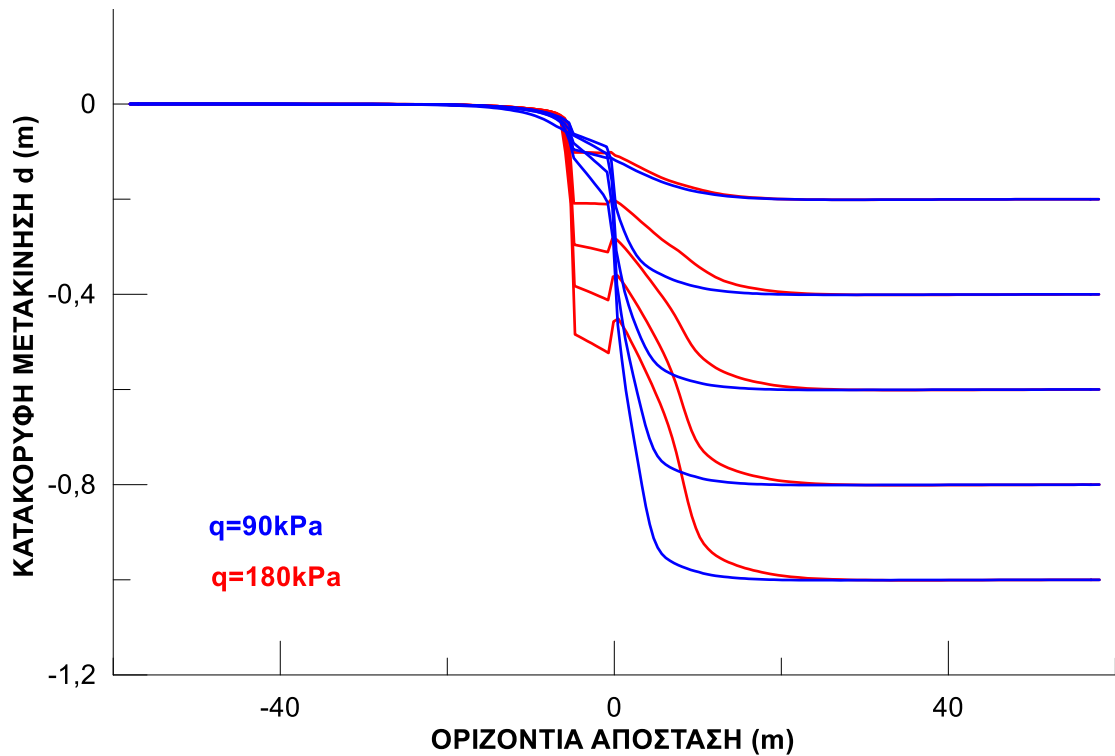


**Σχήμα 5.50** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κατακόρυφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



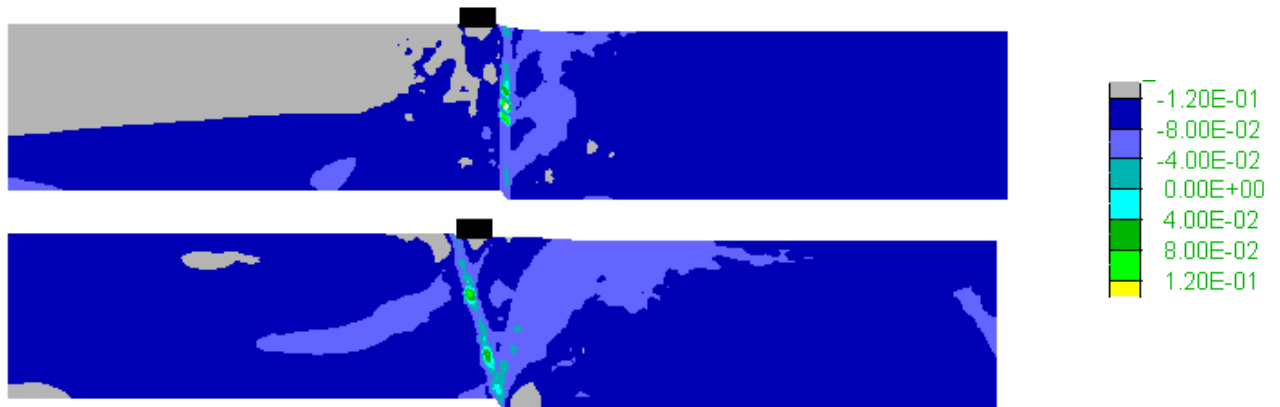
**Σχήμα 5.51** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη κατακόρυφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

Η επίδραση του φορτίου γίνεται σαφέστερη στο **Σχήμα 5.52**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμώδους στρώσης με κατασκευή φορτίου  $q=90\text{kPa}$  (**μπλε**) και  $q=180\text{kPa}$  (**κόκκινο**), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος. Η κλίση της διάρρηξης στην επιφάνεια είναι πιο έντονη για  $q=90\text{kPa}$ , καθώς για  $q=180\text{kPa}$  επηρεάζεται μεγαλύτερο εύρος στην επιφάνεια του εδάφους.

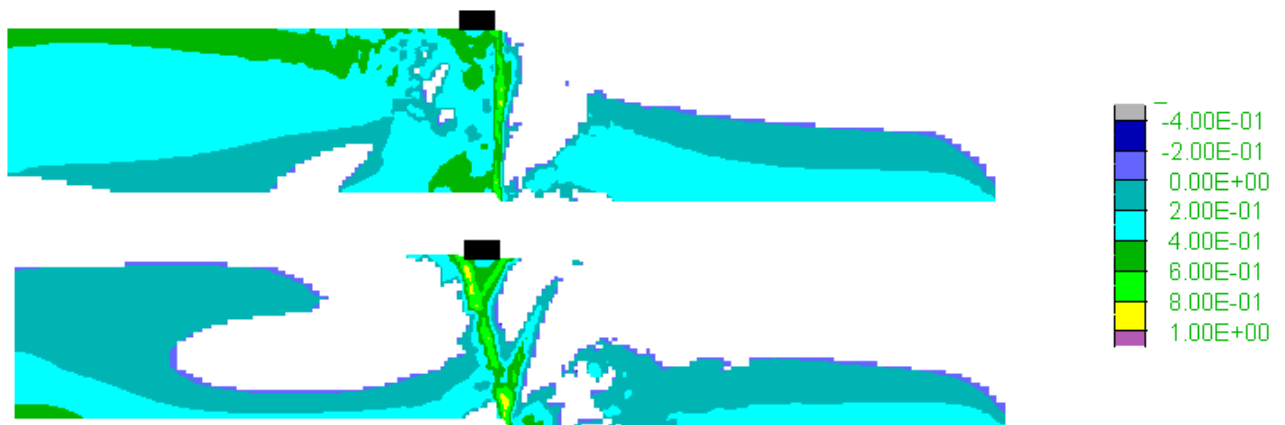


**Σχήμα 5.52** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (μπλε γραμμή), β) φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (κόκκινη γραμμή).

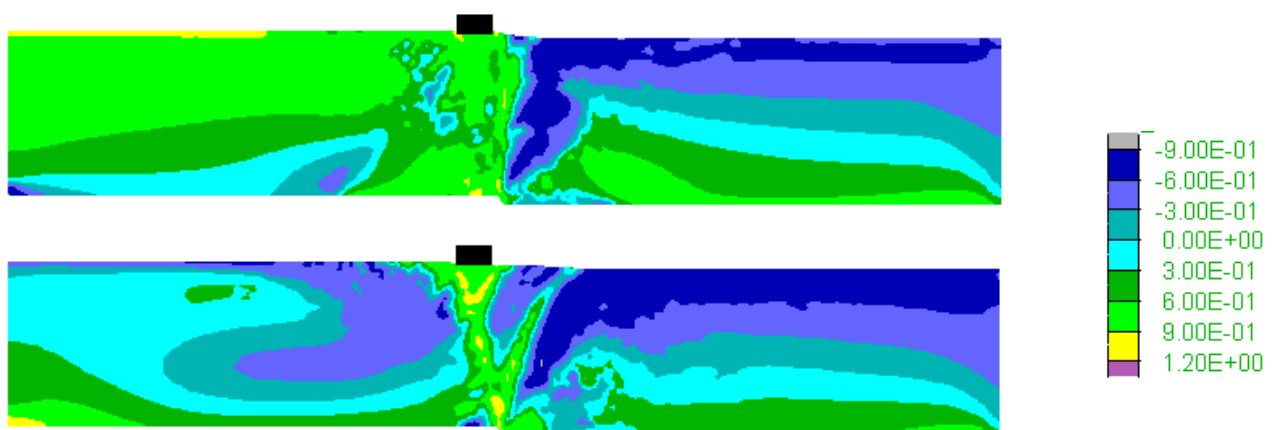
Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.53** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=3\text{m}$  και για φορτία  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω). Επίσης, στα **Σχήματα 5.54, 5.55 και 5.56** παρουσιάζονται η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A$ , η παράμετρος  $N$  σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης και ο μέτρο του τανυστή δομής  $F$  για τον ίδιο συνδυασμό ρήγματος, μετατόπισης και φορτίων κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0$ ,  $F=N=1$ ). Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις φορτίων κατασκευής, η άμμος εντός των ζωνών διάτμησης δεν έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να συμβεί αυτό. Παρόλα αυτά, εντός των ζωνών διάτμησης οι παράμετροι δομής ( $\zeta$ ,  $A$ ,  $N$  και  $F$ ) έχουν σαφώς πλησιάσει τις τιμές τους για Κρίσιμη Κατάσταση, συγκριτικά με την υπόλοιπη στρώση, καθώς εκεί εντοπίζονται οι ζώνες μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα.



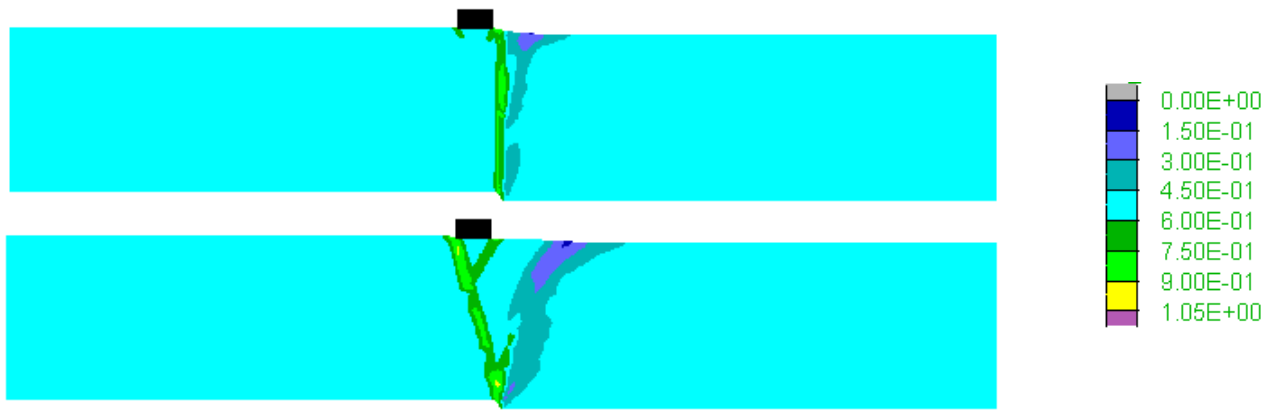
**Σχήμα 5.53** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$ , για οριζόντια δομή, με κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας  $\beta=85^\circ$  με μετατόπιση  $h = 1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 5.54** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$ , για οριζόντια δομή, με κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=3\text{m}$ , με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας  $\beta=85^\circ$  και για μετατόπιση  $h = 1.0\text{m}$ .



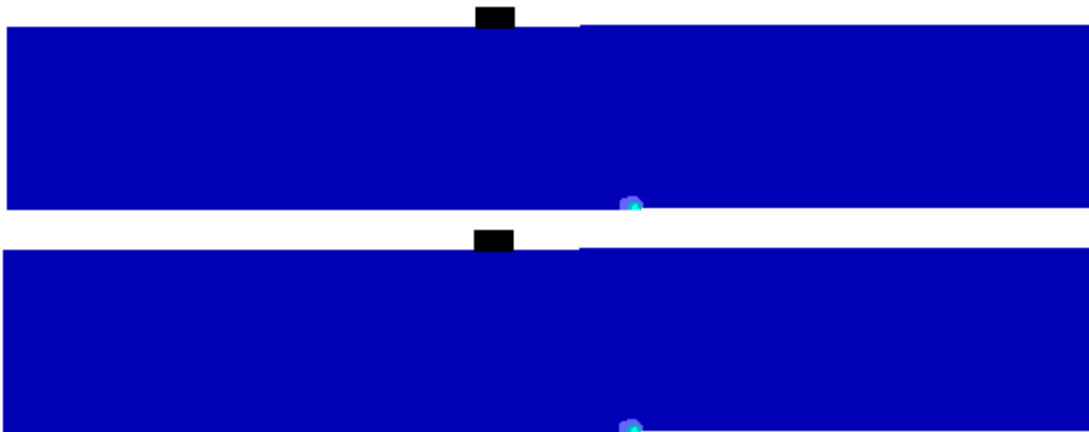
**Σχήμα 5.55** Παράμετρος N σχετικού προσαντολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  για οριζόντια δομή, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας  $\beta=85^\circ$  με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



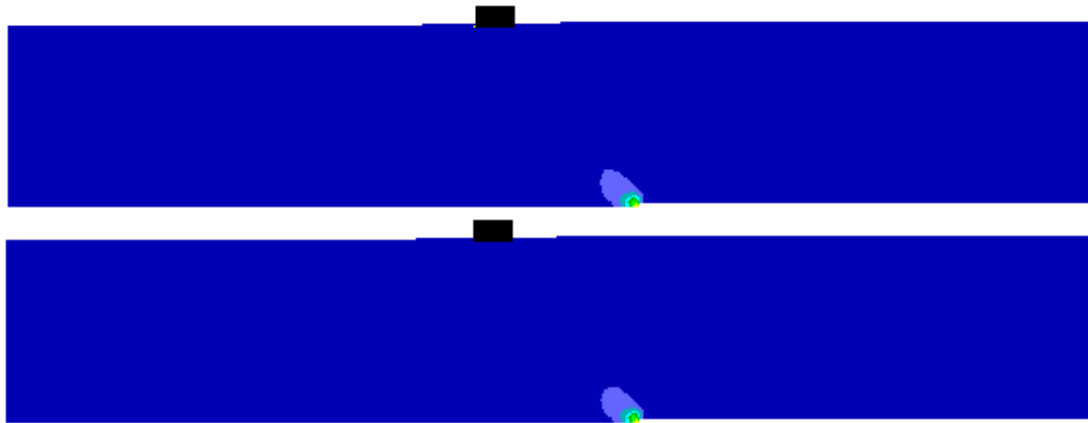
**Σχήμα 5.56** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  για οριζόντια δομή, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος γωνίας  $\beta=85^\circ$  με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

### 5.5.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

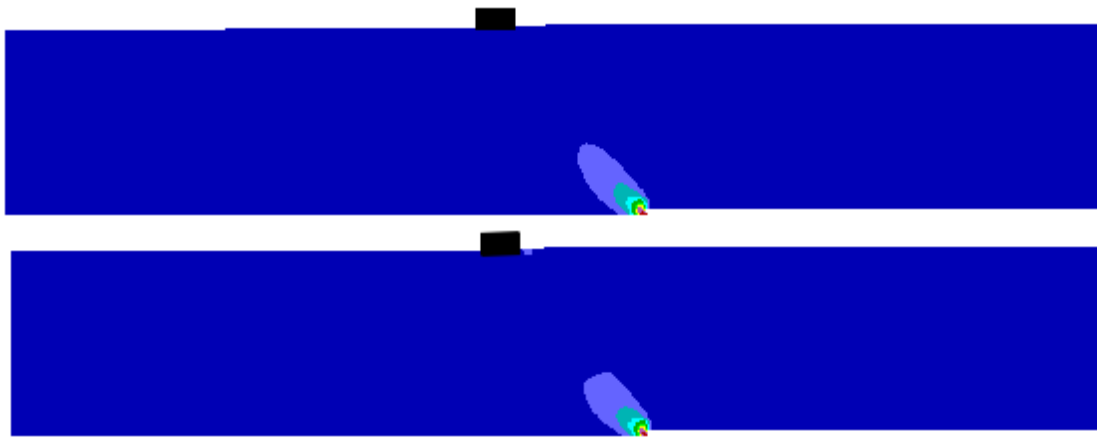
Στα **Σχήματα 5.57** έως **5.61** συγκρίνονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για φορτία κατασκευής  $q = 90$  και  $180\text{kPa}$ , κατά τη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με  $d = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Για οριζόντια δομή εδάφους, η αύξηση του φορτίου δε μεταβάλλει τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης στην επιφάνεια, αντίθετα με ό,τι παρατηρήθηκε για κανονικό και «κατακόρυφο» ρήγμα. Επιπλέον, ο διπλασιασμός του φορτίου δεν επηρεάζει ουσιωδώς ούτε τις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις στην αμμώδη στρώση.



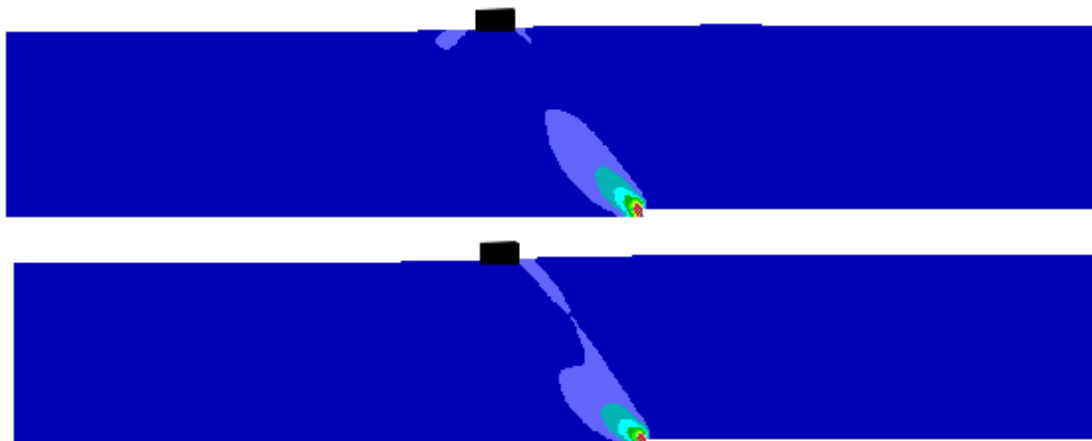
**Σχήμα 5.57** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



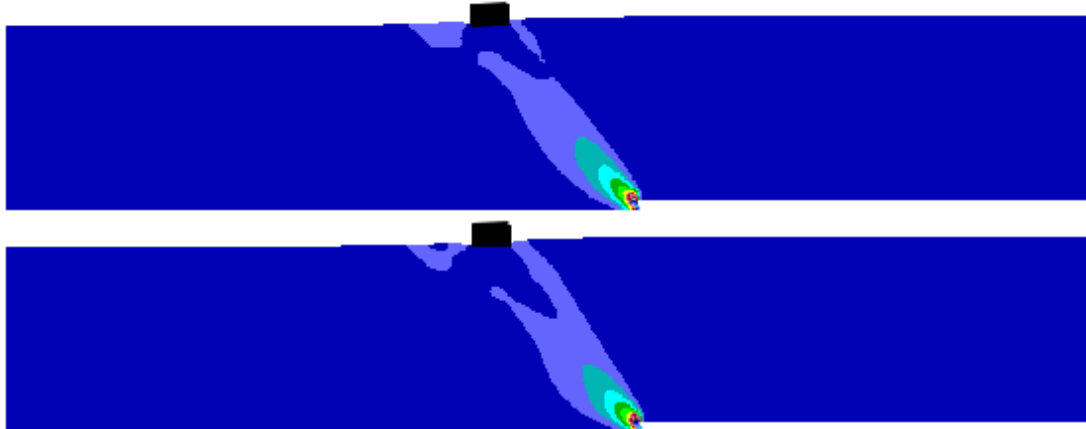
**Σχήμα 5.58** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



**Σχήμα 5.59** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



**Σχήμα 5.60** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

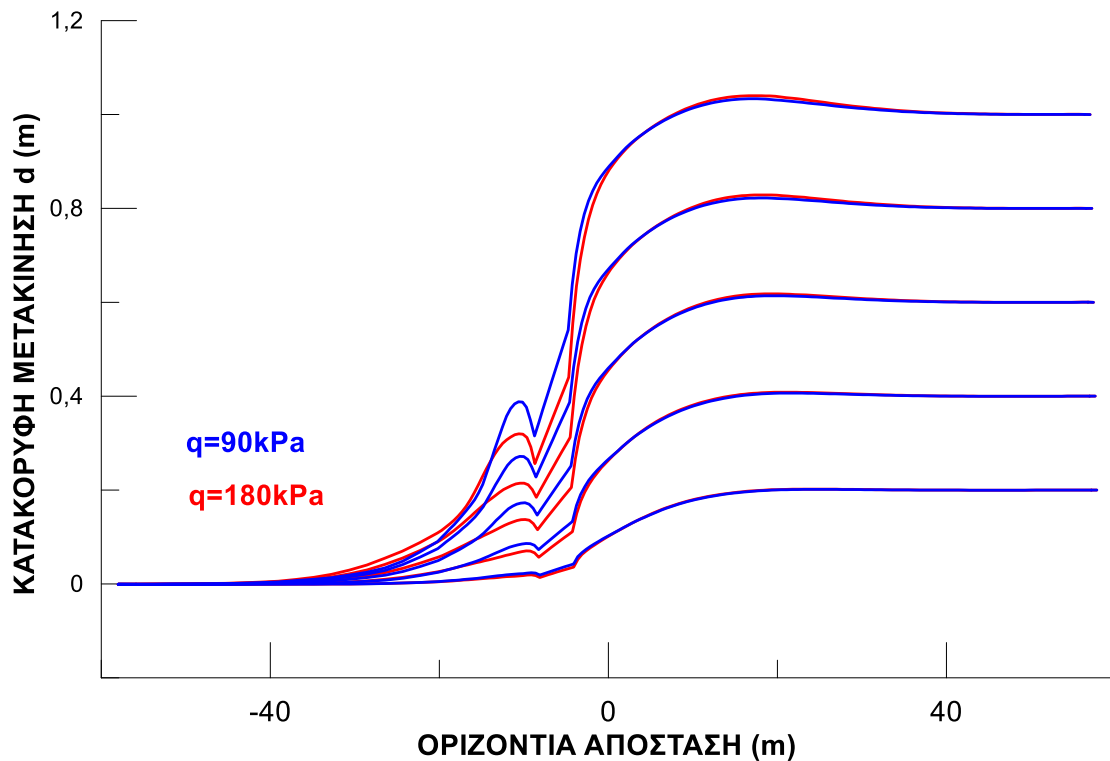


**Σχήμα 5.61** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **οριζόντιας δομής**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

Τα ανωτέρω συμπεράσματα μη-σημαντικής επίδρασης του φορτίου κατασκευής επιβεβαιώνονται και στο **Σχήμα 5.62**, όπου παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της αμμώδους στρώσης με κατασκευή φορτίου  $q=90\text{kPa}$  (**μπλε**) και  $q=180\text{kPa}$  (**κόκκινο**), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Παρατηρείται ότι οι διαφορές ανάμεσα στις δυο καμπύλες είναι ελάχιστες, ειδικά ποιοτικά, καθώς ποσοτικά απλώς παρατηρείται πιο έντονη διαστολή του εδάφους στα αριστερά της κατασκευής.

Πιθανοί λόγοι αυτής της μη-επίδρασης είναι η θεωρηθείσα θέση με  $C=16\text{m}$ , η οποία επελέγη με βάση αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα και μπορεί να μην η πλέον χαρακτηριστική για αναλύσεις με το σοφιστεμένο προσομοίωμα SANISAND. Ένας δεύτερος λόγος είναι ότι μετατοπίσεις  $d=1.0\text{m}$  είναι σχετικώς μικρές για ανάστροφα ρήγματα που χρειάζονται μεγάλες τιμές για να αναδυθούν στην επιφάνεια, οπότε οι όποιες διαφοροποιήσεις είναι αναγκαστικά λιγότερο έντονες, όπως συμβαίνει, για παράδειγμα για  $d=0.2-0.4\text{m}$  για διαρρήξεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος.





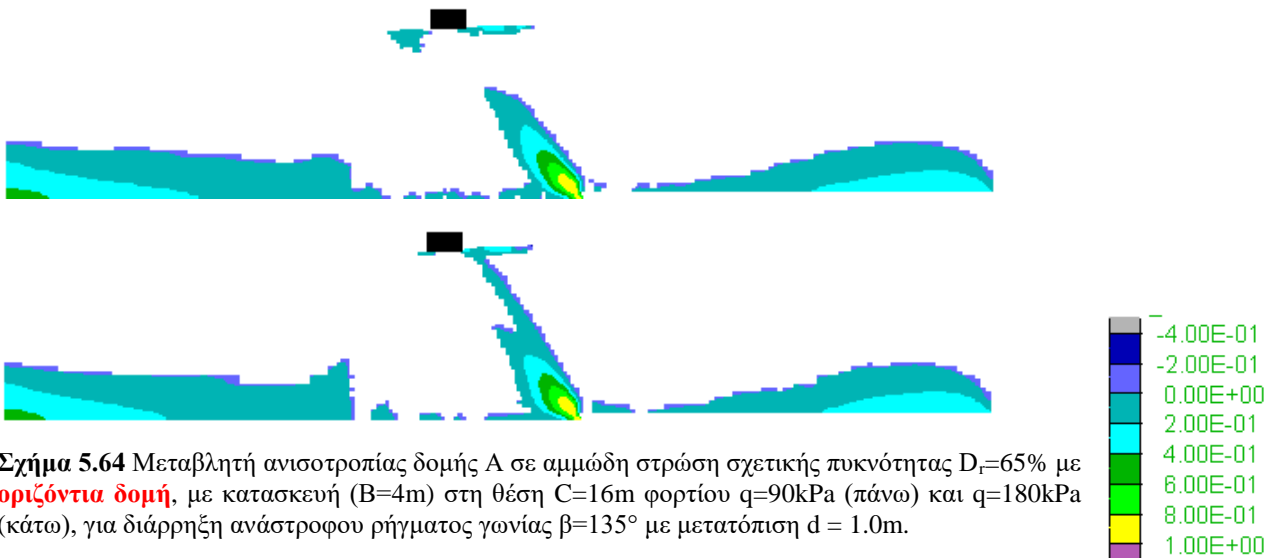
**Σχήμα 5.62** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (μπλε γραμμή), β) φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (κόκκινη γραμμή).

Παρακάτω, στο **Σχήμα 5.63** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=16\text{m}$  και για φορτία  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω). 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 και φορτίων κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0$ ,  $F=N=1$ ).

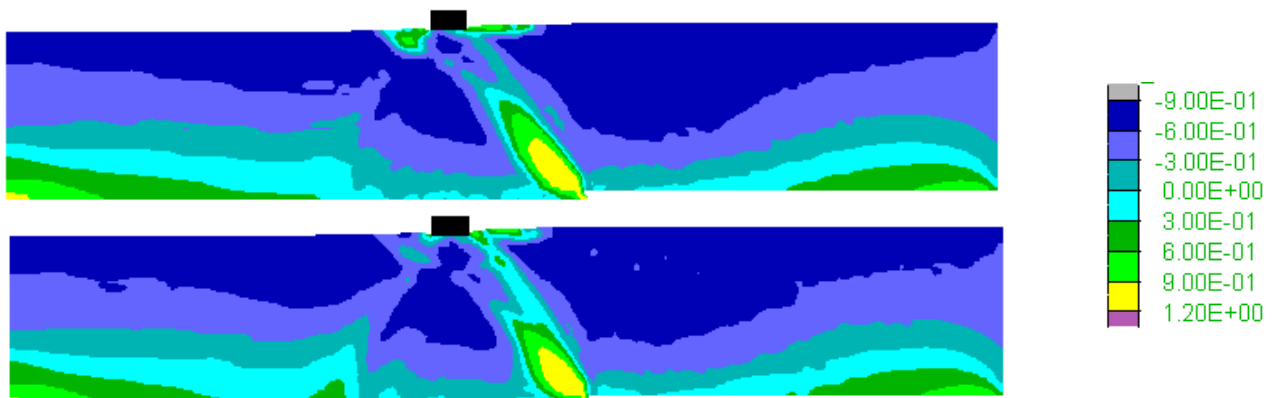
Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις φορτίων κατασκευής, η άμμος εντός των ζωνών διάτμησης έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση μόνο σε μεγάλο βάθος, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να εμποδωθεί η Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος τους. Η αύξηση του φορτίου κατασκευής, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη διάρρηξη και αυτό αποτυπώνεται και στις παραμέτρους δομής ( $\zeta$ ,  $A$ ,  $F$ ,  $N$ ).



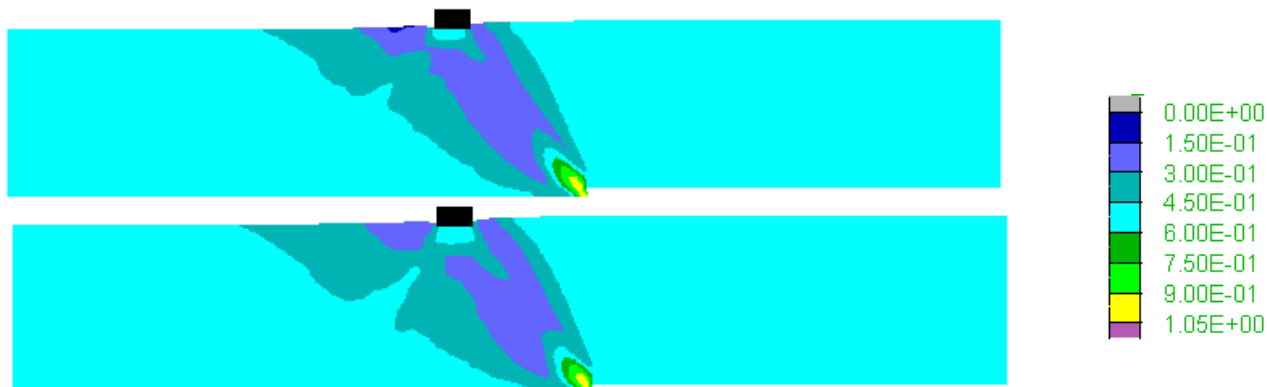
Σχήμα 5.63 Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης ζ σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **οριζόντια δομή**, με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=16m$  φορτίου  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας  $\beta=135^\circ$  με μετατόπιση  $d = 1.0m$ .



Σχήμα 5.64 Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **οριζόντια δομή**, με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=16m$  φορτίου  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας  $\beta=135^\circ$  με μετατόπιση  $d = 1.0m$ .



Σχήμα 5.65 Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **οριζόντια δομή**, με κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=16m$  φορτίου  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας  $\beta=135^\circ$  με μετατόπιση  $d = 1.0m$ .



**Σχήμα 5.66** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **οριζόντια δομή**, με κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  φορτίου  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω), για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος γωνίας  $\beta=135^\circ$  με μετατόπιση  $d = 1.0\text{m}$ .

## 5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής με βάση αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα και το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια δομή» κόκκων, για τα τρία είδη ρηγματών και για μια χαρακτηριστική θέση κατασκευής ανά είδος ρήγματος. Ακόμη, εξετάστηκε η επίδραση του μεγέθους φορτίου κατασκευής στη διάρρηξη. Υπενθυμίζεται ότι με την κατάλληλη βαθμονόμηση τα 2 προσομοιώματα οδηγούν σε συμφωνία προβλέψεων για δοκιμές σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου και σε επίπεδο δοκιμής φυγοκεντρική (βλέπε Κεφάλαιο 3).

### A. Στην περίπτωση του **κανονικού ρήγματος ( $45^\circ$ ):**

(α) Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης σε ελεύθερο πεδίο δεν επηρεάζεται από το είδος του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται. Ελάχιστη απόκλιση παρουσιάζουν οι θέσεις των δευτερευουσών διαρρήξεων, που ορίζουν και το εύρος του δημιουργούμενου κατακρημνίσματος. Επομένως, το απλουστευμένο προσομοίωμα προσφέρει επαρκή ακρίβεια για την ανάλυση διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου.

(β) Η ύπαρξη κατασκευής με  $q=90\text{kPa}$  οδηγεί σε διαφορές στις αναλύσεις με τα διαφορετικά προσομοιώματα. Για το απλουστευμένο προσομοίωμα η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ δημιουργείται αβαθής δευτερεύουσα διάρρηξη προς τη δεξιά πλευρά της. Αντίθετα, η ανάλυση με σοφιστευμένο προσομοίωμα δείχνει ανάδυση της διάρρηξης στη δεξιά πλευρά της κατασκευής και ανάπτυξη βαθιάς δευτερεύουσας διάρρηξης με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός βαθιού και πλατιού κατακρημνίσματος.

(γ) Με βάση αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής σε  $q=180\text{kPa}$  προκαλεί εκτροπή της διάρρηξης προς την αριστερή πλευρά της κατασκευής, σε αντίθεση με την περίπτωση του  $q=90\text{kPa}$  όπου η ανάδυση γίνεται στη δεξιά πλευρά της. Σε κάθε περίπτωση φορτίου κατασκευής, η άμμος εντός της αναδυθέντων διαρρήξεων έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση για κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος  $d=1\text{m}$ , και συγκεκριμένα για  $q=90\text{kPa}$  καθ' όλο το μήκος της,

ενώ για  $q=180\text{kPa}$  σε ένα μεγάλο ποσοστό της, δηλαδή σε μεγάλο βάθος και επιφανειακά κοντά στην κατασκευή.

#### **B. Στην περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος ( $85^\circ$ ):**

(α) Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης σε ελεύθερο πεδίο δεν επηρεάζεται σημαντικά από το είδος του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται. Ελάχιστη απόκλιση παρουσιάζει η ένταση των διατμητικών παραμορφώσεων εντός των αναδυθέντων διαρρήξεων. Επομένως, το απλουστευμένο προσομοίωμα προσφέρει επαρκή ακρίβεια για την ανάλυση διάρρηξης «κατακόρυφου» ρήγματος σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου.

(β) Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό την ύπαρξη κατασκευής με  $q=90\text{kPa}$  είναι στην ίδια (δεξιά) πλευρά της κατασκευής και στις δύο περιπτώσεις προσομοιωμάτων. Όμως, για την περίπτωση του απλουστευμένου προσομοιώματος δημιουργείται δευτερεύουσα διάρρηξη στην αριστερή πλευρά της κατασκευής. Επομένως, η ανάλυση με απλουστευμένο προσομοίωμα δίνει ποιοτικά διαφορετικά αποτελέσματα από εκείνα του σοφιστευμένου προσομοιώματος, αντίθετα με τη συμφωνία σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου.

(γ) Με βάση αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα, η αύξηση του φορτίου του κατασκευής αλλάζει τελείως την εικόνα διάρρηξης του ρήγματος. Η διάρρηξη υπό το μεγαλύτερο φορτίο κατασκευής ( $q=180\text{kPa}$ ) εκτρέπεται και αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις στην δεξιά πλευρά της κατασκευής. Σε κάθε περίπτωση φορτίου κατασκευής, η άμμος εντός της αναδυθέντων διαρρήξεων δεν έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

#### **Γ. Στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ):**

(α) Η επιλογή του προσομοιώματος για την πρόβλεψη της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος σε αμμώδη στρώση υπό ελεύθερο πεδίο επηρεάζεται ελαφρώς από την επιλογή προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, η χρήση απλουστευμένου προσομοιώματος επιτρέπει ανάδυση της διάρρηξης σε μικρότερη μετατόπιση ρήγματος και οδηγεί σε πιο απότομη κλίση στην επιφάνεια του εδάφους στη θέση ανάδυσης, συγκριτικά με τη χρήση σοφιστευμένου προσομοιώματος που οδηγεί μεγαλύτερο εύρος της επιφάνειας του εδάφους να έχει επηρεαστεί από τη διάρρηξη.

(β) Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό κατασκευή φορτίου  $q=90\text{kPa}$  δεν επηρεάζεται σημαντικά από το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται (απλουστευμένο ή σοφιστευμένο). Η διάρρηξη ακολουθεί ίδια πορεία ανάδυσης και στις δύο περιπτώσεις και οι διαφορές στις αναλύσεις με τα δύο προσομοιώματα εντοπίζονται μόνο στις συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις εντός των ζωνών διάτμησης. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι το απλουστευμένο προσομοίωμα παρουσιάζει ισοδύναμα αποτελέσματα με το σοφιστευμένο, τουλάχιστον για μέγιστη μετατόπιση  $d=1\text{m}$  που είναι σχετικά μικρή για ανάστροφα ρήγματα.

(γ) Με βάση αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα, η αύξηση του φορτίου κατασκευής  $q$  από  $90\text{kPa}$  σε  $180\text{kPa}$  δε φαίνεται να συμβάλλει σε αλλαγές στην αναδυόμενη διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος. Τα αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδια, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είτε η

επιλεχθείσα θέση της κατασκευής δεν επηρεάζει τόσο σημαντικά τη διάρρηξη, είτε η κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος με  $d=1.0\text{m}$  δεν επαρκεί για να υποδείξει σημαντικές αλλαγές στη διάρρηξη. Σε κάθε περίπτωση φορτίου κατασκευής, η άμμος εντός της αναδυθέντων διαρρήξεων δεν έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση, τουλάχιστον για κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$  παρά μόνο σε μεγάλα βάθη και για μικρό μήκος της αναδυόμενης διάρρηξης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΗ ΣΤΡΩΣΗ

#### 6.1 Εισαγωγή

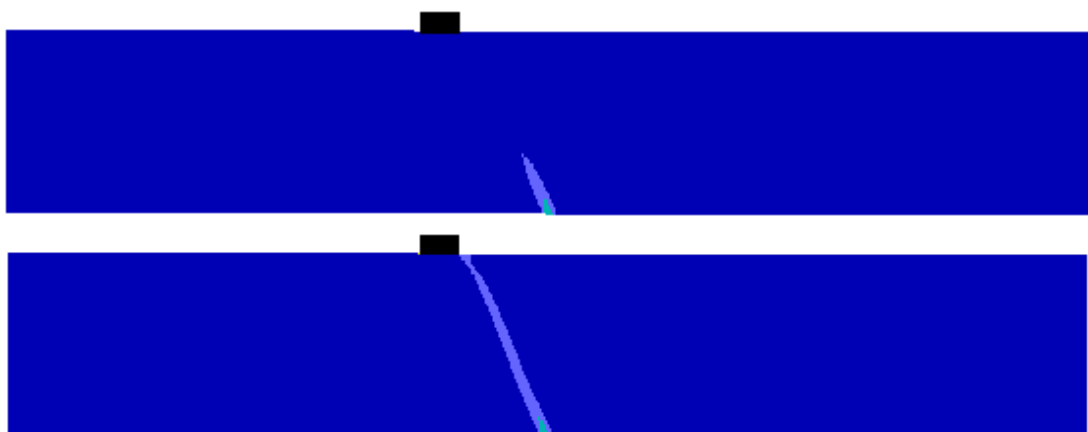
Στο Κεφάλαιο 5 διερευνήθηκε η έννοια της μικρο-δομής των κόκκων και ο τρόπος με τον οποίο διαφοροποιείται η αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής αν αυτή ληφθεί υπόψη συστηματικά μέσω ενός σοφιστευμένου προσομοιώματος συγκριτικά με ένα απλουστευμένο. Υπενθυμίζεται ότι στη φύση οι κόκκοι του εδάφους εναποτίθενται κυρίως οριζόντια, λόγω βαρύτητας, δημιουργώντας μια εγκάρσια ισότροπη δομή. Η θεώρηση αυτής της συνήθους αρχικής μικρο-δομής ορίζεται ως «**οριζόντια δομή**» κόκκων. Με την περιστροφή της αρχικής αυτής μικρο-δομής κόκκων κατά 90° δημιουργείται η «**κατακόρυφη δομή**» κόκκων, η οποία θεωρείται μια ακραία περίπτωση μικρο-δομής και ο στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί πόσο μπορεί να επηρεαστεί η αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής λόγω μικρο-δομής.

Έτσι, στο παρόν Κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του σοφιστευμένου προσομοιώματος για τις δύο αρχικές δομές των κόκκων. Οι αναλύσεις για «κατακόρυφη δομή» κόκκων επαναλήφθηκαν με τον ίδιο κάρναβο, τις ίδιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες, τις ίδιες σταθερές του προσομοιώματος, με εξαίρεση τον προσανατολισμό της μικρο-δομής σε σχέση με την «οριζόντια δομή» που παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5. Το σοφιστευμένο προσομοίωμα που χρησιμοποιείται είναι το SANISAND και για κάθε τύπο ρήγματος (κανονικό, «κατακόρυφο», ανάστροφο) μελετάται μια χαρακτηριστική θέση κατασκευής. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων ολοκληρώνεται με την αύξηση του φορτίου κατασκευής και τη μελέτη επίδρασης του φορτίου αυτού και στην διάρρηξη υπό «κατακόρυφη δομή».

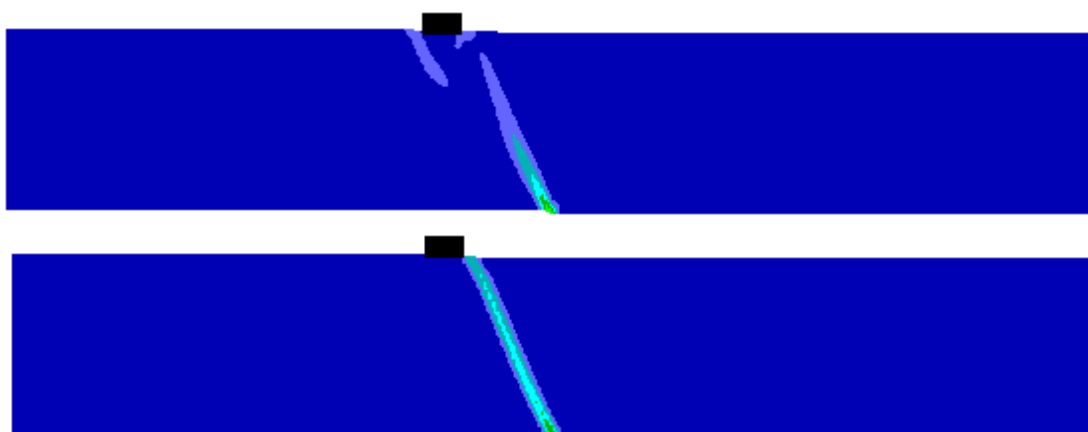
Στο τέλος του Κεφαλαίου συνοψίζονται οι επιδράσεις του επιλεγέντος προσομοιώματος (σοφιστευμένο ή απλουστευμένο), του προσανατολισμού δομής κόκκων («οριζόντια» ή «κατακόρυφη») και του φορτίου της κατασκευής ( $q = 90$  ή  $180\text{kPa}$ ) στην εξέλιξη της (μέσης) καθίζησης και στροφής της κατασκευής με την αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης στο βραχώδες υπόβαθρο, ξεχωριστά για κάθε τύπο ρήγματος. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν αναλύσεις των οποίων τα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς στα Κεφάλαια 4, 5 και 6.

## 6.2 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

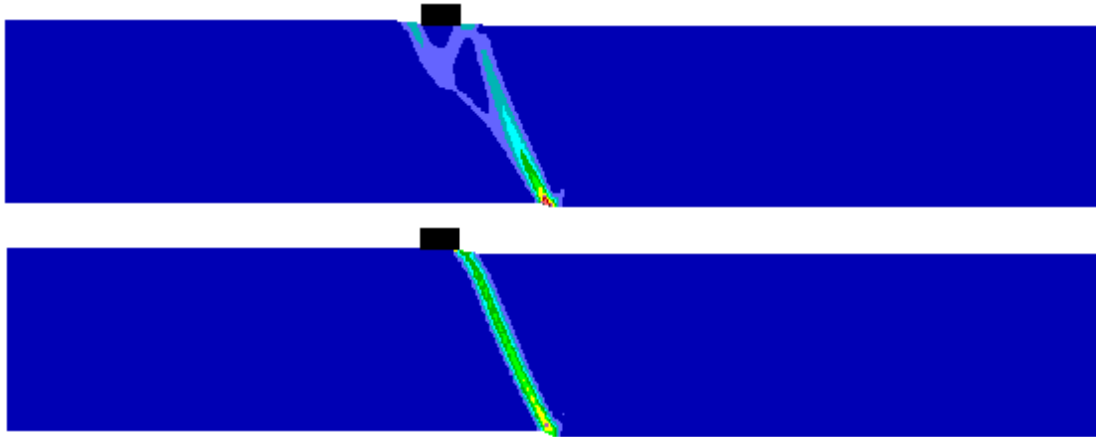
Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για κανονικό ρήγμα ( $45^\circ$ ) υπό την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για τους δύο προσανατολισμούς δομής των κόκκων. Όπως είναι φανερό από τα **Σχήματα 6.1** έως **6.5** που παρουσιάζουν συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις, η δομή των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την πορεία διάρρηξης του ρήγματος. Στην περίπτωση της «**οριζόντιας δομής**», η διάρρηξη αναδύεται στην δεξιά πλευρά της κατασκευής, ενώ στη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος ( $d=1.0\text{m}$ ) ξεκινάει η δημιουργία μιας δευτερεύουσας διάρρηξης. Στην «**κατακόρυφη δομή**» των κόκκων, η διάρρηξη αναδύεται πιο αργά, αλλά πάλι στην δεξιά πλευρά της κατασκευής με κάποιες διαφορές όμως. Συγκεκριμένα, ήδη από την κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.4\text{m}$  παρατηρούνται επιφάνειες ολίσθησης κάτω από τα δύο άκρα της κατασκευής, εντός των οποίων οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνουν όσο μεγαλώνει η μετατόπιση στο υπόβαθρο, δημιουργώντας μια πιο πολύπλοκη μορφή αστοχίας κάτω από την κατασκευή.



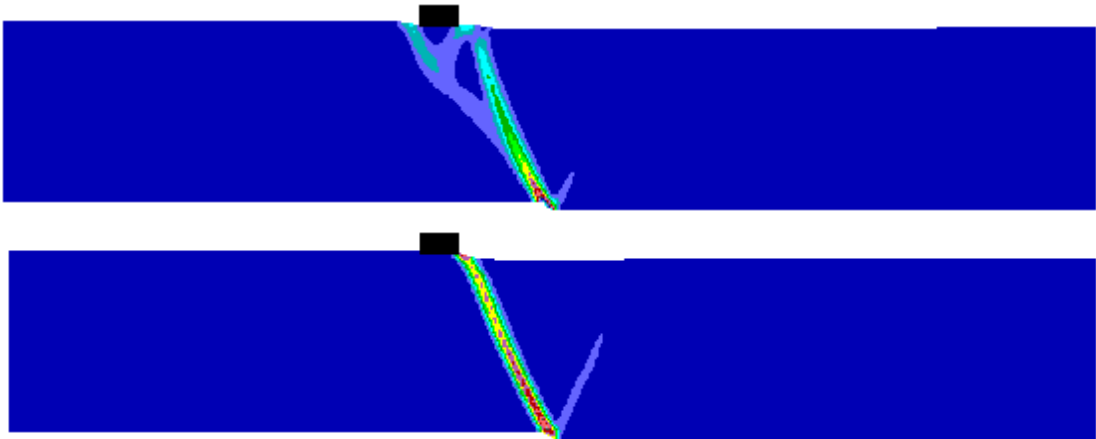
**Σχήμα 6.1** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



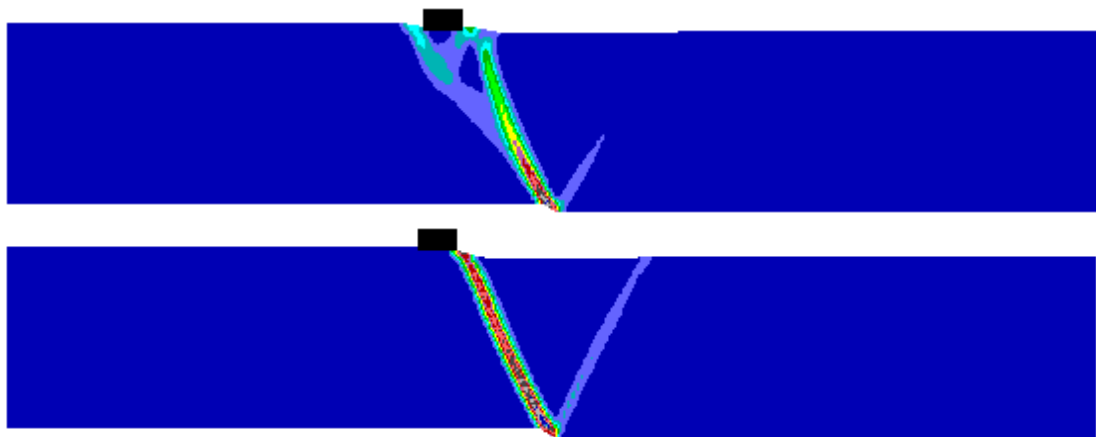
**Σχήμα 6.2** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



**Σχήμα 6.3** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



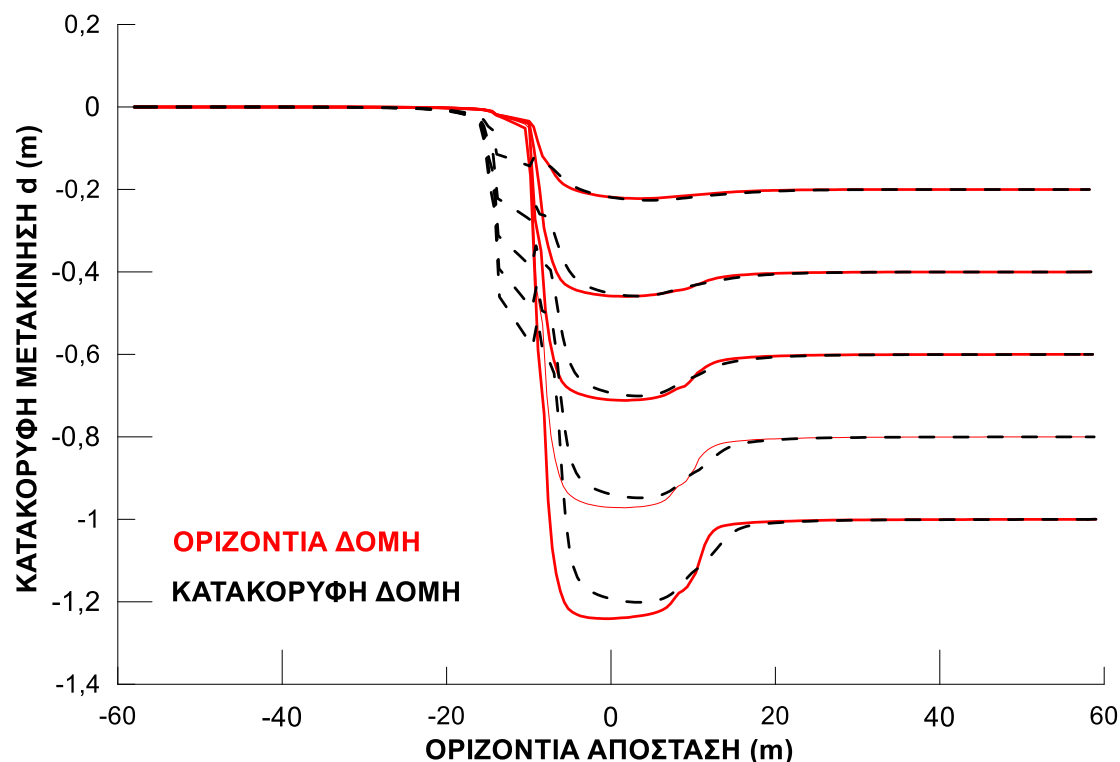
**Σχήμα 6.4** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



**Σχήμα 6.5** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



Στο παρακάτω **Σχήμα 6.6** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με «οριζόντια» δομή (κόκκινο) και με «κατακόρυφη» δομή (μαύρο) κόκκων για διάφορες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης του κανονικού ρήγματος. Όπως γίνεται αντιληπτό, η «κατακόρυφη δομή» οδηγεί σε δευτερεύουσες διαρρήξεις και στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ για την «οριζόντια δομή» των κόκκων, το κατακρήμνισμα είναι συγκριτικά πιο βαθύ, και ελαφρώς πιο ευρύ.



**Σχήμα 6.6** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή) και «κατακόρυφη δομή» (μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

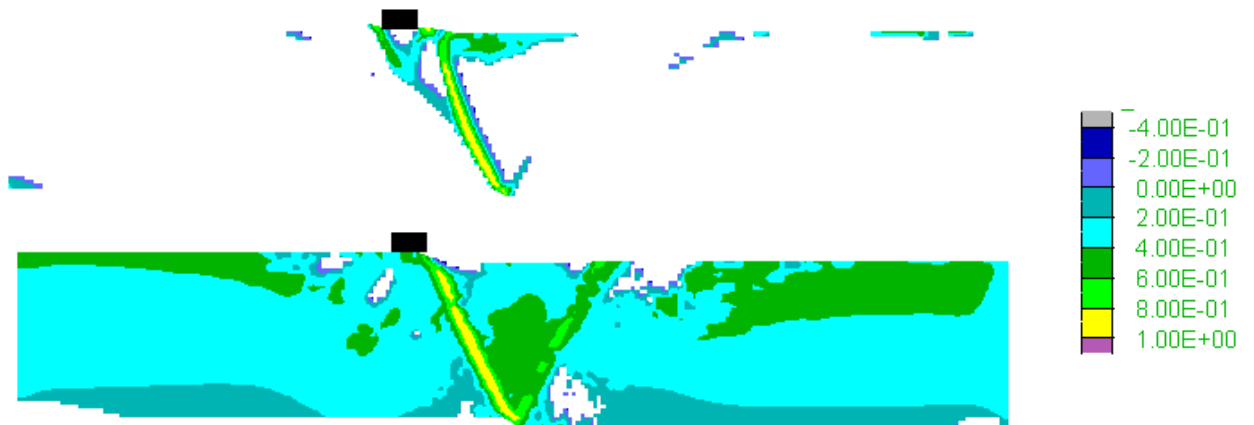
Παρακάτω, στο **Σχήμα 6.7** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη κανονικού ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=12\text{m}$  και για «κατακόρυφη» (άνω) και «οριζόντια» (κάτω) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 6.8, 6.9** και **6.10** 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 προσανατολισμών δομής κόκκων. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0$ ,  $F=N=1$ ). 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 κατά μήκος της κύριας διάρρηξης. Αντίστοιχα, για τις περιπτώσεις των δευτερευουσών διαρρήξεων, σε

καμιά από τις δύο περιπτώσεις προσανατολισμού δομής κόκκων δεν φτάνει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση, καθώς για την τελική κατακόρυφη μετατόπιση ( $d=1.0\text{m}$ ) οι δευτερεύουσες διαρρήξεις έχουν μόλις εμφανιστεί.

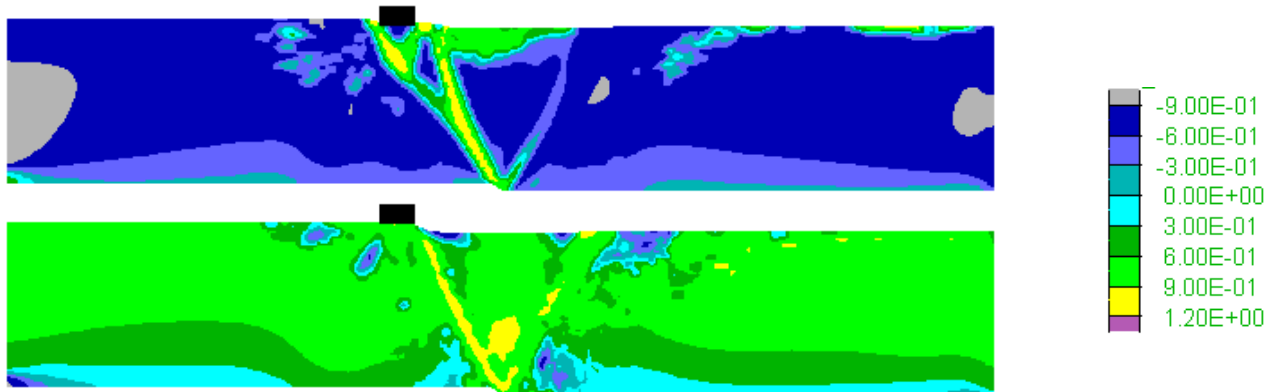
Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή κόκκων συνεπάγονται αρχικές τιμές  $A > 0$  και  $< 0$ , καθώς το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος χαρακτηρίζεται από μείωση της οριζόντιας τάσης. Αυτή η μείωση υπονοεί ότι η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγραμμική με τη διεύθυνση της «οριζόντιας» δομής κόκκων, οδηγώντας σε θετικές τιμές  $A$  (και το αντίθετο για την «κατακόρυφη» δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς «οριζόντια» δομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «εφελκυστικό» τασικό πεδίο ενός κανονικού ρήγματος. Όμως, η αρνητική τιμή του  $A$  για αρχικώς «κατακόρυφη» μικρο-δομή συνεπάγεται αλγεβρικά μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου  $\zeta$  απ' ό,τι για «οριζόντια» μικρο-δομή, δηλαδή πιο συστολική συμπεριφορά για «κατακόρυφη» μικρο-δομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για να αναδυθεί η διάρρηξη κανονικού ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης με «κατακόρυφη» δομή, και αυτό ισχύει ανεξαρτήτως της ύπαρξης ή μη κατασκευής στην εδαφική επιφάνεια.



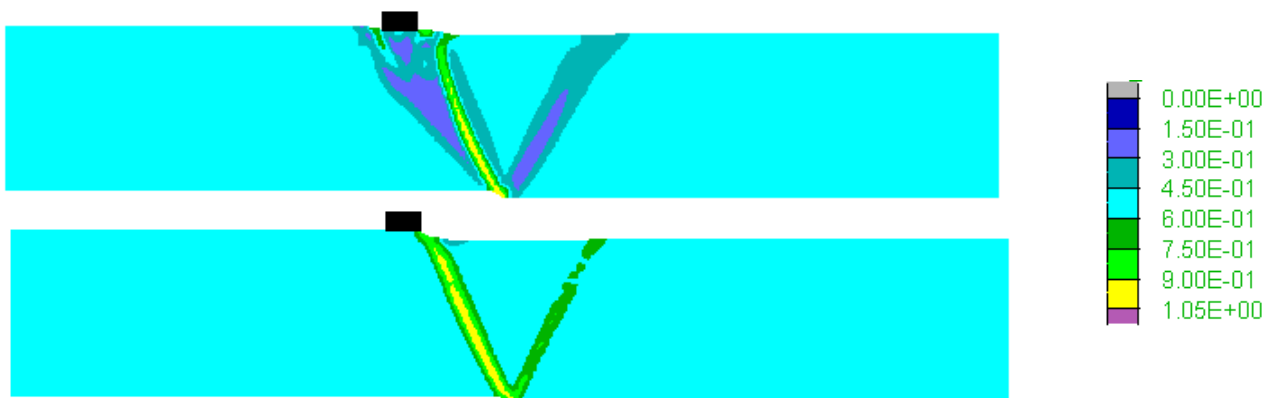
**Σχήμα 6.7** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d = 1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.8** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



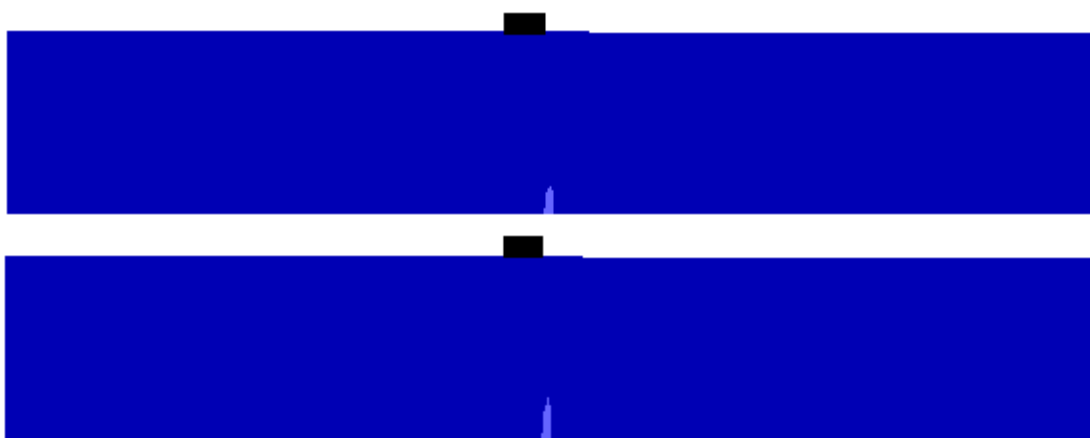
**Σχήμα 6.9** Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



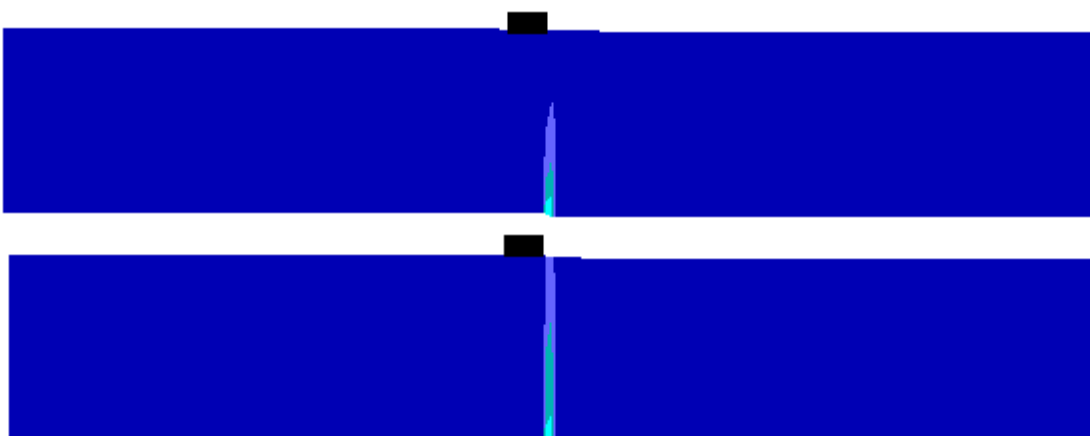
**Σχήμα 6.10** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$ , για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

### 6.3 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

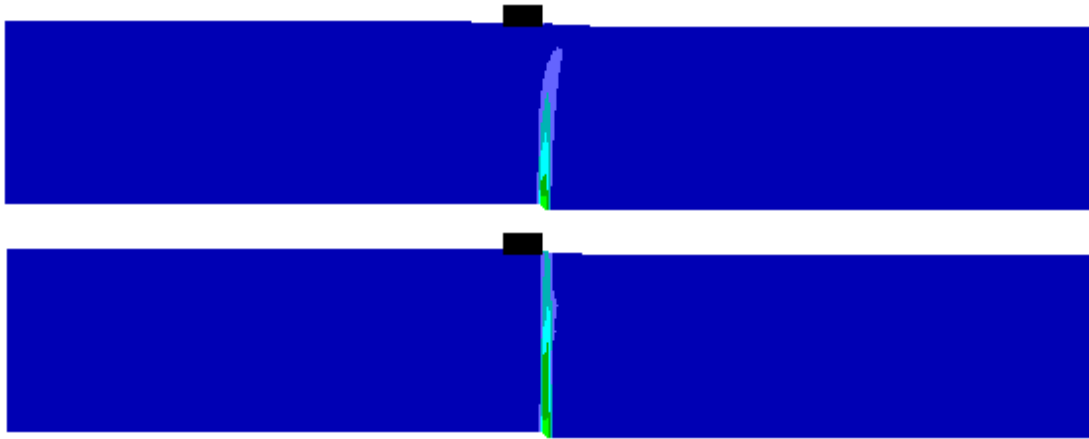
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για «κατακόρυφο» ρήγμα ( $85^\circ$ ) υπό την ύπαρξη κατασκευής (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στην επιφάνεια, στη θέση  $C=3\text{m}$ , για τους δύο αρχικούς προσανατολισμούς δομής των κόκκων. Όπως προκύπτει από τα **Σχήματα 6.11** έως **6.15** που παρουσιάζουν συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις, η αρχική δομή των κόκκων δεν επηρεάζει σημαντικά την πορεία διάρρηξης του ρήγματος. Συγκεκριμένα, η εικόνα της διάρρηξης είναι παρόμοια μέχρι κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.4\text{m}$ . Για μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις παρατηρείται ότι στην περίπτωση της «**κατακόρυφης**» δομής των κόκκων η διάρρηξη εκτρέπεται ελάχιστα δεξιά από την κατασκευή, ενώ ταυτόχρονα δεν παρατηρείται δευτερεύουσα διάρρηξη. Και στις δύο περιπτώσεις όμως, η διάρρηξη φτάνει στην επιφάνεια στην δεξιά πλευρά της κατασκευής.



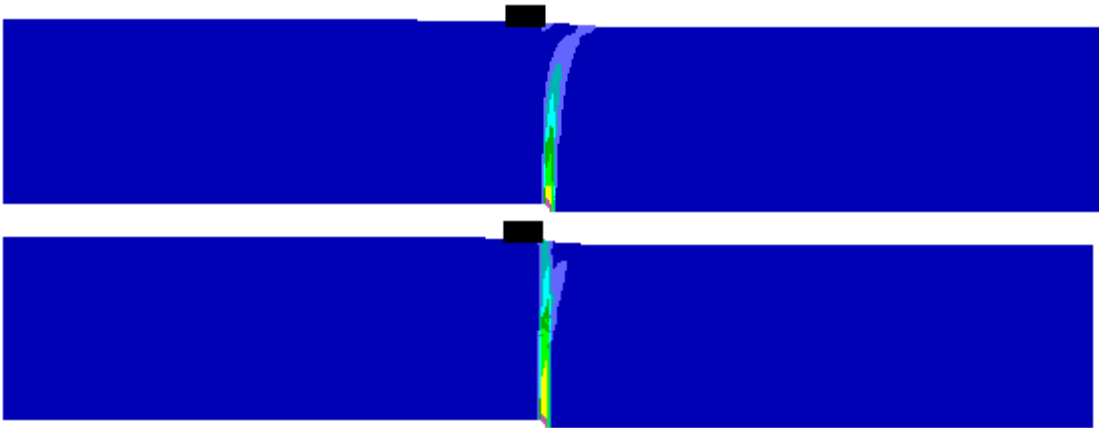
**Σχήμα 6.11** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



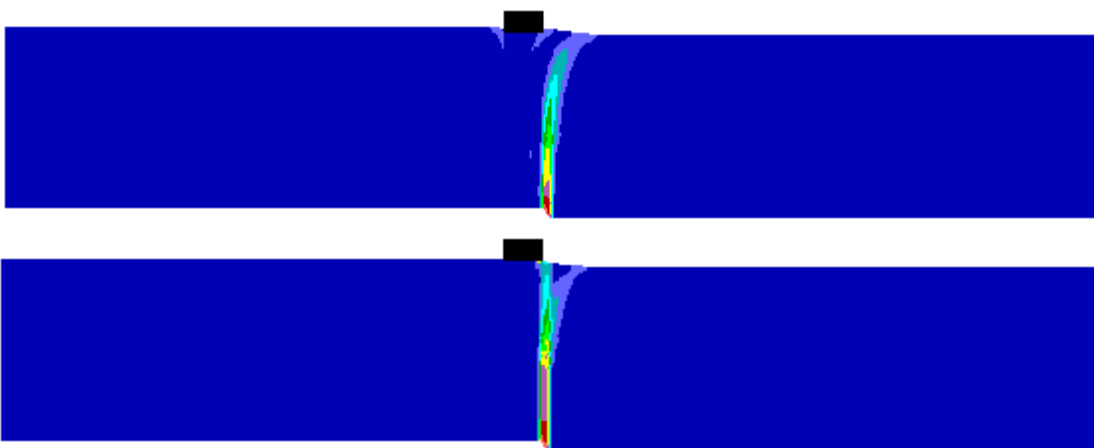
**Σχήμα 6.12** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



Σχήμα 6.13 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6m$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4m$ ) στη θέση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος.

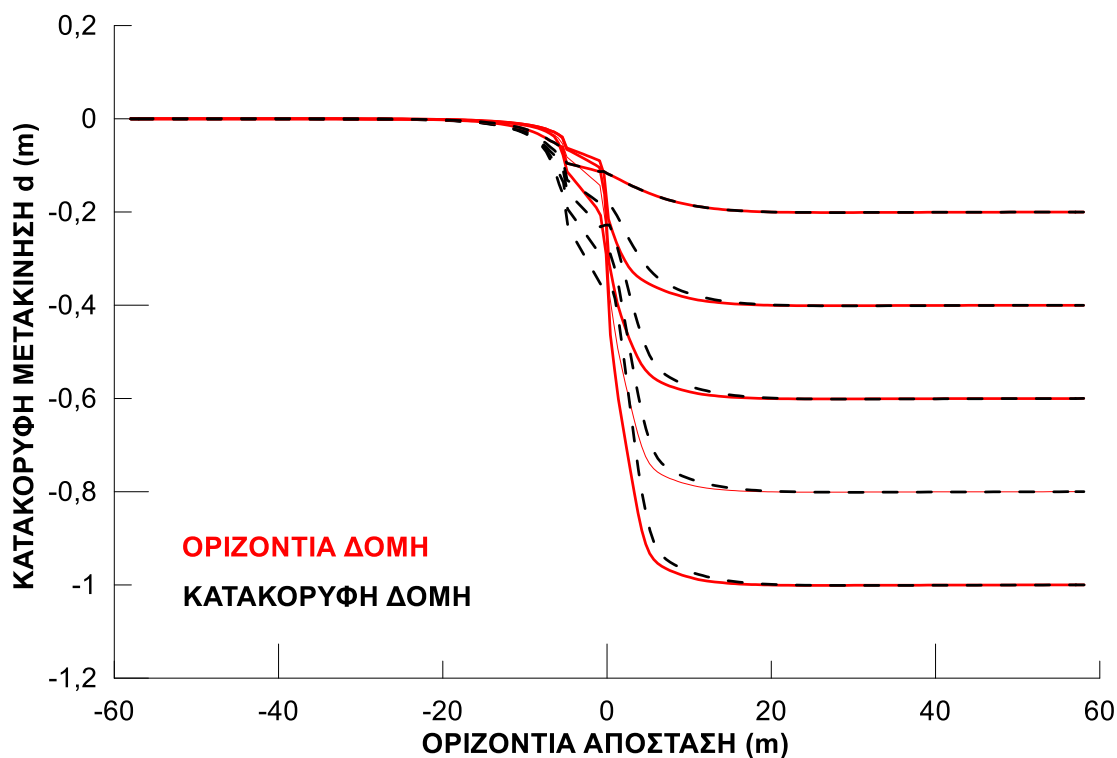


Σχήμα 6.14 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8m$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4m$ ) στη θέση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος.



Σχήμα 6.15 Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0m$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4m$ ) στη θέση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος.

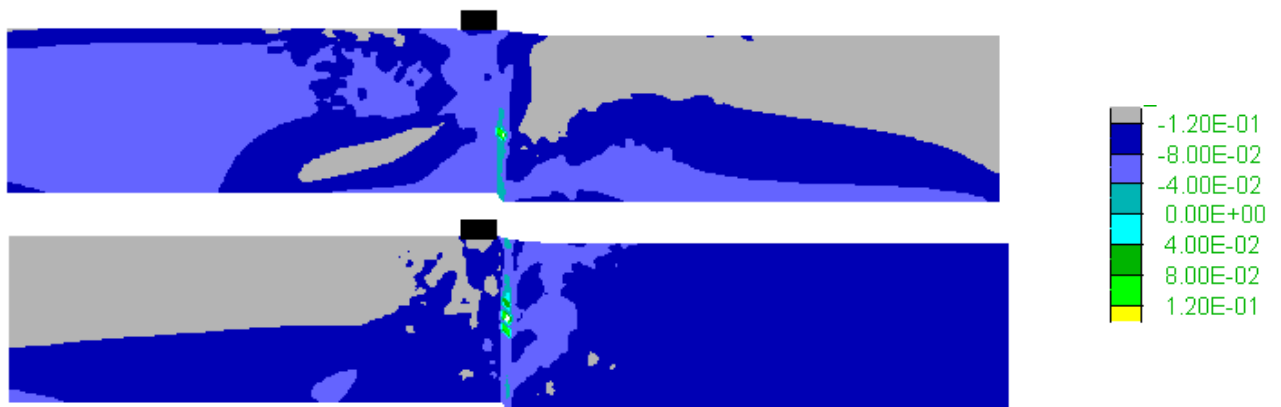
Στο παρακάτω **Σχήμα 6.16** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με «οριζόντια» δομή (**κόκκινο**) και με «κατακόρυφη» δομή (**μαύρο**) κόκκων για διάφορες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης του «κατακόρυφου» ρήγματος. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της «οριζόντιας» δομής η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια με πιο απότομη κλίση, σε αντίθεση με την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής. Από εκεί και πέρα, οι διαφορές στην παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια εντοπίζονται μόνο στη στενή γειτονιά της κατασκευής.



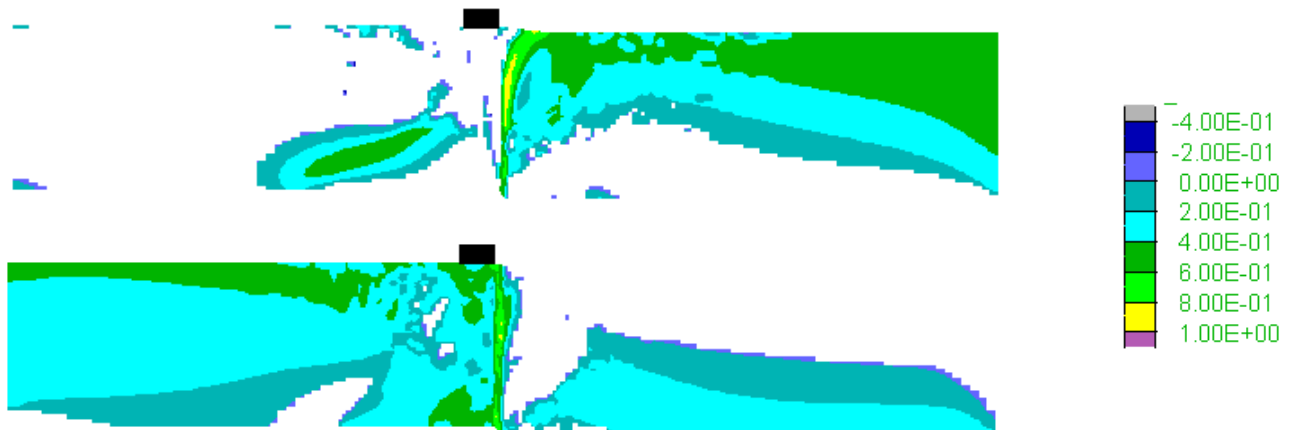
**Σχήμα 6.16** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή), β) «κατακόρυφη δομή» (μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.17** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  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 «κατακόρυφη» (άνω) και «οριζόντια» (κάτω) δομή κόκκων. Επίσης, στα **Σχήματα 6.18, 6.19** και **6.20** 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 την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0, F=N=1$ ). Παρατηρείται ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναδυθεί και στις δύο περιπτώσεις προσανατολισμού δομής κόκκων, σε καμιά από τις δύο δεν φτάνει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος της διάρρηξης. Συγκεκριμένα, στην κατακόρυφη δομή κόκκων, σε ένα πολύ μικρό μήκος εντός της ζώνης διάτμησης φτάνει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση.

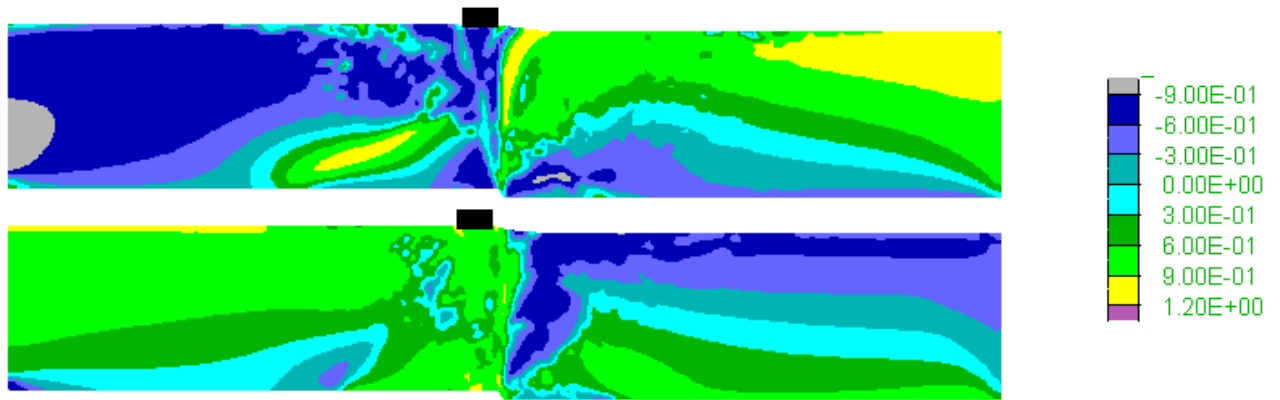
Γενικώς, οι διαφορές λόγω μικρο-δομής είναι μικρές καθώς και η φόρτιση διεύθυνσης απλής διάτμησης (στο κατακόρυφο επίπεδο) οδηγεί σε ίδιες τιμές της παραμέτρου  $A$  (περί το μηδέν) για αρχικώς «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή. Με άλλα λόγια, ίδιες αρχικές τιμές της  $A$  υπονοούν ίδια μακροσκοπική απόκριση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει μόνο η περίπου κατοπτρική διαφορά στις τιμές των παραμέτρων δομής  $A$  και  $N$  για τους δύο προσανατολισμούς δομής, δηλαδή ό,τι συμβαίνει σε αυτές τις παραμέτρους δομής στο κινούμενο (δεξί) τέμαχος στην «κατακόρυφη» δομή παρουσιάζεται στο σταθερό (αριστερό) τέμαχος στην «οριζόντια» δομή, και το αντίστροφο. Από εκεί και πέρα, το μέτρο του τανυστή δομής  $F$  διαφοροποιείται μόνο κατά μήκος των διαρρήξεων, και προς μεγάλες τιμές που αντιστοιχούν στην Κρίσιμη Κατάσταση.



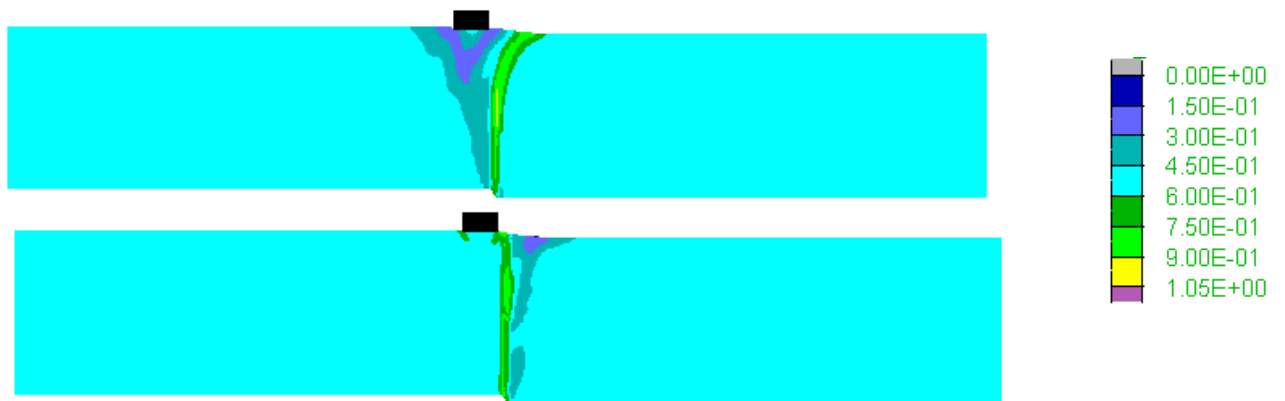
**Σχήμα 6.17** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.18** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.19** Παράμετρος  $N$  σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

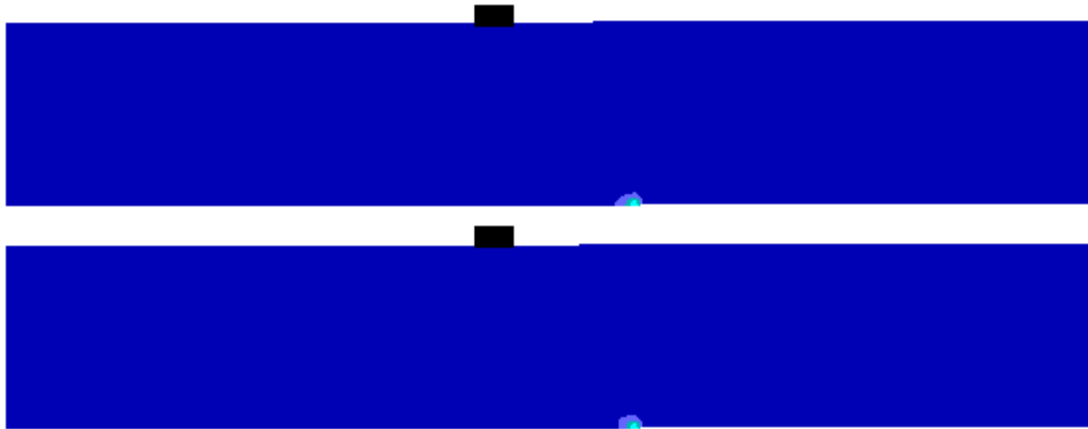


**Σχήμα 6.20** Μέτρο τανυστή δομής  $F$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$ , για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

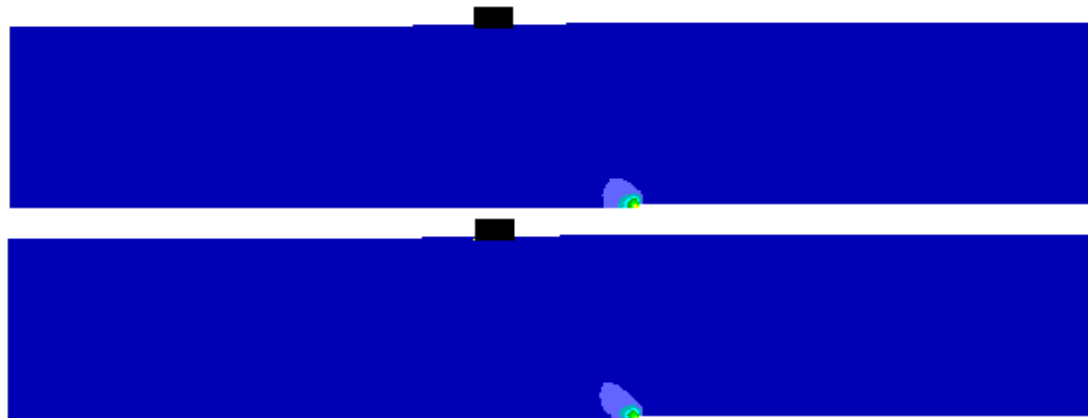
#### 6.4 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Εδώ παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για ανάστροφο ρήγμα ( $135^\circ$ ) υπό την ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για τους δύο προσανατολισμούς δομής των κόκκων. Όπως είναι φανερό από τα **Σχήματα 6.21** έως **6.25** που παρουσιάζουν συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις, η δομή των κόκκων επηρεάζει σημαντικά τη διάρρηξη του ρήγματος, μόνο για σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις ( $d=0.6-1.0\text{m}$ ). Στην περίπτωση της «κατακόρυφης δομής», η διάρρηξη αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, χωρίς δημιουργία δευτερεύουσας διάρρηξης. Αντίθετα, για την «οριζόντια δομή» πέραν της κύριας διάρρηξης προς την αριστερή πλευρά, διαφαίνεται και δημιουργία αβαθών δευτερευουσών διαρρήξεων προς τη δεξιά πλευρά της κατασκευής. Επιπλέον, αντίθετα απ' ό τι συμβαίνει για «κατακόρυφη» δομή, για «οριζόντια» δομή δεν έχει υπάρξει πλήρης ανάδυση της διάρρηξης για  $d=1\text{m}$ , κάτι αναμενόμενο για τις συνήθεις περιπτώσεις ρηγμάτων (π.χ. Loukidis et al. 2009).

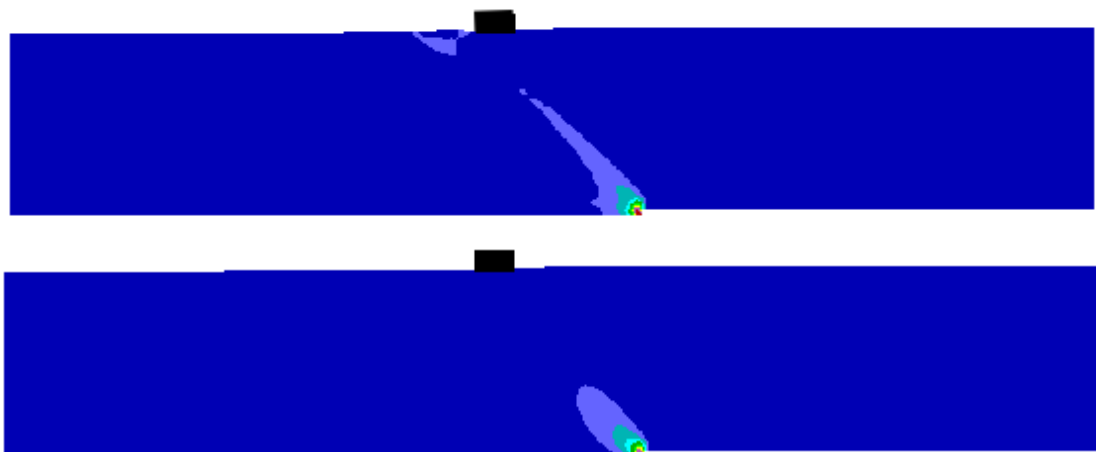




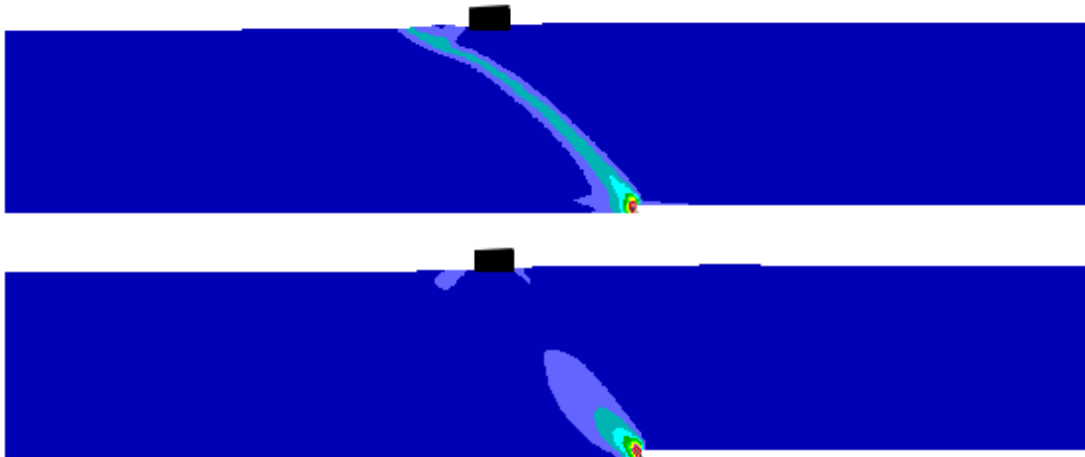
**Σχήμα 6.21** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



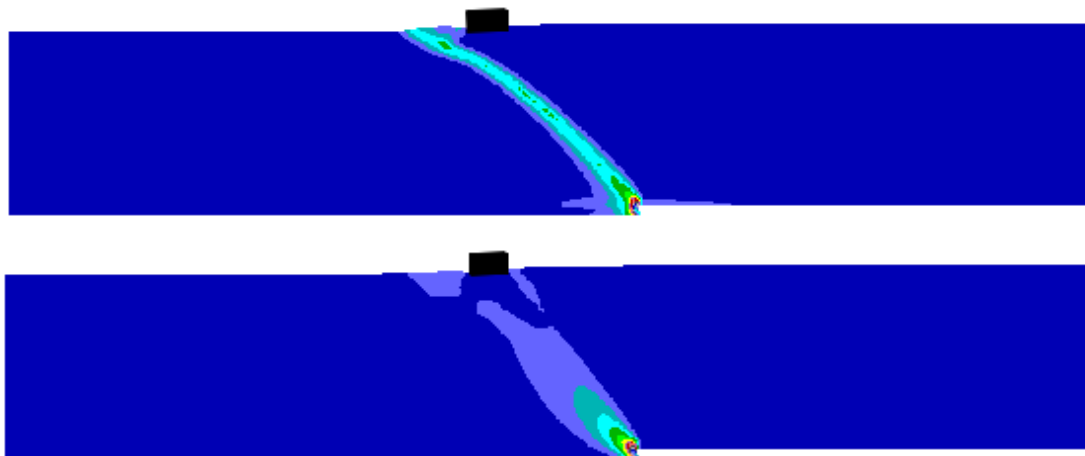
**Σχήμα 6.22** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



**Σχήμα 6.23** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.

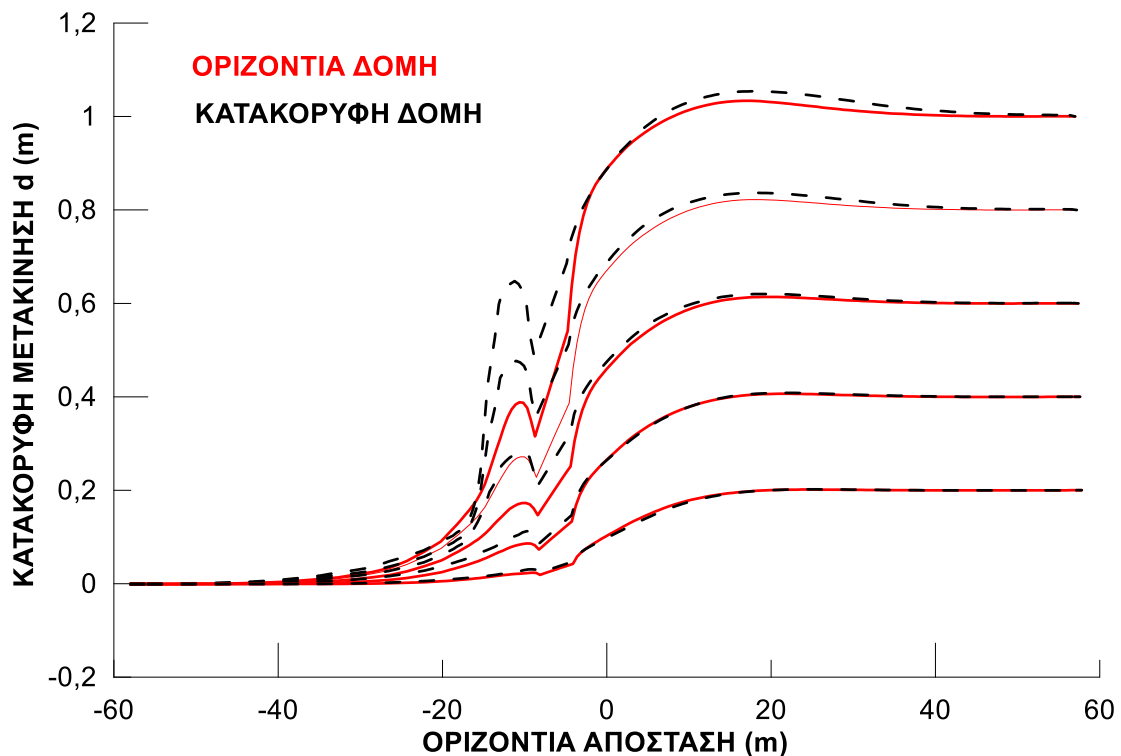


**Σχήμα 6.24** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.



**Σχήμα 6.25** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** (πάνω) και **οριζόντια δομή** (κάτω) κόκκων, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=1.0\text{m}$  όταν υπάρχει κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος.

Στο παρακάτω **Σχήμα 6.26** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με «οριζόντια» δομή (**κόκκινο**) και με «κατακόρυφη» δομή (**μαύρο**) κόκκων για διάφορες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης του ανάστροφου ρήγματος. Από το σχήμα αυτό προκύπτει σαφώς πιο έντονη παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους για την «κατακόρυφη» δομή, ειδικά στα αριστερά της κατασκευής όπου και έχει αναδυθεί πλήρως η διάρρηξη (για  $d>0.8\text{m}$ ).

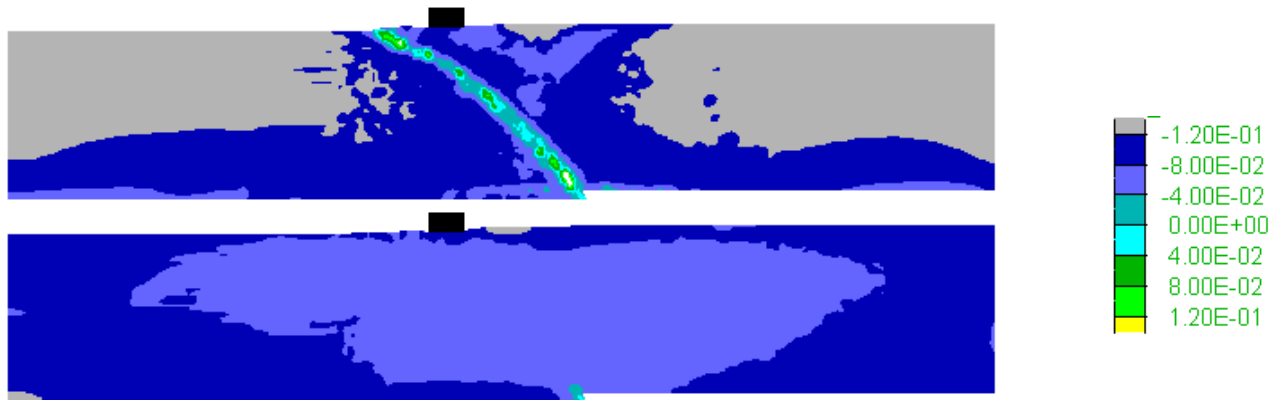


**Σχήμα 6.26** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής (πλάτους  $B=4\text{m}$  σε απόσταση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος και για α) «οριζόντια δομή» (κόκκινη γραμμή), β) «κατακόρυφη δομή» (μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

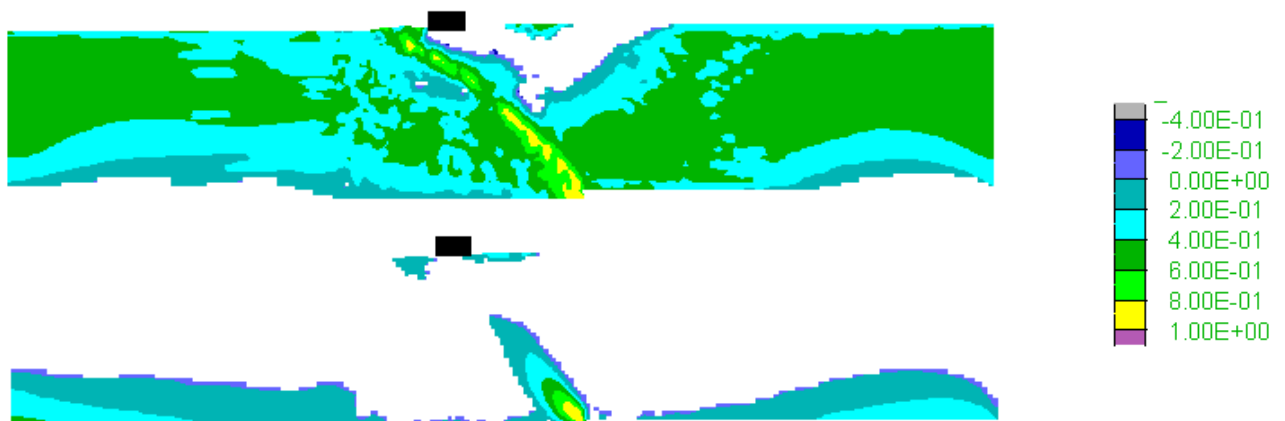
Παρακάτω, στο **Σχήμα 6.27** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=16\text{m}$  και για «κατακόρυφη» (άνω) και «οριζόντια» (κάτω) δομή κόκκων. Επιπλέον, στα **Σχήματα 6.28, 6.29** και **6.30** 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 την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3), επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0$ ,  $F=N=1$ ). Παρατηρείται ότι η άμμος έχει σχεδόν φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση στην περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής κόκκων κατά μήκος της διάρρηξης, σε αντίθεση με την «οριζόντια» δομή για την οποία η άμμος έχει φτάσει στην Κρίσιμη Κατάσταση μόνο σε μεγάλα βάθη.

Αυτές οι διαφορές λόγω μικρο-δομής οφείλονται στο γεγονός ότι αρχικώς «οριζόντια» και «κατακόρυφη» μικρο-δομή συνεπάγονται αρχικές τιμές  $A < 0$  και  $> 0$ , καθώς το «θλιπτικό» τασικό πεδίο σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος χαρακτηρίζεται από αύξηση της οριζόντιας τάσης, δηλαδή η διεύθυνση της φόρτισης είναι συγγραμμική με τη διεύθυνση της «κατακόρυφης» δομής δίνοντας θετικές τιμές  $A$  (και το αντίθετο για την «οριζόντια» δομή). Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχικώς «κατακόρυφη» μικροδομή είναι πιο κοντά στην Κρίσιμη Κατάσταση για το «θλιπτικό» τασικό πεδίο ενός ανάστροφου ρήγματος. Επιπλέον, η αρνητική τιμή του  $A$  για «οριζόντια» μικροδομή

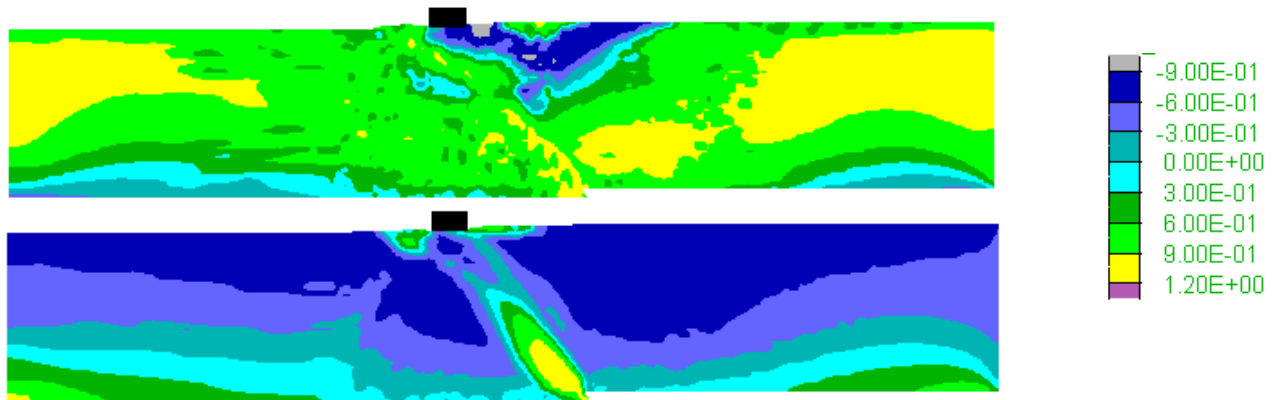
συνεπάγεται αλγεβρικά μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου  $\zeta$ , συγκριτικά με την τιμή της για «κατακόρυφη» μικροδομή. Αυτό σημαίνει πιο συστολική συμπεριφορά για «οριζόντια» μικροδομή, γεγονός που μακροσκοπικά αποδίδεται σαν η εν λόγω άμμος να είναι σχετικώς πιο χαλαρή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, και να χρειάζεται μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση για να αναδυθεί η διάρρηξη.



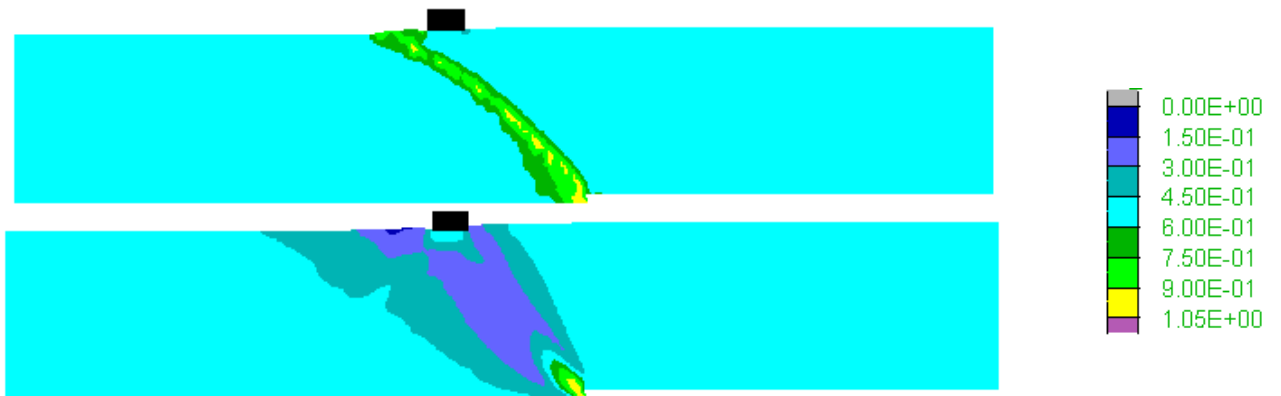
**Σχήμα 6.27** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.28** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.29** Παράμετρος  $N$  σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.30** Μέτρο ταχυστή δομής  $F$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή (άνω) και **οριζόντια** δομή (κάτω) κόκκων, με κατασκευή (πλάτους  $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$ , για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ .

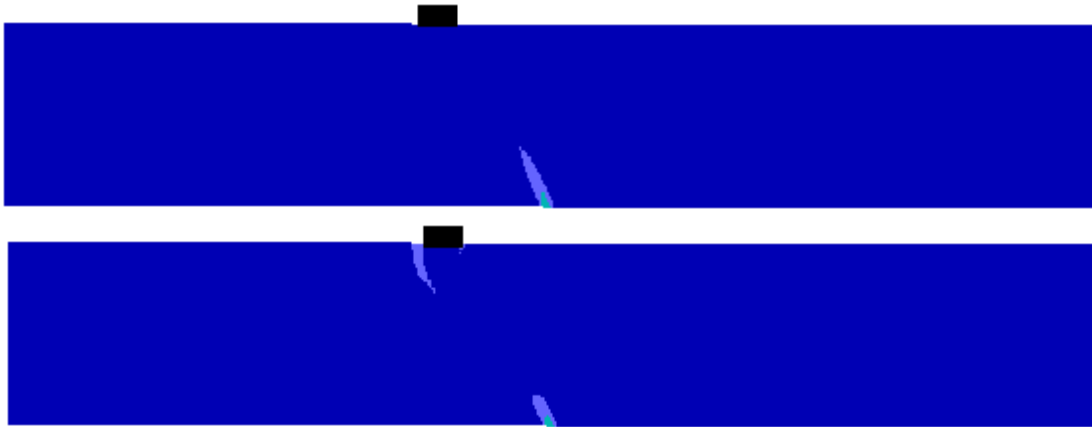
## 6.5 Επίδραση φορτίου κατασκευής

Το φορτίο της κατασκευής παρουσίασε έντονη επιρροή στην πορεία ανάδυσσης της διάρρηξης των ρηγμάτων, όπως αναφέρθηκε και στα δύο προηγούμενα Κεφάλαια. Στο τέλος του Κεφαλαίου 5 αναλύθηκε η επίδραση της αύξησης του φορτίου της κατασκευής στη διάρρηξη των ρηγμάτων για «οριζόντια δομή» κόκκων. Στην παρούσα παράγραφο, θα αναλυθεί η επίδραση αύξησης του φορτίου στην διάρρηξη των τριών ρηγμάτων αλλά για «κατακόρυφη δομή» των κόκκων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τους τρεις τύπους ρηγμάτων και συγκρίνονται τα δύο είδη φορτίων για την ίδια («κατακόρυφη») δομή κόκκων.

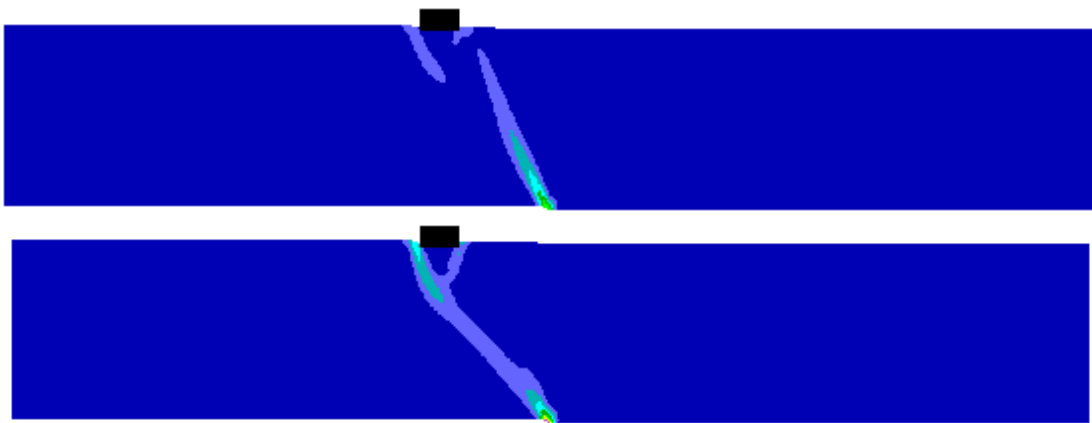
### 6.5.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Στα **Σχήματα 6.31 έως 6.35** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για αμμώδη στρώση με «κατακόρυφη» δομή με κατασκευή στη θέση  $C=12\text{m}$  και φορτίου  $q = 90\text{kPa}$  και  $180\text{kPa}$ , υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση  $d = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Προκύπτει ότι οι διαφορές λόγω μεγέθους φορτίου εμφανίζονται από τα πρώτα κιόλας στάδια της

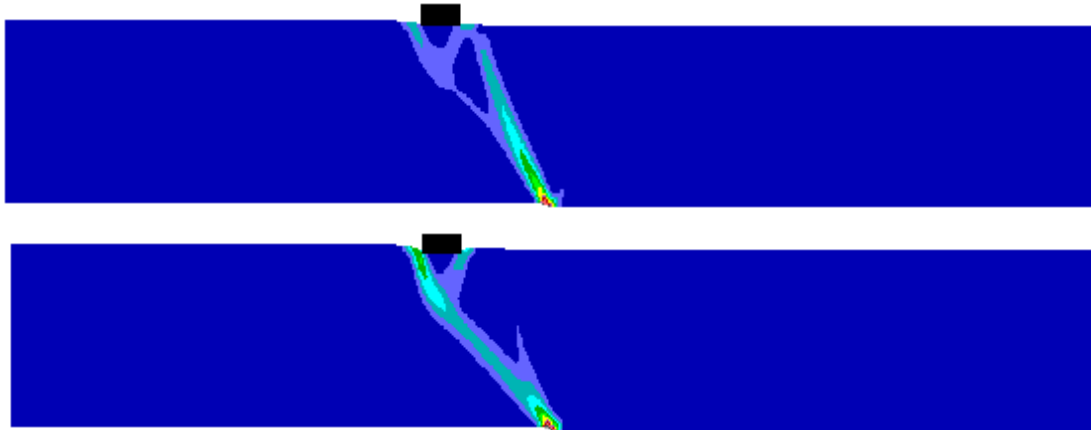
κατακόρυφης μετακίνησης. Για το μικρό φορτίο ( $q=90\text{kPa}$ ), η διάρρηξη αναδύεται στην επιφάνεια στο δεξί άκρο της κατασκευής ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις, με πιο έντονη εκείνη κάτω από το αριστερό άκρο της κατασκευής. Ο διπλασιασμός του φορτίου ( $q=180\text{kPa}$ ) εκτρέπει την διάρρηξη στο αριστερό άκρο της κατασκευής και οδηγεί στην δημιουργία έντονης δευτερεύουσας διάρρηξης κάτω από το δεξί άκρο της κατασκευής. Στην τελική κατακόρυφη μετακίνηση ( $d=1.0\text{m}$ ) παρατηρείται ότι η αύξηση του φορτίου προκαλεί εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις κάτω από την κατασκευή, σε σχέση με το μικρό φορτίο.



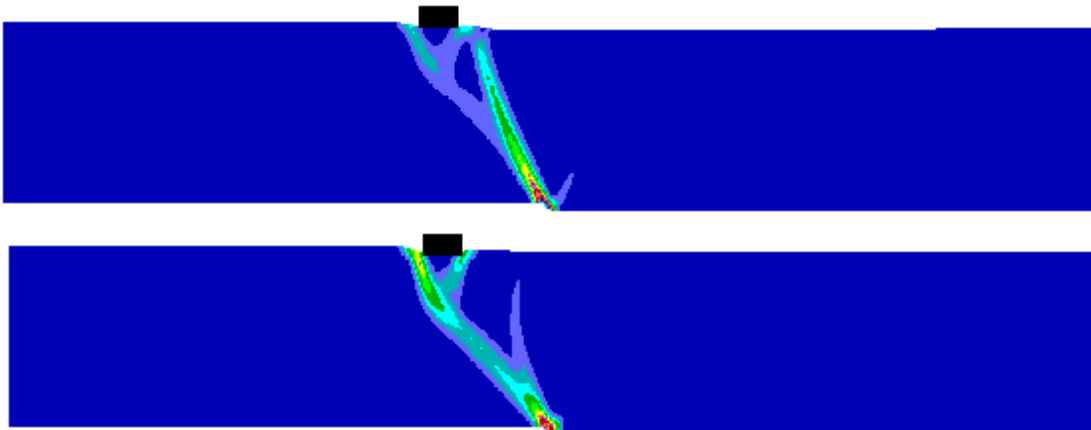
**Σχήμα 6.31** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



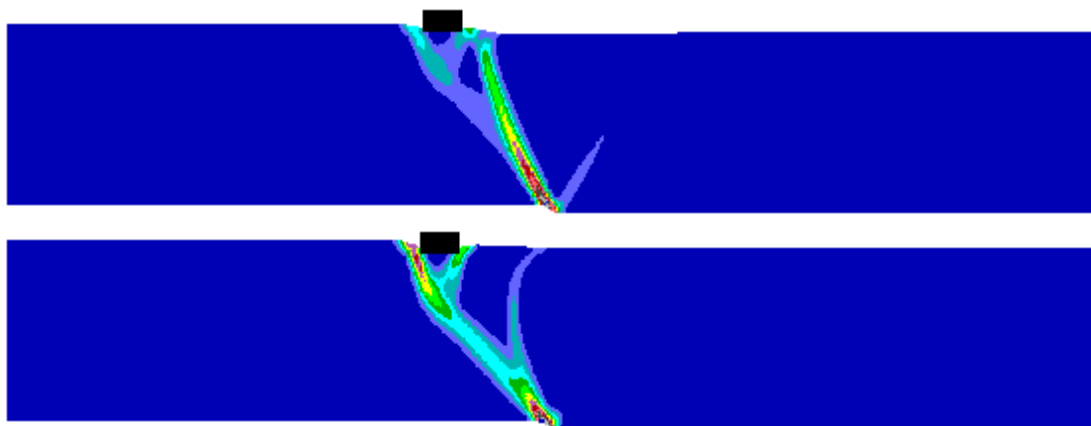
**Σχήμα 6.32** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=12\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



**Σχήμα 6.33** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.6m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

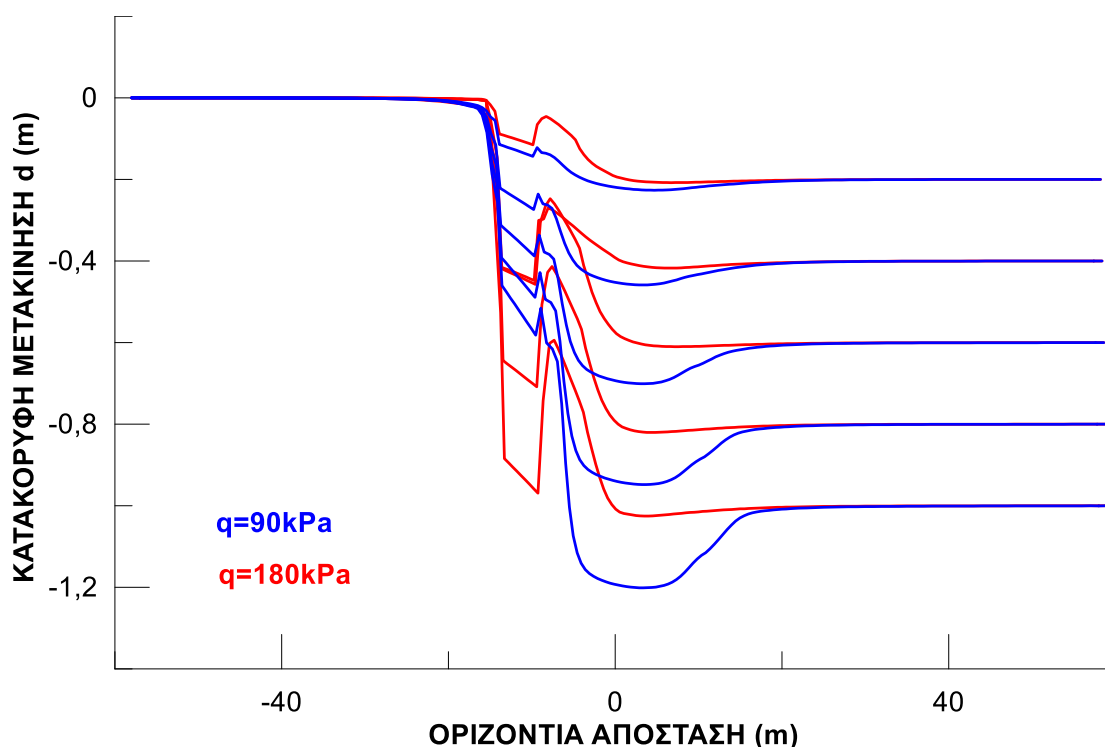


**Σχήμα 6.34** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=0.8m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



**Σχήμα 6.35** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  με  $d=1.0m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=12m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

Στο παρακάτω **Σχήμα 6.36** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με μικρό φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (**μπλε**) και με μεγάλο φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (**κόκκινο**) κατασκευής για «κατακόρυφη δομή» κόκκων. Οι έντονες αλλαγές που επιφέρει η αύξηση του φορτίου της κατασκευής φαίνονται και στην παραμορφωμένη εδαφική επιφάνεια. Στην περίπτωση του μικρού φορτίου παρατηρείται η δημιουργία ενός κατακρημνίσματος για μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις, ενώ για το μεγάλο φορτίο το κατακρημνισμα δεν είναι έντονο, αντίθετα με την καθίζηση της κατασκευής που είναι σαφώς μεγαλύτερη.



**Σχήμα 6.36** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=12\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για **κατακόρυφη δομή** και για φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (μπλε γραμμή) και φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (κόκκινη γραμμή).

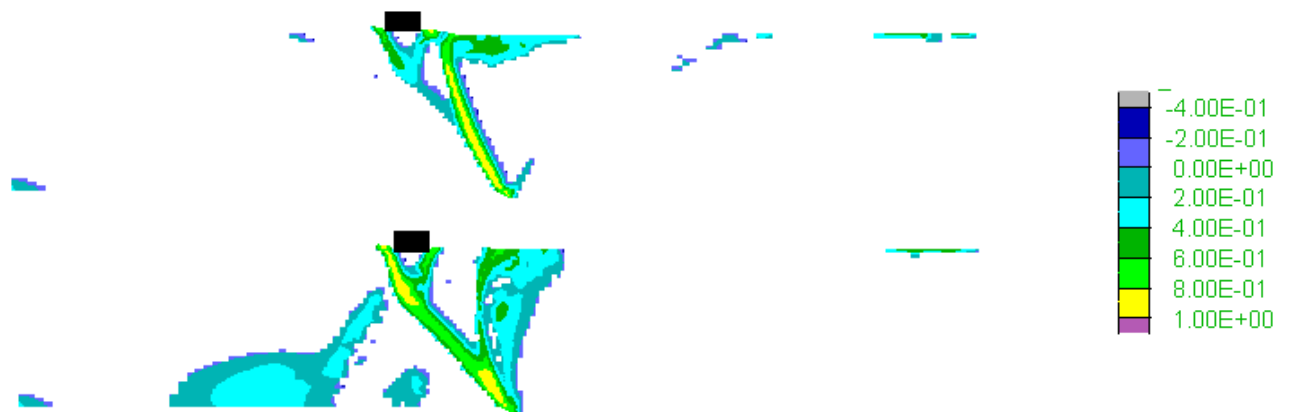
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.37** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη κανονικού ρήγματος με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$  μέσω αμμόδους στρώσης με «κατακόρυφη» δομή κόκκων, με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=12\text{m}$  και να φέρει φορτίο  $q = 90\text{ kPa}$  (άνω) και  $q = 180\text{kPa}$  (κάτω). Επιπλέον, στα **Σχήματα 6.38, 6.39** και **6.40** 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, προσανατολισμού δομής κόκκων και τα δύο φορτία κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta = 0, F=N=1$ ). Παρατηρείται ότι παρότι η διάρρηξη έχει αναπτυχθεί πλήρως και στις δύο περιπτώσεις φορτίων κατασκευής, μόνο στην περίπτωση του μικρού φορτίου ( $q=90\text{kPa}$ ) η άμμος



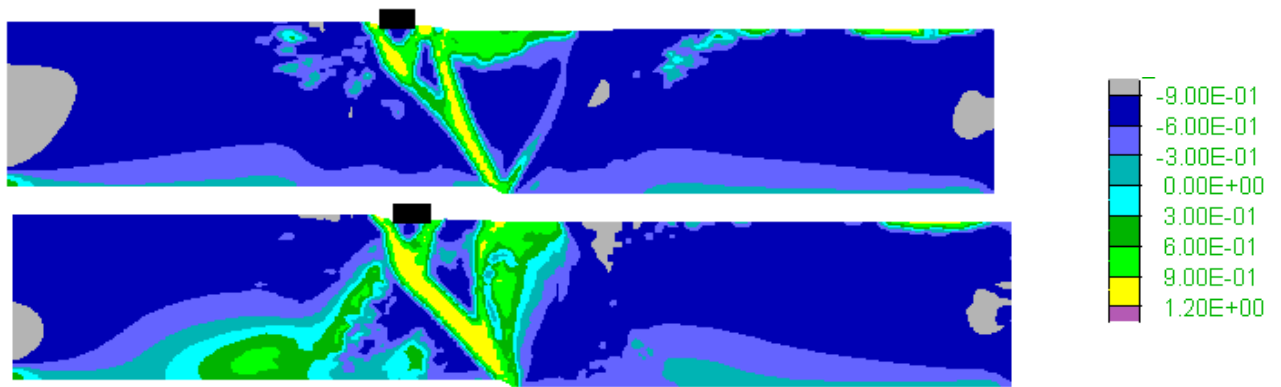
έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση σχεδόν σε όλο το μήκος της διατμητικής ζώνης. Στην περίπτωση του μεγαλύτερου φορτίου ( $q=180\text{kPa}$ ) η άμμος φαίνεται να έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση μόνο επιφανειακά κάτω από την κατασκευή και σε μεγάλο βάθος πλησίον του υποβάθρου.



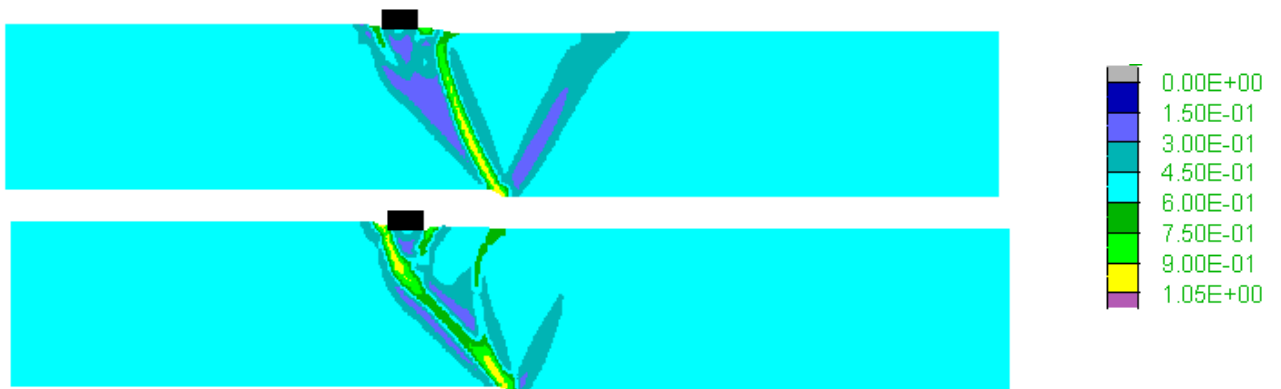
**Σχήμα 6.37** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση **C=12m** με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



**Σχήμα 6.38** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση **C=12m** με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



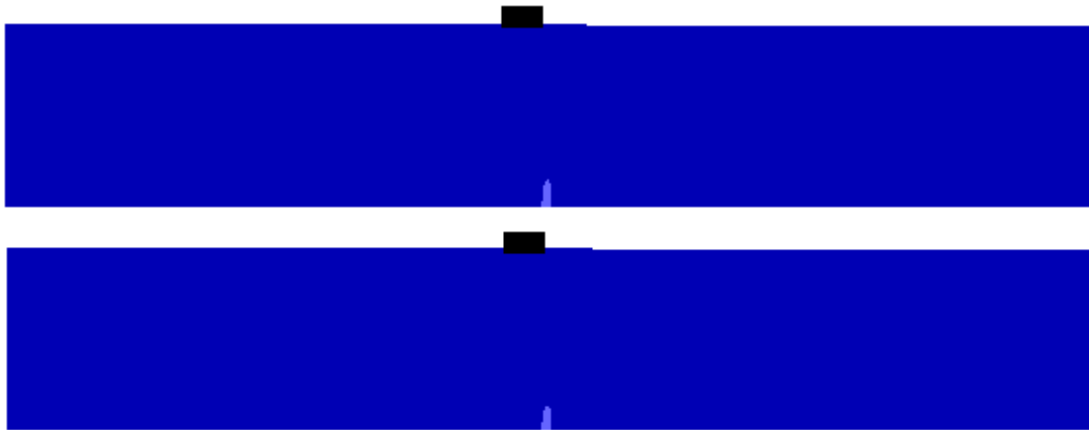
**Σχήμα 6.39** Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-κόκκων σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



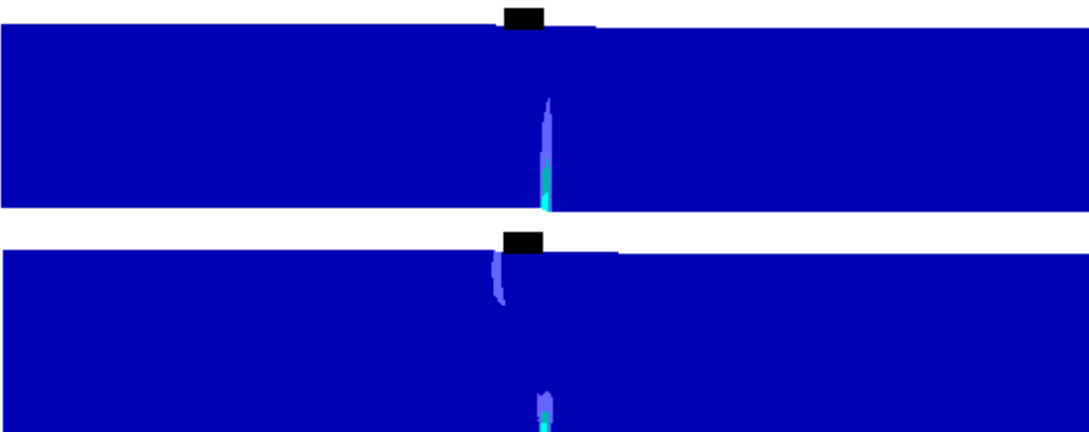
**Σχήμα 6.40** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη κανονικού ρήγματος ( $\beta=45^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=12\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)

### 6.5.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

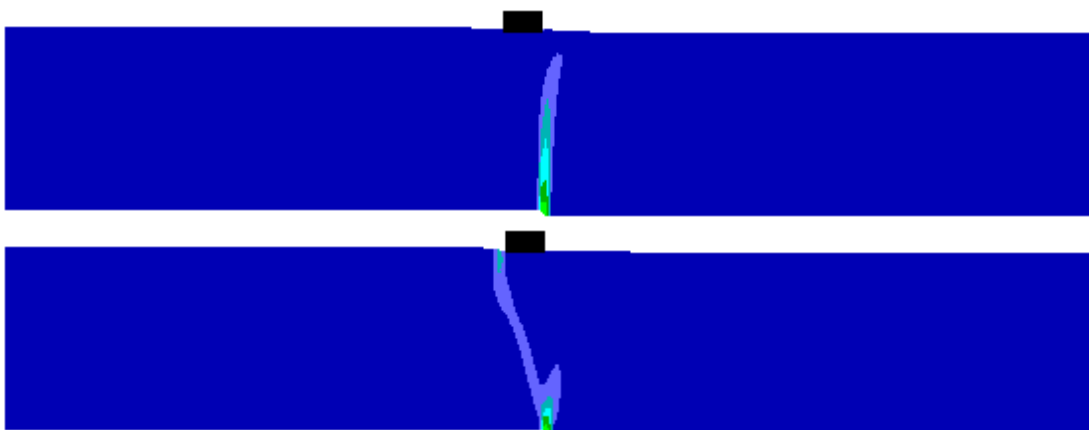
Στα **Σχήματα 6.41 έως 6.45** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για αμμώδη στρώση με «κατακόρυφη» δομή με κατασκευή στη θέση  $C=3\text{m}$  και φορτίου  $q=90\text{kPa}$  και  $180\text{kPa}$ , υπό διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με μετατόπιση  $d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Προκύπτει ότι η αύξηση του φορτίου της κατασκευής προκαλεί αλλαγές στη διάρρηξη του «κατακόρυφου» ρήγματος. Πιο αναλυτικά, για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.4\text{m}$  το μεγαλύτερο φορτίο δημιουργεί προδιάτμηση στο αριστερό άκρο της κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάρρηξη να αναδυθεί στην επιφάνεια στο σημείο που υπάρχει προδιάτμηση. Επομένως, στην περίπτωση του μεγαλύτερου φορτίου, η διάρρηξη εκτρέπεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής και ταυτόχρονα αναπτύσσεται βαθιά δευτερεύουσα διάρρηξη προς το κινούμενο τέμαχος. Αντίθετα, για  $q=90\text{kPa}$  υπάρχει μόνο κύρια διάρρηξη προς τη δεξιά πλευρά της κατασκευής.



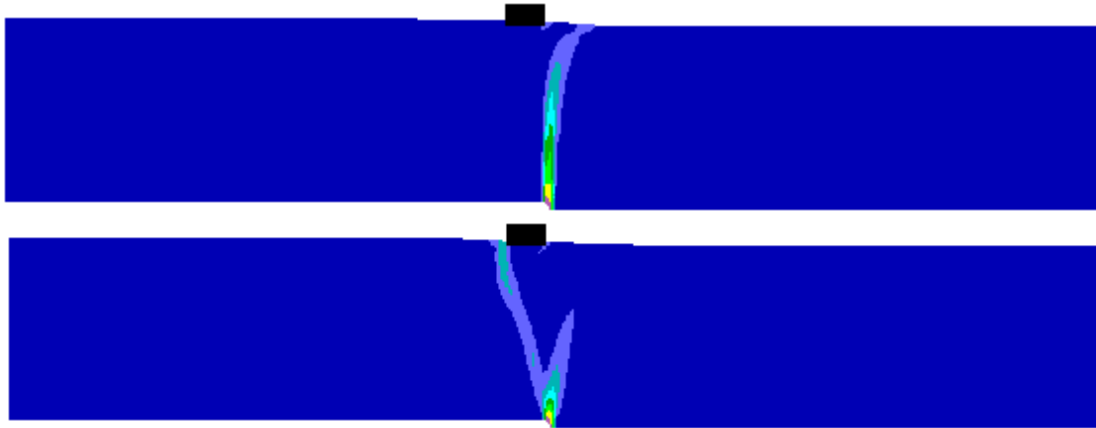
**Σχήμα 6.41** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.2m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=3m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



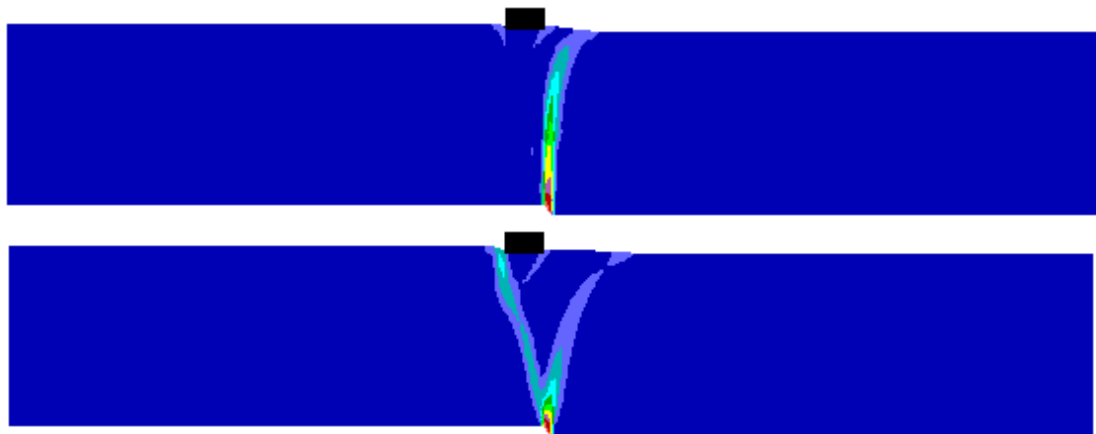
**Σχήμα 6.42** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.4m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=3m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



**Σχήμα 6.43** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.6m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=3m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

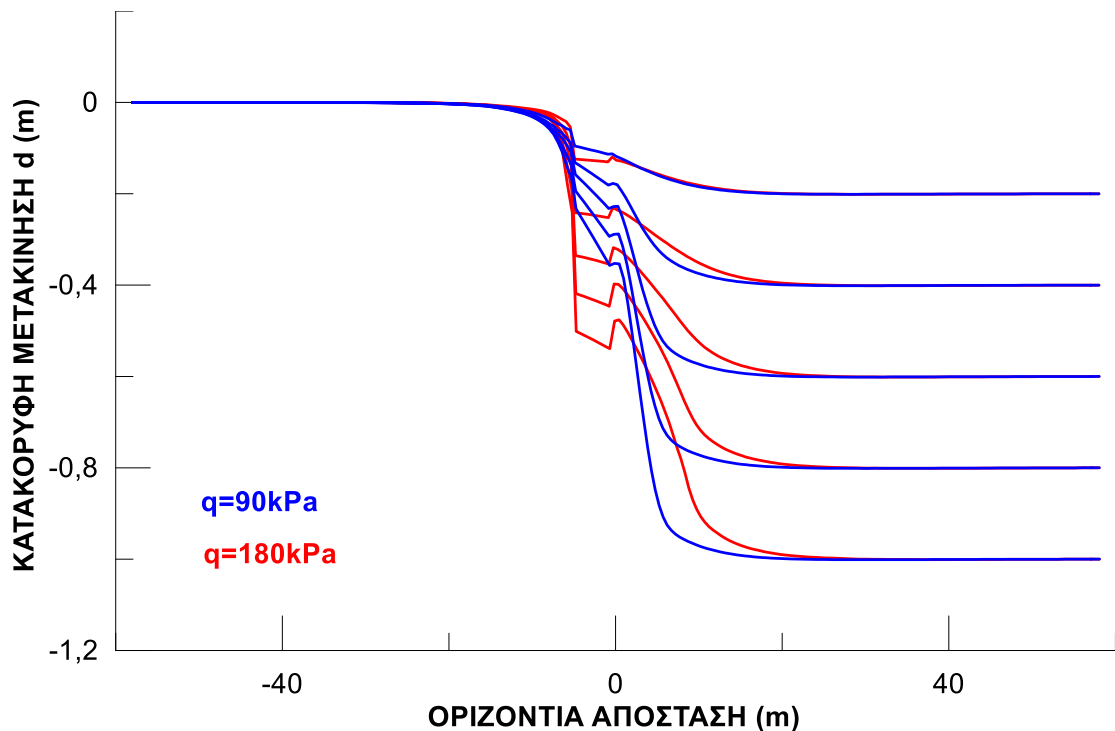


**Σχήμα 6.44** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=0.8m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=3m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).



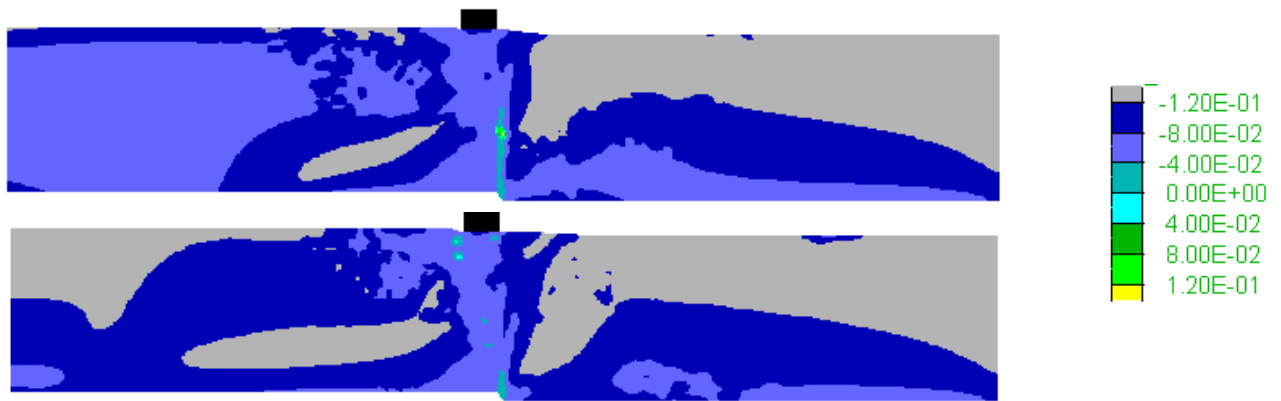
**Σχήμα 6.45** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή** κόκκων, για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  με  $d=1.0m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=3m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

Στο παρακάτω **Σχήμα 6.46** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια τη στρώσης με αρχικό φορτίο  $q=90kPa$  (**μπλε**) και με διπλάσιο φορτίο  $q=180kPa$  (**κόκκινο**) κατασκευής για «κατακόρυφη δομή» κόκκων, υπό διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος. Όπως παρατηρείται, η αύξηση του φορτίου μεγαλώνει τις καθιζήσεις και μειώνει τις στροφές της κατασκευής, ενώ συνολικά επηρεάζει μεγαλύτερο εύρος του εδάφους προς το κινούμενο τέμαχος λόγω της βαθιάς δευτερεύουσας διάρρηξης.

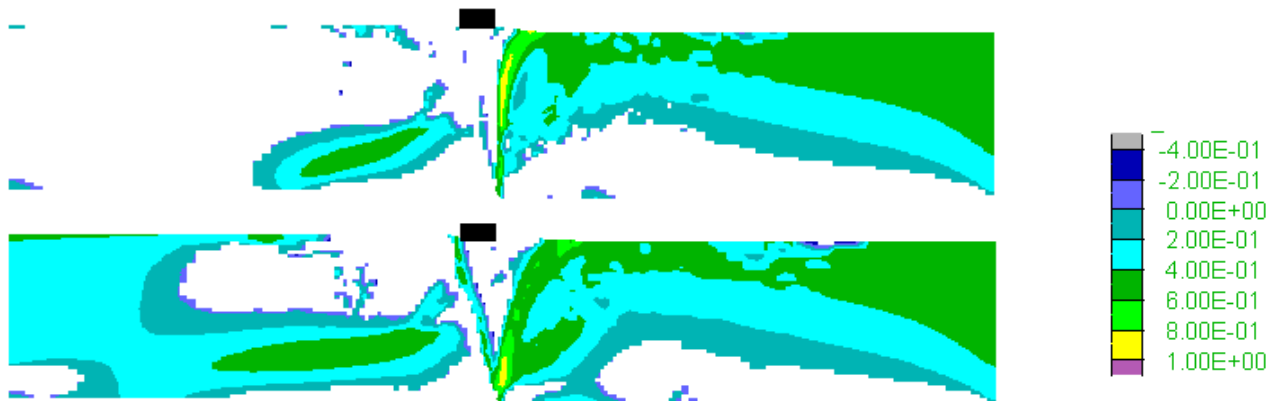


**Σχήμα 6.46** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0\text{m}$  (ανά  $0.2\text{m}$ ), για θέση κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  σε απόσταση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για **κατακόρυφη δομή** και για α) φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (μπλε γραμμή), β) φορτίο  $q=180\text{kPa}$  (κόκκινη γραμμή).

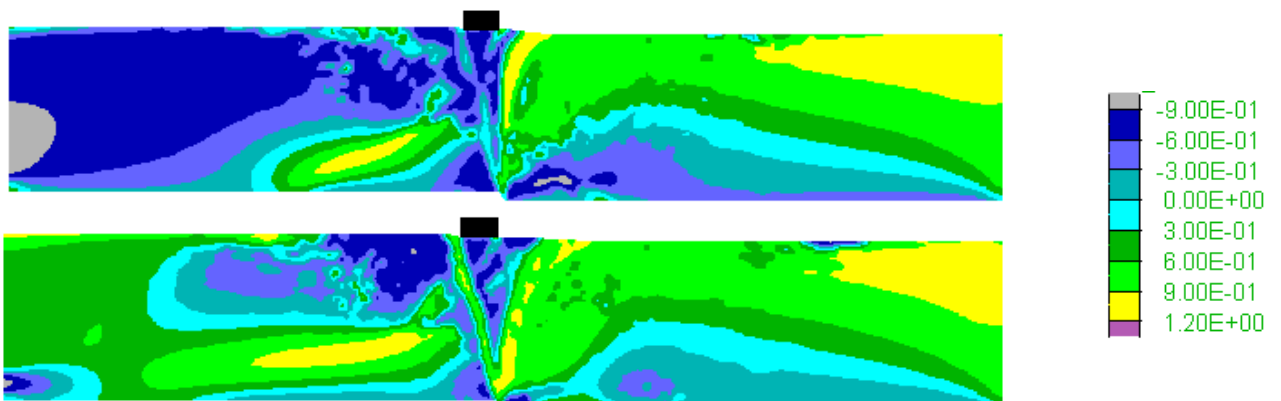
Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.47** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$  μέσω αμμώδους στρώσης με «κατακόρυφη» δομή κόκκων, με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=3\text{m}$  και να φέρει φορτίο  $q = 90 \text{ kPa}$  (άνω) και  $q = 180\text{kPa}$  (κάτω). Επιπλέον, στα **Σχήματα 6.48, 6.49** και **6.50** 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, προσανατολισμό δομής κόκκων και τα δύο φορτία κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias 2012 (Κεφάλαιο 3) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta=0, F=N=1$ ). Από τα παρακάτω σχήματα διαπιστώνεται ότι σε καμία περίπτωση φορτίου κατασκευής δεν έχει φτάσει η άμμος σε Κρίσιμη Κατάσταση σε όλο το μήκος της ζώνης διάτμησης, παρά μόνο σε σποραδικά σημεία εντός αυτής. Γίνεται φανερό ότι κατά μήκος της κύριας, αλλά και της δευτερεύουσας διάρρηξης για  $q=180\text{kPa}$ , οι παράμετροι δομής έχουν μεταβάλλει τις τιμές τους προς τις τιμές που αντιστοιχούν σε Κρίσιμη Κατάσταση, αλλά εκτός αυτών οι τιμές των παραμέτρων αυτών δεν επηρεάζονται από το φορτίο κατασκευής.



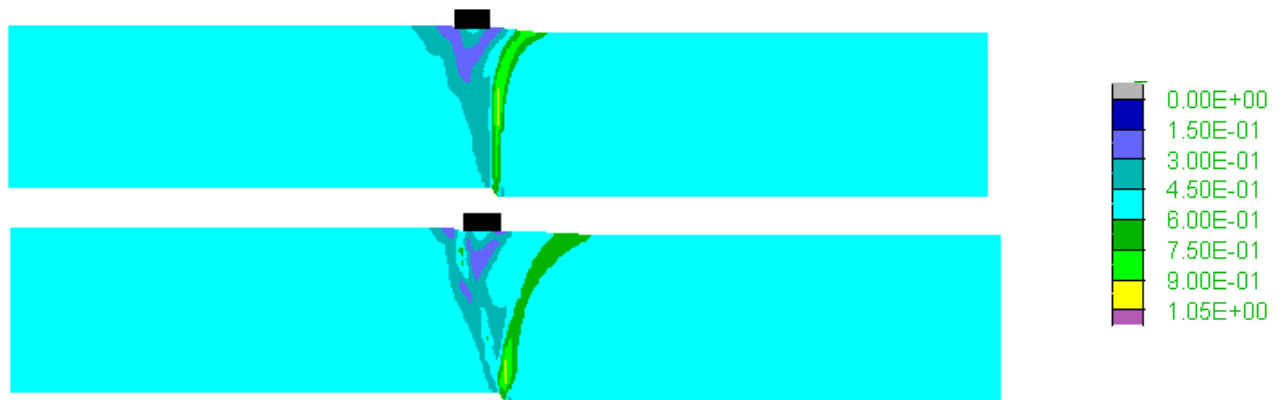
Σχήμα 6.47 Ανιστροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



Σχήμα 6.48 Μεταβλητή ανιστροπίας δομής  $A$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



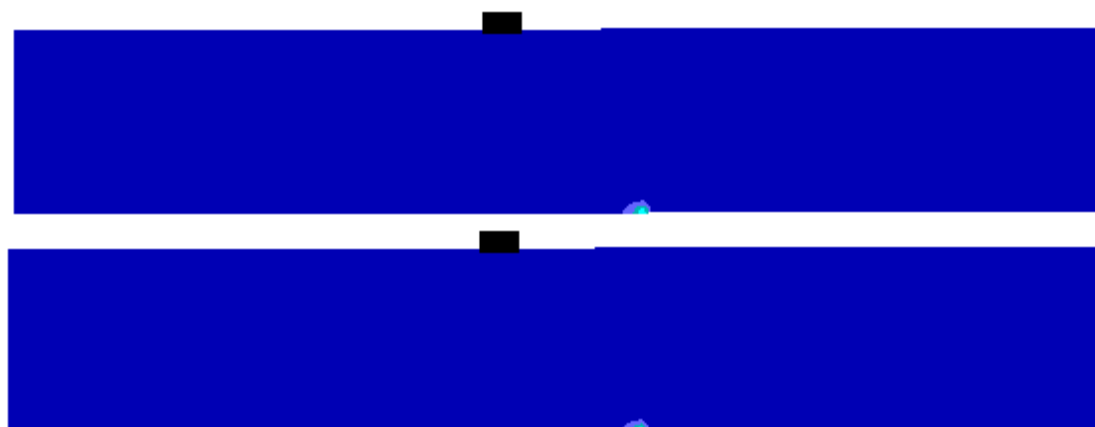
Σχήμα 6.49 Παράμετρος  $N$  σχετικού προσανατολισμού δομής-φόρτισης σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



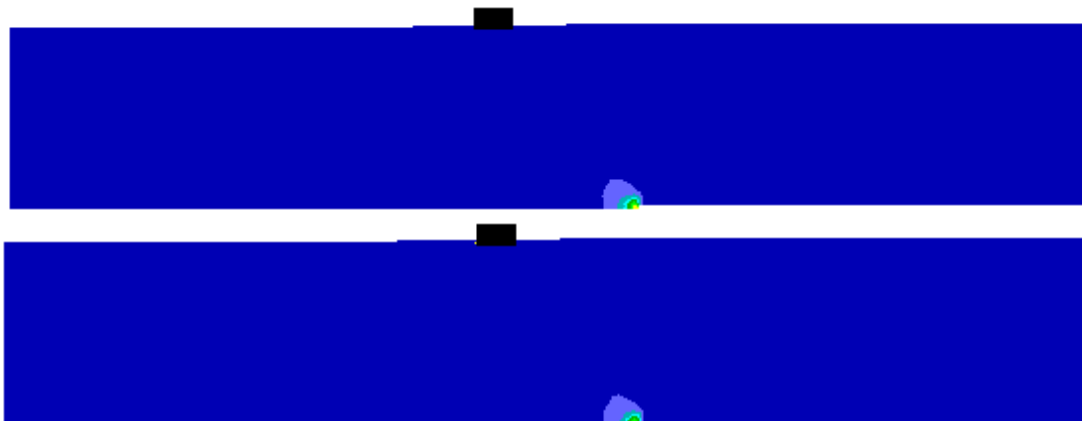
**Σχήμα 6.50** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος ( $\beta=85^\circ$ ) με μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=3\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)

### 6.5.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

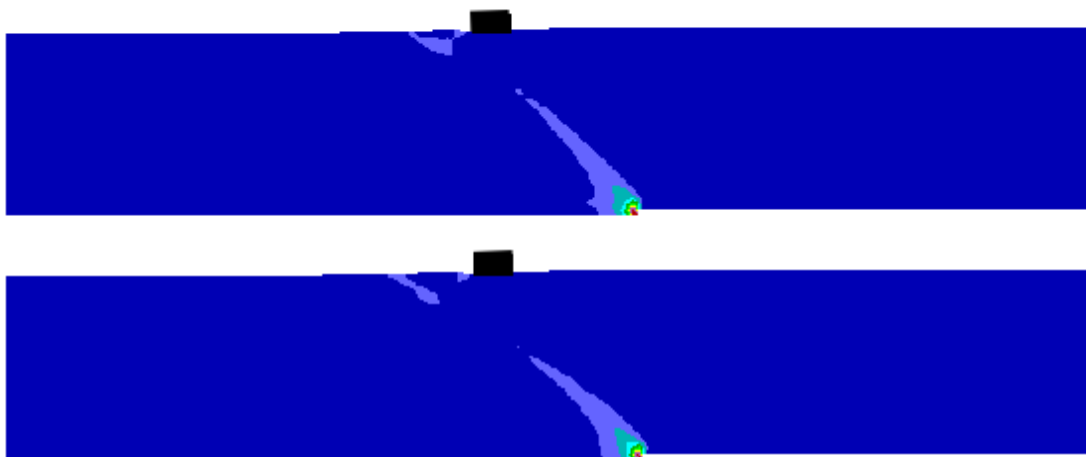
Στα **Σχήματα 6.51 έως 6.55** παρουσιάζονται οι συσσωρευμένες διατμητικές παραμορφώσεις για αμμώδη στρώση με «κατακόρυφη» δομή με κατασκευή στη θέση  $C=16\text{m}$  και φορτίου  $q=90\text{kPa}$  και  $180\text{kPa}$ , υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  και  $1.0\text{m}$ , αντίστοιχα. Προκύπτει ότι η αύξηση του φορτίου ( $q=180\text{kPa}$ ) δε διαφοροποιεί ιδιαίτερα την εικόνα της διάρρηξης. Στη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση ( $d=1.0\text{m}$ ) παρατηρούνται και οι μέγιστες διαφορές στις διατμητικές παραμορφώσεις για διαφορετικά φορτία κατασκευής, οι οποίες είναι πρακτικώς αμελητέες για περιοχές εκτός της (ίδιας) θέσης ανάδυσης της διάρρηξης. Αυτή η ομοιότητα οφείλεται στο ότι μετατόπιση μεγέθους  $d=1.0\text{m}$  είναι σχετικώς μικρή για ανάστροφα ρήγματα, αλλά πιθανώς και στην επιλεγείσα θέση  $C=16\text{m}$  η οποία πιθανώς δεν είναι εκείνη που θα δημιουργούσε έντονη επίδραση στη διάρρηξη για στρώση με «κατακόρυφη» δομή κόκκων.



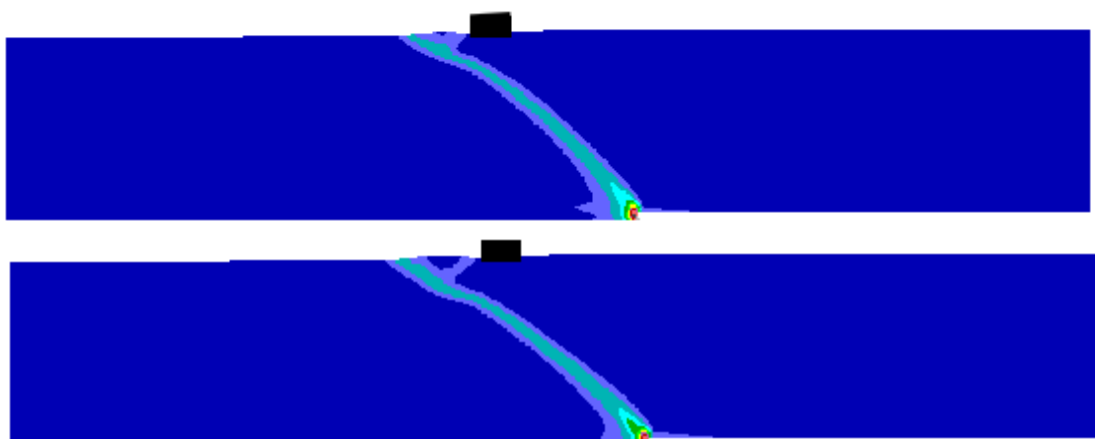
**Σχήμα 6.51** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.2\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



**Σχήμα 6.52** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.4\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).

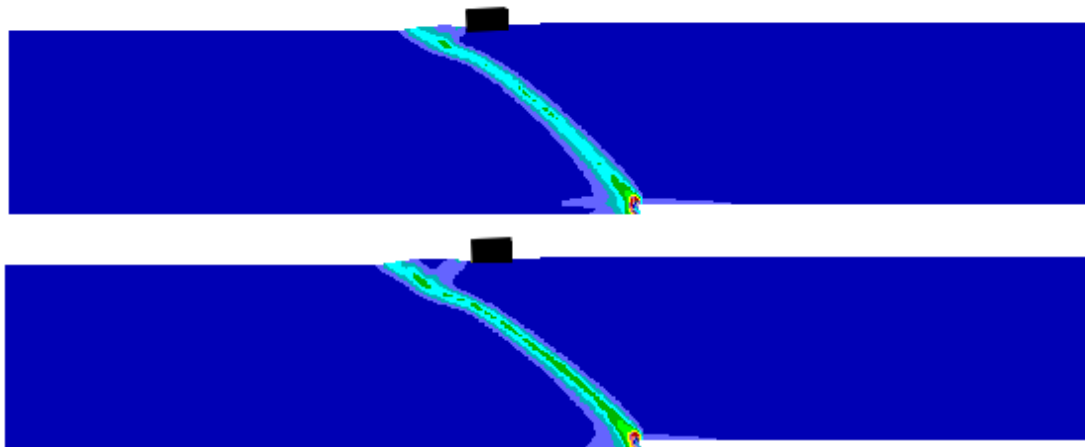


**Σχήμα 6.53** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.6\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).



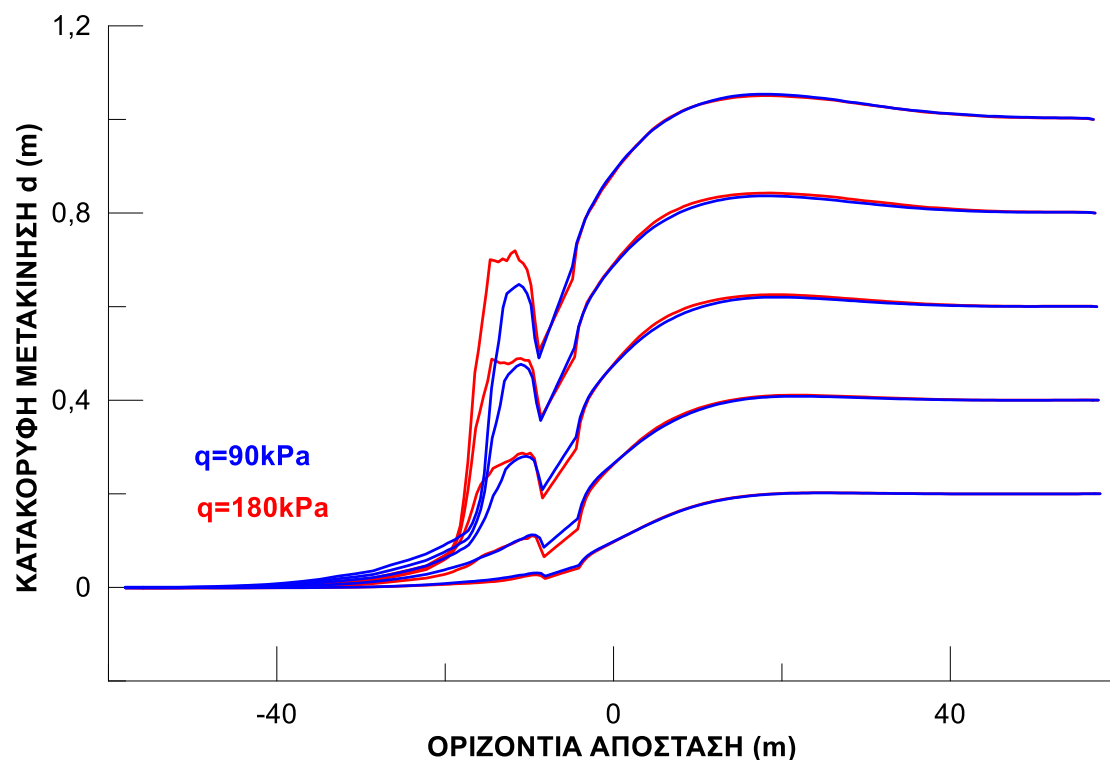
**Σχήμα 6.54** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=0.8\text{m}$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4\text{m}$ ) στην θέση  $C=16\text{m}$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω).





**Σχήμα 6.55** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης με  $D_r=65\%$  και **κατακόρυφη δομή**, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  με  $d=1.0m$ , με ύπαρξη κατασκευής ( $B=4m$ ) στην θέση  $C=16m$  και επιβαλλόμενο φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω).

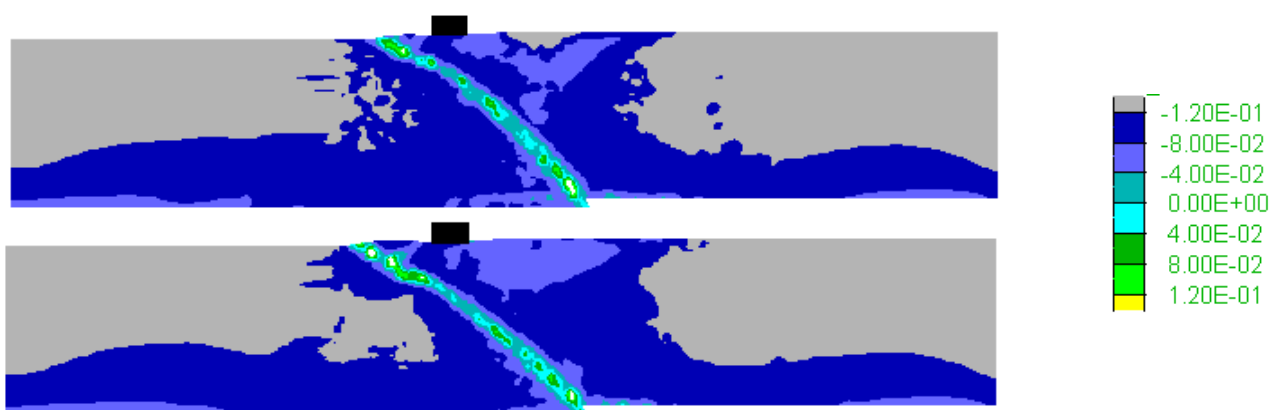
Στο παρακάτω **Σχήμα 6.56** παρουσιάζεται η παραμορφωμένη επιφάνεια της στρώσης με κατασκευή πλάτους  $B=4m$  στη θέση  $C=16m$  και φορτίου  $q=90kPa$  (**μπλε**) και  $q=180kPa$  (**κόκκινο**) επί στρώσης με «κατακόρυφη δομή» κόκκων, υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Δεν προκύπτουν ουσιώδεις διαφοροποιήσεις, παρά μόνο σε σχετικά μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος και στην περιοχή αριστερά της κατασκευής όπου αναδύεται η διάρρηξη, και παρουσιάζει εντονότερη διαστολή.



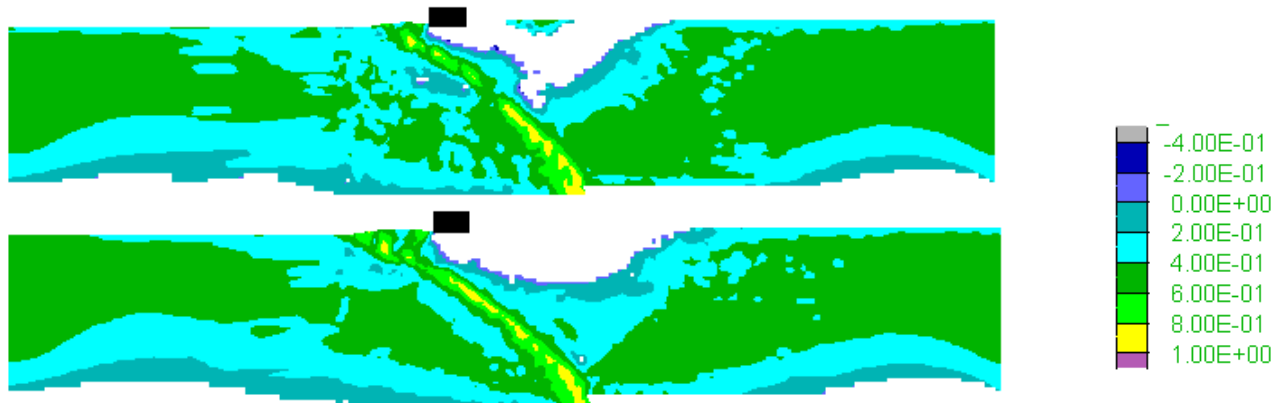
**Σχήμα 6.56** Εξέλιξη της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  για κάθε στάδιο επιβαλλόμενης μετακίνησης  $d = 0.0$  έως  $1.0m$  (ανά  $0.2m$ ), για θέση κατασκευής

πλάτους 4m σε απόσταση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος, για **κατακόρυφη δομή** και για α) φορτίο  $q=90kPa$  (μπλε γραμμή), β) φορτίο  $q=180kPa$  (κόκκινη γραμμή).

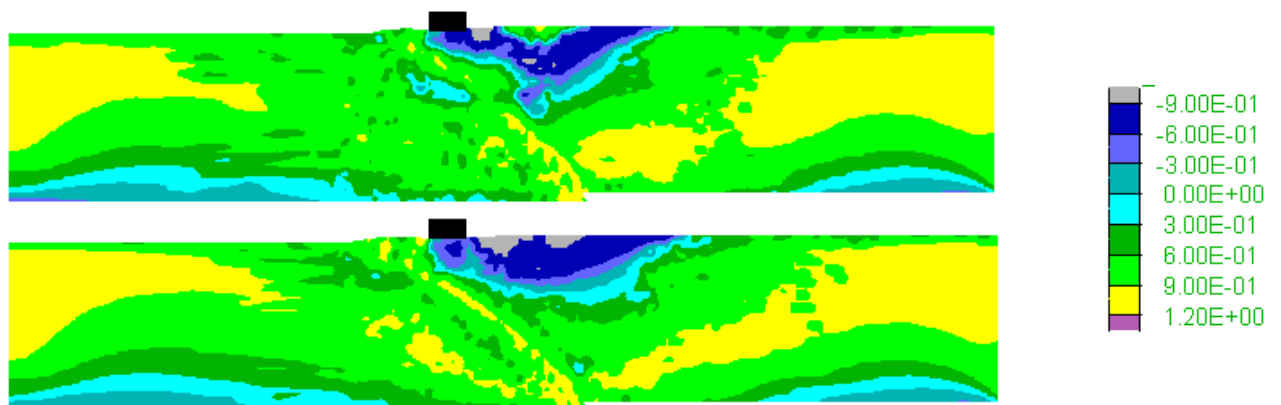
Παρακάτω, στο **Σχήμα 6.57** παρουσιάζεται η ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με μετατόπιση  $d=1.0m$  μέσω αμμώδους στρώσης με «κατακόρυφη» δομή κόκκων, με την κατασκευή να είναι τοποθετημένη στην θέση  $C=16m$  και να φέρει φορτίο  $q = 90 kPa$  (άνω) και  $q = 180kPa$  (κάτω). Επιπλέον, στα **Σχήματα 6.58, 6.59** και **6.60** 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, προσανατολισμό δομής κόκκων και τα δύο φορτία κατασκευής. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, η Κρίσιμη Κατάσταση κατά την θεωρία ACST των Li & Dafalias (2012) επιτυγχάνεται όταν και η μεταβλητή ανισοτροπίας δομής  $A=1$  (γεγονός που συνοδεύεται από  $\zeta =0, F=N=1$ ). Από τα παρακάτω σχήματα προκύπτει ότι η άμμος εντός της ζώνης διάτμησης έχει φτάσει σε Κρίσιμη Κατάσταση σε μεγάλα βάθη και στις δύο περιπτώσεις φορτίου κατασκευής, χωρίς ουσιώδεις διαφορές λόγω φορτίου κατασκευής. Αυτό οφείλεται στο ότι σε μεγάλα βάθη εντοπίζονται οι εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους και στις δύο περιπτώσεις φορτίου. Μια ακόμη παρατήρηση είναι ότι ποιοτικά είναι σχεδόν ίδια τα αποτελέσματα, γεγονός που οφείλεται στο ότι η αύξηση του φορτίου της κατασκευής δεν επηρέασε σχεδόν καθόλου τη διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος (βλ. **Σχήματα 6.51 έως 6.56**), καθώς εκτιμάται ότι  $d=1m$  είναι σχετικά μικρή για ανάστροφα ρήγματα ενώ μάλλον και η θέση της κατασκευής ( $C=16m$ ) μάλλον δεν επηρεάζει τη διάρρηξη όταν η δομή των κόκκων είναι «κατακόρυφη» σε αντίθεση με ό,τι προκύπτει για «οριζόντια» δομή κόκκων.



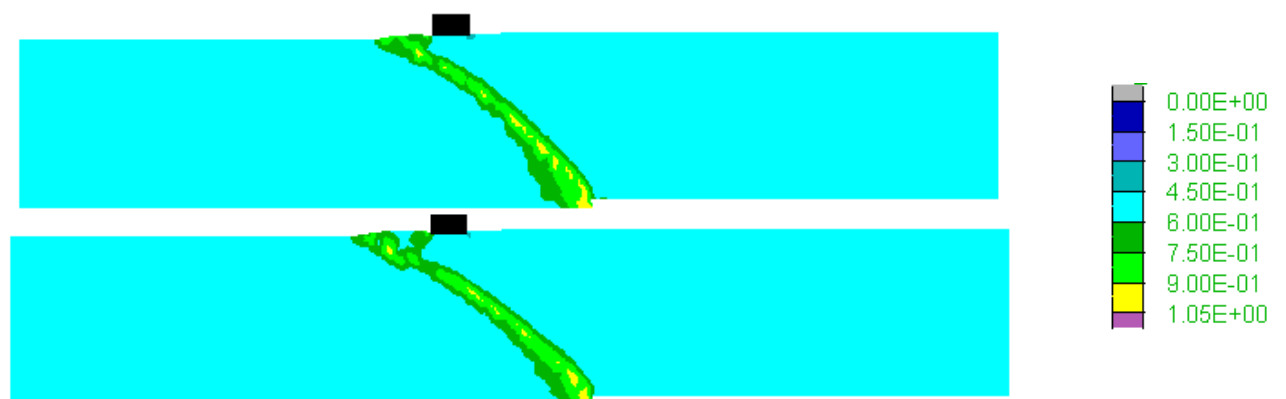
**Σχήμα 6.57** Ανισοτροπική παράμετρος κατάστασης  $\zeta$  σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d = 1.0m$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4m$ ) στη θέση  $C=16m$  με φορτίο  $q=90kPa$  (πάνω) και  $q=180kPa$  (κάτω)



**Σχήμα 6.58** Μεταβλητή ανισοτροπίας δομής A σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



**Σχήμα 6.59** Παράμετρος N σχετικού προσανατολισμού δομής-κόκκων σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)



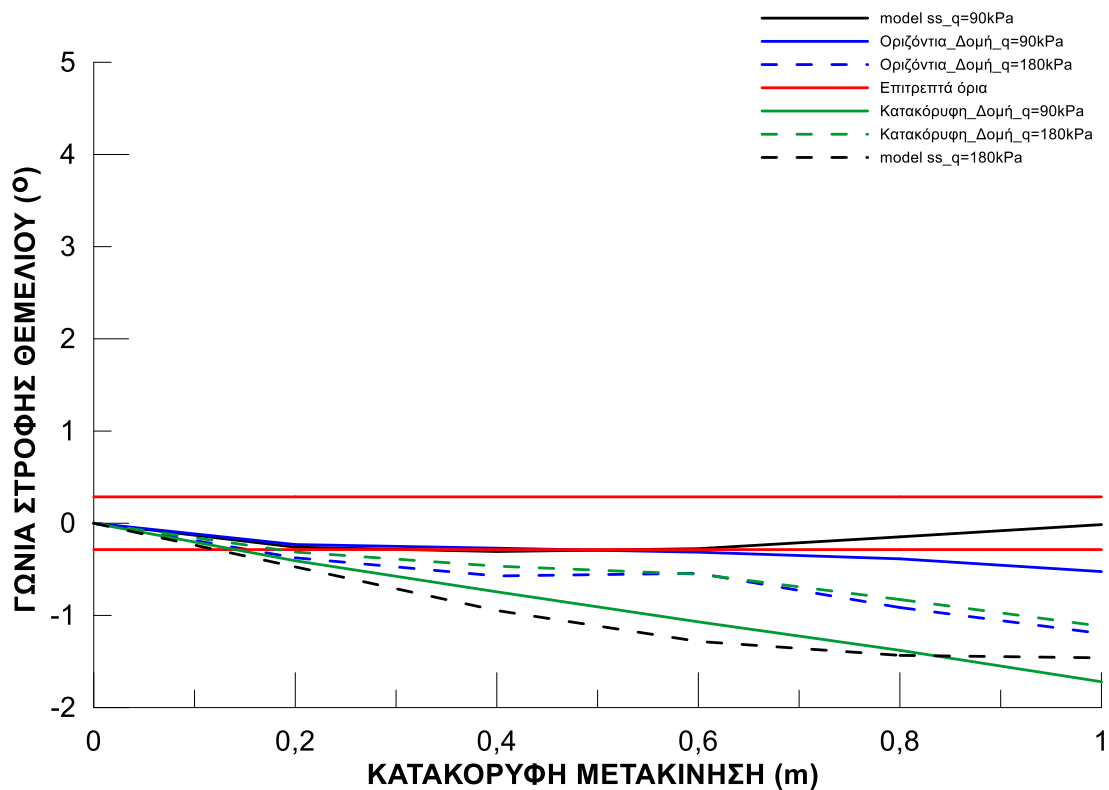
**Σχήμα 6.60** Μέτρο τανυστή δομής F σε αμμώδη στρώση σχετικής πυκνότητας  $D_r=65\%$  με **κατακόρυφη** δομή για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ( $\beta=135^\circ$ ) με κατακόρυφη μετατόπιση  $d=1.0\text{m}$ , όταν υπάρχει κατασκευή ( $B=4\text{m}$ ) στη θέση  $C=16\text{m}$  με φορτίο  $q=90\text{kPa}$  (πάνω) και  $q=180\text{kPa}$  (κάτω)

## 6.6 Εξέλιξη καθίζησης και στροφής κατασκευής με τη μετατόπιση ρήγματος

### 6.6.1 Διάρρηξη κανονικού ρήγματος

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την απόκριση της κατασκευής στη θέση  $C=12m$  από το ίχνος του κανονικού ρήγματος. Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 6.61, 6.62 και 6.63** παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιρροής της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  του κανονικού ρήγματος στη γωνία στροφής της κατασκευής, στη (μέση) καθίζησή της, καθώς και στην καθίζηση μετά την κανονικοποίησή της ως προς τη μετακίνηση  $d$  του ρήγματος, αντίστοιχα. Τα διαγράμματα αυτά συνοψίζουν την απόκριση της κατασκευής για τη συγκεκριμένη θέση, με βάση όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο παρόν και στα δύο προηγούμενα Κεφάλαια (4 και 5). Οι κόκκινες γραμμές στο **Σχήμα 6.61** ορίζουν ένα ενδεικτικό όριο «αποδεκτής» στροφής της κατασκευής, που έχει οριστεί περί τις  $0.3^\circ$  (με ακρίβεια  $0.286^\circ$ ) που αντιστοιχεί σε μια στροφή  $1/200$ , δηλαδή συμβατά με το όριο λειτουργικότητας για αμφιέρειστες γέφυρες (Wahls 1990) και λιγότερο συντηρητικά από το  $1/500$  που αφορά συνήθη κτήρια (Skempton, 1956). Αντιθέτως, η κόκκινη γραμμή στο **Σχήμα 6.63** απλά ορίζει το «αυθαίρετο» όριο καθίζησης όταν γίνεται ίση με τη μετατόπιση του ρήγματος, χωρίς αυτό να υπονοεί κάτι για την απόκριση της κατασκευής.

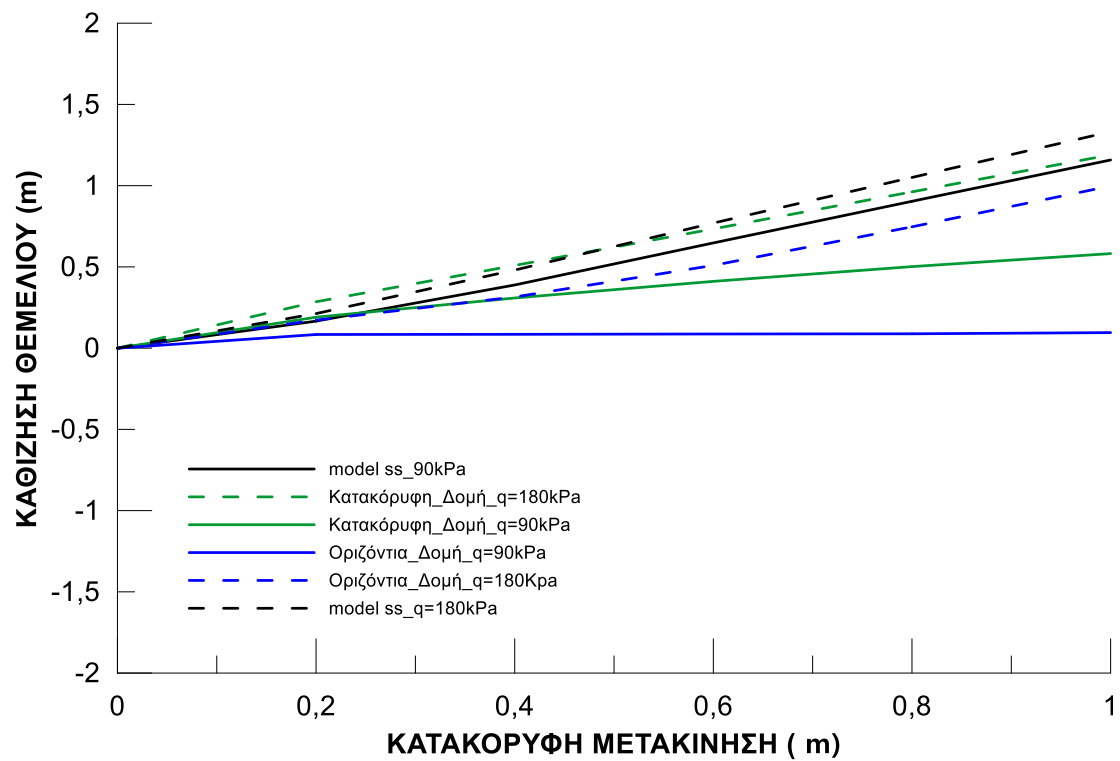
Αρχικώς, από το **Σχήμα 6.61** προκύπτει ότι για όλες τις αναλύσεις, υπάρχει η αναμενόμενη αύξηση της στροφής της κατασκευής με τη μετατόπιση του ρήγματος. Εξαιρέση αποτελούν οι αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα για μετατοπίσεις μεγαλύτερες των  $0.6m$ , όπου υπάρχει μια μείωση της αύξησης της στροφής ή και μείωσή της λόγω δημιουργίας δευτερεύουσας διάρρηξης που εξισορροπεί την κατασκευή, μια απόκριση όμως που δεν επιβεβαιώνεται από το σοφιστευμένο προσομοίωμα. Επιπλέον, για «οριζόντια» δομή κόκκων η αύξηση του φορτίου της κατασκευής αυξάνει τη στροφή της, με πιο έντονη την επίδραση αυτή στις αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα. Αντιθέτως, για «κατακόρυφη» δομή κόκκων, η αύξηση του φορτίου απομειώνει τη στροφή της κατασκευής, καθώς δεν δημιουργείται πια κατακρήμνισμα (που αυξάνει τις στροφές). Ποσοτικά, μια κατακόρυφη μετακίνηση  $d$  μεγαλύτερη των  $0.2m$  ( $d > 0.2m$ ) οδηγεί σε γωνία στροφής κατασκευής πέραν των «επιτρεπτών» ορίων, εκτός από την περίπτωση «οριζόντιας» δομής (με το απλουστευμένο και σοφιστευμένο προσομοίωμα) για το μικρό φορτίο κατασκευής, όπου το όριο αυτό ανεβαίνει στα  $0.5m$  περίπου.



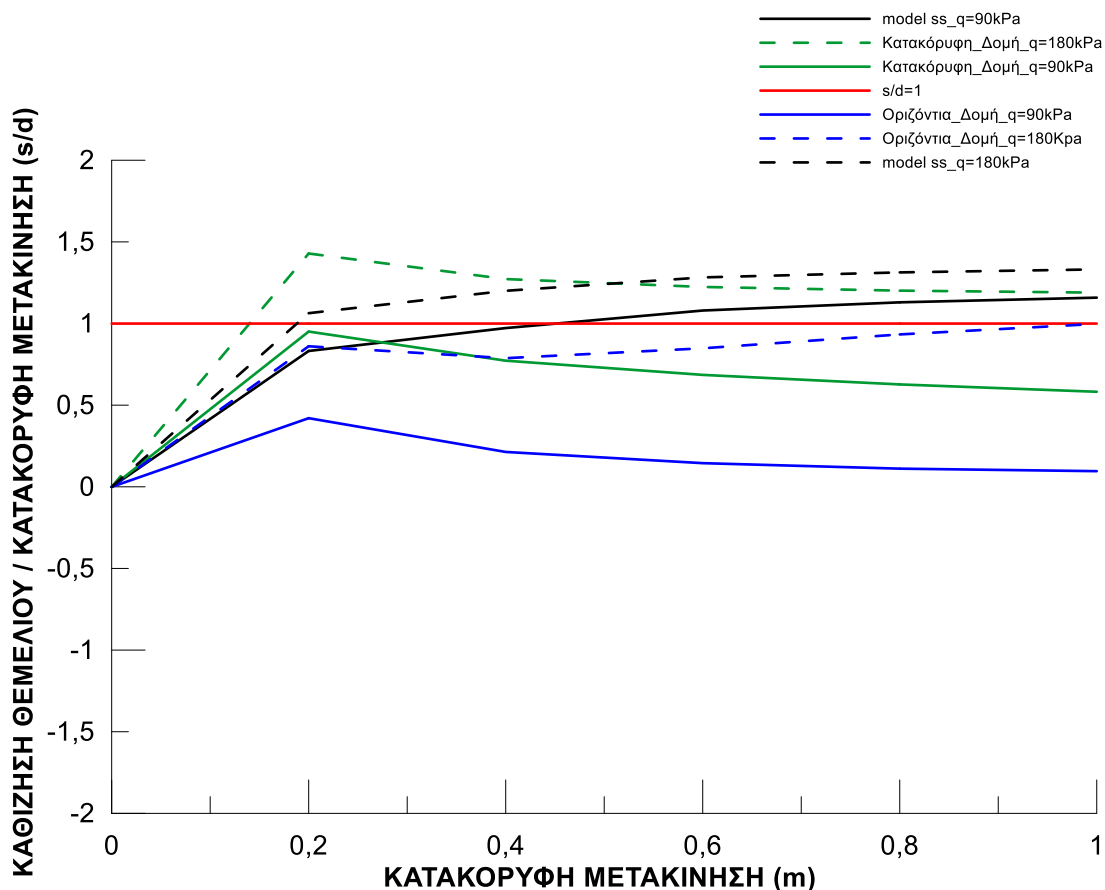
**Σχήμα 6.61** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στη στροφή της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος, και για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

Στα **Σχήματα 6.62 και 6.63** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  του ρήγματος στην καθίζηση της κατασκευής, και στην καθίζηση μετά από κανονικοποίηση ως προς  $d$ , αντίστοιχα. Από το **Σχήμα 6.62** προκύπτει γενικώς η αναμενόμενη αύξηση της καθίζησης της κατασκευής με τη μετατόπιση του ρήγματος, καθώς και η αύξηση με την αύξηση του φορτίου της κατασκευής. Οι καθιζήσεις με βάση το απλουστευμένο προσομοίωμα είναι μάλλον υπερβολικές, καθώς δεν επιβεβαιώνονται από τις αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια» δομή κόκκων. Η δομή αυτή μάλιστα δίνει μικρότερες καθιζήσεις υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος συγκριτικά με την «κατακόρυφη» δομή κόκκων, που αντιστοιχεί σε απόκριση συγκριτικά πιο συστολικής άμμου.

Επιπλέον, από το **Σχήμα 6.63** προκύπτει ότι για  $d=0.2m$  η κανονικοποιημένη καθίζηση αποκτά, λίγο έως πολύ, την τελική της τιμή, και την οποία διατηρεί με την αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος, με τις τιμές αυτές να είναι μικρότερες του 1.0 για  $q=90kPa$  και μεγαλύτερες ή ίσες του 1.0 για  $q=180kPa$ .



**Σχήμα 6.62** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης d κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στην καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση C=12m από το ίχνος του ρήγματος, και για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστεμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

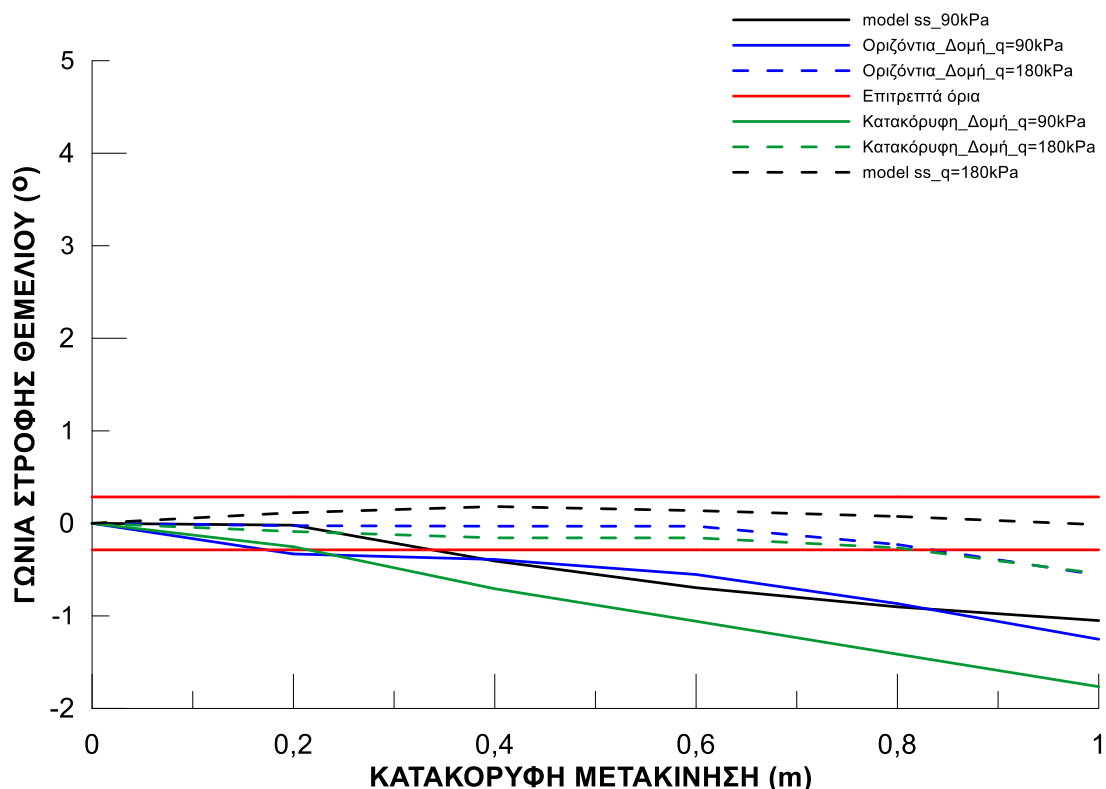


**Σχήμα 6.63** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  κανονικού ρήγματος  $\beta=45^\circ$  στη (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=12m$  από το ίχνος του ρήγματος, και για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

### 6.6.2 Διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την απόκριση της κατασκευής στη θέση  $C=3m$  υπό διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος. Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 6.64, 6.65 και 6.66** παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιρροής της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  του κανονικού ρήγματος στη γωνία στροφής της κατασκευής, στη (μέση) καθίζησή της, καθώς και στην καθίζηση μετά την κανονικοποίησή της ως προς τη μετακίνηση  $d$  του ρήγματος, αντίστοιχα. Όπως και για το κανονικό ρήγμα, τα διαγράμματα αυτά συνοψίζουν την απόκριση της κατασκευής για τη συγκεκριμένη θέση υπό «κατακόρυφο» ρήγμα, με βάση όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο παρόν και στα δύο προηγούμενα Κεφάλαια (4 και 5). Όπως προκύπτει από το **Σχήμα 6.64**, το «κατακόρυφο» ρήγμα προκαλεί αρνητικές (δεξιόστροφες) γωνίες στην κατασκευή, οι οποίες είναι ή ανεξάρτητες της μετατόπισης του ρήγματος ή αυξάνουν με αυτή. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις με μεγαλύτερο φορτίο κατασκευής ( $q=180kPa$ ) δίνουν μικρότερες γωνίες στροφής κατασκευής, οι οποίες μάλιστα είναι και εντός «αποδεκτών» ορίων, εκτός από τις αναλύσεις με το σοφιστευμένο προσομοίωμα όπου για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος ( $d > 0.8m$ ) οι γωνίες ξεφεύγουν ελάχιστα των αποδεκτών ορίων. Αντιθέτως, για μικρό φορτίο κατασκευής ( $q=90kPa$ ) οι στροφές μεγαλώνουν με τη μετατόπιση του ρήγματος, και για τιμές  $d = 0.20 - 0.35m$  ξεπερνούν τα αποδεκτά όρια. Η «κατακόρυφη» δομή

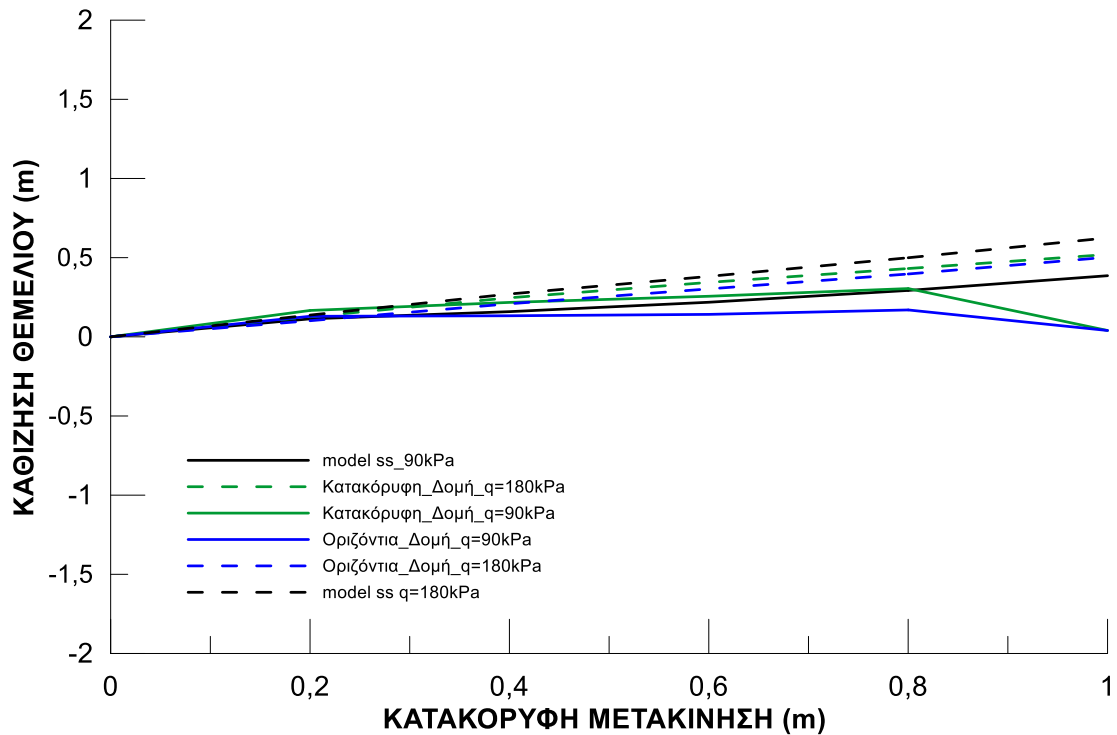
κόκκων δίνει τις μεγαλύτερες στροφές, συγκριτικά με την «οριζόντια» δομή η οποία δίνει συγκρίσιμες τιμές στροφής με το απλουστευμένο προσομοίωμα (για  $q=90\text{kPa}$ ).



**Σχήμα 6.64** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης d «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στη στροφή της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=3\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

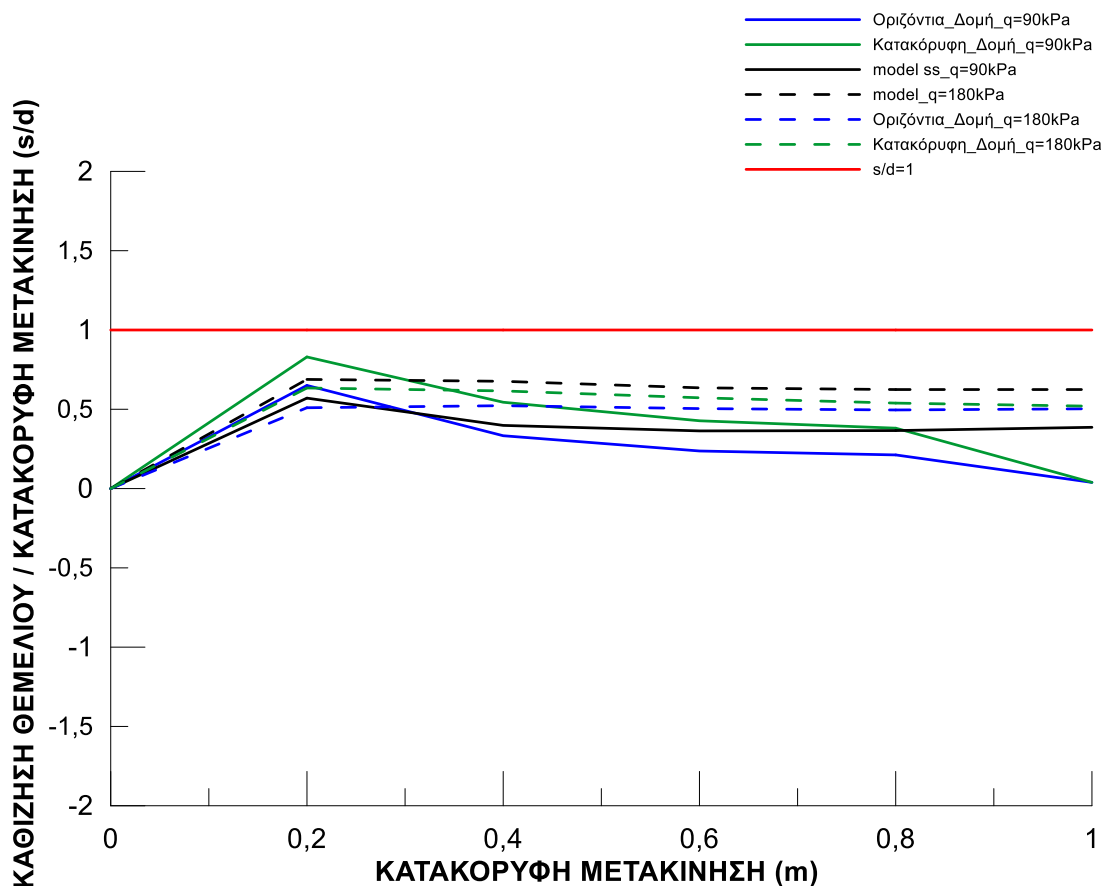
Στα **Σχήματα 6.65 και 6.66** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της μετακίνησης d του «κατακόρυφου» ρήγματος στην καθίζηση της κατασκευής, και στην καθίζηση μετά από κανονικοποίηση ως προς d, αντίστοιχα. Από το **Σχήμα 6.65** προκύπτει γενικώς η αναμενόμενη αύξηση της καθίζησης της κατασκευής με τη μετατόπιση του ρήγματος, καθώς και η αύξησή της με την αύξηση του φορτίου της κατασκευής. Το εύρος διακύμανσης των καθιζήσεων είναι μικρότερο εκείνου για κανονικό ρήγμα, γεγονός που υποδεικνύει ότι τόσο η ακρίβεια του προσομοιώματος, όσο και ο προσανατολισμός της δομής κόκκων παίζουν συγκριτικά μικρότερο ρόλο για διάρρηξη «κατακόρυφου» ρήγματος. Οι καθιζήσεις με βάση το απλουστευμένο προσομοίωμα είναι σχετικά μεγαλύτερες από εκείνες για το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια» δομή, αλλά αυτή η διαφορά δεν κρίνεται υπερβολική όπως για διάρρηξη κανονικού ρήγματος.





**Σχήμα 6.65** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στη καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστευμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

Επιπλέον, από το **Σχήμα 6.66** προκύπτει ότι η κανονικοποίηση των καθιζήσεων προς την κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος, δείχνει ότι όλες οι περιπτώσεις αναλύσεων παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για φορτίο  $q = 180kPa$  ο λόγος  $s/d$  σταθεροποιείται, λίγο έως πολύ, για μετατόπισεις ρήγματος μεγαλύτερες από  $d = 0.2m$ , σε τιμές περί το 0.5. Αντίθετα, για φορτίο  $q = 90kPa$  ο λόγος  $s/d$  δείχνει να παίρνει τη μέγιστη τιμή του για  $d = 0.2m$  (σε τιμές πάνω από 0.5) και μετά να φθίνει ελαφρώς με τη μετατόπιση σε τιμές κάτω από 0.5. Επίσης, το απλουστευμένο προσομοίωμα δίνει μεγαλύτερες καθιζήσεις απ' ότι το σοφιστευμένο για «οριζόντια» δομή, χωρίς αυτές οι διαφορές να είναι σημαντικές. Αντίστοιχα, και η «κατακόρυφη» δομή δείχνει να δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες καθιζήσεις, χωρίς και πάλι αυτές οι διαφορές να είναι σημαντικές.



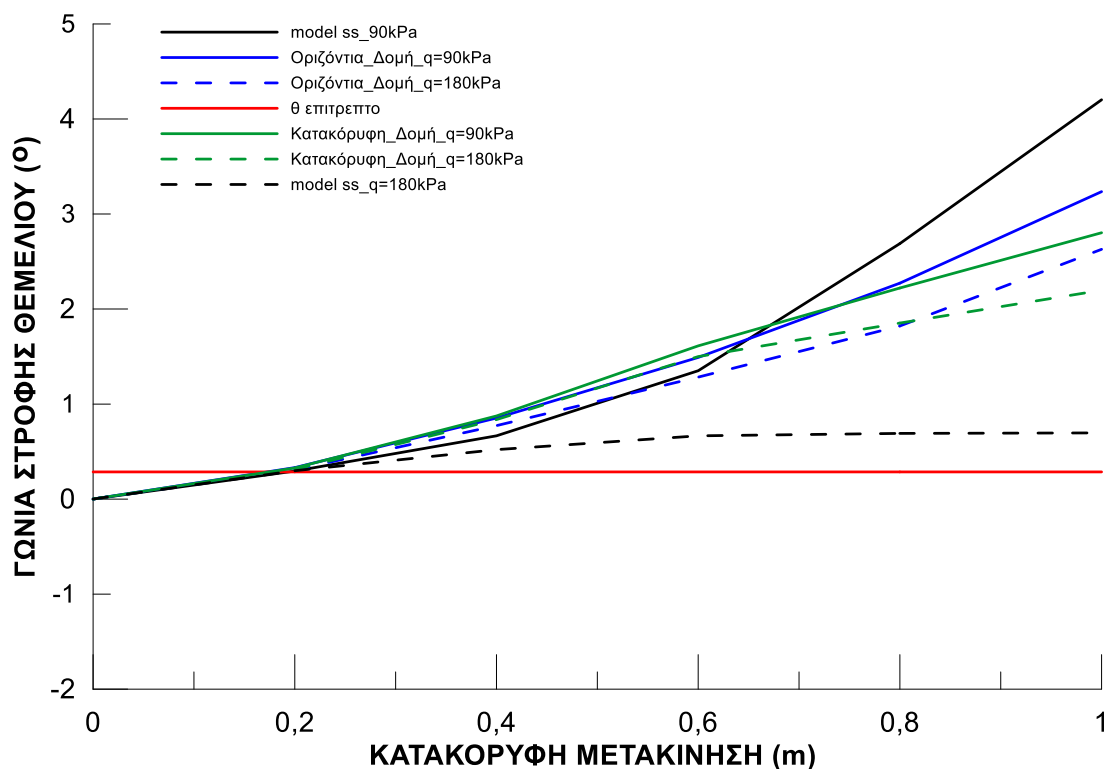
**Σχήμα 6.66** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  «κατακόρυφου» ρήγματος  $\beta=85^\circ$  στη (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=3m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και σοφιστευμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

### 6.6.3 Διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος

Εδώ παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την απόκριση της κατασκευής πλάτους  $B=4m$  στη θέση  $C=16m$  υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 6.67, 6.68 και 6.69** παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιρροής της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  του κανονικού ρήγματος στη γωνία στροφής της κατασκευής, στη (μέση) καθίζησή της, καθώς και στην καθίζηση μετά την κανονικοποίησή της ως προς τη μετακίνηση  $d$  του ρήγματος, αντίστοιχα. Όπως και για τους άλλους τύπους ρηγμάτων, τα διαγράμματα αυτά συνοψίζουν την απόκριση της κατασκευής για τη συγκεκριμένη θέση υπό ανάστροφο ρήγμα, με βάση όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο παρόν και στα δύο προηγούμενα Κεφάλαια.

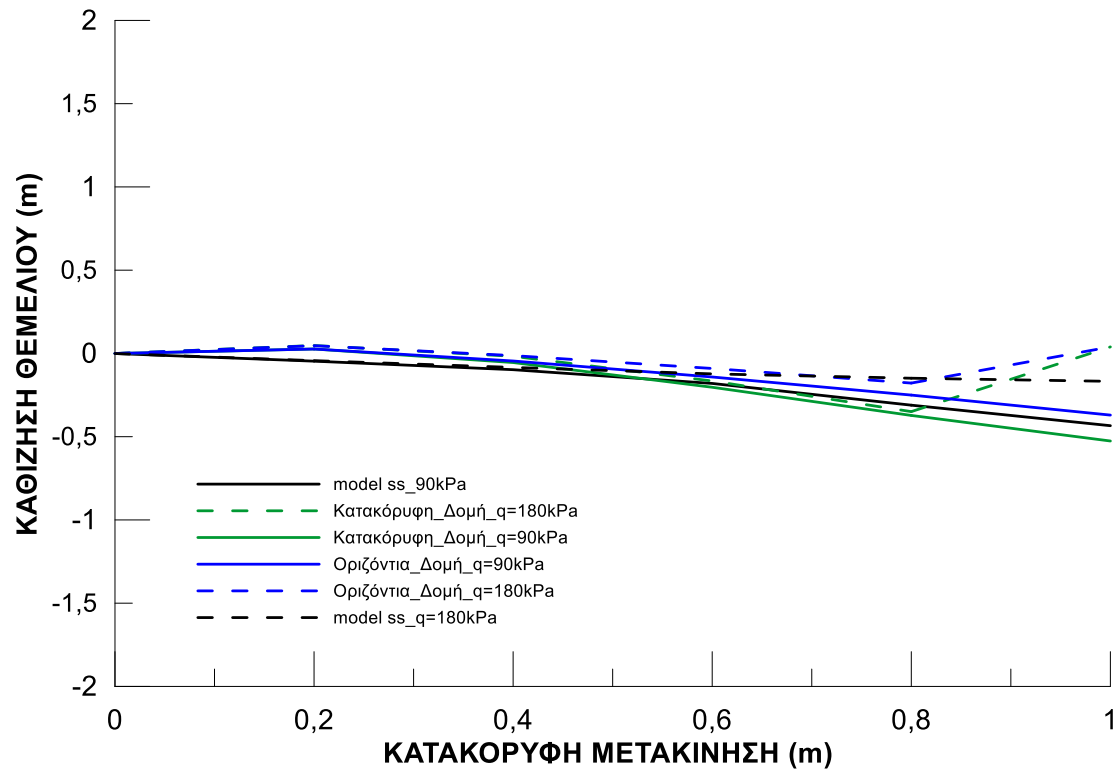
Όπως προκύπτει από το **Σχήμα 6.67**, το ανάστροφο ρήγμα προκαλεί μόνο θετικές στροφές (αριστερόστροφες) μεγάλου εύρους διακύμανσης, υπογραμμίζοντας τη σημασία του επιλεγέντος προσομοιώματος για την ανάλυση και του φορτίου της ίδιας της κατασκευής. Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι για  $d > 0.2m$ , όλες οι αναλύσεις δίνουν στροφές μη-αποδεκτές υπογραμμίζοντας την καταστροφικότητα ανάστροφων ρηγμάτων για τις κατασκευές. Επιπλέον, είναι σαφής η αύξηση της στροφής με τη μετατόπιση του ρήγματος, ειδικά για το μικρό φορτίο  $q=90kPa$ , καθώς για το μεγάλο

φορτίο  $q=180\text{kPa}$  αυτή η επίδραση είναι συγκριτικά λιγότερο έντονη. Έτσι, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής μειώνει συγκριτικά τη στροφή της κατασκευής υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Αυτή η επίδραση είναι υπερβολικά έντονη για το απλουστευμένο προσομοίωμα, γεγονός που υποδεικνύει ποσοτικά λανθασμένες προβλέψεις, παρότι ποιοτικά προβλέπει σωστή τη σχετική επίδραση. Από εκεί και πέρα, η επίδραση του προσανατολισμού της δομής των κόκκων είναι σχετικώς μικρή στις στροφές της κατασκευής, τουλάχιστον για το διερευνηθέν εύρος μετατοπίσεων ανάστροφου ρήγματος (έως  $1.0\text{m}$ ) και για τη διερευνηθείσα θέση κατασκευής.

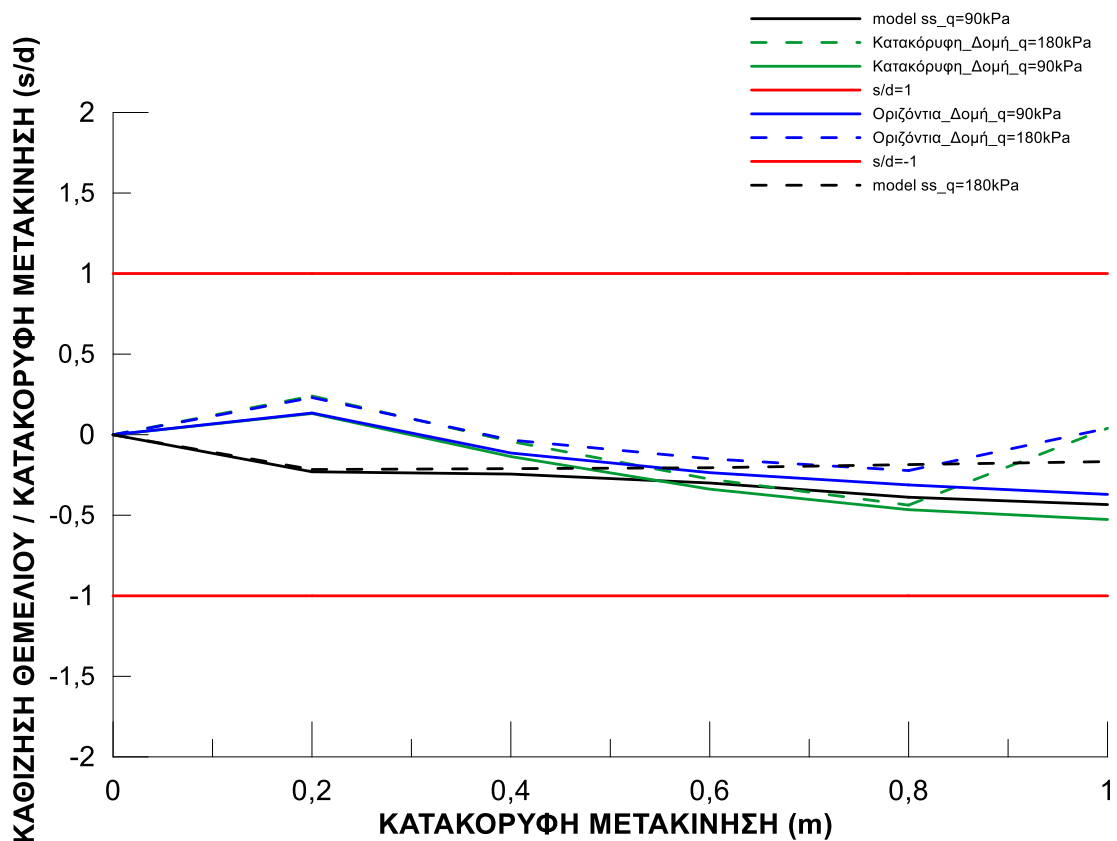


**Σχήμα 6.67** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στη στροφή της κατασκευής πλάτους  $4\text{m}$  που βρίσκεται στην θέση  $C=16\text{m}$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη του φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και το σοφιστεμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η αύξηση του φορτίου της κατασκευής καθώς και η αλλαγή της δομής των κόκκων δεν οδηγεί σε έντονες μεταβολές στη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος. Έτσι, στα **Σχήματα 6.68 και 6.69** προκύπτουν σχετικώς μικρές καθιζήσεις, οι οποίες δεν επηρεάζονται πρακτικώς από τις ανωτέρω παραμέτρους, με εξαίρεση ίσως τα μεγάλα φορτία ( $q=180\text{kPa}$ ) τα οποία μειώνουν ελαφρά τις καθιζήσεις για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος  $d=1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 6.68** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στη καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και σοφιστεμένο προσομοίωμα (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).



**Σχήμα 6.69** Συγκεντρωτικό διάγραμμα επίδρασης της κατακόρυφης μετακίνησης  $d$  ανάστροφου ρήγματος  $\beta=135^\circ$  στη (κανονικοποιημένη ως προς  $d$ ) καθίζηση της κατασκευής πλάτους 4m που βρίσκεται στην θέση  $C=16m$  από το ίχνος του ρήγματος, για τα δύο μεγέθη φορτίου με βάση τις αναλύσεις με το απλουστευμένο και σοφιστευμένο μοντέλο (οριζόντια και κατακόρυφη δομή κόκκων).

## 6.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρήσης του σοφιστευμένου προσομοιώματος σε αναλύσεις αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής για τις δύο δομές των κόκκων («οριζόντια» και «κατακόρυφη»), τα τρία είδη ρηγμάτων και για μία χαρακτηριστική θέση κατασκευής ανά είδος ρήγματος. Ακόμη, εξετάστηκε η επίδραση του μεγέθους φορτίου κατασκευής στη διάρρηξη για τις δύο δομές κόκκων. Τέλος, συνοψίστηκαν οι επιδράσεις του επιλεγέντος προσομοιώματος (σοφιστευμένο ή απλουστευμένο), του προσανατολισμού δομής κόκκων («οριζόντια» ή «κατακόρυφη» δομή) και του φορτίου της κατασκευής ( $q = 90$  ή  $180kPa$ ) στην εξέλιξη της (μέσης) καθίζησης και στροφής της κατασκευής με την αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος, ξεχωριστά για κάθε τύπο ρήγματος. Με βάση αυτά, τα αποτελέσματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

### A. Στην περίπτωση του **κανονικού ρήγματος ( $45^\circ$ ):**

(α) Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον προσανατολισμό της δομής των κόκκων καθώς και στις δύο περιπτώσεις φτάνει στην επιφάνεια στο δεξί άκρο της κατασκευής. Ωστόσο, για την «κατακόρυφη» δομή των κόκκων, η ανάδυση χρειάζεται μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση, ενώ

δημιουργούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις κάτω από την κατασκευή, οι οποίες μαζί με την κύρια διάρρηξη δεν παρουσιάζουν τόσο έντονες διατμητικές παραμορφώσεις όπως στην «οριζόντια δομή» για την ίδια μετατόπιση ρήγματος. Επιπλέον, για την «κατακόρυφη» δομή, το κατακρήμισμα είναι πιο αβαθές και πιο στενό, συγκριτικά με ό,τι εμφανίζεται για «οριζόντια» δομή.

(β) Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής υπό «κατακόρυφη δομή» κόκκων έχει ως αποτέλεσμα την εκτροπή της διάρρηξης και την ανάδυσή της στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, ενώ παρατηρούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις με αρκετά εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις από εκείνες υπό το μικρό φορτίο. Επιπλέον, η αύξηση του φορτίου απαλείφει το κατακρήμισμα που εμφανίζεται για το μικρό φορτίο κατασκευής.

(γ) Ως αναμενόταν, η στροφή της κατασκευής αυξάνει με τη μετατόπιση του κανονικού ρήγματος, και αυτό ισχύει ανεξαρτήτως προσανατολισμού δομής κόκκων. Η αύξηση του φορτίου αυξάνει τη στροφή της κατασκευής για «οριζόντια» δομή κόκκων, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει για την «κατακόρυφη» δομή λόγω της απαλοιφής του κατακρημίσματος (που αυξάνει τη στροφή). Ποσοτικά, μια κατακόρυφη μετακίνηση  $d$  μεγαλύτερη των  $0.2m$  ( $d > 0.2m$ ) οδηγεί σε γωνία στροφής κατασκευής πέραν των «επιτρεπτών» ορίων, εκτός από την περίπτωση οριζόντιας δομής για το μικρό φορτίο κατασκευής, όπου το όριο αυτό ανεβαίνει στα  $0.5m$  περίπου.

(δ) Και πάλι, ως αναμενόταν, η καθίζηση της κατασκευής αυξάνει με τη μετατόπιση του κανονικού ρήγματος, αλλά και με την αύξηση του φορτίου της κατασκευής. Η «οριζόντια» δομή κόκκων δίνει συγκριτικά μικρότερες καθιζήσεις υπό διάρρηξη κανονικού ρήγματος, συγκριτικά με την «κατακόρυφη» δομή κόκκων, η οποία αντιστοιχεί σε απόκριση πιο συστολικής άμμου. Τέλος, η κανονικοποιημένη καθίζηση αποκτά, λίγο έως πολύ, την τελική της τιμή, για  $d=0.2m$ .

(ε) Οι αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα ποσοτικά μάλλον υπερεκτιμούν τις καθιζήσεις της κατασκευής, ενώ για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος υποδεικνύουν και ποιοτικά λάθος απόκριση, καθώς προβλέπουν απομείωση της στροφής της.

## **B. Στην περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος (85°):**

(α) Η διάρρηξη αναδύεται στην ίδια (δεξιά) πλευρά της κατασκευής και για τις δύο δομές κόκκων, ενώ για την «κατακόρυφη» δομή εκτρέπεται ελάχιστα πιο δεξιά, χωρίς να δημιουργηθεί δευτερεύουσα διάρρηξη. Η διάρρηξη για «κατακόρυφη» δομή κόκκων παρουσιάζει εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις έναντι της «οριζόντιας» δομής για την ίδια κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος.

(β) Η αύξηση του φορτίου της κατασκευής για «κατακόρυφη» δομή κόκκων προκαλεί την εκτροπή της διάρρηξης στο αριστερό άκρο της κατασκευής, ενώ παράλληλα δημιουργεί βαθιά δευτερεύουσα διάρρηξη. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η κύρια διάρρηξη υπό το μικρό φορτίο αναπτύσσει εντονότερες διατμητικές παραμορφώσεις έναντι του μεγαλύτερου φορτίου.

(γ) Η στροφή της κατασκευής είναι είτε ανεξάρτητη της μετατόπισης του ρήγματος (μεγάλο φορτίο) και εντός αποδεκτών ορίων, ή αυξάνουν με αυτή (μικρό φορτίο). Η «κατακόρυφη» δομή κόκκων δίνει τις μεγαλύτερες στροφές, συγκριτικά με την

«οριζόντια» δομή η οποία δίνει συγκρίσιμες τιμές στροφής με το απλουστευμένο προσομοίωμα (για  $q=90\text{kPa}$ ).

(δ) Στις καθιζήσεις της κατασκευής παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές λόγω χρήσης διαφορετικών προσομοιωμάτων, ή λόγω αύξησης του φορτίου, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει για κανονικό ρήγμα. Επίσης, οι καμπύλες καθιζήσεων  $s$  (κανονικοποιημένες προς τις κατακόρυφες μετατοπίσεις  $d$ ) σταθεροποιούνται περίπου σε λόγο  $s/d=0.5$  για  $d > 0.2\text{m}$  για το μεγάλο φορτίο, ενώ για το μικρό φορτίο ο λόγος  $s/d$  δείχνει να παίρνει τη μέγιστη τιμή του για  $d = 0.2\text{m}$  (σε τιμές πάνω από 0.5) και μετά να φθίνει ελαφρώς με τη μετατόπιση σε τιμές κάτω από 0.5.

(ε) Οι καθιζήσεις με βάση το απλουστευμένο προσομοίωμα είναι σχετικά μεγαλύτερες από εκείνες για το σοφιστευμένο προσομοίωμα για «οριζόντια» δομή, αλλά αυτή η διαφορά δεν είναι μεγάλη. Σε όρους στροφής, η «οριζόντια» δομή δίνει συγκρίσιμες τιμές με το απλουστευμένο προσομοίωμα, τουλάχιστον για το μικρό φορτίο ( $q=90\text{kPa}$ ).

### **Γ. Στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος ( $135^\circ$ ):**

(α) Η διάρρηξη εκτρέπεται για την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής των κόκκων του εδάφους και αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής, χωρίς να υπάρχει ανάπτυξη δευτερεύουσας διάρρηξης. Για την «οριζόντια» δομή η διάρρηξη αναδύεται στην ίδια αριστερή πλευρά, μα εμφανίζεται και δευτερεύουσα διάρρηξη προς τη δεξιά πλευρά. Σε κάθε περίπτωση, η «οριζόντια» δομή απαιτείται συγκριτικά μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος για να αναδυθεί στην επιφάνεια.

(β) Το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης δεν επηρεάζεται από την αύξηση του φορτίου της κατασκευής, τουλάχιστον για την αναλυθείσα θέση κατασκευής.

(γ) Η στροφή της κατασκευής παρουσιάζει μεγάλο εύρος διακύμανσης, ανάλογα με το φορτίο και το επιλεγέν προσομοίωμα. Πρακτικώς, για  $d > 0.2\text{m}$ , όλες οι αναλύσεις δίνουν μη-αποδεκτές στροφές, ενώ είναι σαφής η αύξηση της στροφής με τη μετατόπιση του ρήγματος, ειδικά για το μικρό φορτίο  $q=90\text{kPa}$ , καθώς για το μεγάλο φορτίο  $q=180\text{kPa}$  αυτή η επίδραση είναι συγκριτικά λιγότερο έντονη. Η επίδραση του προσανατολισμού της δομής των κόκκων είναι σχετικώς μικρή στις στροφές της κατασκευής.

(δ) Η (μέση) καθίζηση της κατασκευής είναι σχεδόν ανεπηρέαστη από το μέγεθος του φορτίου της, με εξαίρεση ίσως τα μεγάλα φορτία ( $q=180\text{kPa}$ ) τα οποία μειώνουν ελαφρά τις καθιζήσεις για μεγάλες μετατοπίσεις ρήγματος  $d=1.0\text{m}$ .

(ε) Το απλουστευμένο προσομοίωμα υπερεκτιμά ποσοτικά την ευεργετική επίδραση του φορτίου της κατασκευής στη στροφή της, αλλά δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις προβλέψεις καθίζησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 7.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αριθμητική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής μέσω επιφανειακής στρώσης ανισοτροπικής άμμου. Η διερεύνηση έγινε με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε 2 διαστάσεις (θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης), χρησιμοποιώντας δύο μη-γραμμικά καταστατικά προσομοιώματα: ένα απλουστευμένο ελαστο-πλαστικό Mohr-Coulomb με χαλάρωση (Strain Softening, SS) και ένα σοφιστευμένο προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης (SANISAND, Papadimitriou et al. 2015) που λαμβάνει υπόψη την εξελισσόμενη ανισοτροπία δομής των κόκκων της άμμου. Υπογραμμίζεται ότι η έρευνα στη βιβλιογραφία υπέδειξε ότι η συντριπτική πλειονότητα αριθμητικών διερευνήσεων για το πρόβλημα διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης έχει υλοποιηθεί με απλουστευμένα προσομοιώματα, και έτσι η παρούσα εργασία προσπαθεί να καλύψει το σχετικό κενό, με έμφαση στην επίδραση της ανισοτροπίας του εδάφους. Οι αναλύσεις που εκτελέστηκαν ήταν ψευδοστατικές και επέβαλαν σταδιακά στη βάση της αμμώδους στρώσης τη μετατόπιση που αντιστοιχεί στον τύπο και τη γωνία βύθισης του ρήγματος.

Στο Κεφάλαιο 3 το απλουστευμένο προσομοίωμα βαθμονομήθηκε ώστε να αποδίδει, κατά το δυνατόν, τις προβλέψεις του SANISAND σε στραγγιζόμενες δοκιμές τριαξονικής θλίψης και απλής διάτμησης, το οποίο με τη σειρά του ήταν βαθμονομημένο για την άμμο Toyoura. Στη συνέχεια, διακριβώθηκε ικανοποιητική ακρίβεια από τη χρήση και των δύο προσομοιωμάτων σε ανάλυση δοκιμής φυγοκεντρική για τη διάρρηξη κανονικού ρήγματος μέσω στρώσης άμμου Toyoura σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (δηλαδή χωρίς κατασκευή στην επιφάνεια).

Για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ρήγματος-κατασκευής στο Κεφάλαιο 4 εκτελέστηκε σειρά παραμετρικών αναλύσεων για διαφορετικές θέσεις μιας επιφανειακής άκαμπτης κατασκευής (θεμέλιο μορφής λωρίδας, πλάτους  $B=4m$ ) υπό διάρρηξη κανονικού ( $\beta=45^\circ$ ), «κατακόρυφου» ( $\beta=85^\circ$ ) και ανάστροφου ( $\beta=135^\circ$ ) ρήγματος μέσω αμμώδους στρώσης πάχους 20m. Η διερεύνηση αυτή έγινε με το ως άνω βαθμονομημένο απλουστευμένο προσομοίωμα οδηγώντας στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Αν η κατασκευή βρίσκεται στο σταθερό τέμαχος, δεν επηρεάζει την ανάδυση της διάρρηξης για τις τρεις περιπτώσεις ρηγμάτων. Καθώς η κατασκευή πλησιάζει τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο, η διάρρηξη εκτρέπεται και παράλληλα η απόκριση της κατασκευής παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ως προς την στροφή και τη (μέση) καθίζησή της για όλα τα είδη ρήγματος. Για κανονικό ρήγμα, η μετατόπιση της κατασκευής στο κατακρήμνισμα οδηγεί στην εκτροπή της δευτερεύουσας διάρρηξης. Για τα άλλα δύο είδη ρηγμάτων, η διάρρηξη μένει ανεπηρέαστη όταν η κατασκευή τοποθετείται στο μετακινούμενο τέμαχος.
- Στο κανονικό ρήγμα, η κατασκευή στρέφεται εντός «αποδεκτών» ορίων ( $1/200$ ) για μικρή κατακόρυφη μετατόπιση ( $d < 0.2m$ ), ενώ για μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις  $d$ , το μέγεθος της στροφής διαφοροποιείται ανάλογα με τη θέση της



κατασκευής. Στις περιπτώσεις του «κατακόρυφου» και ανάστροφου ρήγματος, όταν η κατασκευή βρίσκεται στο σταθερό τέμαχος, τότε στρέφεται εντός «αποδεκτών» ορίων, ενώ πλησιάζοντας τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης υπό ελεύθερο πεδίο στρέφεται έντονα και ξεπερνάει τα «αποδεκτά» όρια. Η τοποθέτηση της κατασκευής στο μετακινούμενο τέμαχος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της στροφής της, η οποία θεωρείται πάλι «αποδεκτή» για την περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος, ενώ για το ανάστροφο ρήγμα συνεχίζει να είναι εκτός «αποδεκτών» ορίων.

- Αν η κατασκευή βρίσκεται στο κατακρήνισμα κανονικού ρήγματος παρουσιάζει καθιζήσεις μεγαλύτερες και από εκείνες του ρήγματος στο υπόβαθρο. Αντίστοιχα, αν η κατασκευή βρίσκεται στο μετακινούμενο τέμαχος «κατακόρυφου» και ανάστροφου ρήγματος, παρουσιάζει καθιζήσεις που τείνουν να εξισωθούν με τη μετατόπιση του ρήγματος.
- Θεωρώντας ως χαρακτηριστική μια θέση κατασκευής όπου η αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής είναι έντονη, μια αύξηση του φορτίου (από  $q = 90\text{kPa}$  σε  $180$  ή και  $270\text{kPa}$ ) προκαλεί αύξηση της στροφής και της (μέσης) καθίζησης της κατασκευής για κανονικό ρήγμα, χωρίς εκτροπή της διάρρηξης. Αντίστοιχα αποτελέσματα επιφέρει και στην περίπτωση του «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά με την διαφορά ότι εμφανίζεται και εκτροπή της διάρρηξης στην άλλη πλευρά της κατασκευής. Αντιθέτως, για ανάστροφο ρήγμα, η αύξηση του φορτίου κατασκευής μειώνει τόσο τη στροφή όσο και τη (μέση) καθίζηση της κατασκευής, χωρίς εκτροπή της διάρρηξης.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5 επαναλήφθηκαν επιλεγμένες αναλύσεις του Κεφαλαίου 4, αλλά με χρήση του σοφιστευμένου προσομοιώματος SANISAND. Ο στόχος ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους για συνθήκες διαφορετικές από τις συνθήκες βαθμονόμησης του απλουστευμένου προσομοιώματος που έγινε στο Κεφάλαιο 3, αλλά πάντα για τη συνήθη «οριζόντια» δομή κόκκων (που δημιουργείται λόγω βαρύτητας), και οδήγησε στα κάτωθι συμπεράσματα:

- Το απλουστευμένο προσομοίωμα παρουσιάζει αντίστοιχη ακρίβεια με το σοφιστευμένο σε διαρρήξεις κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, χωρίς την ύπαρξη επιφανειακής κατασκευής. Όμως, για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, το σοφιστευμένο προσομοίωμα απαιτεί μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για ανάδυση της ίδιας διάρρηξης.
- Ύπαρξη κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους επιφέρει έντονες αλλαγές στην διάρρηξη κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, με τα δύο προσομοιώματα να δίνουν διαφορετική εικόνα εκτροπής της διάρρηξης συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο. Αντίθετα, για κατασκευή υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος, τα δύο προσομοιώματα δίνουν συγκρίσιμη εικόνα διάρρηξης, με το σοφιστευμένο να απαιτεί, και πάλι, μεγαλύτερη μετατόπιση ρήγματος για την ανάδυσή της.
- Για τη χαρακτηριστική θέση κατασκευής, το σοφιστευμένο προσομοίωμα υποδεικνύει ότι η αύξηση του φορτίου κατασκευής οδηγεί σε εκτροπή της διάρρηξης στην αριστερή πλευρά της κατασκευής σε κανονικό και «κατακόρυφο» ρήγμα, καθώς και δημιουργία αβαθών δευτερευουσών διαρρήξεων κάτω από την κατασκευή. Αντίθετα, η αύξηση του φορτίου κατασκευής δεν επηρεάζει την αλληλεπίδραση της κατασκευής με τη διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.

- Συγκριτικά, η χρήση του απλουστευμένου προσομοιώματος υποεκτιμά και υπερεκτιμά την επίδραση του φορτίου κατασκευής σε κανονικό και ανάστροφο ρήγμα, ενώ δίνει συγκρίσιμη επίδραση για «κατακόρυφο» ρήγμα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 έγινε αποκλειστική χρήση του προσομοιώματος SANISAND για τη μελέτη της επίδρασης του προσανατολισμού της δομής των κόκκων στην αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής. Έτσι, οι σχετικές αναλύσεις του Κεφαλαίου 5 για «οριζόντια» δομή κόκκων επαναλήφθηκαν για «κατακόρυφη» δομή κόκκων, δηλαδή τον προσανατολισμό που προκύπτει αν η «οριζόντια» δομή κόκκων περιστραφεί κατά 90°. Η «κατακόρυφη» δομή κόκκων θεωρείται ακραία, αλλά υιοθετήθηκε εδώ για να υποδειχθεί το εύρος της πιθανής επίδρασης της ανισοτροπίας της άμμου στο υπό μελέτη πρόβλημα. Οι συγκρίσεις αυτές υπέδειξαν ότι:

- Για κατασκευή με μικρό φορτίο ( $q=90\text{kPa}$ ), η θέση ανάδυσης της διάρρηξης κανονικού ρήγματος δεν επηρεάζεται από τον προσανατολισμό δομής των κόκκων. Ωστόσο, για «κατακόρυφη» δομή κόκκων, παρατηρούνται δευτερεύουσες διαρρήξεις κάτω από την κατασκευή, ενώ η ανάδυση της διάρρηξης απαιτεί μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση ρήγματος. Σε «κατακόρυφο» ρήγμα, η διάρρηξη αναδύεται στην ίδια πλευρά της κατασκευής (με  $q=90\text{kPa}$ ) και για τους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων, απλά για «κατακόρυφη» δομή η θέση ανάδυσης εκτρέπεται ελάχιστα προς το μετακινούμενο τέμαχος. Σε ανάστροφο ρήγμα, η διάρρηξη εκτρέπεται για την περίπτωση της «κατακόρυφης» δομής κόκκων της άμμου και αναδύεται στην αριστερή πλευρά της κατασκευής (με  $q=90\text{kPa}$ ), χωρίς να υπάρχει ανάπτυξη δευτερεύουσας διάρρηξης, ενώ για την «οριζόντια» δομή κόκκων απαιτείται μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση του ρήγματος για την ανάδυση της διάρρηξης.
- Η αύξηση του φορτίου κατασκευής (από  $q = 90\text{kPa}$  σε  $180\text{kPa}$ ) εκτρέπει τη διάρρηξη προς το σταθερό τέμαχος (αριστερή πλευρά κατασκευής) και δημιουργεί δευτερεύουσες διαρρήξεις κάτω από αυτή, και για τους δύο προσανατολισμούς κόκκων. Αντιθέτως, το φορτίο κατασκευής δεν επηρεάζει τη διάρρηξη του ανάστροφου ρήγματος και για τους δύο προσανατολισμούς δομής κόκκων, ένα αποτέλεσμα μη-επίδρασης που μάλλον οφείλεται στο ότι η επιλεγείσα χαρακτηριστική θέση κατασκευής δεν προκαλεί έντονη αλληλεπίδραση με τη διάρρηξη (είχε επιλεγεί με βάση το απλουστευμένο προσομοίωμα) και στο ότι απαιτείται μεγαλύτερη μετατόπιση για την ανάδυση διάρρηξης σε ανάστροφα ρήγματα συγκριτικά με τους άλλους τύπους ρηγμάτων.

Τέλος, επικεντρώνοντας στην επίδραση της κατακόρυφης μετατόπισης ρήγματος στη (μέση) καθίζηση και τη στροφή της άκαμπτης κατασκευής, το σύνολο των αναλύσεων οδηγεί στα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- Σε ό,τι αφορά τη στροφή της κατασκευής, αυτή αυξάνει με τη μετατόπιση του κανονικού ρήγματος, ενώ για «κατακόρυφο» ρήγμα αυτό συμβαίνει μόνο για το μικρό φορτίο ( $q=90\text{kPa}$ ). Για ανάστροφο ρήγμα, η στροφή είναι εν γένει μεγαλύτερη, και αυξάνει με τη μετατόπιση του ρήγματος.
- Η (μέση) καθίζηση της κατασκευής αυξάνει με τη μετατόπιση κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά δεν επηρεάζεται από τη μετατόπιση ανάστροφου

ρήγματος. Το φορτίο κατασκευής αυξάνει τις καθιζήσεις της, μόνο στην περίπτωση κανονικού ρήγματος.

- Οι αναλύσεις με το απλουστευμένο προσομοίωμα ποσοτικά μάλλον υπερεκτιμούν τις καθιζήσεις της κατασκευής υπό διάρρηξη κανονικού και «κατακόρυφου» ρήγματος, αλλά έχουν αποδεκτή ακρίβεια για ανάστροφο ρήγμα. Σε όρους στροφής της κατασκευής, το απλουστευμένο προσομοίωμα προβλέπει λανθασμένα απομείωση της στροφής για μεγάλες μετατοπίσεις κανονικού ρήγματος, ενώ αντίθετα για «κατακόρυφο» ρήγμα οι προβλέψεις είναι συγκρίσιμες με εκείνες του σοφιστευμένου προσομοιώματος. Τέλος, το απλουστευμένο προσομοίωμα υπερεκτιμά ποσοτικά την ευεργετική επίδραση του φορτίου της κατασκευής στη στροφή της, υπό διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η αλληλεπίδραση ρήγματος-κατασκευής μέσω στρώσης ανισοτροπικού εδάφους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, το εύρος διερεύνησης των οποίων καθορίζει και τους περιορισμούς της παρούσας έρευνας. Συγκεκριμένα, διερεύνησε:

- Ρήγματα: με γωνίες βύθισης  $\beta = 45^\circ, 85^\circ$  και  $135^\circ$  για κανονικό, πρακτικώς «κατακόρυφο» και ανάστροφο ρήγμα, υπό κατακόρυφη μετατόπιση  $d$  από 0 έως 1.0m.
- Στρώση: με πάχος στρώσης ίση με 20m, με σχετική πυκνότητα ίση με 65%.
- Ανισοτροπία εδάφους: με ένταση που έχει αρχικό μέτρο τανυστή δομής  $F_{in} = 0.5$  (κυμαίνεται από 0.0 έως 1.0) και δύο ακραίες περιπτώσεις προσανατολισμού της δομής που αντιστοιχεί σε «οριζόντια» και «κατακόρυφη» δομή κόκκων, όπου η πρώτη προκύπτει από τη βαρύτητα (όπως συμβαίνει σε ιζηματογένεση) και η δεύτερη από περιστροφή της πρώτης κατά  $90^\circ$
- Κατασκευή: δισδιάστατη (μορφής λωρίδας) με πλάτος ίσο με 4m (20% του πάχους της στρώσης) που θεωρήθηκε άκαμπτη με «μηδενικό» ύψος και χωρίς δυνατότητα αποκόλλησής της από το έδαφος, ενώ το φορτίο της κυμάνθηκε από  $q = 90$  kPa έως 180kPa. Η επίδραση της κατασκευής διερευνήθηκε με το σοφιστευμένο προσομοίωμα μόνο για χαρακτηριστικές θέσεις που εντοπίστηκαν μέσω αναλύσεων με το απλουστευμένο προσομοίωμα.

Σε σχέση με τους ανωτέρω παράγοντες, γίνονται τα παρακάτω σχόλια που ουσιαστικά αντικατοπτρίζουν και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο:

- Οι γωνίες βύθισης θεωρούνται ενδεικτικές για τους 3 τύπους ρηγμάτων και περαιτέρω διερεύνηση αυτών δεν κρίνεται αναγκαία. Αντιθέτως, η μετατόπιση ρήγματος θα ήταν χρήσιμο να ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση ανάστροφων ρηγμάτων.
- Το πάχος της στρώσης θα επηρεάσει τα συμπεράσματα της ανωτέρω εργασίας, και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Το ίδιο ισχύει και για τη σχετική πυκνότητα της άμμου, καθώς εδώ διερευνήθηκε μια μέση πυκνότητας άμμος.
- Η ένταση της ανισοτροπίας κρίνεται ως μια μέση τιμή πιθανού εύρους, αλλά η διερεύνηση των δύο ακραίων προσανατολισμών δομής κόκκων θεωρείται ως επαρκής διερεύνηση για πρακτικές εφαρμογές.

- Το πλάτος της κατασκευής επηρεάζει τα συμπεράσματα της ανωτέρω εργασίας, ειδικά ως προς το θεωρούμενο πάχος της στρώσης, και περαιτέρω διερεύνηση αυτού θεωρείται χρήσιμη. Το φορτίο της κατασκευής αντιστοιχεί σε μικρό και μέσο φορτίο ως προς τη φέρουσα ικανότητά της, ενώ πιο μεγάλα φορτία που φέρνουν την κατασκευή πιο κοντά στη στατική αστοχία θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθούν. Η ακαμψία της κατασκευής είναι μια εύλογη παραδοχή, όταν τουλάχιστον τα πλάτη κατασκευής είναι σχετικά μικρά. Τέλος, το «μηδενικό» ύψος της κατασκευής και η μη-δυνατότητα αποκόλλησής της από το έδαφος είναι απλουστεύσεις που θα επηρεάσουν την απόκριση (λόγω φαινομένων P-Δ) μόνο σε περιπτώσεις μεγάλων στροφών.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anastasopoulos I., Callerio A., Bransby M.F., Davies M.C.R., A. El Nahas, E. Faccioli, G. Gazetas, A. Masella, R. Paolucci, A. Pecker, and E. Rossignol (2008), “Numerical analyses of fault–foundation interaction”. *Bull Earthquake Eng.*, Volume 6, Issue 4, pp 645–675
- Anastasopoulos, I., Gazetas, G, Bransby, F., Davies, M.C.R; and El Nahas, A. (2009), “Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 125(3), 359-370.
- Anastasopoulos, I. (2005). “Fault rupture-soil-foundation-structure interaction”, Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, National Technical Univ., Athens, Greece.
- Anastasopoulos I., and Gazetas G. (2007), *Foundation-Structure Systems over a Rupturing Normal Fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 Earthquake*, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (3), pp. 253–275.
- Athanasopoulos, G., Leonidou, E., and Pelekis, P. (2007), “Fault-rupture related hazard to engineered structures-parametric numerical analyses.” *Proceedings, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*
- Bransby, F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka S., (2008a), "Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction." *Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue: Integrated approach to fault rupture-and soil-foundation interaction, Vol.6, No.4*, pp.585-605
- Bransby, F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., and Nagaoka S., (2008b), "Centrifuge modeling of normal fault-foundation interaction." *Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue: Integrated approach to fault rupture-and soil-foundation interaction, Vol.6, No.4*, pp.607-628.
- Cai Q.P., and C. W. W. Ng (2016), “Centrifuge Modeling of Pile-Sand Interaction Induced by Normal Faulting”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 04016046.
- Jabbari, M., Nabizadeh, A., and Baziar, M. H. (2012), “Evaluation of Fault–Foundation Interaction, Using Numerical Studies”. *15<sup>th</sup> World Conferences on Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisbon
- Li, X.S., and Dafalias, Y.F. (2012). “Anisotropic critical state theory: Role of fabric.”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 138(3): 263–275
- Li, X.S., and Dafalias, Y.F. (2000). “Dilatancy for cohesionless soils”, *Geotechnique*, 50(4):449–460
- Loukidis D., Bouckovalas G. D., 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. and Shafiee A. (2010): “Experimental Investigation of Reverse Fault Rupture – Rigid Shallow Foundation Interaction”, *International Journal of Civil Engineering*. Vol.8, No. 2
- Papadimitriou A. G., Dafalias Y. F., and Li X. S. (2015) “Sand model within anisotropic critical state theory with evolving fabric”, *Proceedings, International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, 2, p. 627-632, Cambridge 2014.

- Skempton AW, and MacDonald DH (1956), “Allowable settlement of buildings”. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part III, Vol. 5., p. 727–68.
- Theliriti P. (2017): “Numerical Simulation of the Fault Rupture Propagation Through Anisotropic Soil”, Diploma Thesis, School of Civil Engineering, National Technical Univ., Athens, Greece (in Greece),
- Wahls H.E. (1990), “Synthesis of Highway Practice 159: Design and Construction of Bridge Approaches”, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Αναστασόπουλος Ι., Γεωργαράκος Τ., Δρόσος Β., και Γκαζέτας Γ. (2008): “Αλληλεπίδραση Ρήγματος–Επιφανειακής Θεμελίωσης: Προσομοίωση στη Νέα Εργαστηριακή Εγκατάσταση του ΕΜΠ”, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 1847.

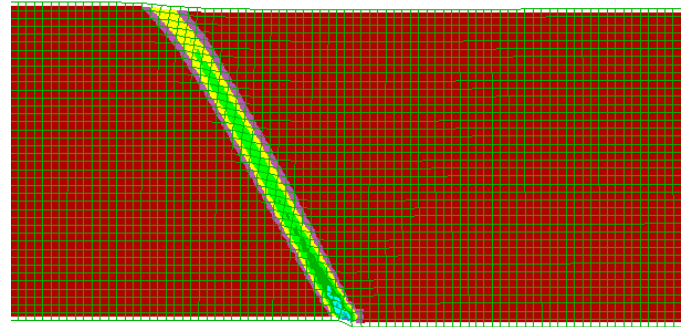
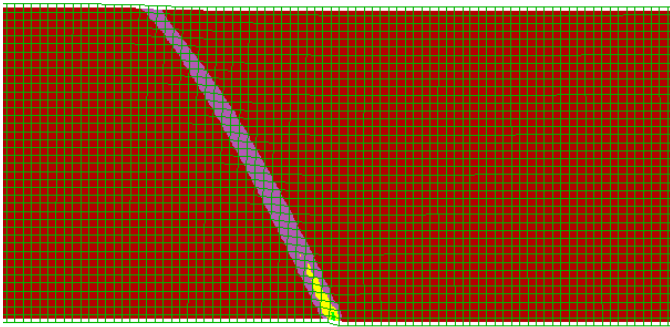




# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

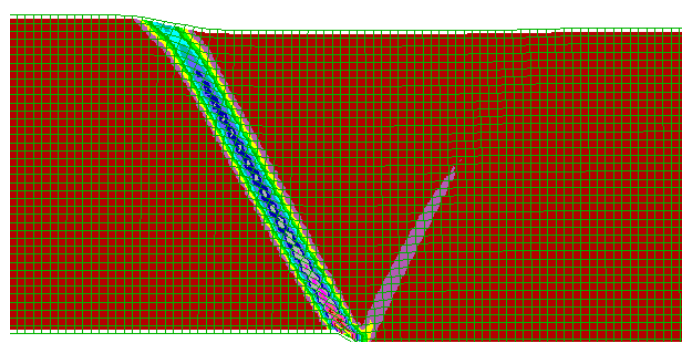
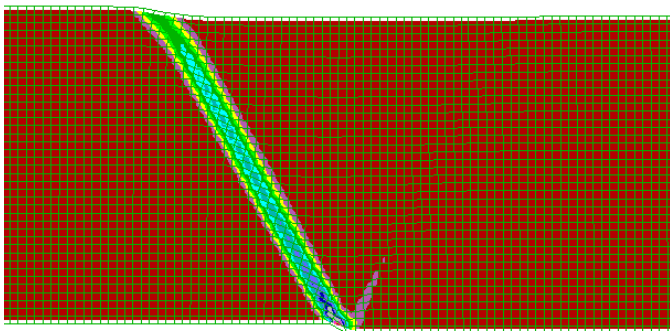
d=0.2m

d=0.4m

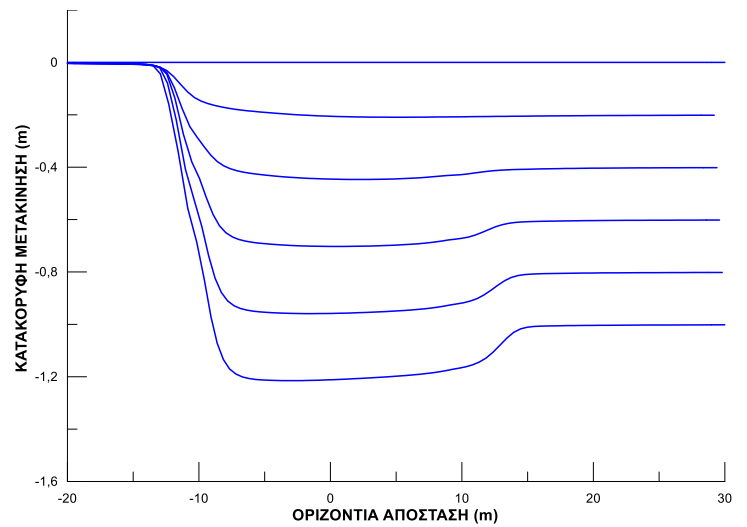
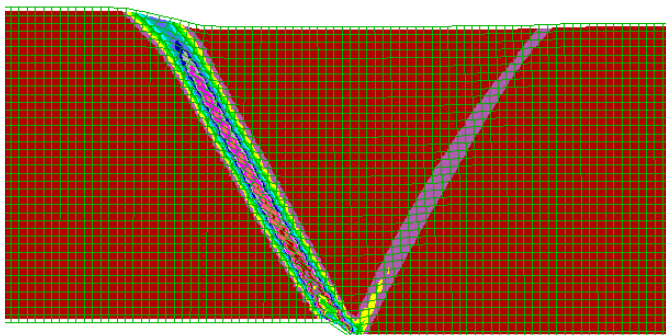


d=0.6m

d=0.8m



d=1.0m

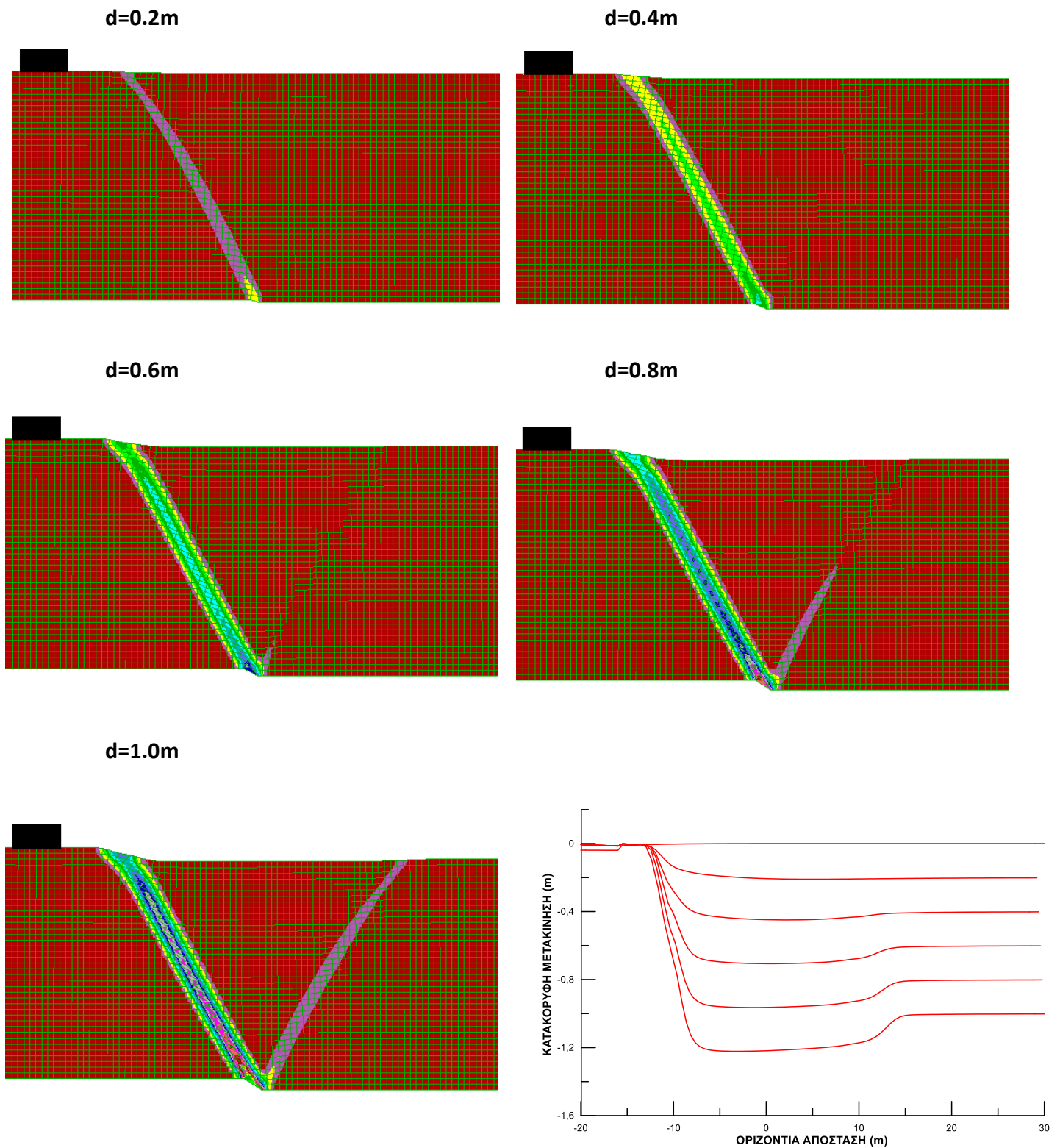


Max. shear strain increment

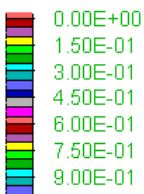


Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 1.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για ελεύθερο πεδίο και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .

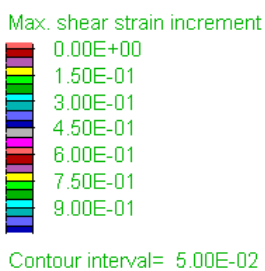
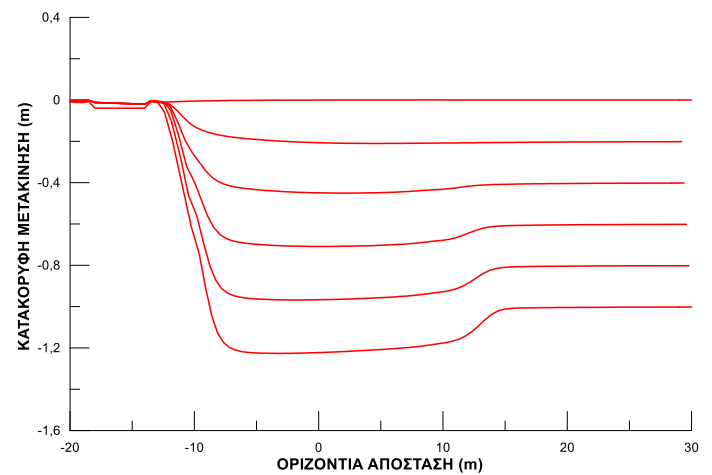
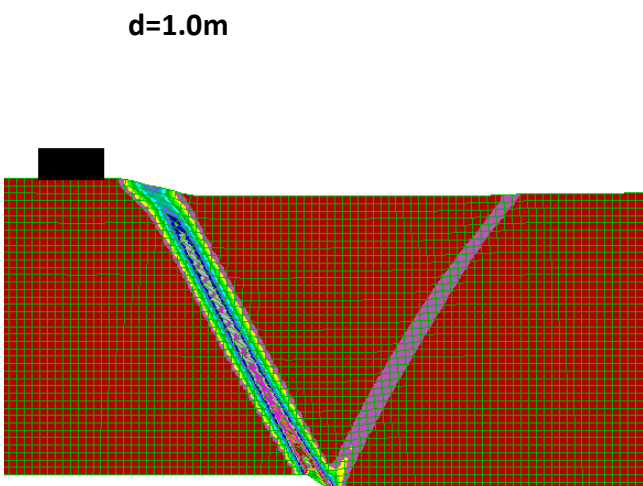
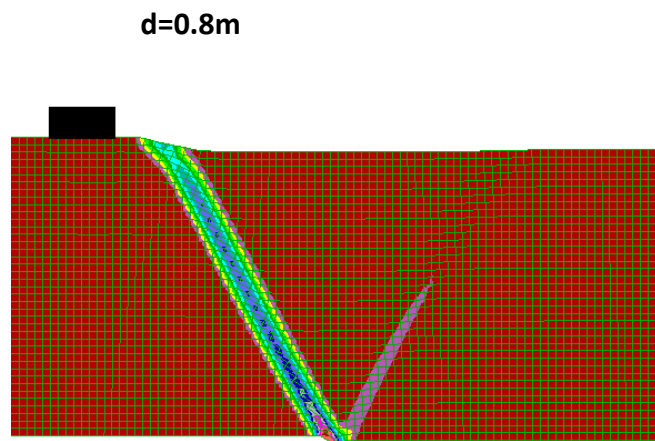
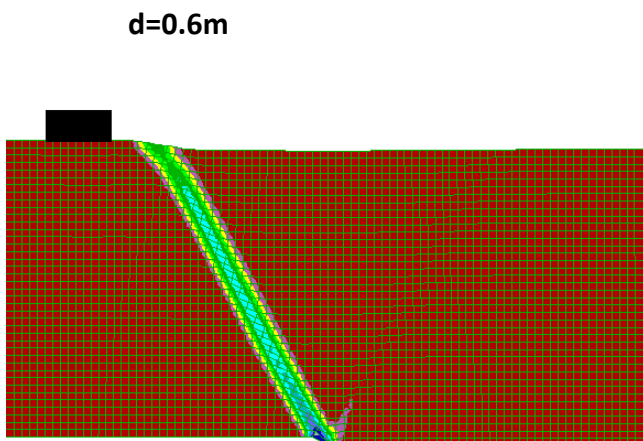
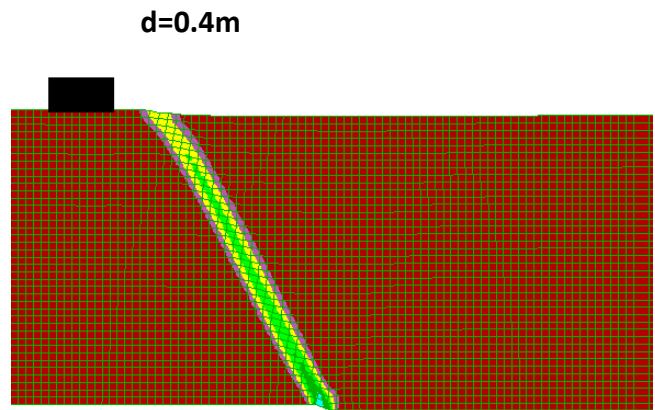
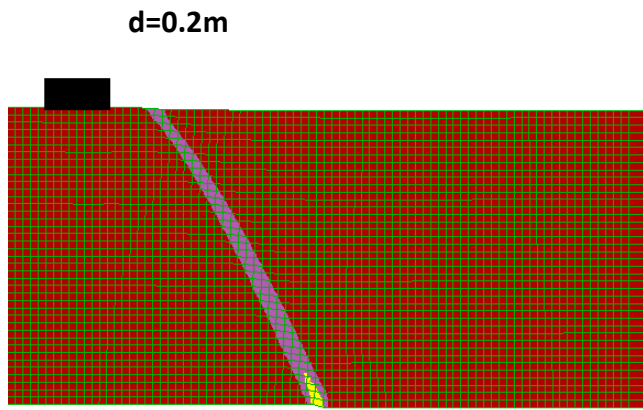


Max. shear strain increment

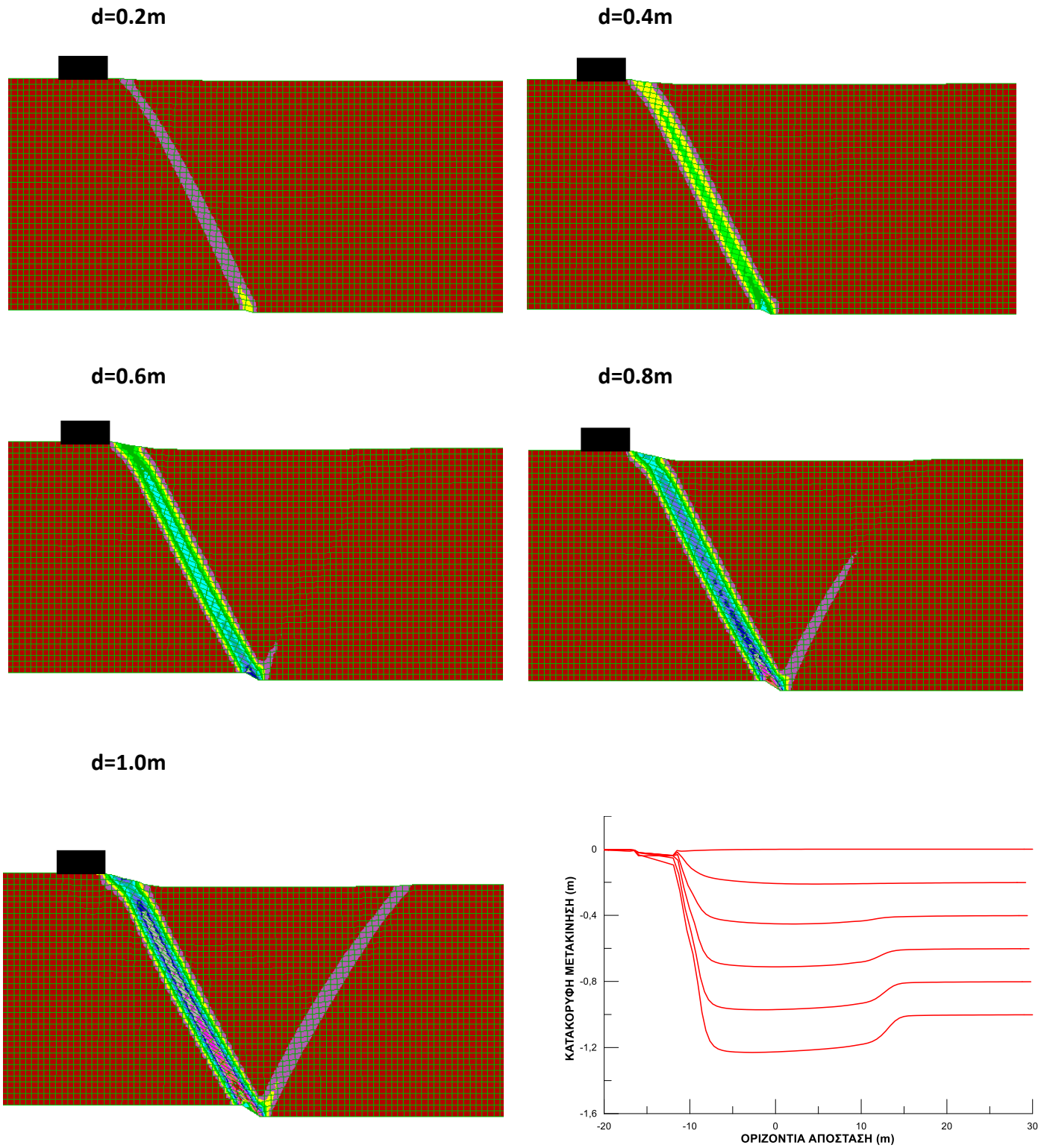


Contour interval= 5.00E-02

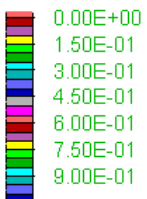
**Σχήμα 2.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=18\text{m}$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .



**Σχήμα 3.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=16m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



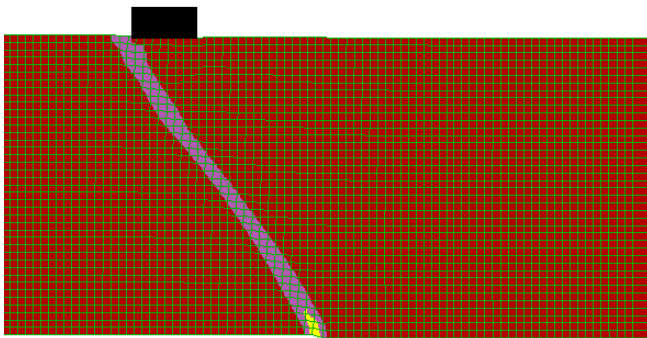
Max. shear strain increment



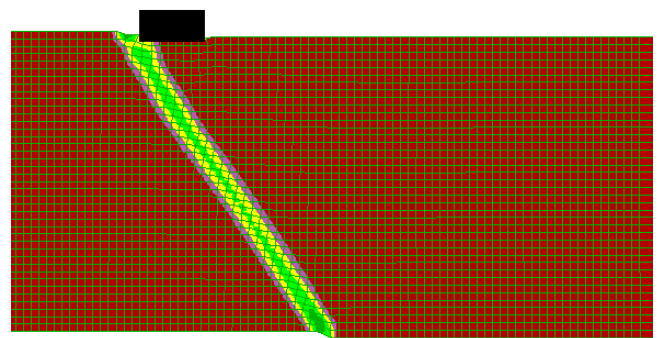
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 4.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=14\text{m}$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .

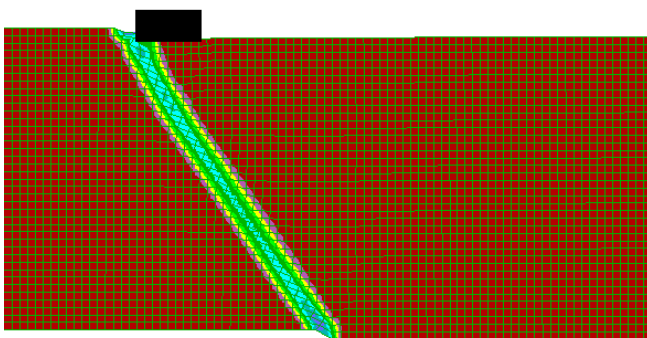
d=0.2m



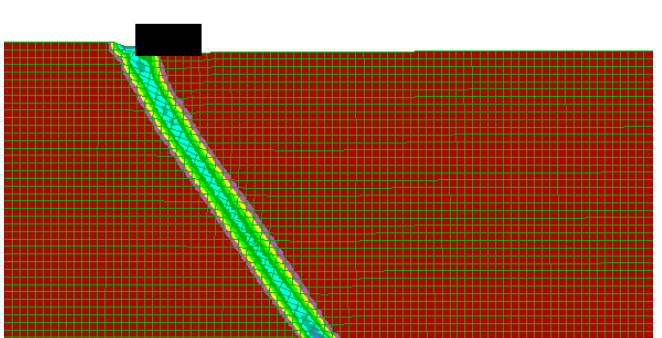
d=0.4m



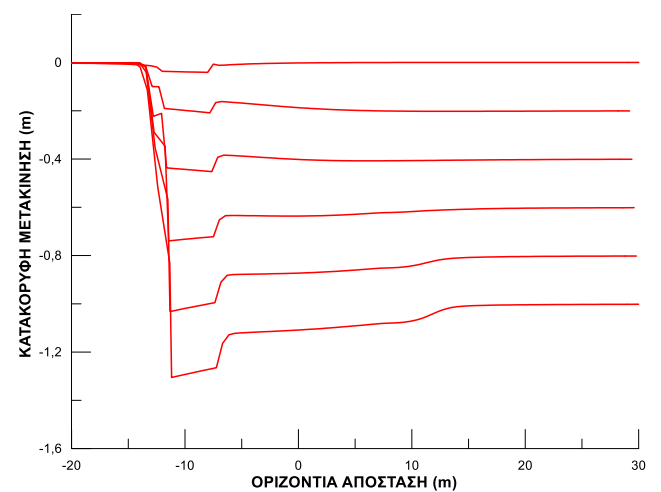
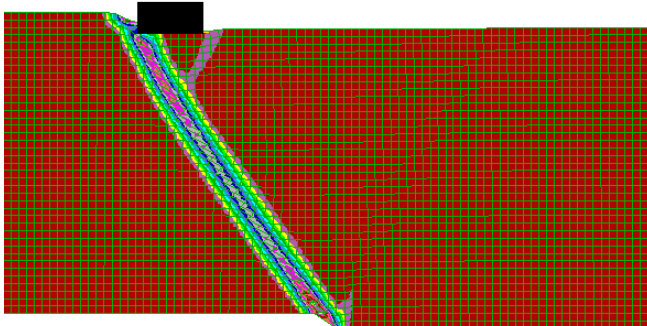
d=0.6m



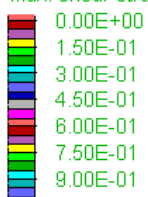
d=0.8m



d=1.0m



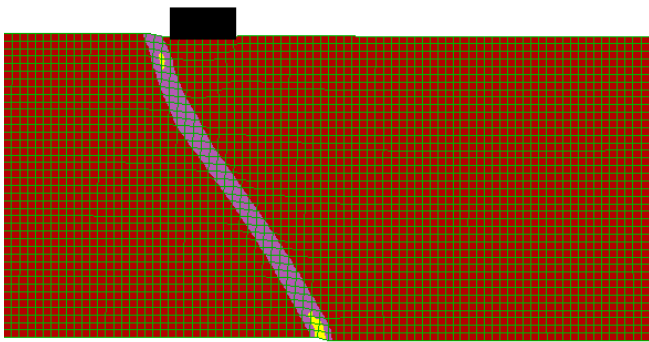
Max. shear strain increment



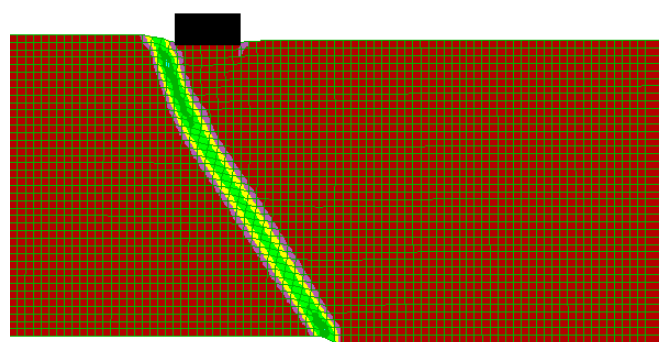
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 5.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=10\text{m}$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .

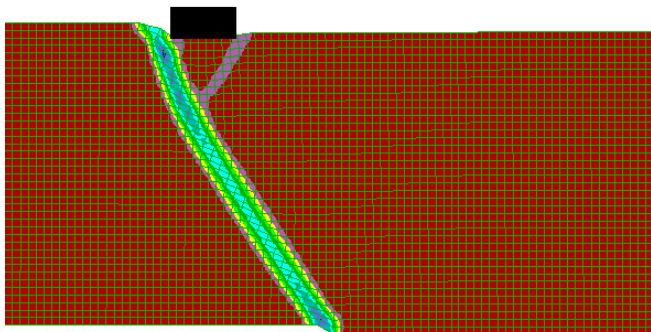
d=0.2m



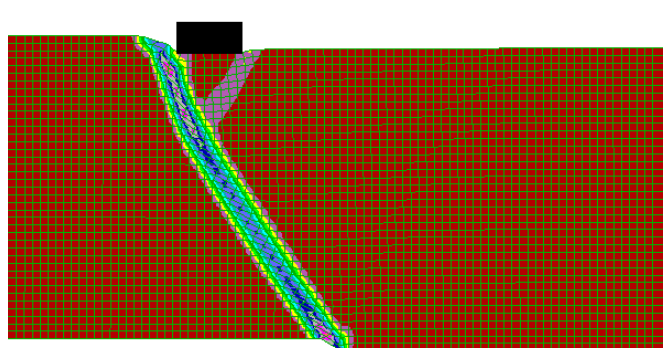
d=0.4m



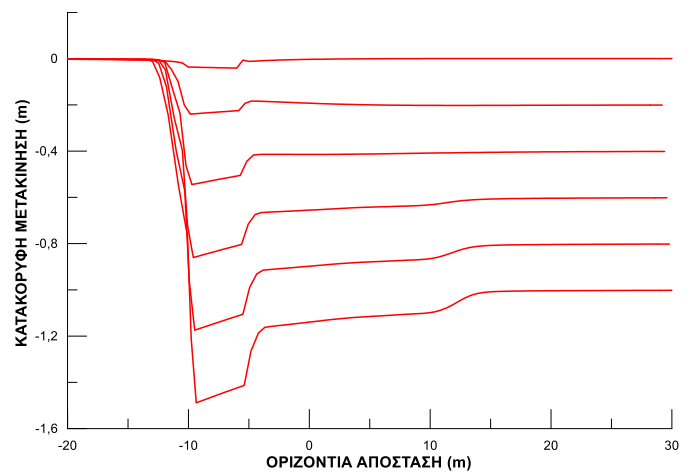
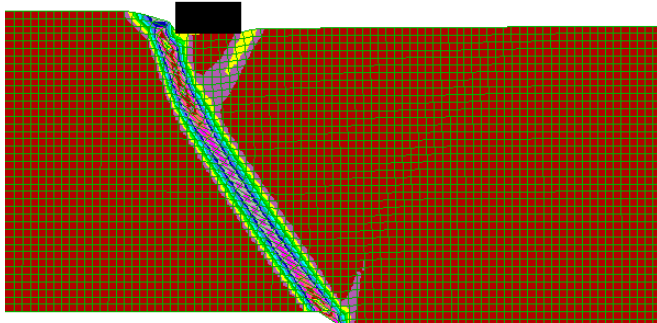
d=0.6m



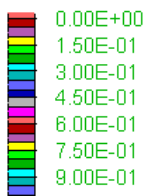
d=0.8m



d=1.0m



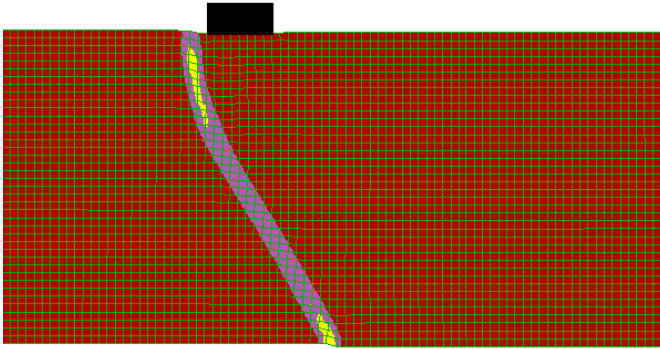
Max. shear strain increment



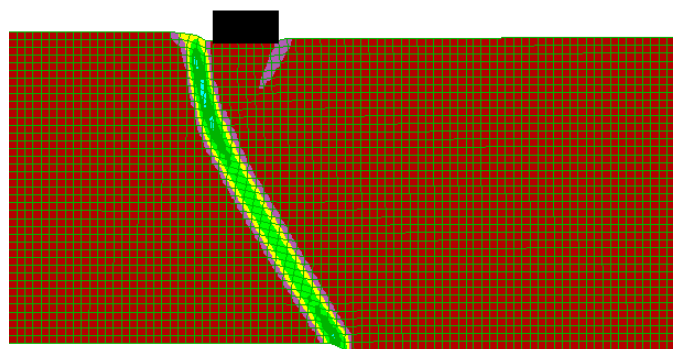
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 6.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=8m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

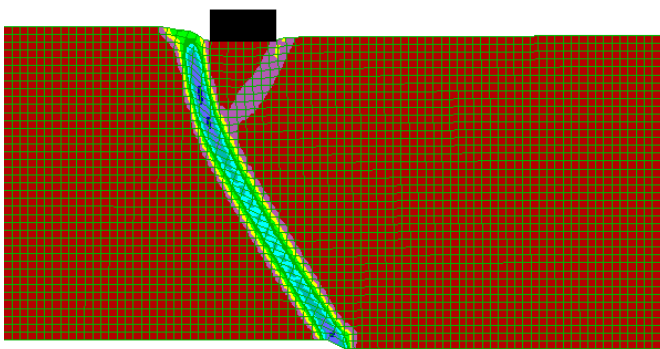
d=0.2m



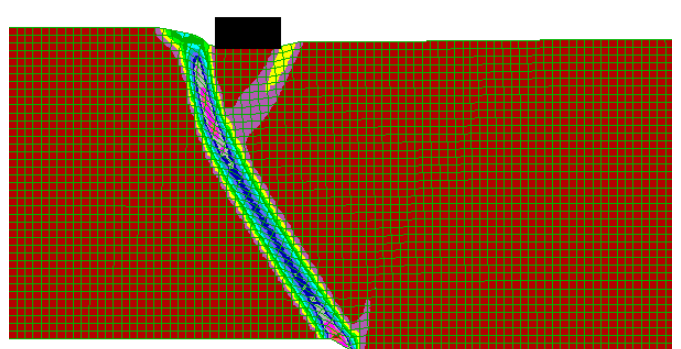
d=0.4m



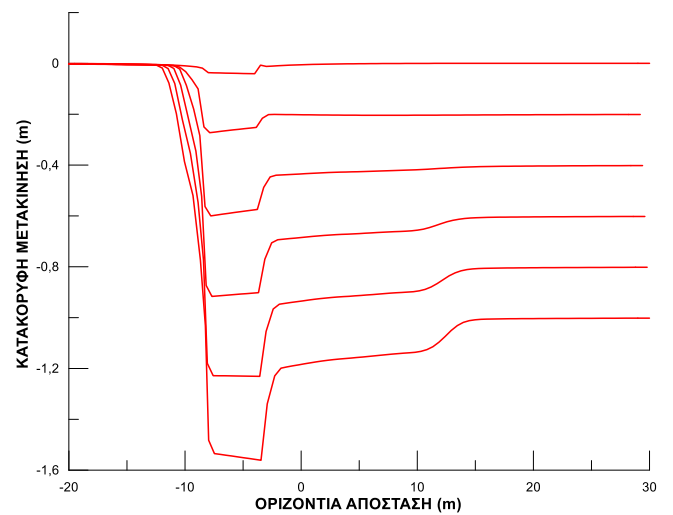
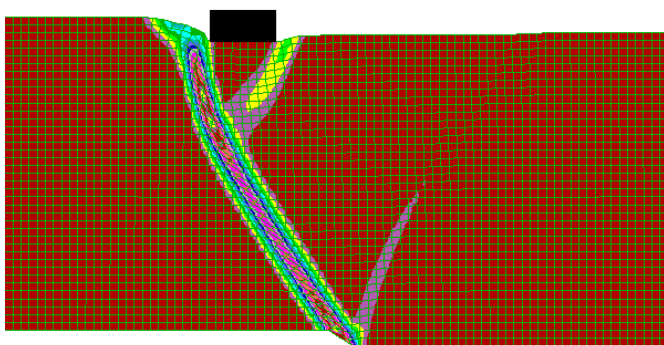
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



Max. shear strain increment

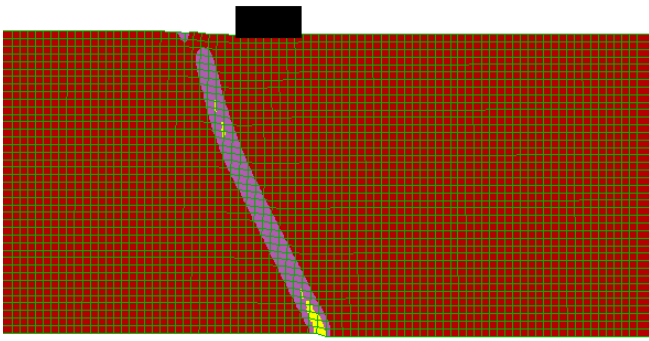


Contour interval= 5.00E-02

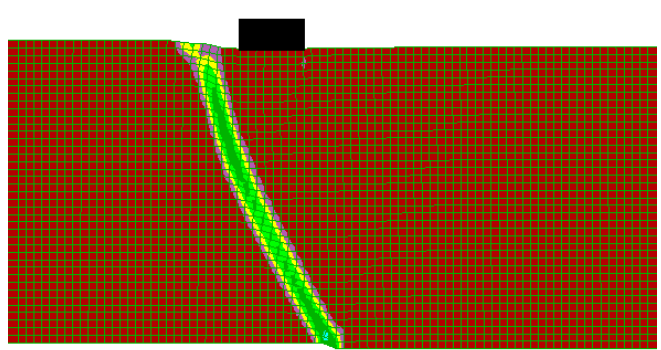
**Σχήμα 7.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=6m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



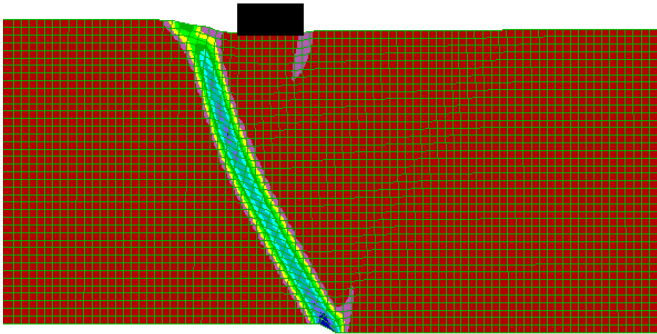
d=0.2m



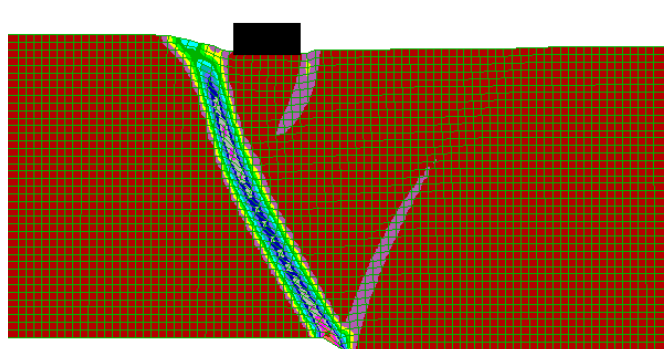
d=0.4m



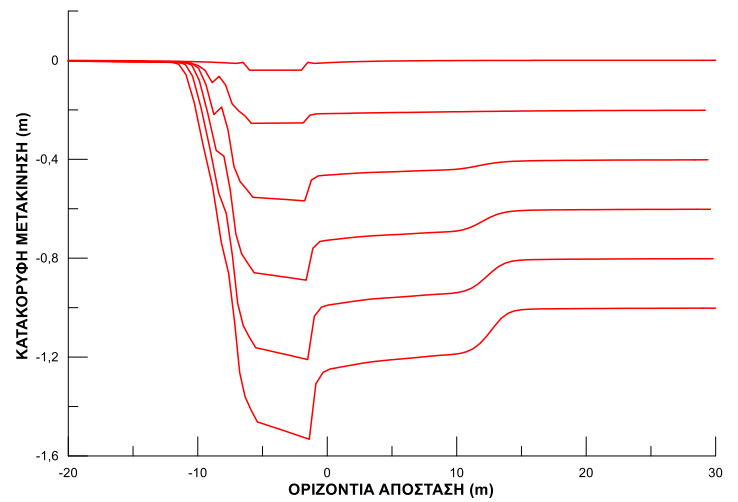
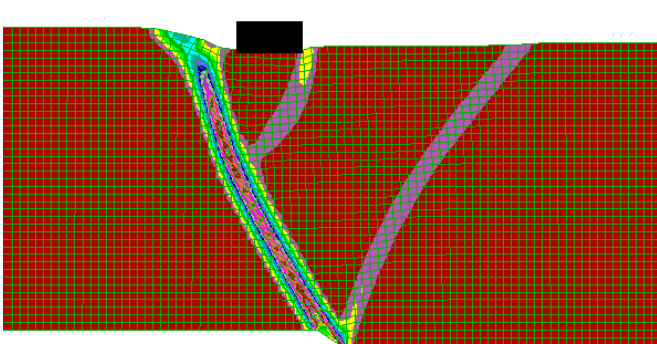
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



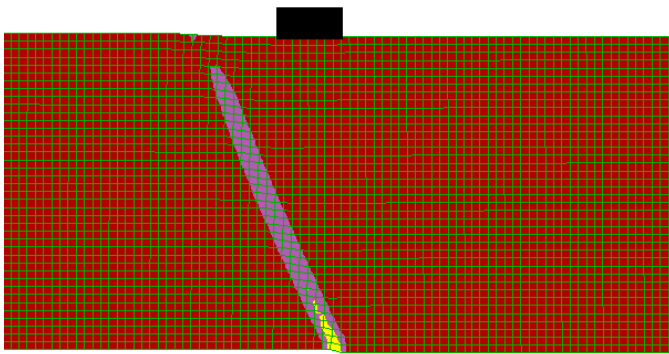
Max. shear strain increment



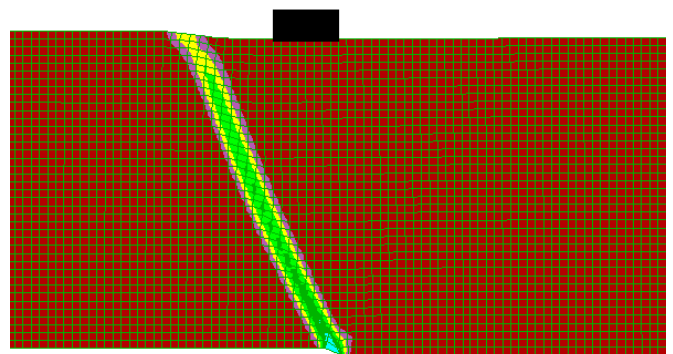
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 8.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=4m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

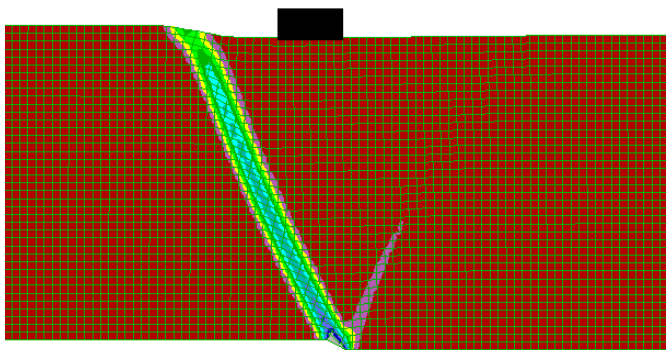
d=0.2m



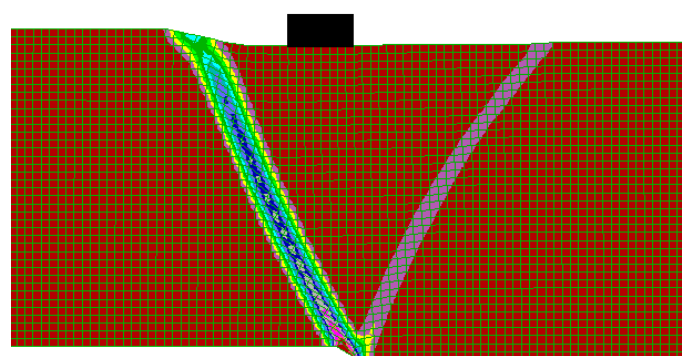
d=0.4m



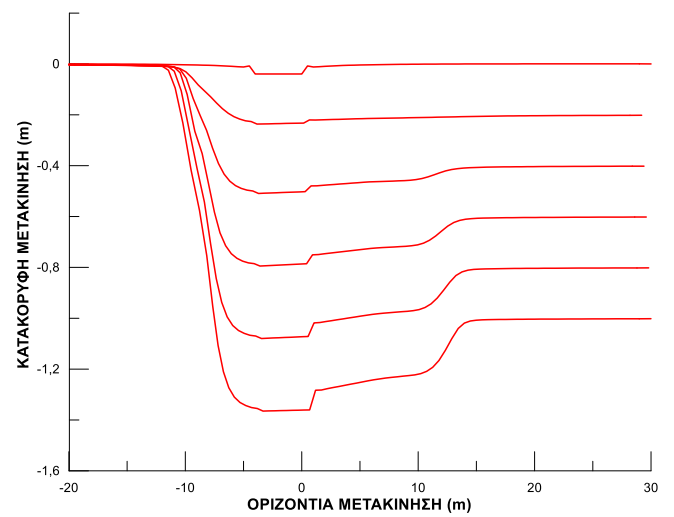
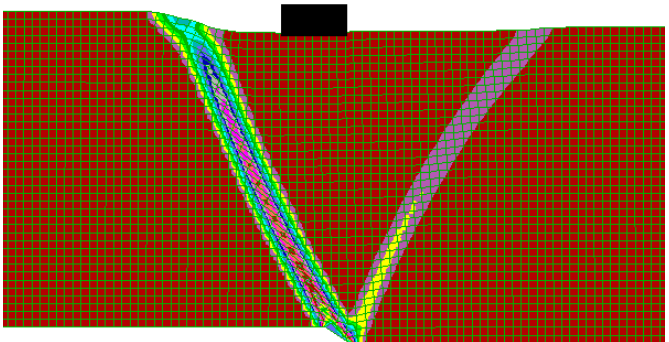
d=0.6m



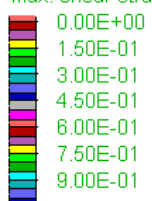
d=0.8m



d=1.0m



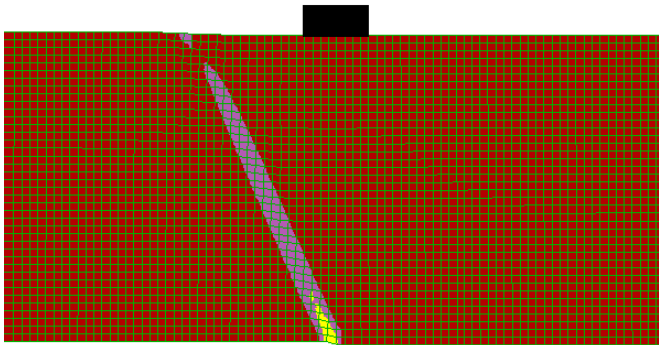
Max. shear strain increment



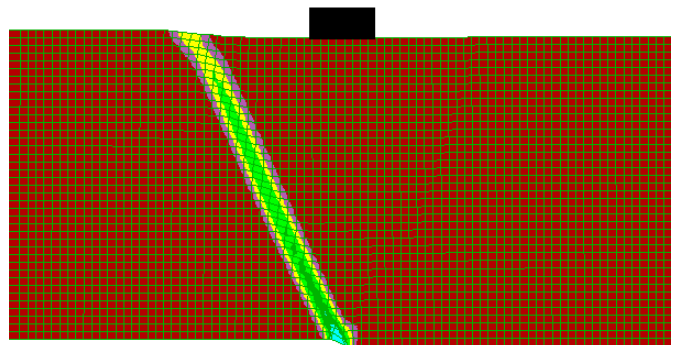
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 9.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=2m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

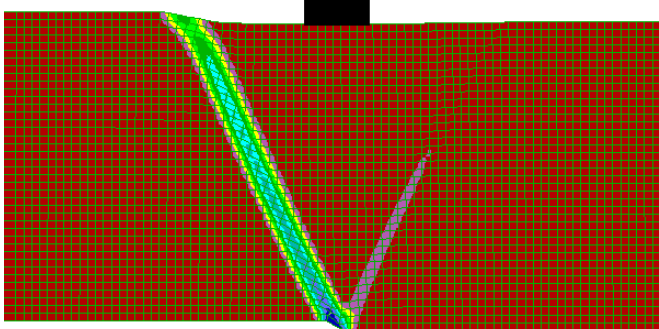
d=0.2m



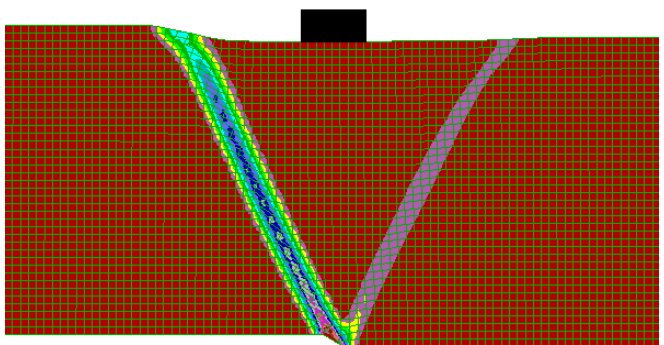
d=0.4m



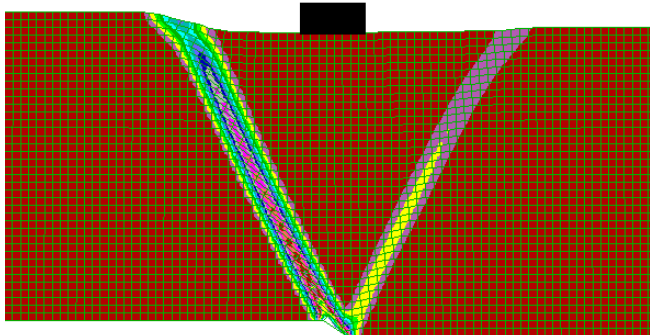
d=0.6m



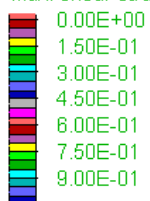
d=0.8m



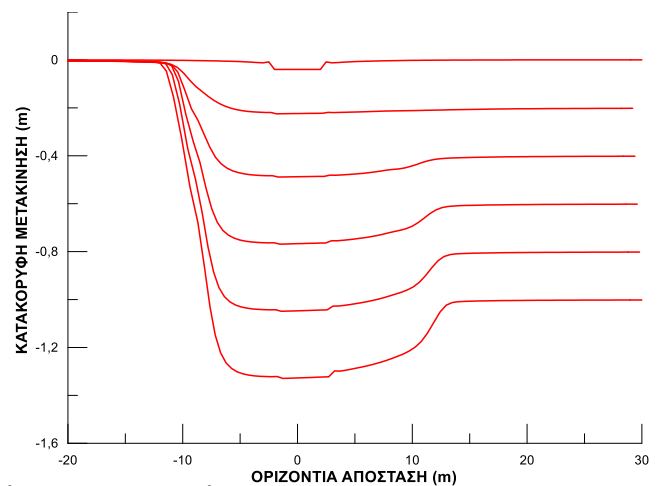
d=1.0m



Max. shear strain increment

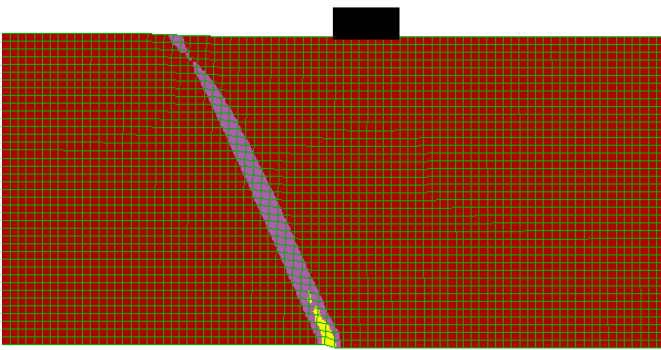


Contour interval= 5.00E-02

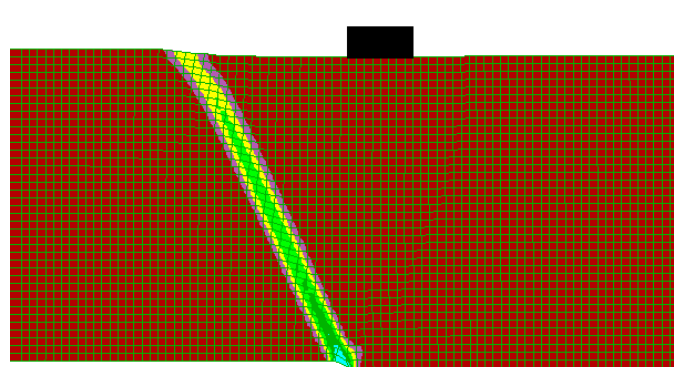


**Σχήμα 10.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=0m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

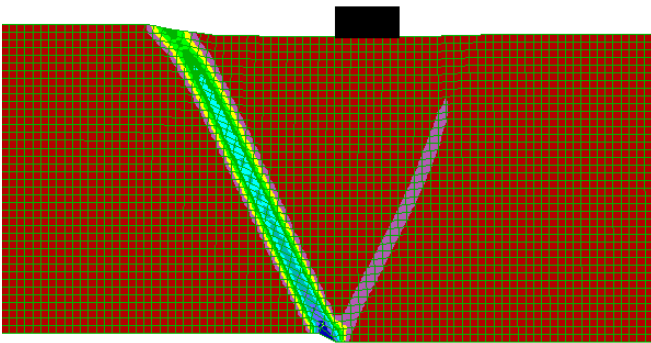
d=0.2m



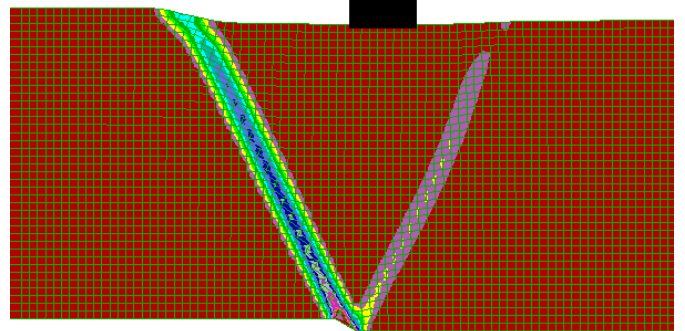
d=0.4m



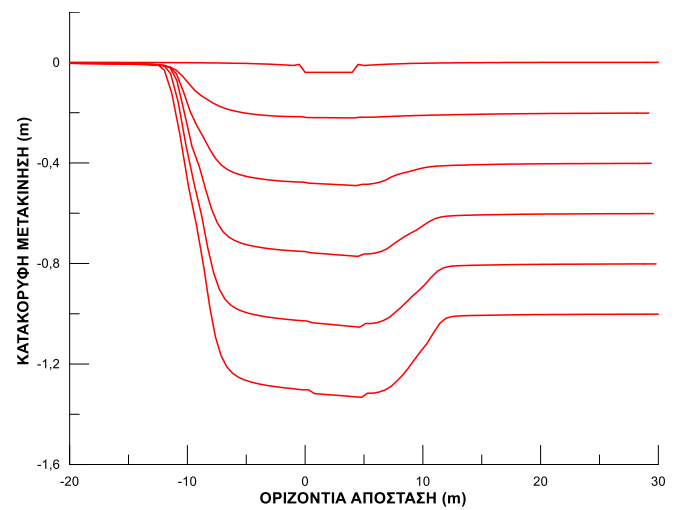
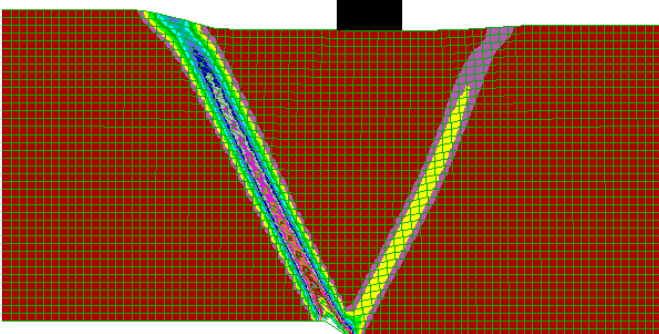
d=0.6m



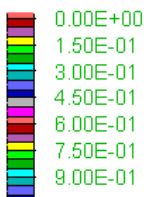
d=0.8m



d=1.0m



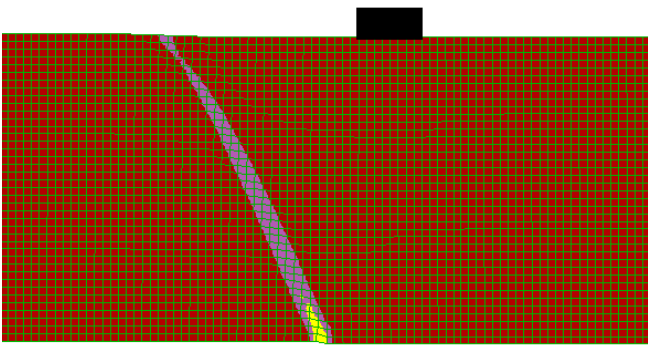
Max. shear strain increment



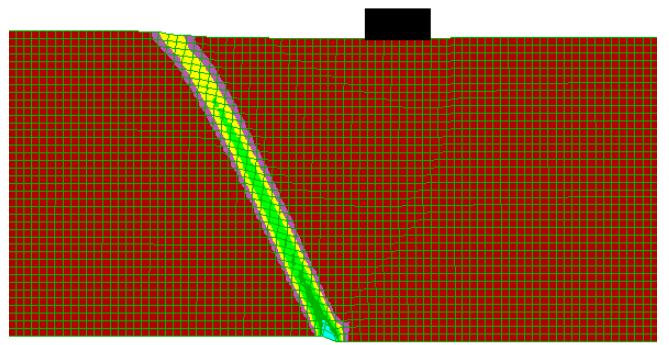
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 11.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=-2m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

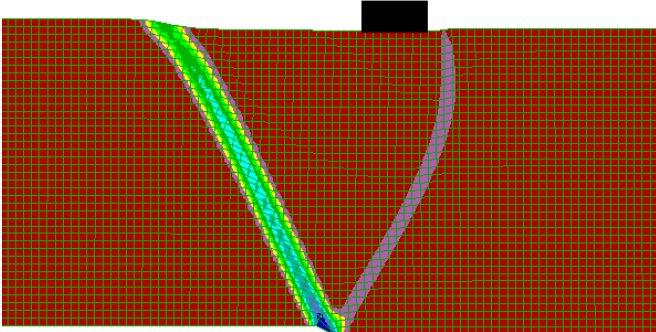
d=0.2m



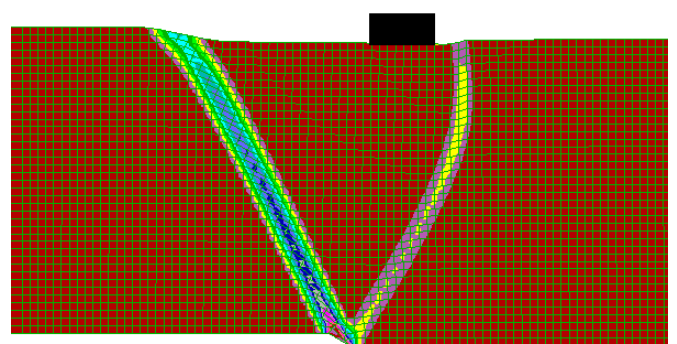
d=0.4m



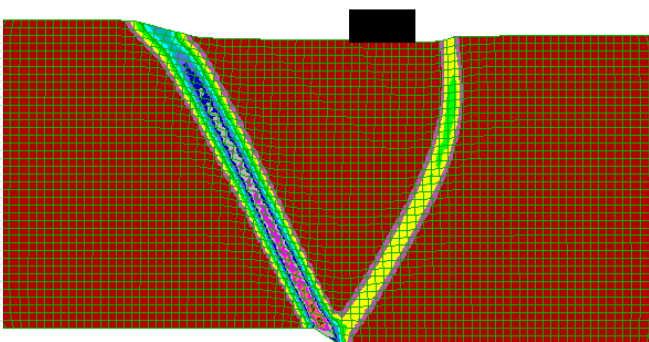
d=0.6m



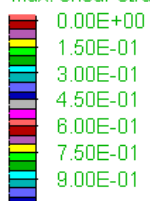
d=0.8m



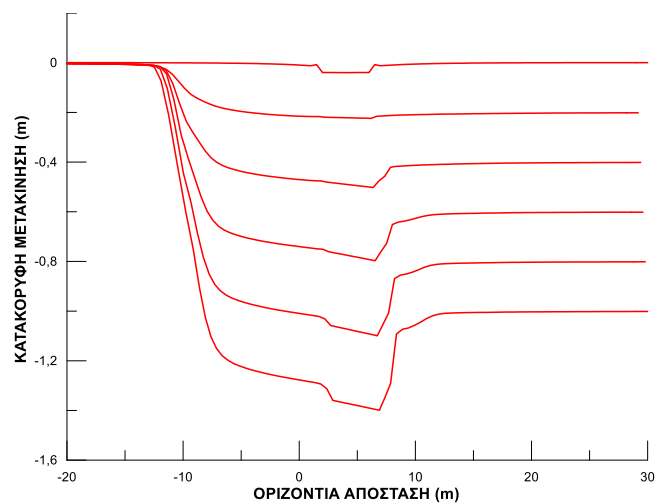
d=1.0m



Max. shear strain increment

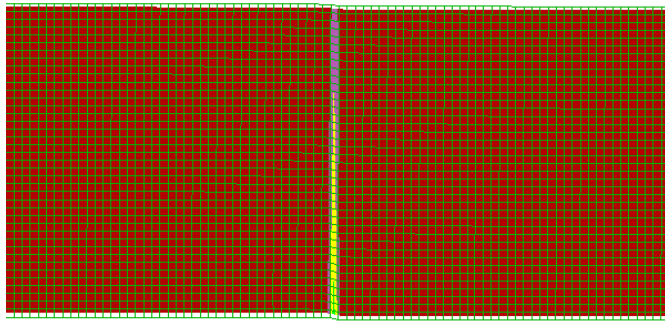


Contour interval= 5.00E-02

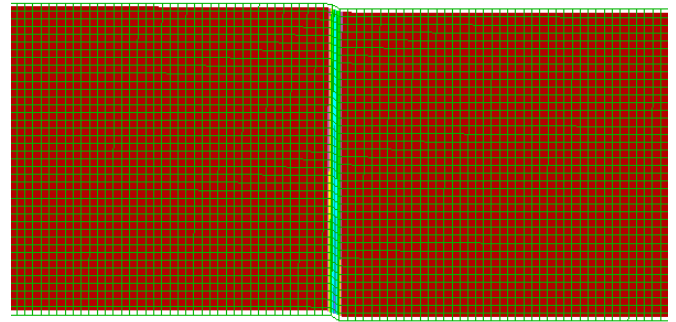


**Σχήμα 10.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=0m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

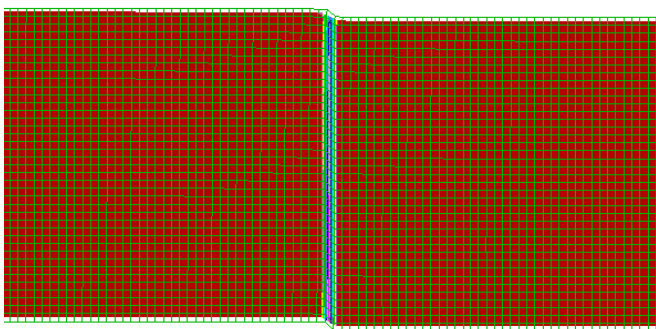
d=0.2m



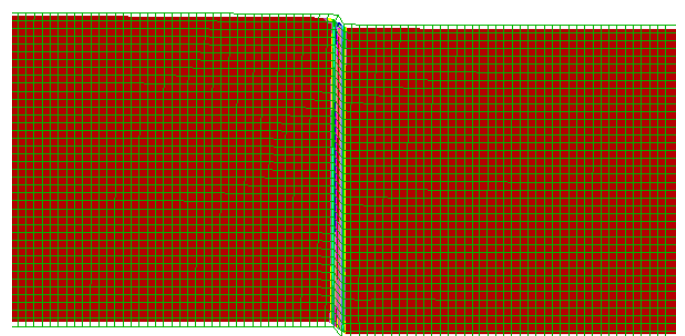
d=0.4m



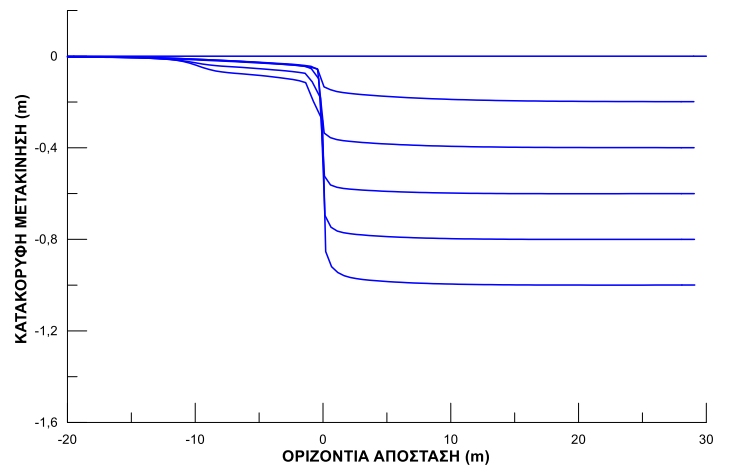
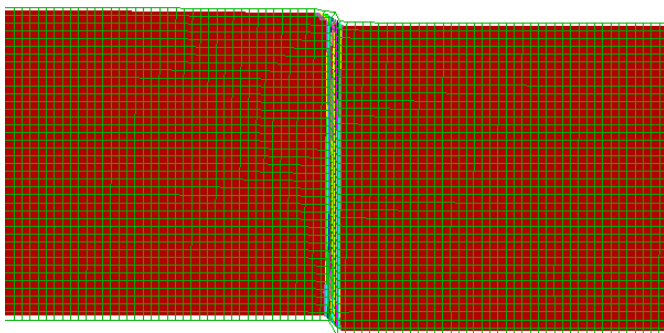
d=0.6m



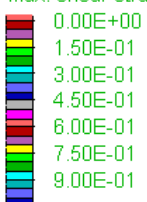
d=0.8m



d=1.0m



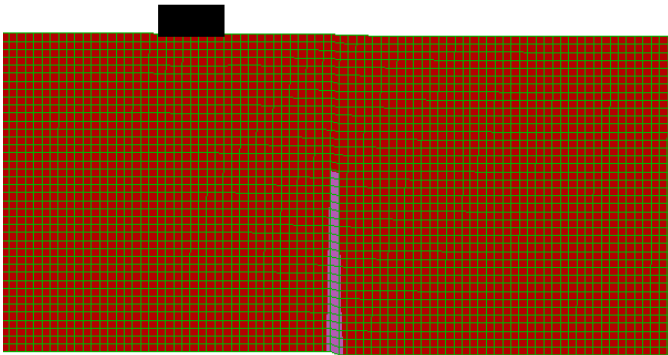
Max. shear strain increment



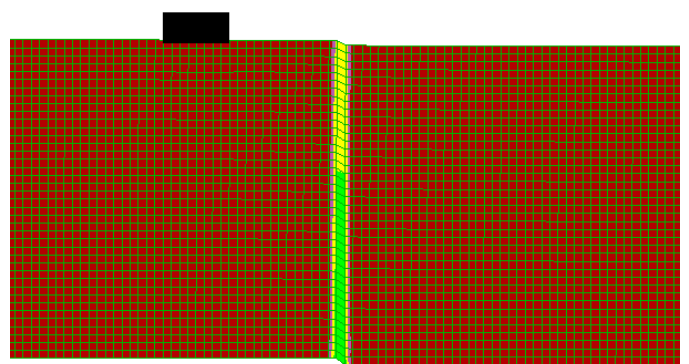
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 11.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για «κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για ελεύθερο πεδίο και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

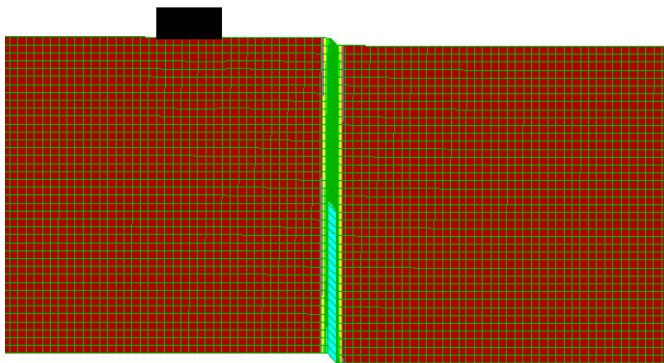
d=0.2m



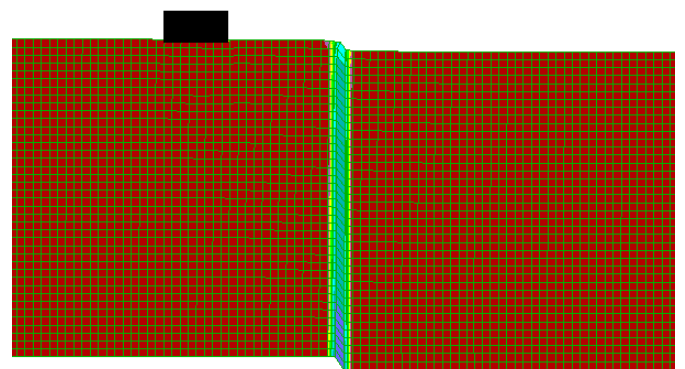
d=0.4m



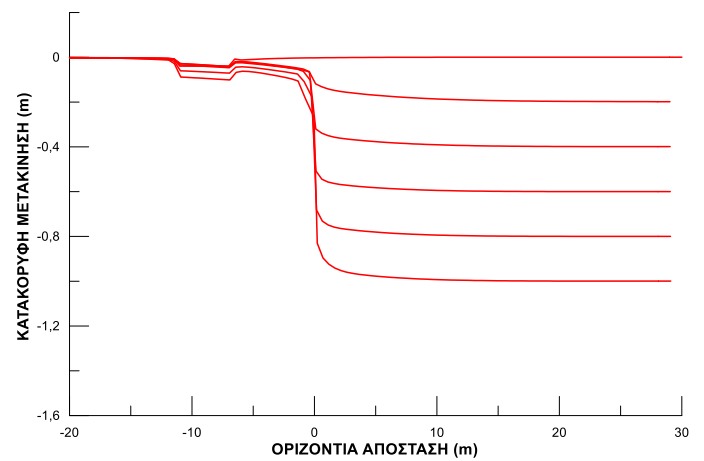
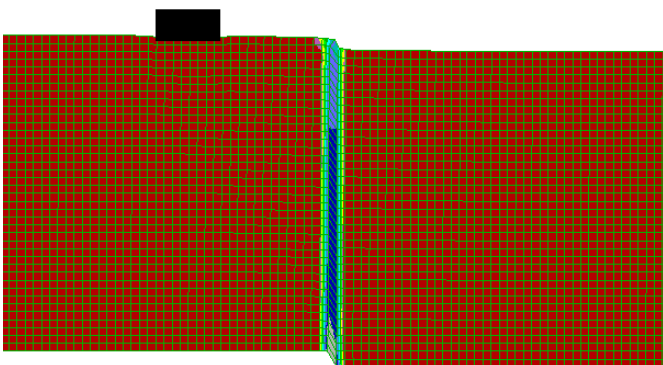
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



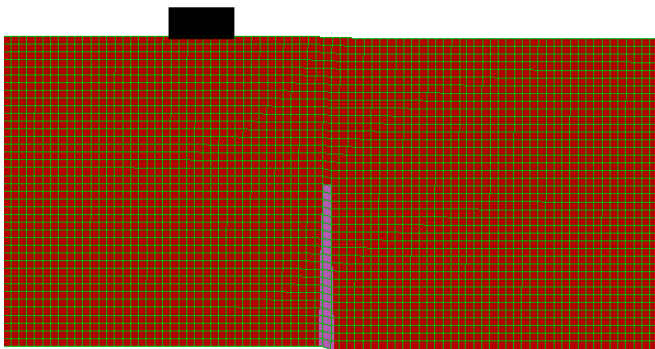
Max. shear strain increment



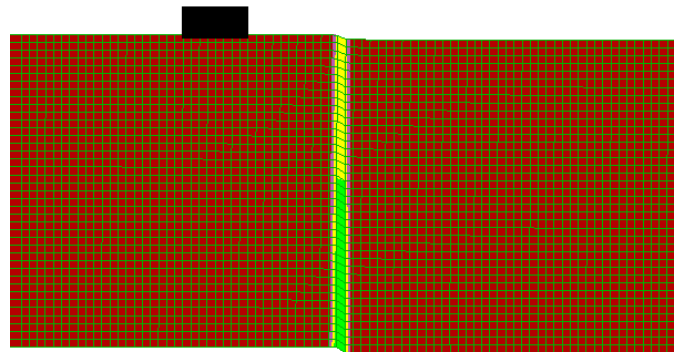
Contour interval= 5.00E-02

Σχήμα 12. Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=9m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

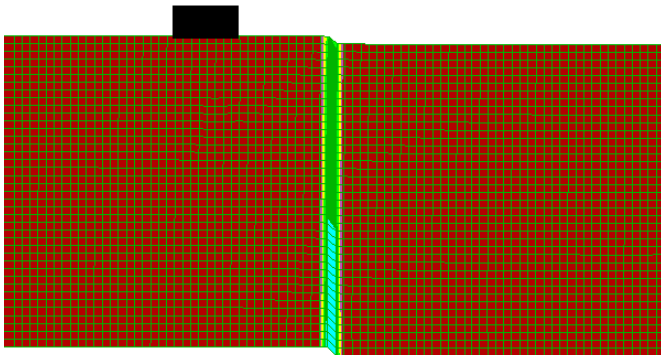
d=0.2m



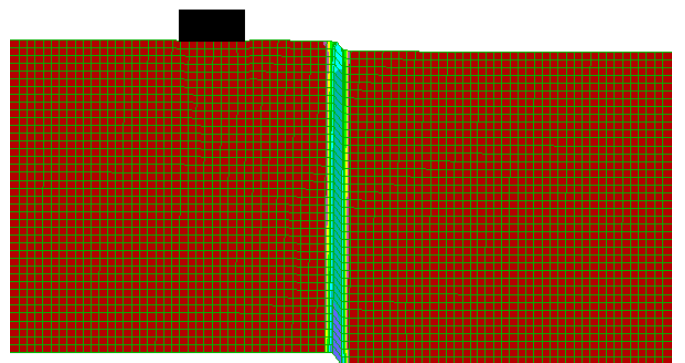
d=0.4m



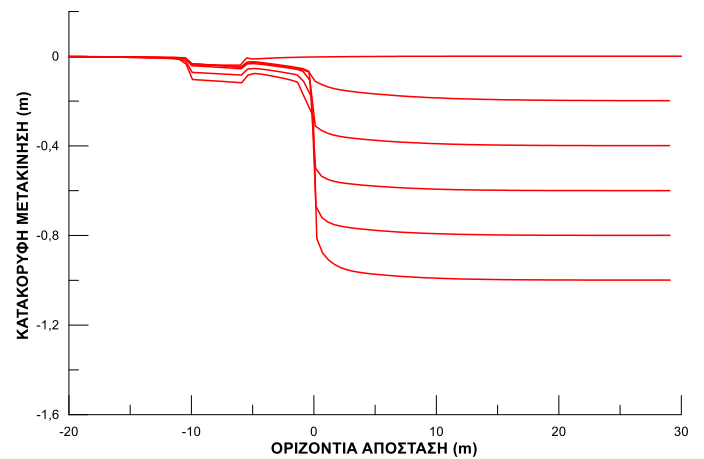
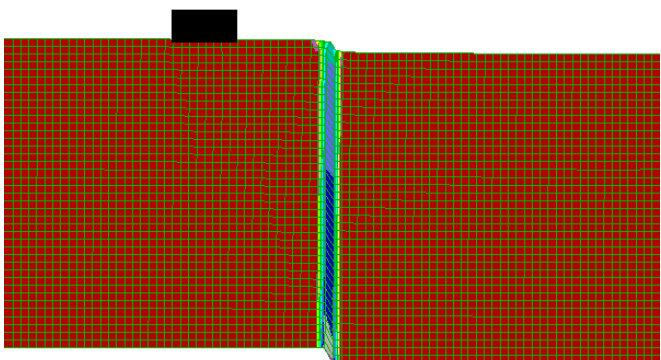
d=0.6m



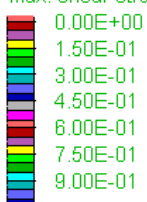
d=0.8m



d=1.0m



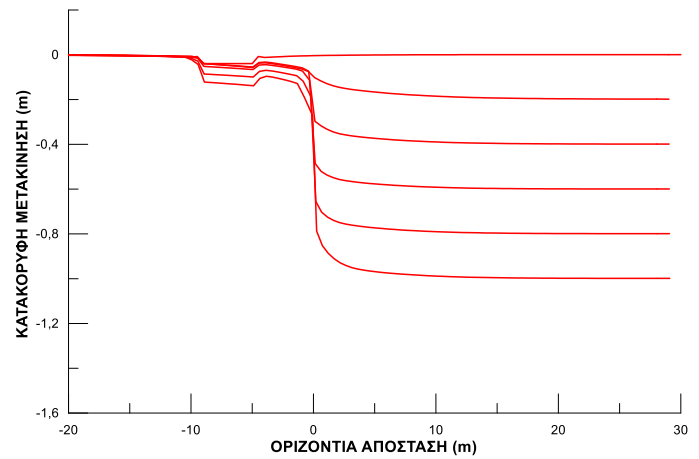
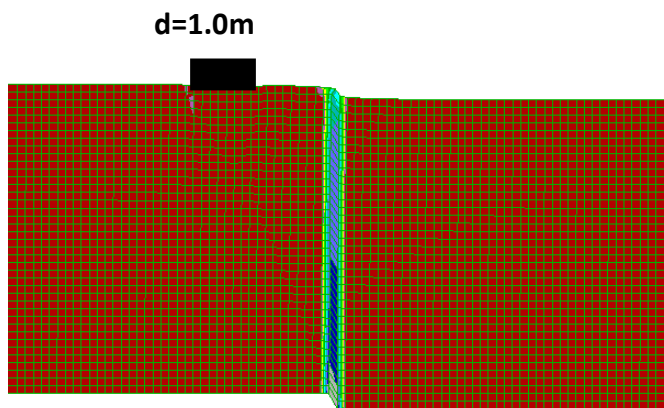
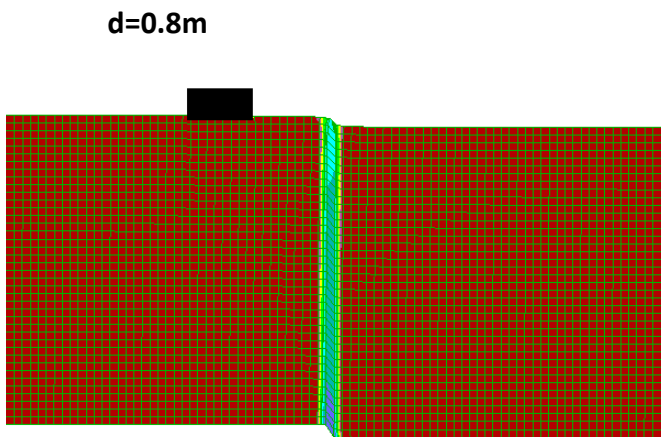
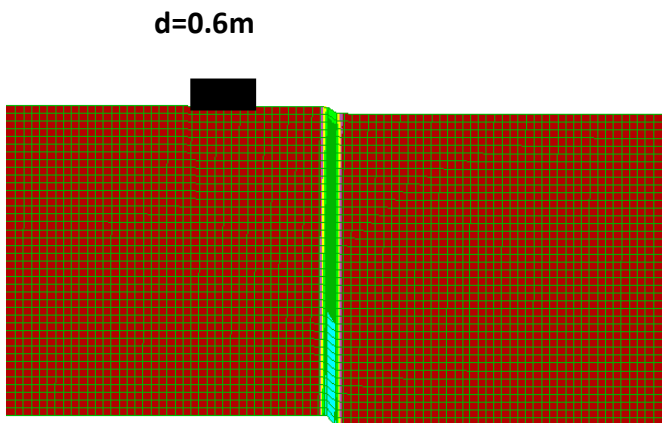
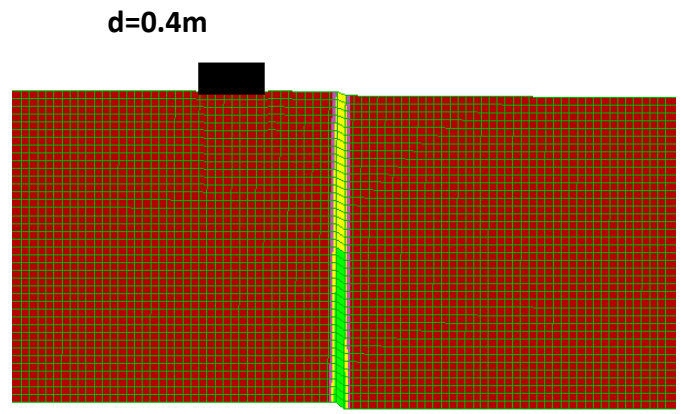
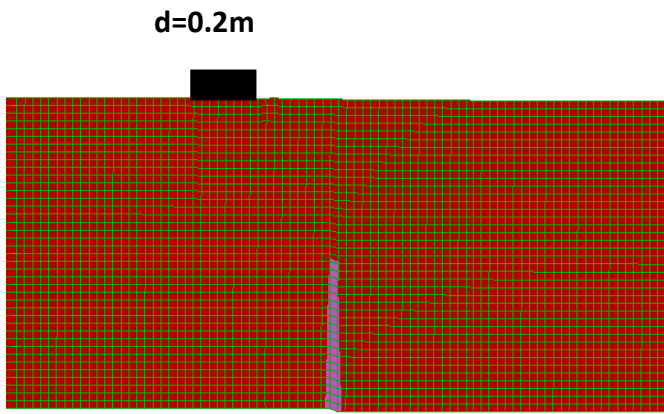
Max. shear strain increment



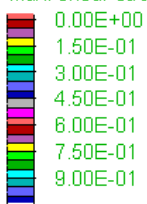
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 13.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=8m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .





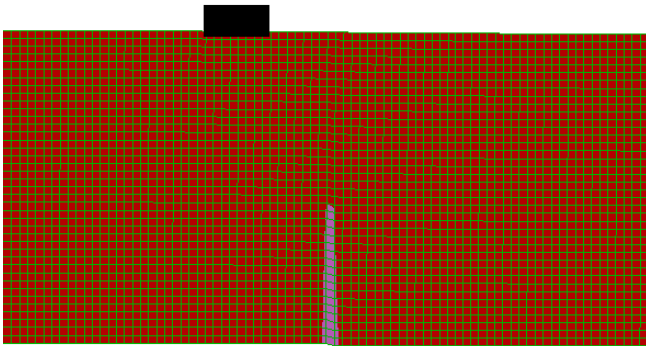
Max. shear strain increment



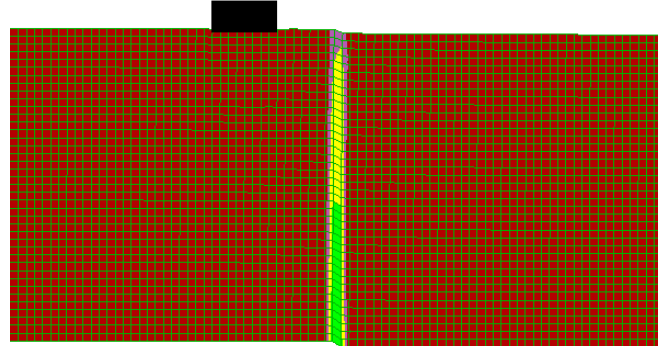
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 14.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=7m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

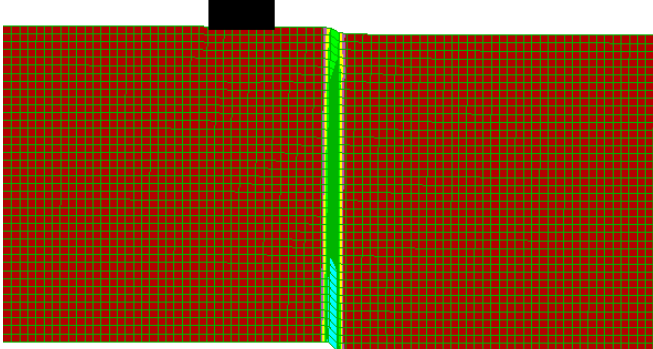
d=0.2m



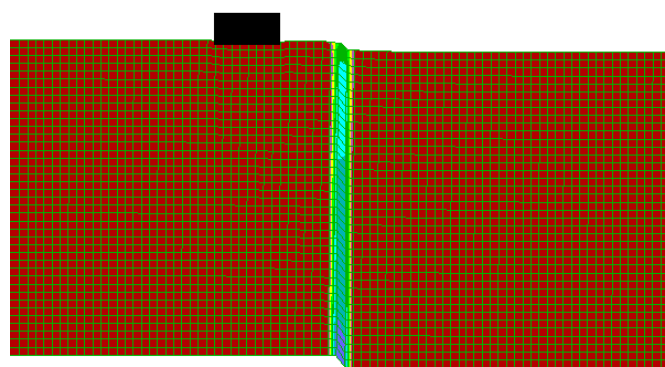
d=0.4m



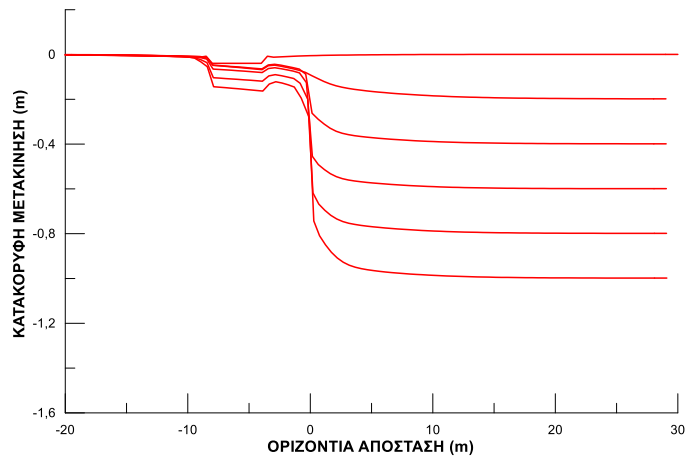
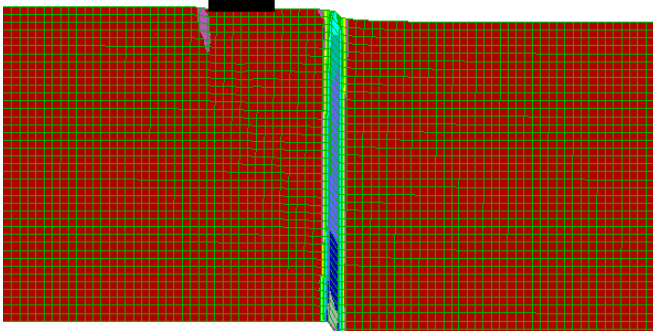
d=0.6m



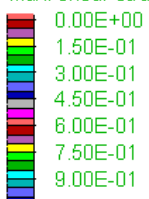
d=0.8m



d=1.0m

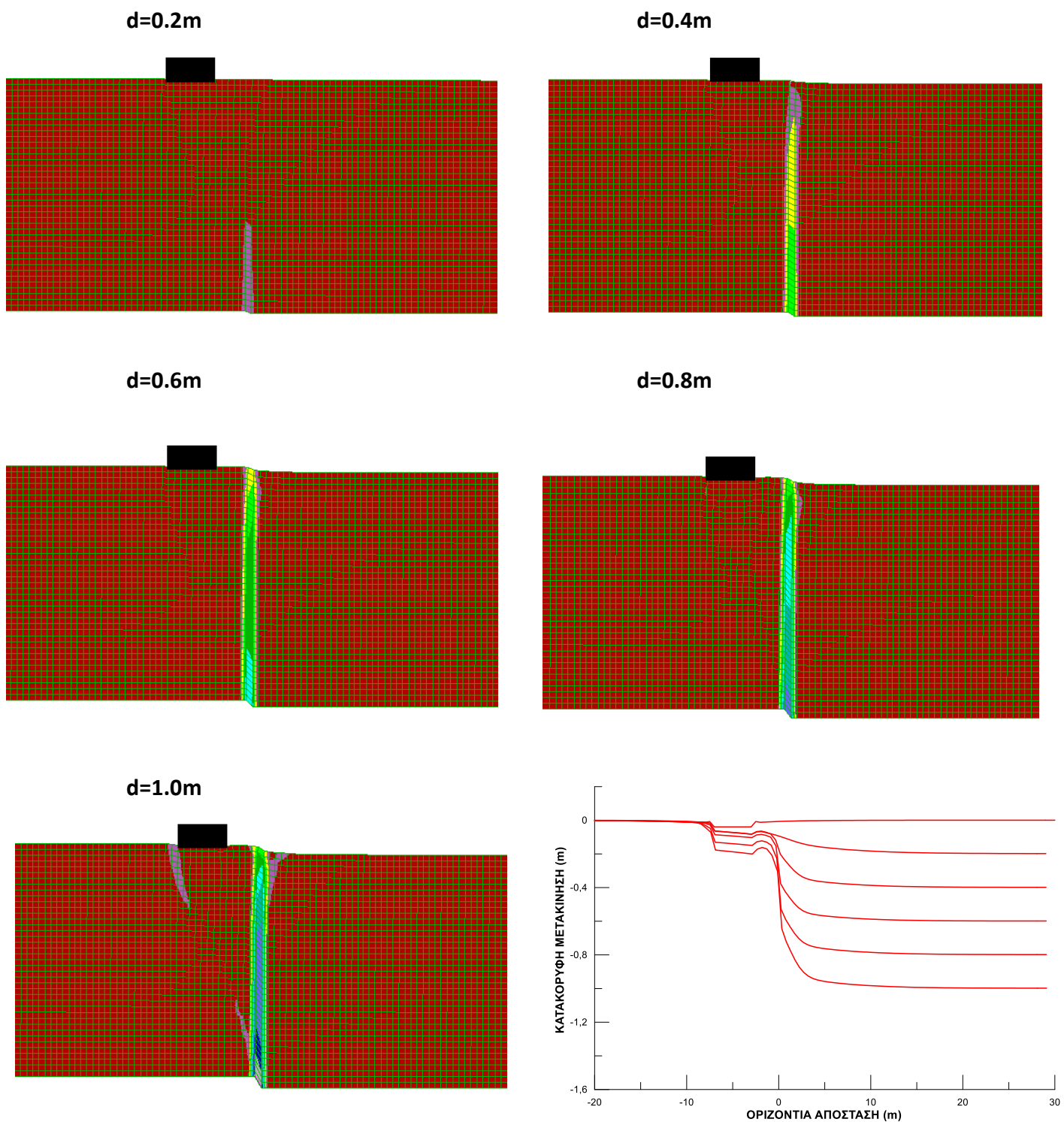


Max. shear strain increment

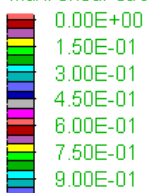


Contour interval= 5.00E-02

Σχήμα 15. Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=6m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



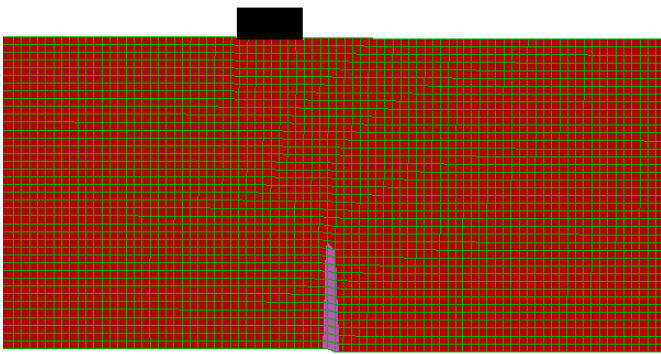
Max. shear strain increment



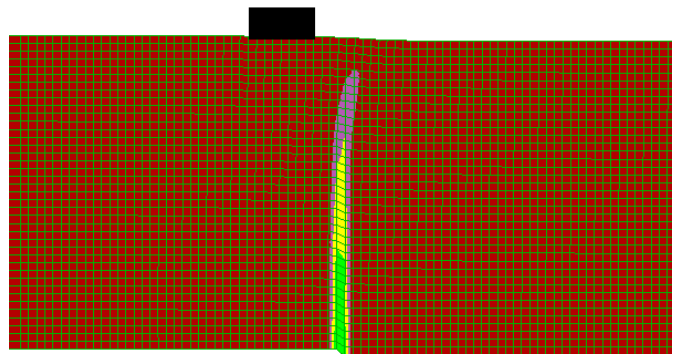
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 16.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=5m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

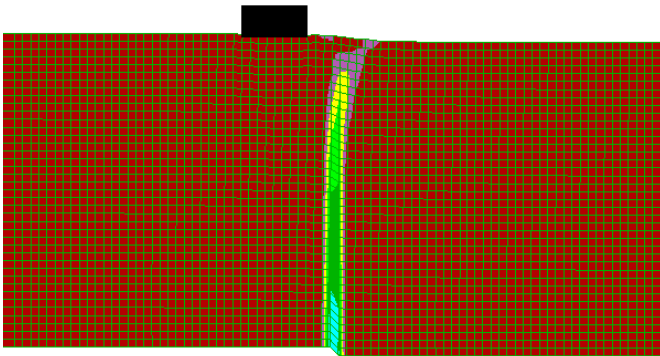
d=0.2m



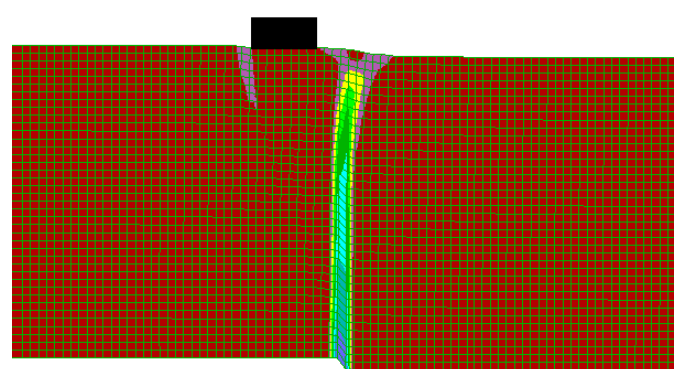
d=0.4m



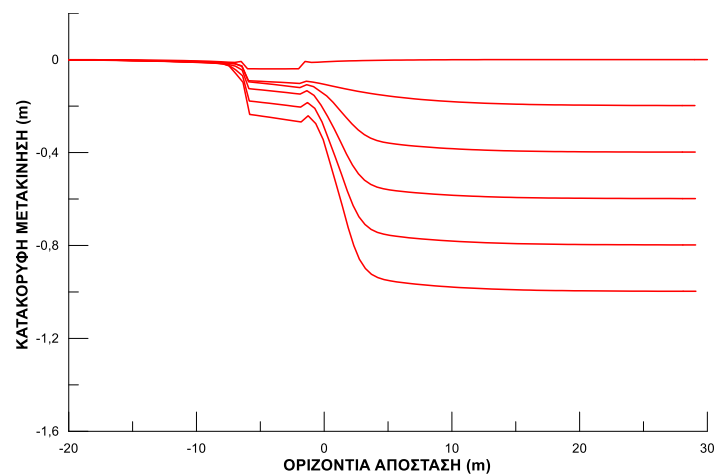
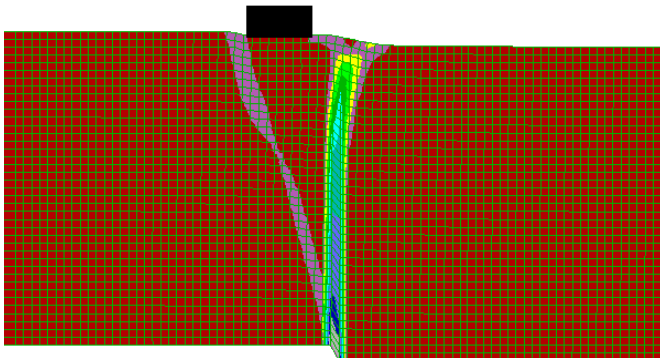
d=0.6m



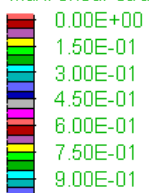
d=0.8m



d=1.0m



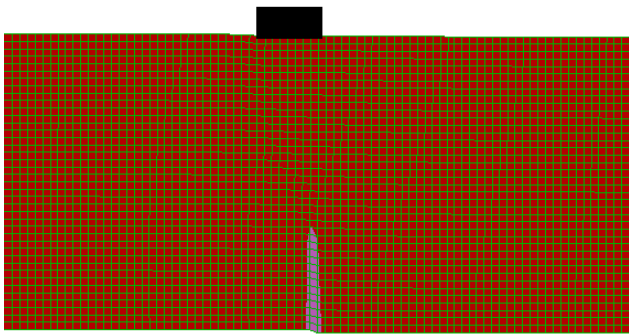
Max. shear strain increment



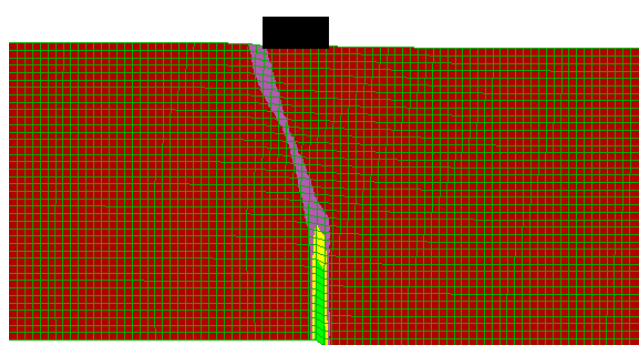
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 17.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για «κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=4m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

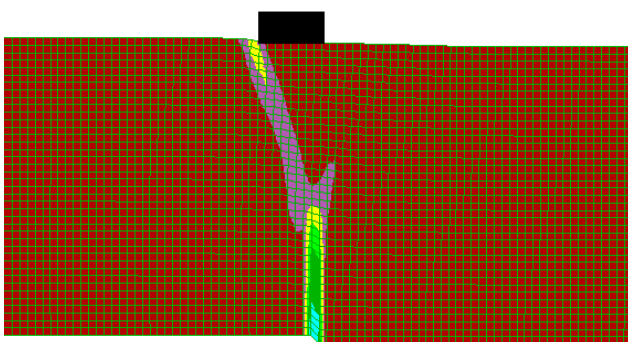
d=0.2m



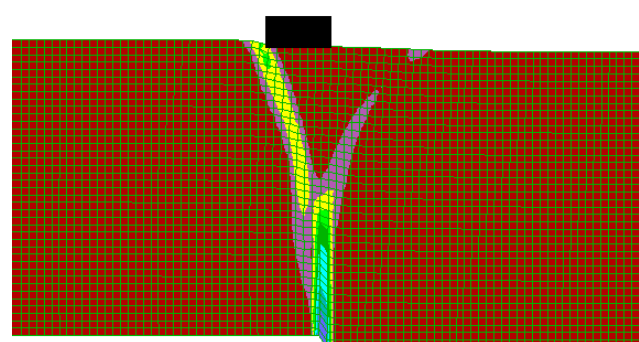
d=0.4m



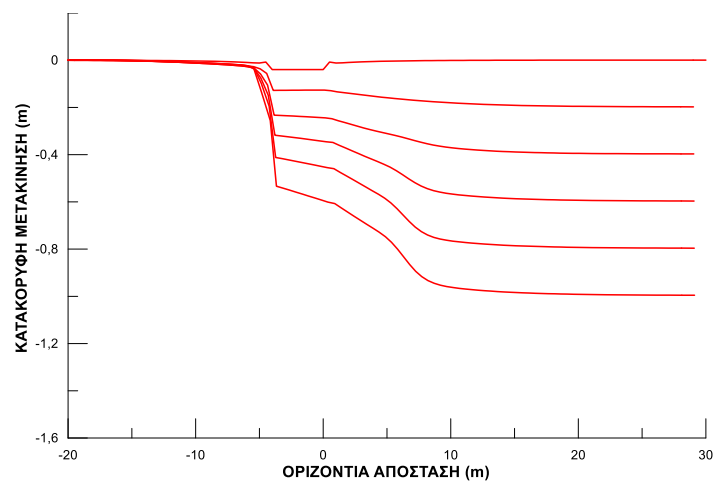
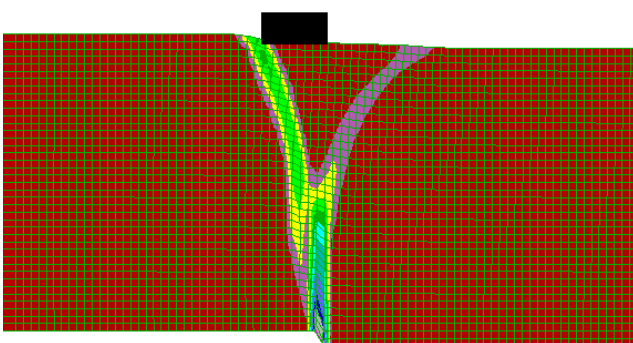
d=0.6m



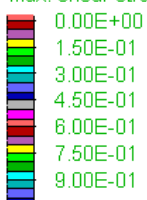
d=0.8m



d=1.0m



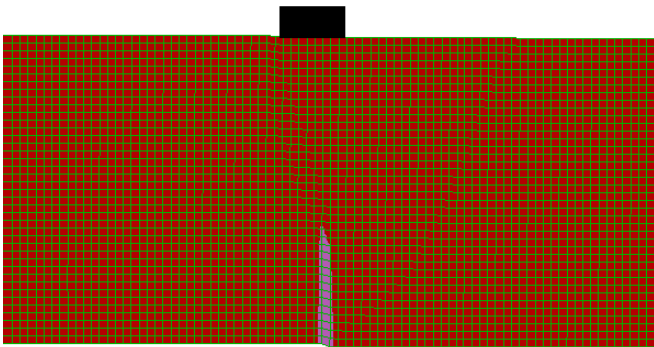
Max. shear strain increment



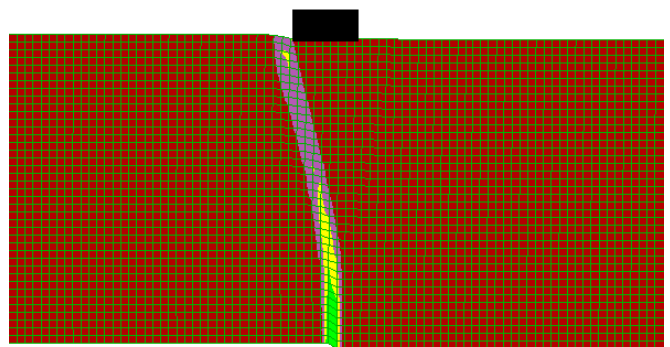
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 18.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=2m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

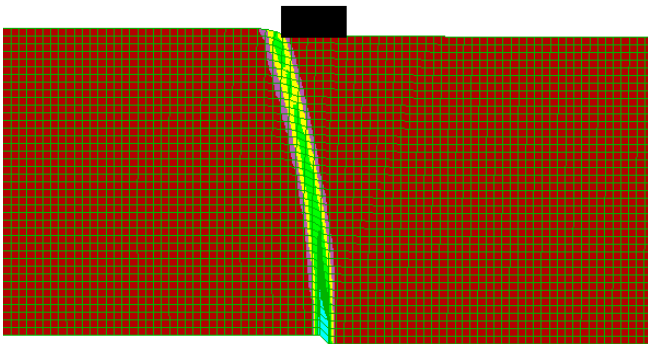
d=0.2m



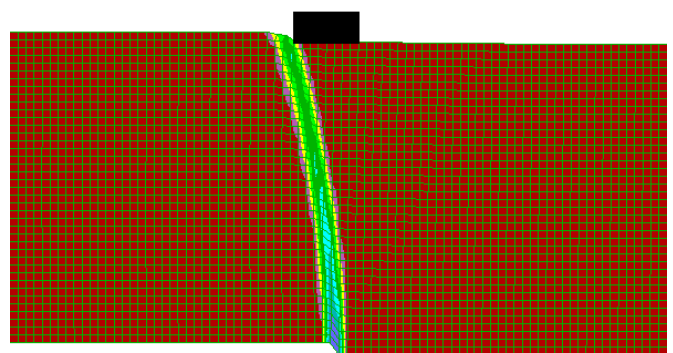
d=0.4m



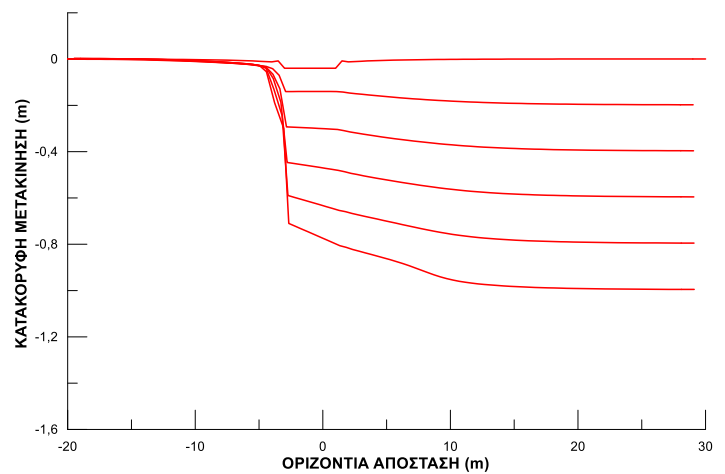
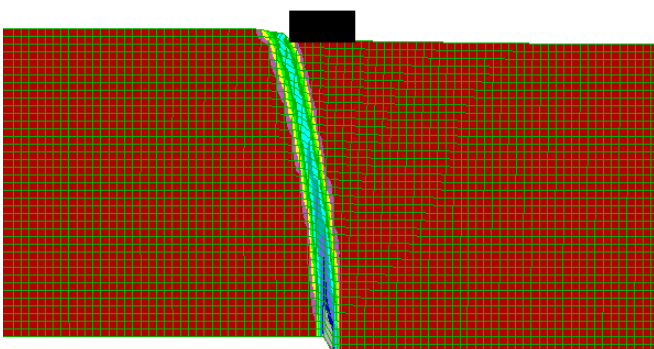
d=0.6m



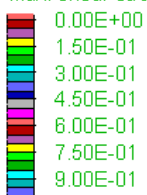
d=0.8m



d=1.0m



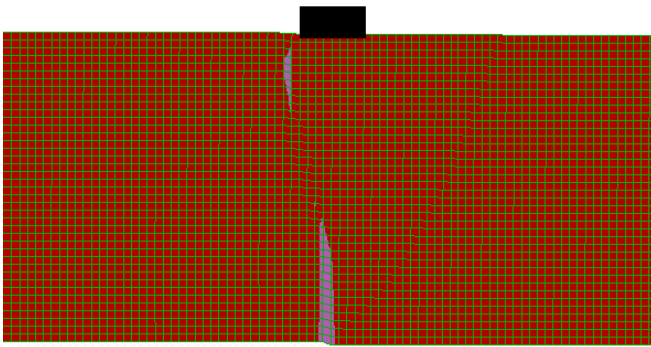
Max. shear strain increment



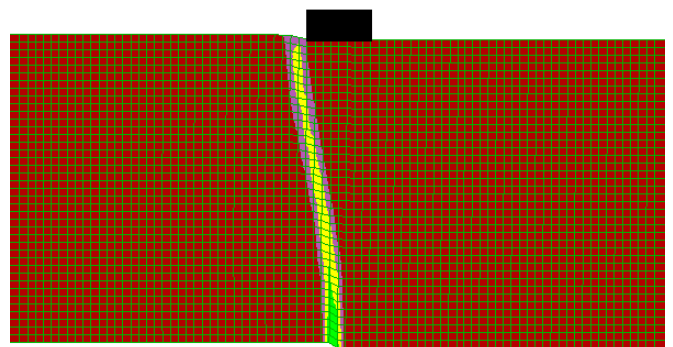
Contour interval= 5.00E-02

Σχήμα 19. Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για «κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=1m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

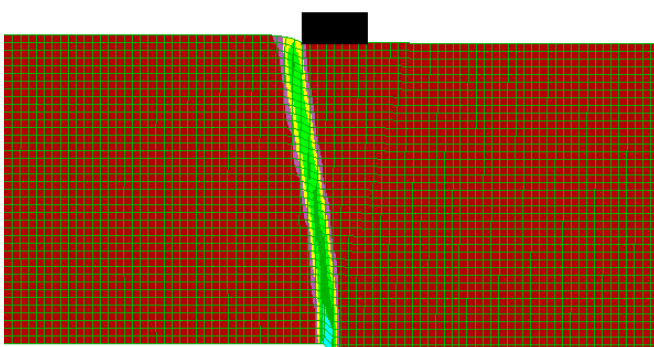
d=0.2m



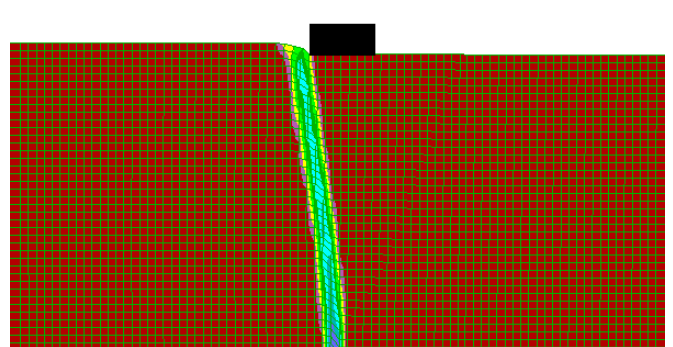
d=0.4m



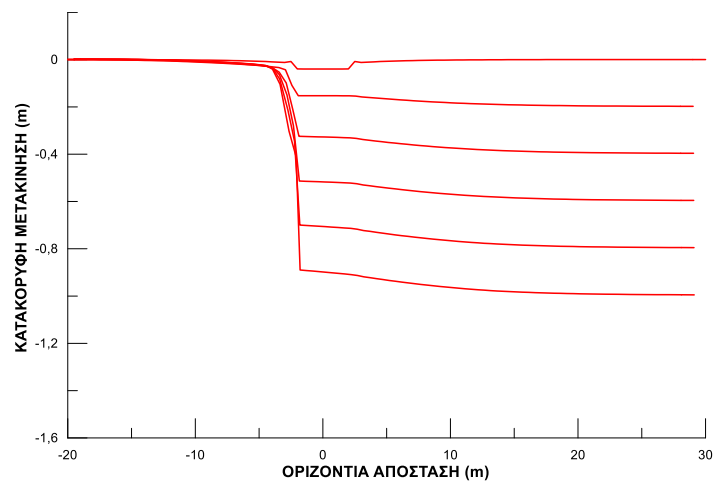
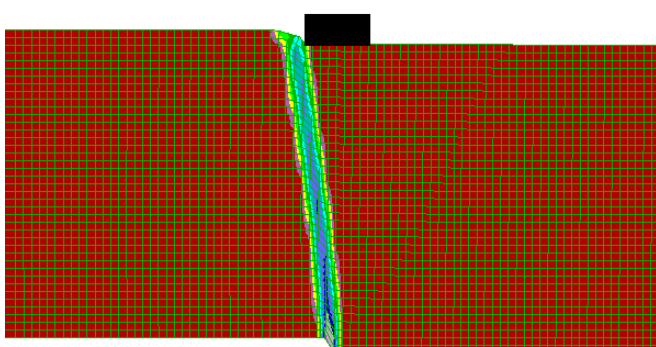
d=0.6m



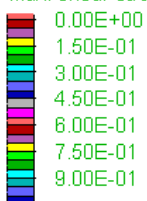
d=0.8m



d=1.0m



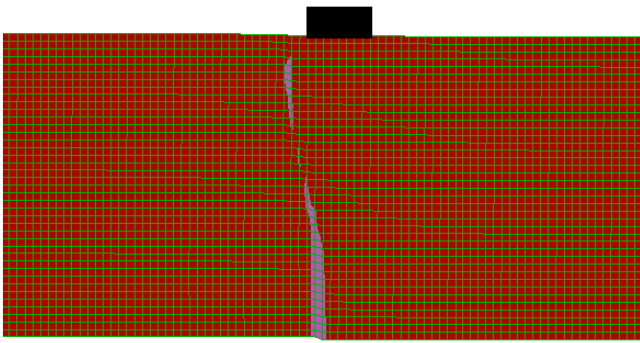
Max. shear strain increment



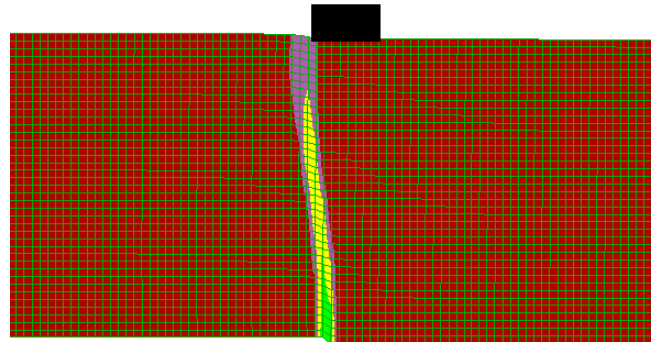
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 20.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=0m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

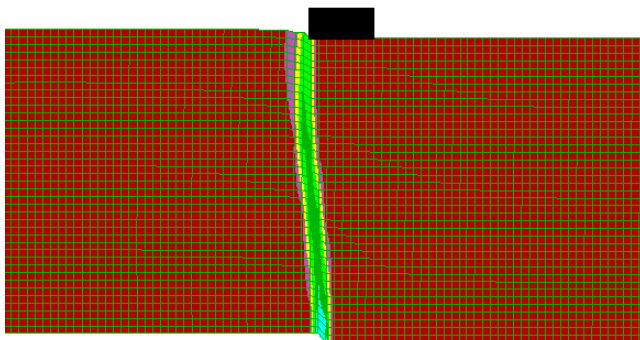
d=0.2m



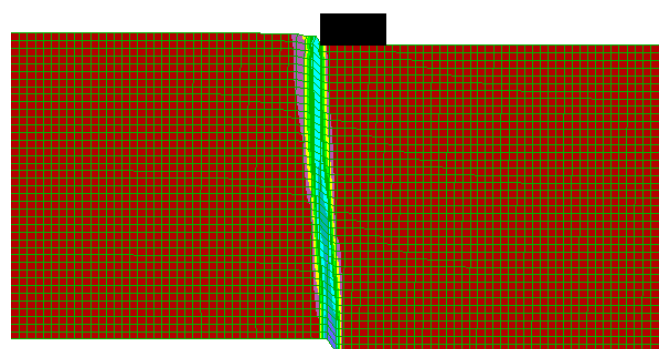
d=0.4m



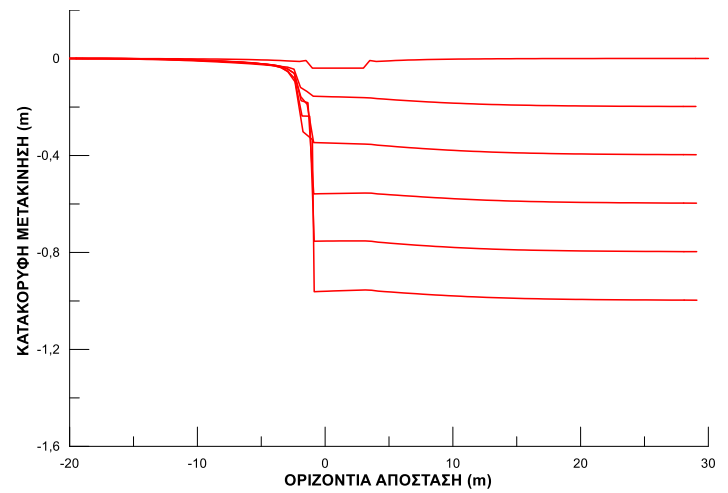
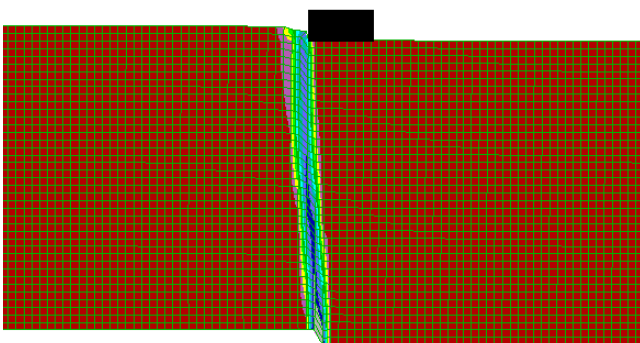
d=0.6m



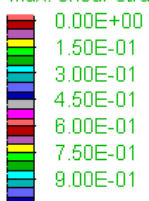
d=0.8m



d=1.0m



Max. shear strain increment

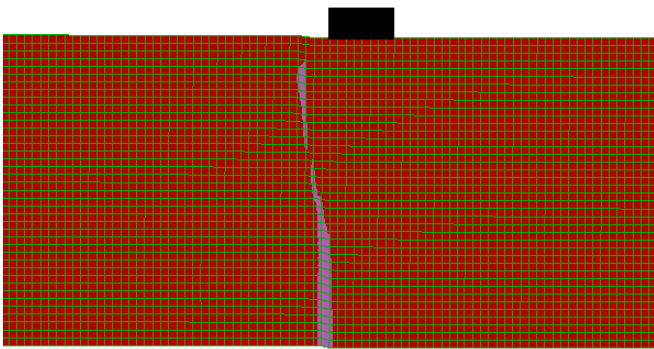


Contour interval= 5.00E-02

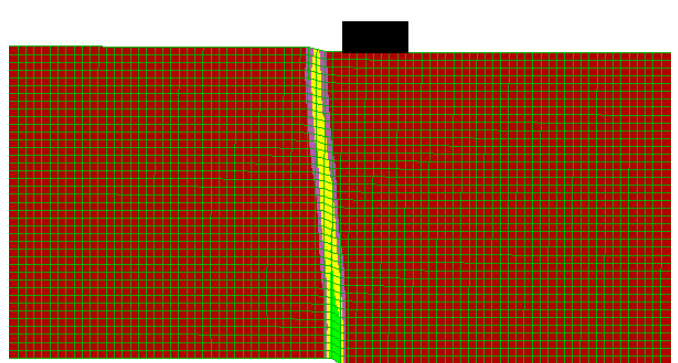
**Σχήμα 21.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=-1m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



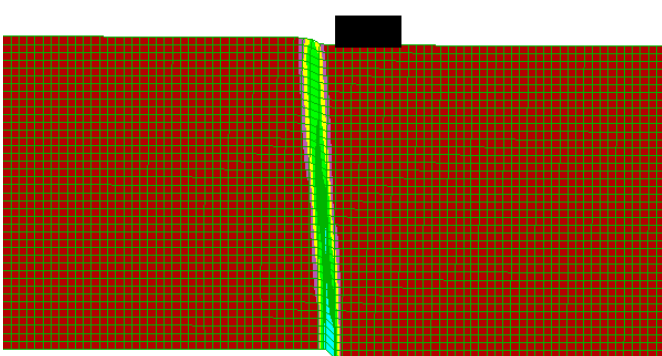
d=0.2m



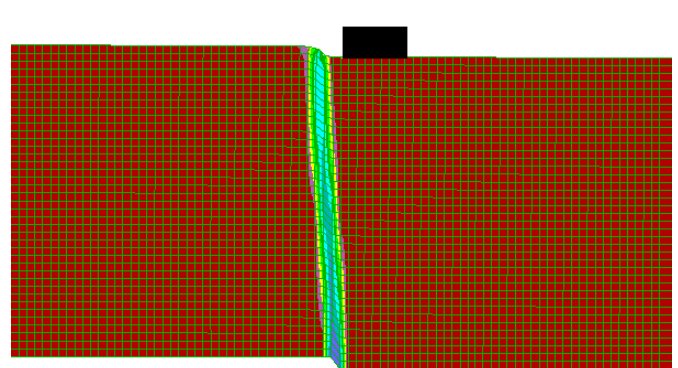
d=0.4m



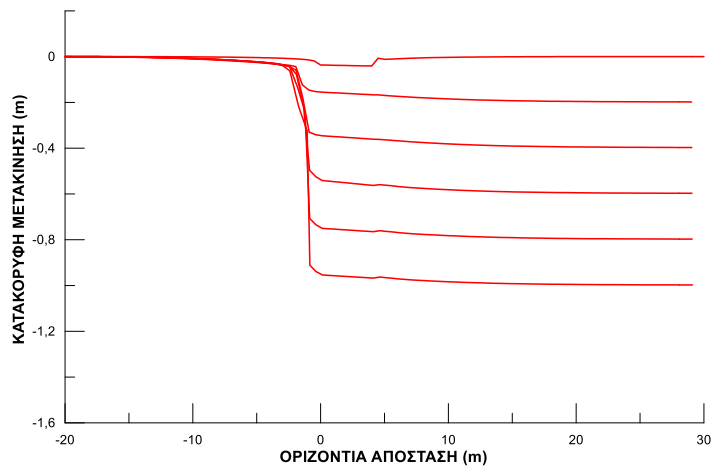
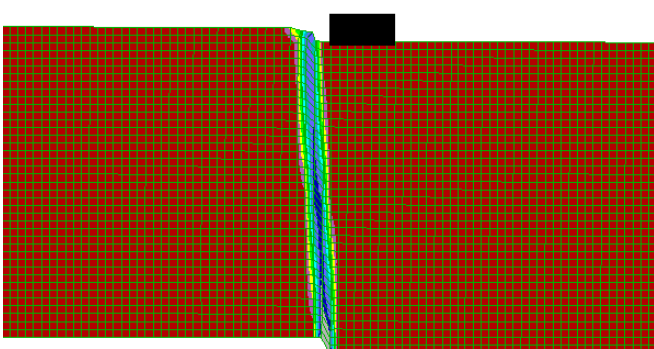
d=0.6m



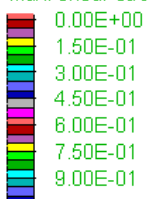
d=0.8m



d=1.0m



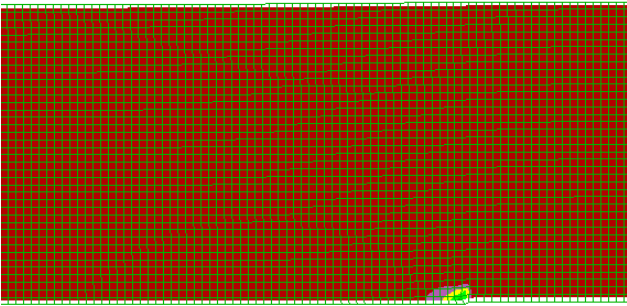
Max. shear strain increment



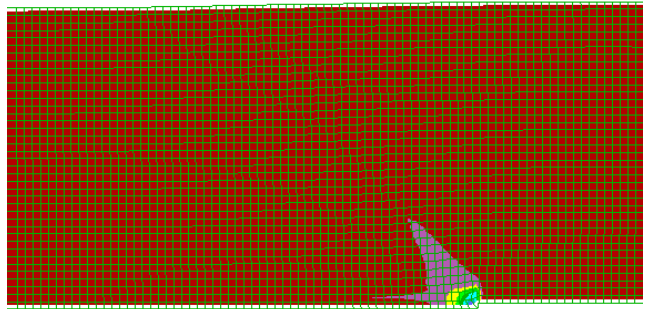
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 22.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για “κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=-2m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$

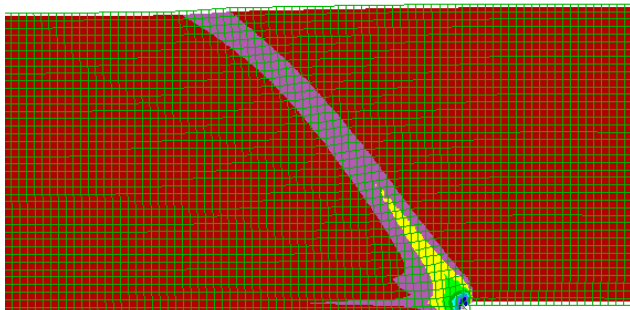
d=0.2m



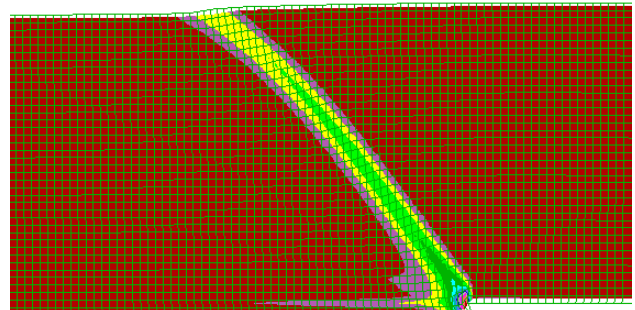
d=0.4m



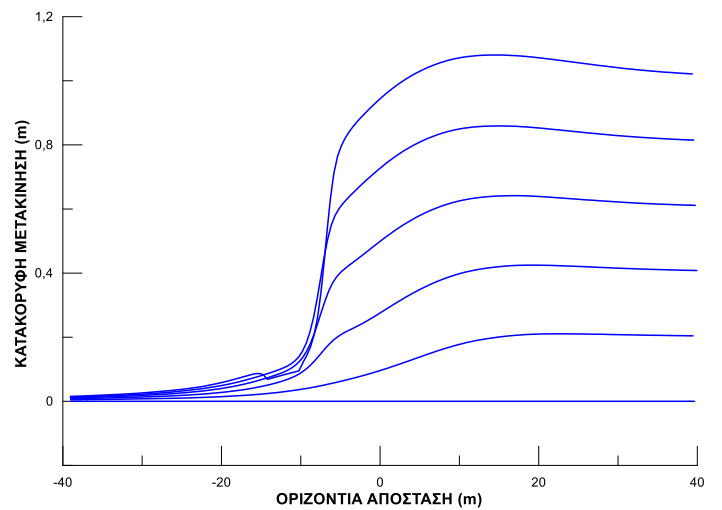
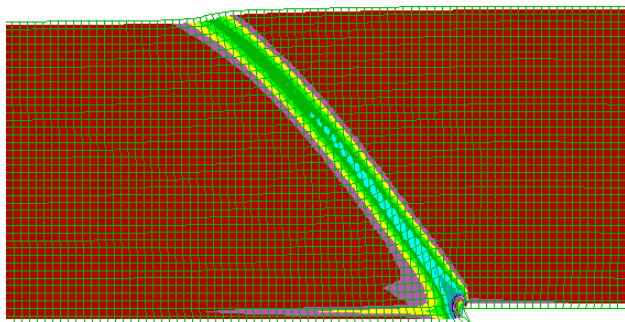
d=0.6m



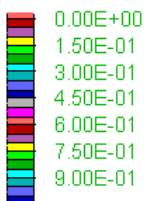
d=0.8m



d=1.0m



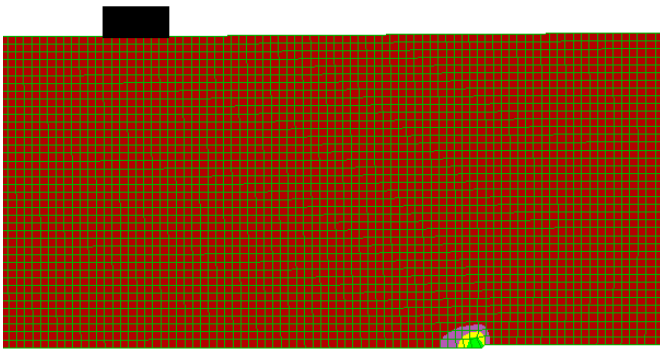
Max. shear strain increment



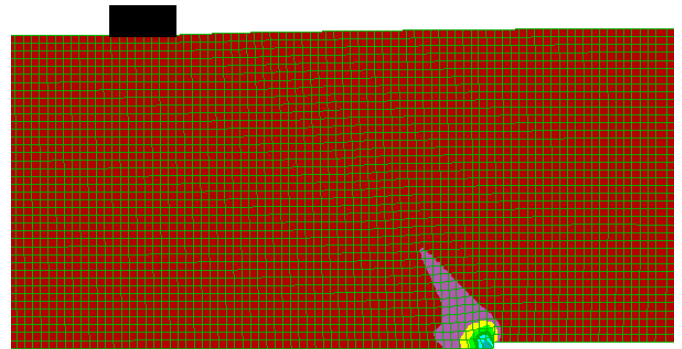
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 23.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για ελεύθερο πεδίο και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

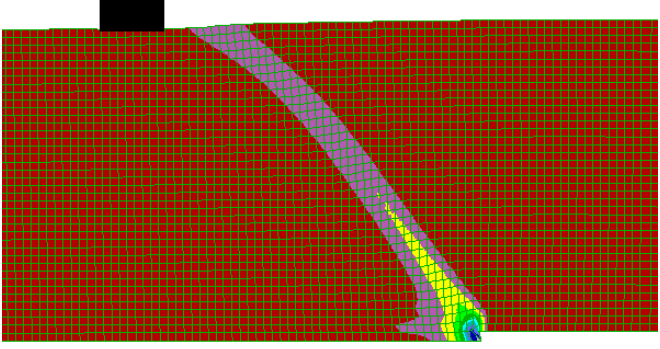
d=0.2m



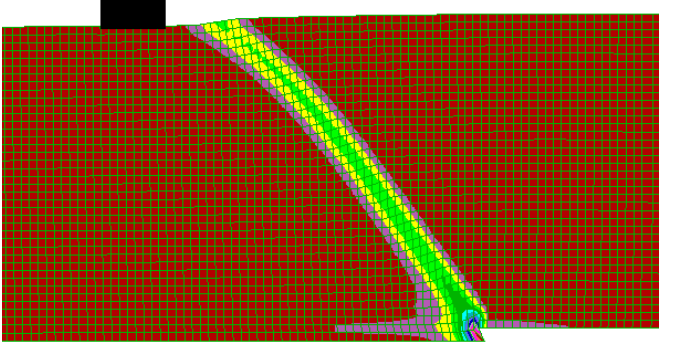
d=0.4m



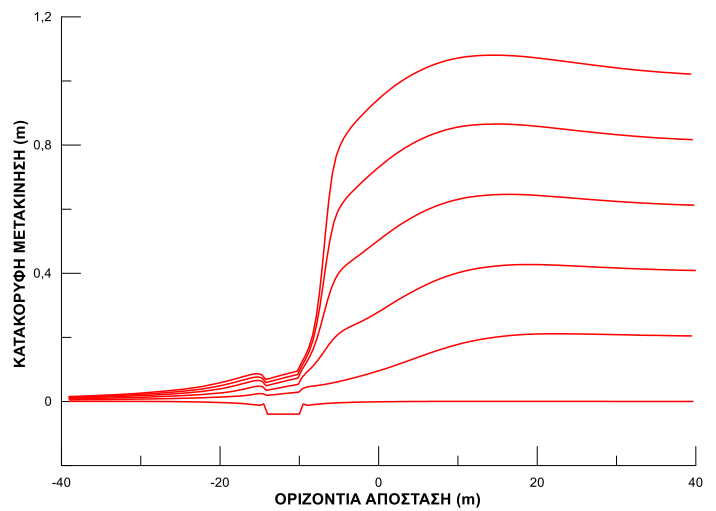
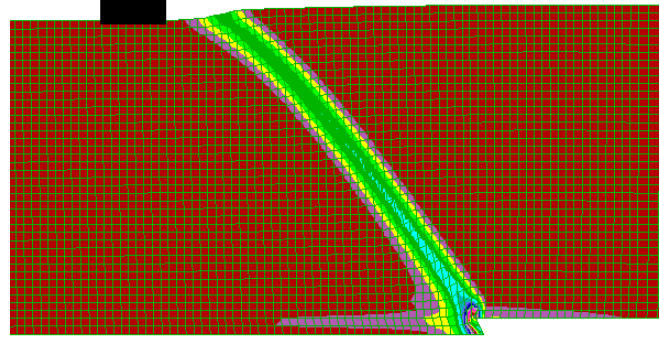
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



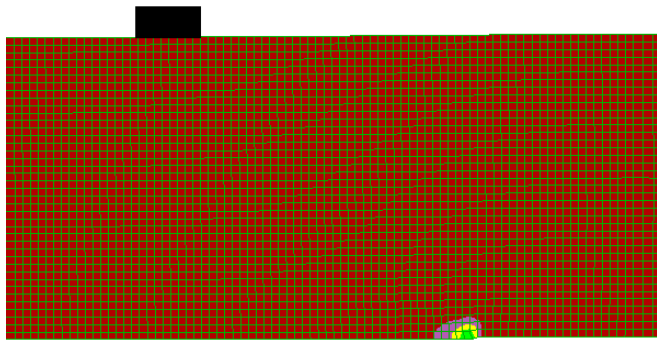
Max. shear strain increment



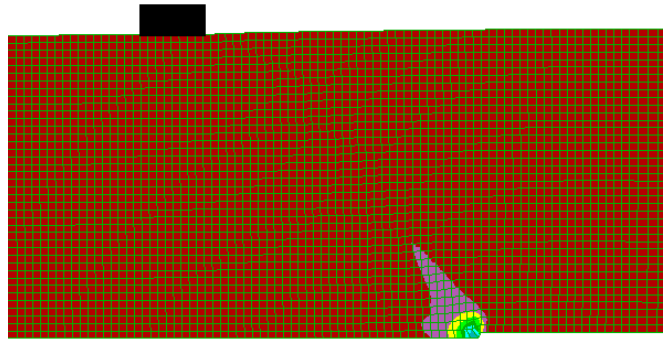
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 24.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=22m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

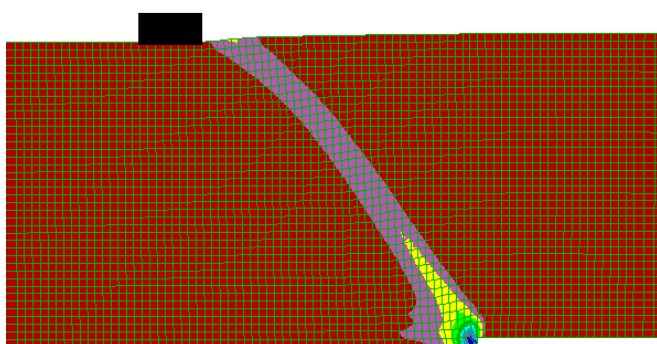
d=0.2m



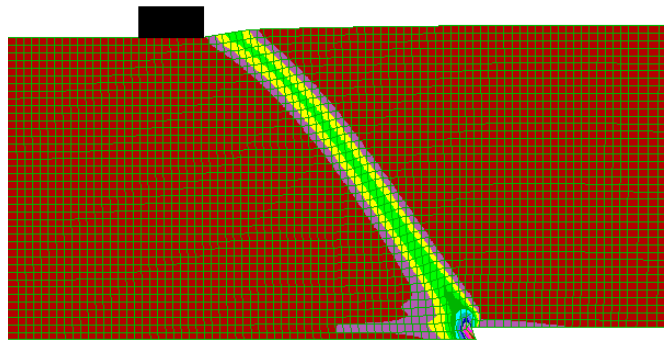
d=0.4m



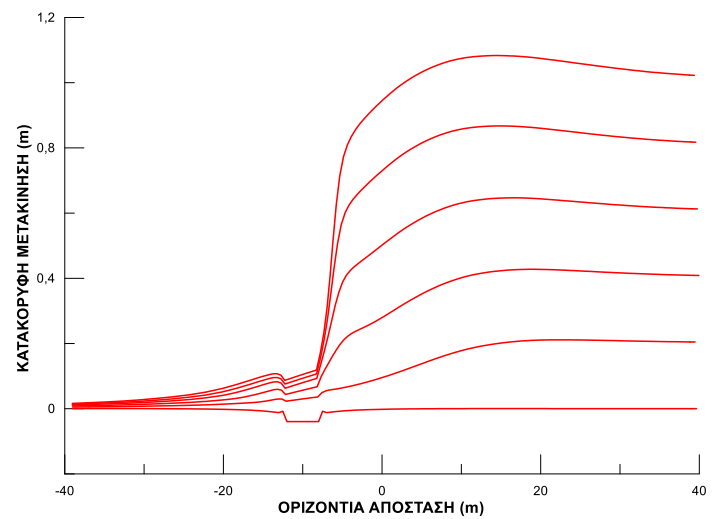
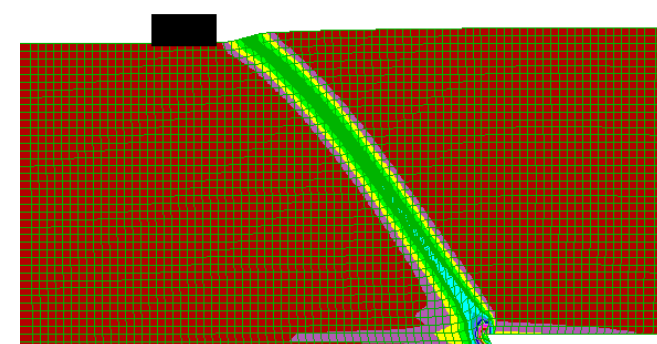
d=0.6m



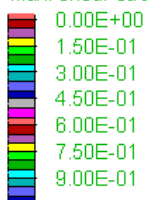
d=0.8m



d=1.0m



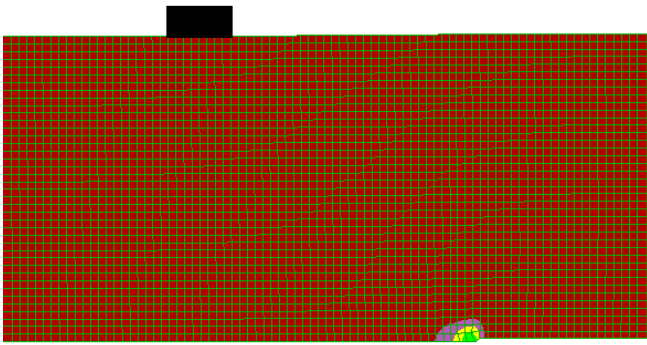
Max. shear strain increment



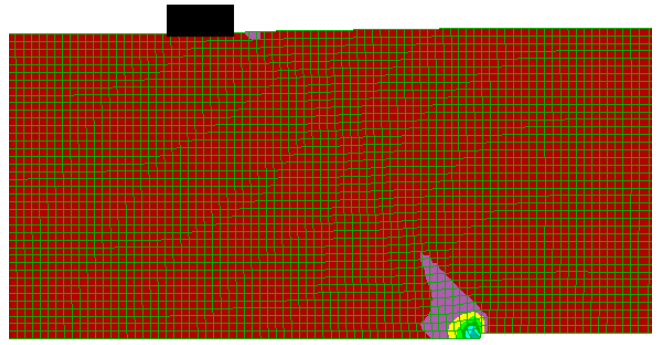
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 25.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=20m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

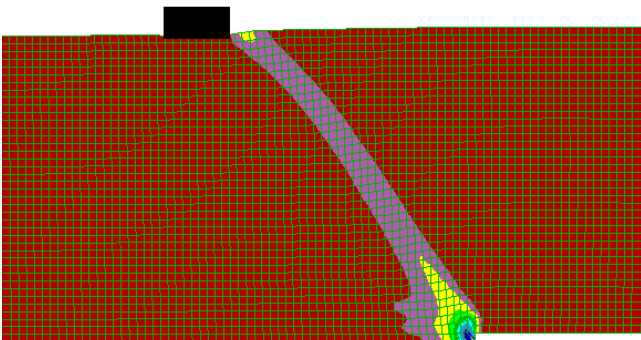
d=0.2m



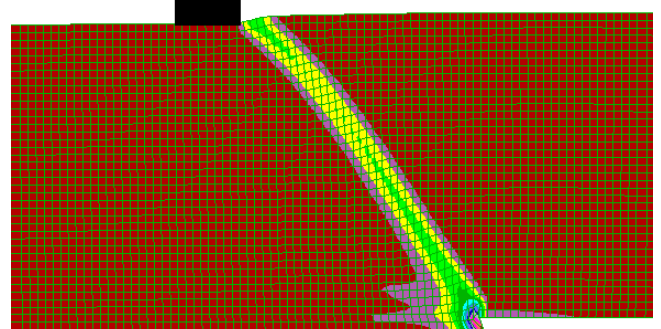
d=0.4m



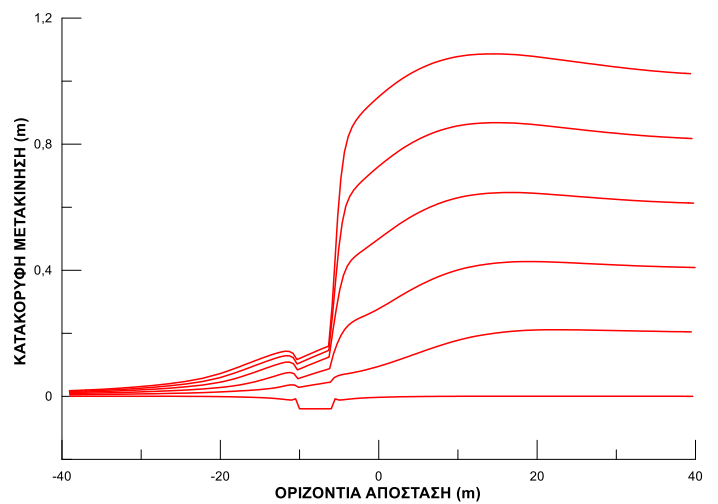
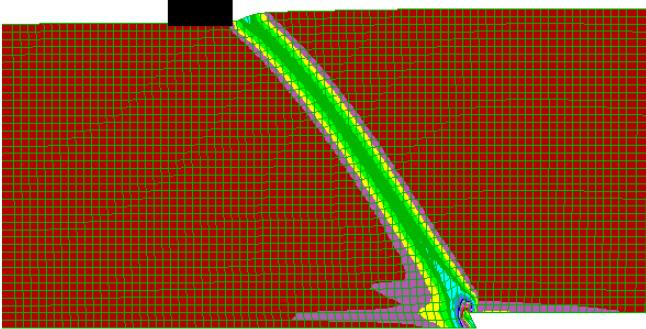
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



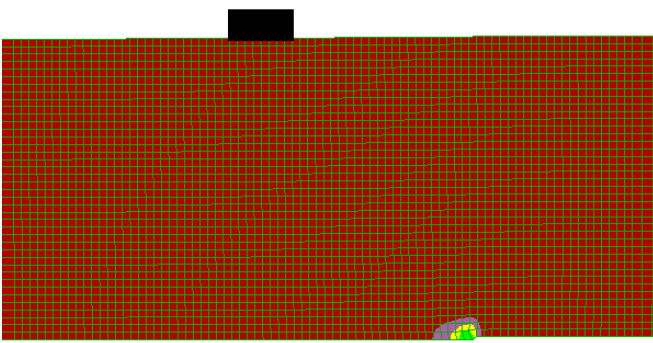
Max. shear strain increment



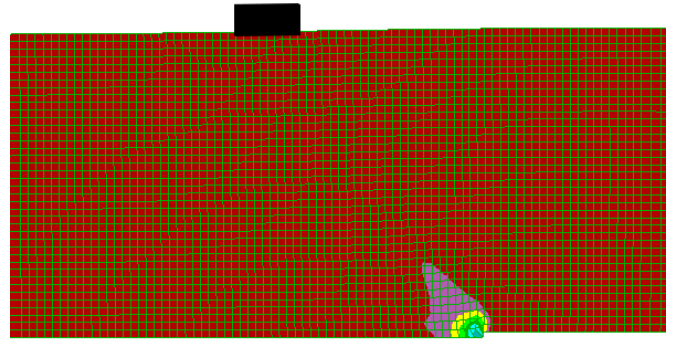
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 26.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=18m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

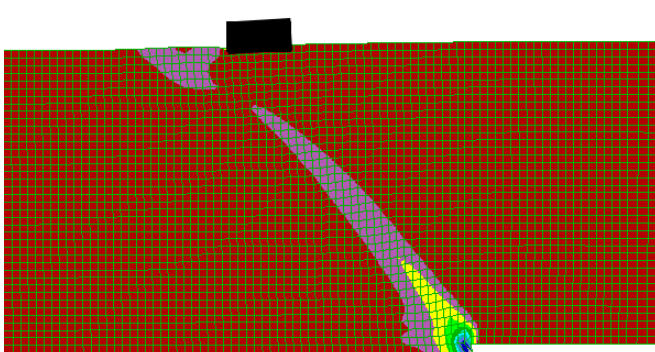
d=0.2m



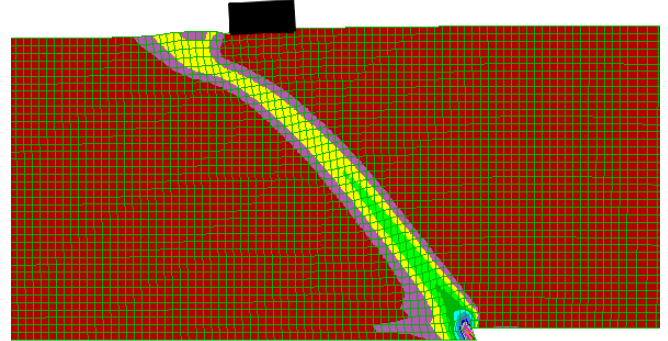
d=0.4m



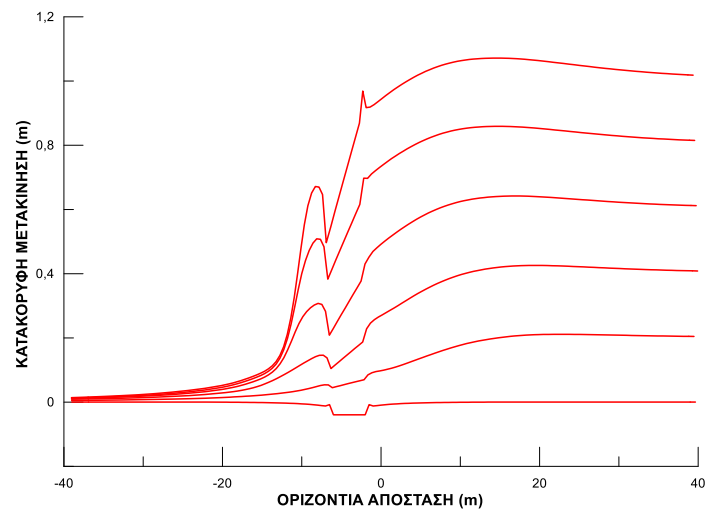
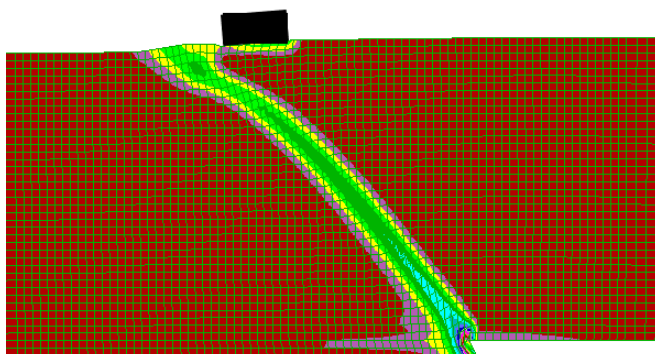
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



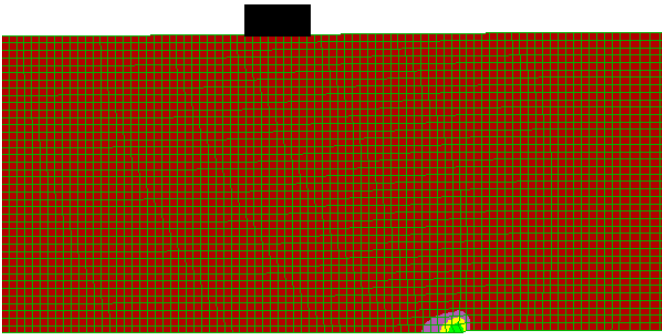
Max. shear strain increment



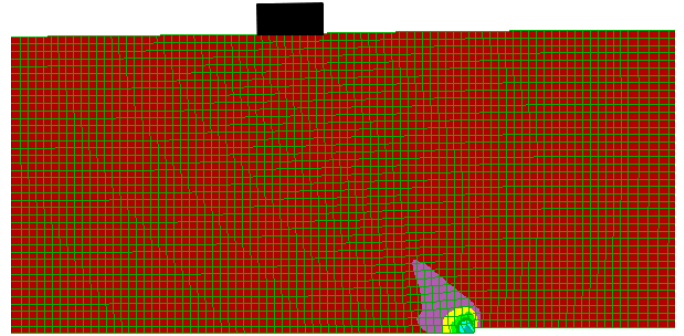
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 27.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=14m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

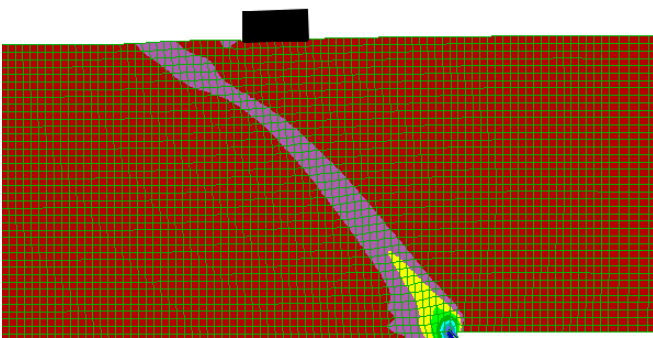
d=0.2m



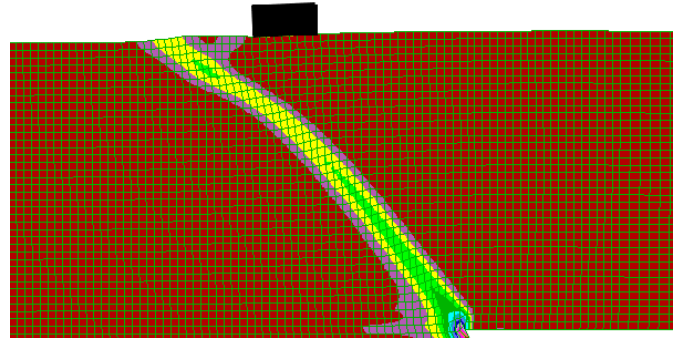
d=0.4m



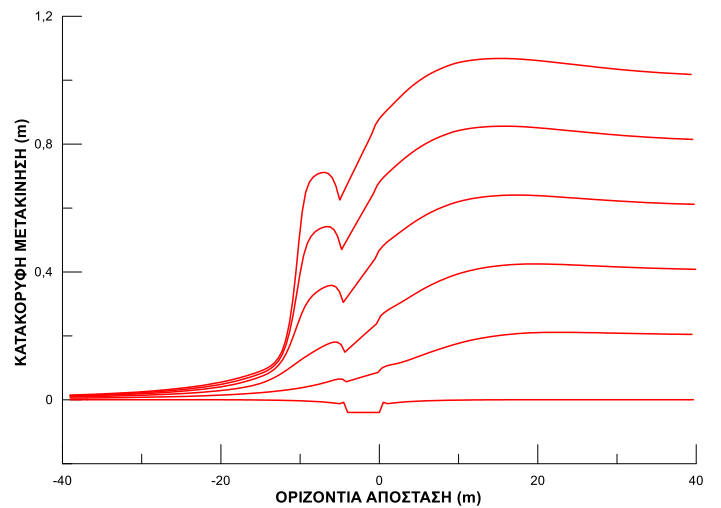
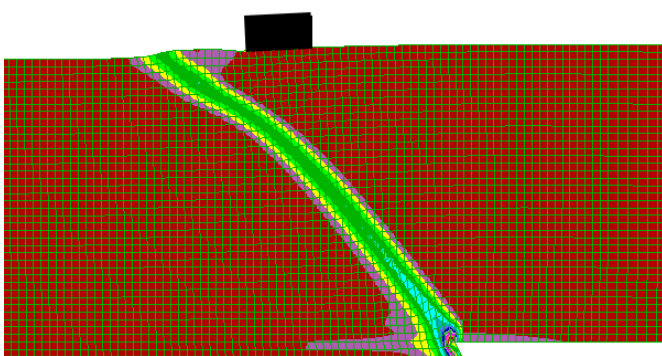
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



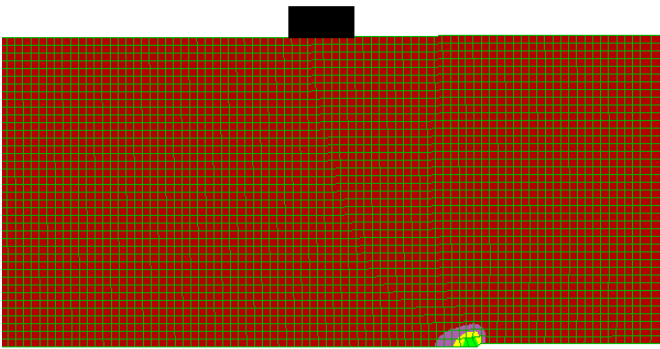
Max. shear strain increment



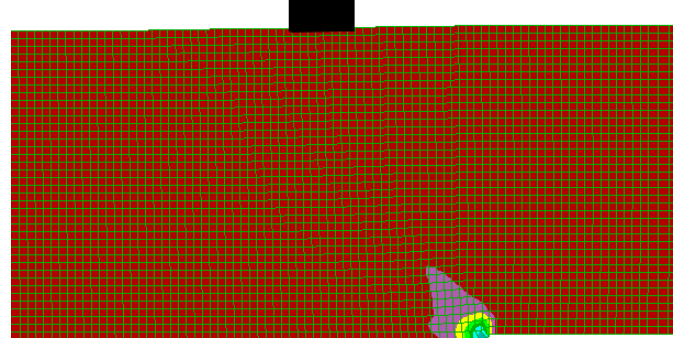
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 27.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=12m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

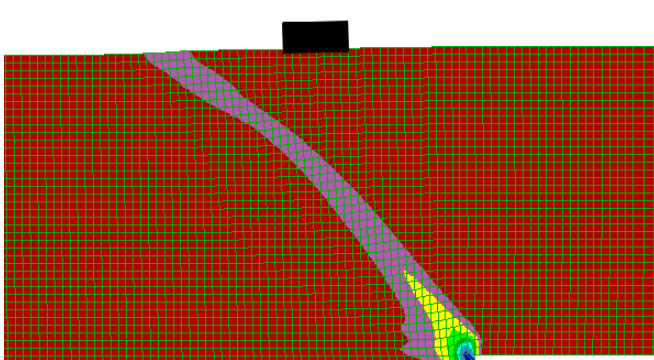
d=0.2m



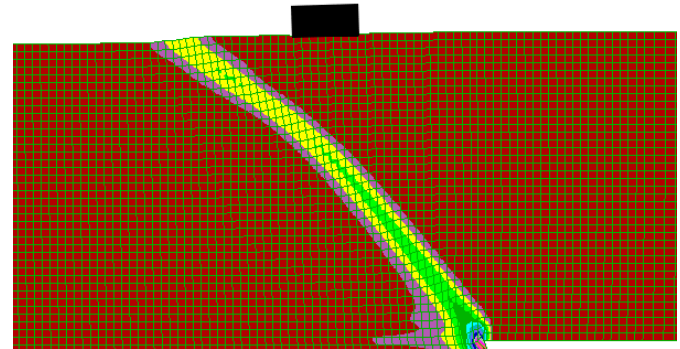
d=0.4m



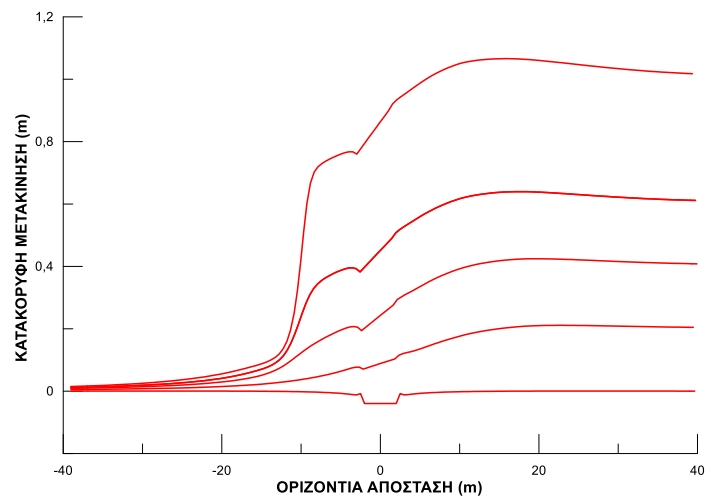
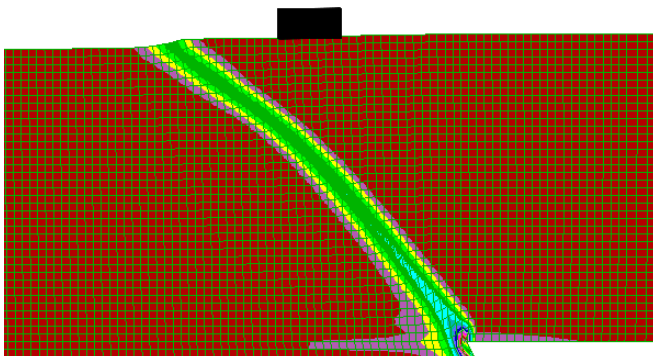
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



Max. shear strain increment

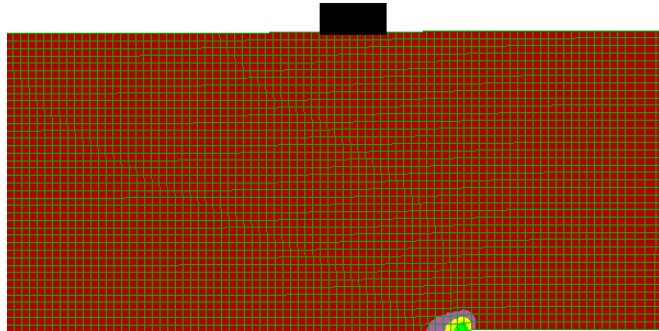


Contour interval= 5.00E-02

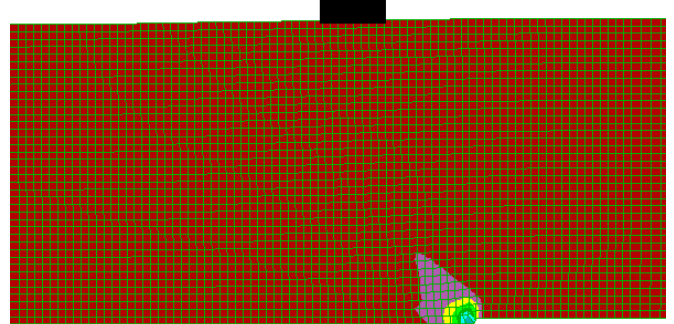
**Σχήμα 28.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=10m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



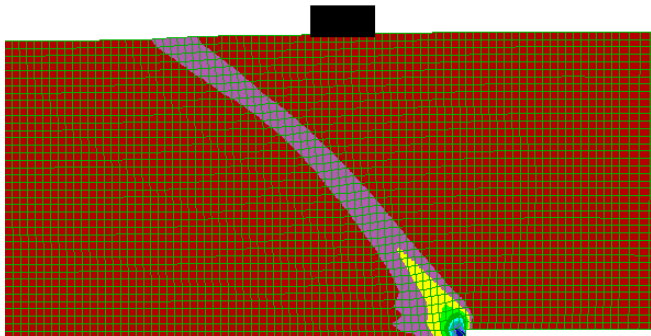
d=0.2m



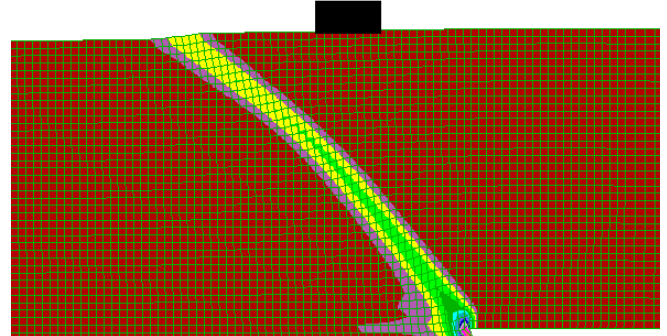
d=0.4m



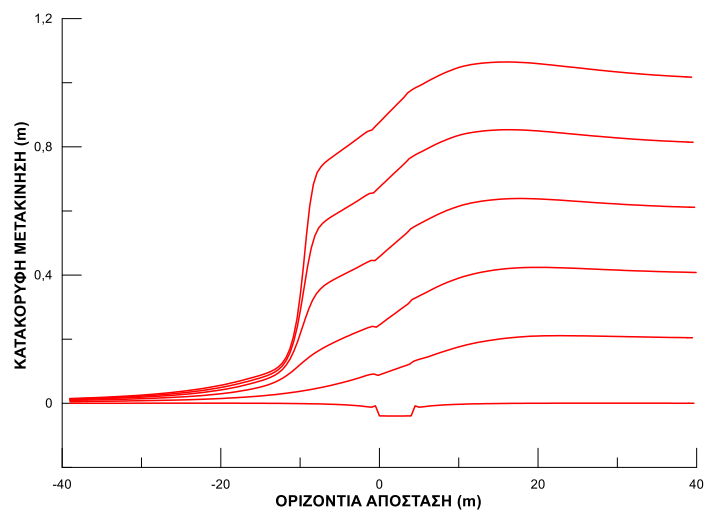
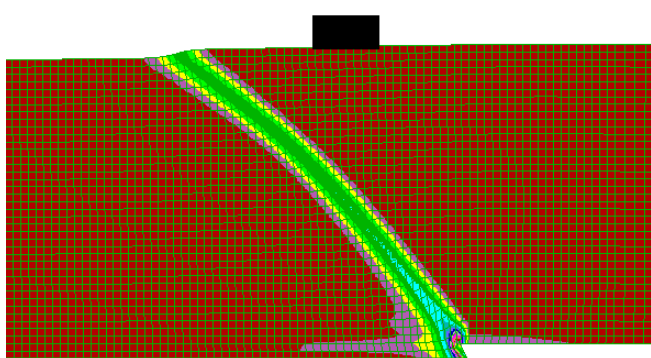
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



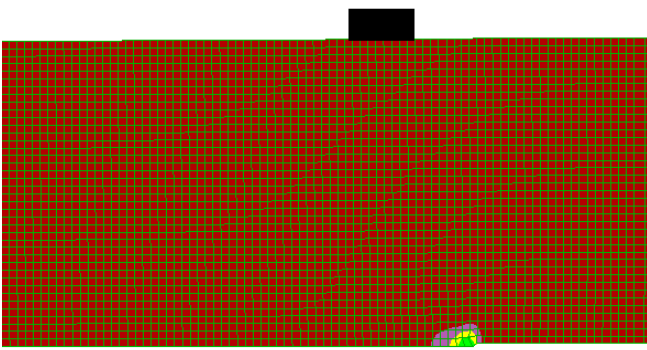
Max. shear strain increment



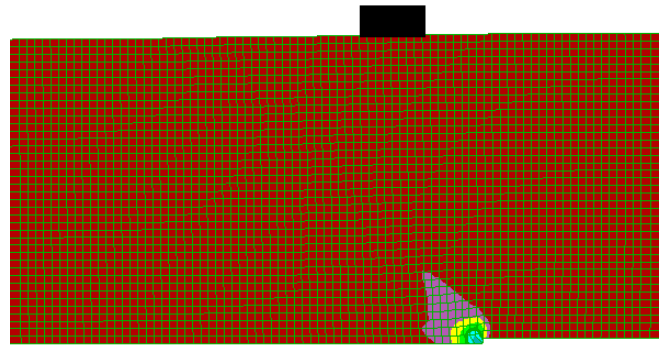
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 29.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=8m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

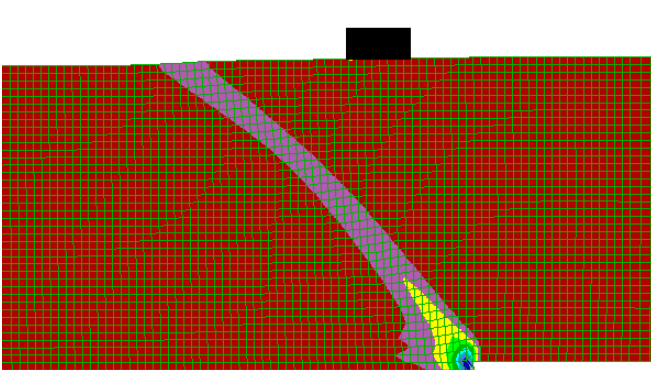
d=0.2m



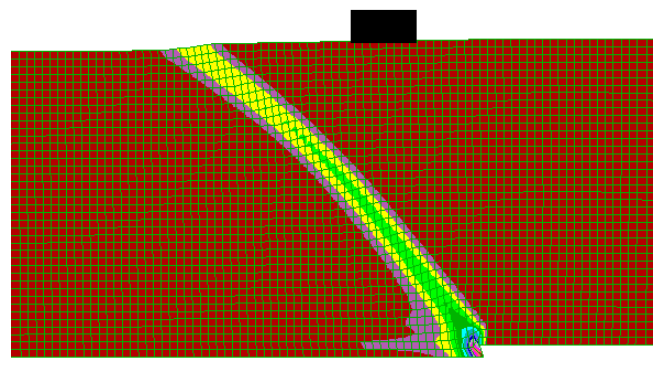
d=0.4m



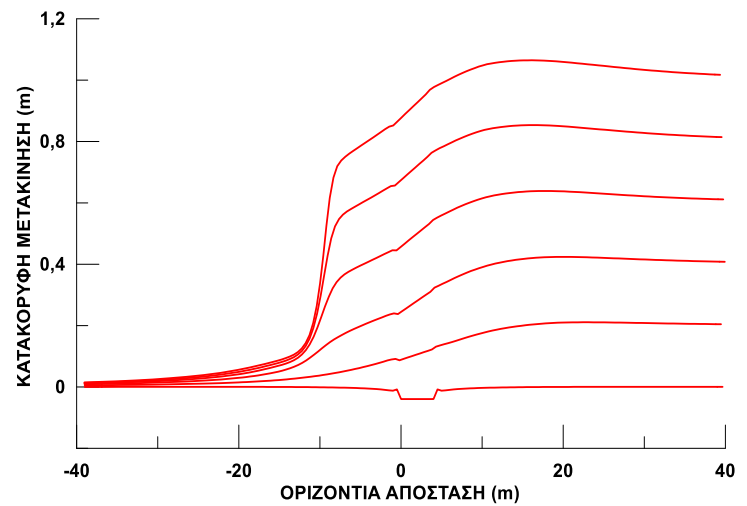
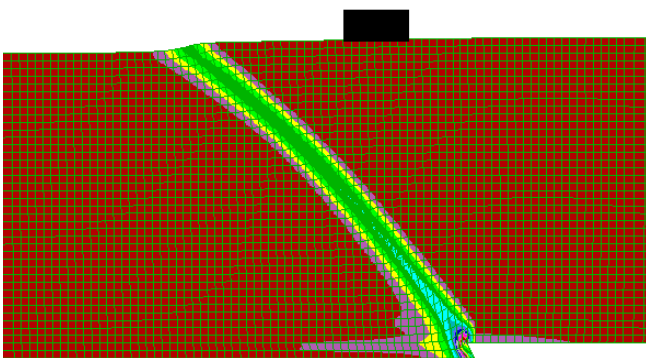
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m



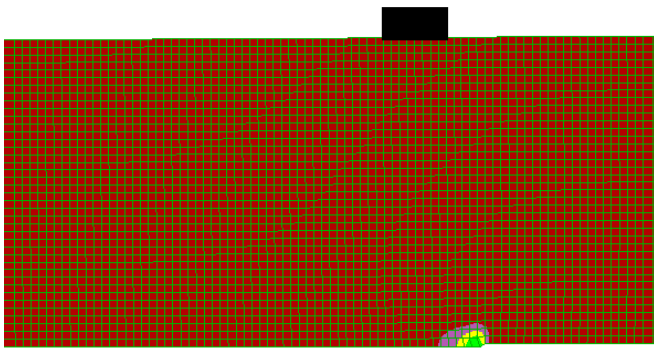
Max. shear strain increment



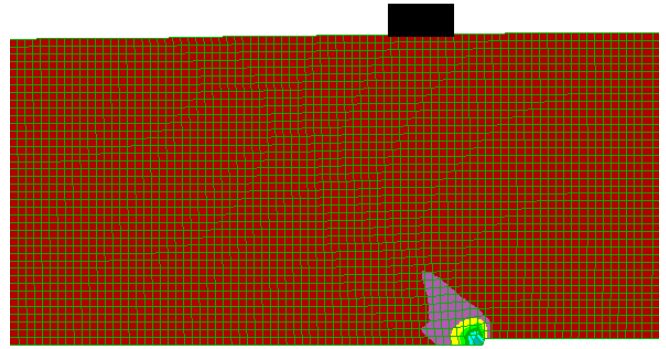
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 30.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=8m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$

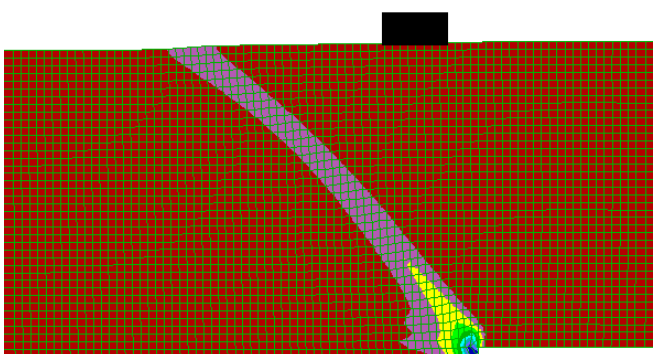
d=0.2m



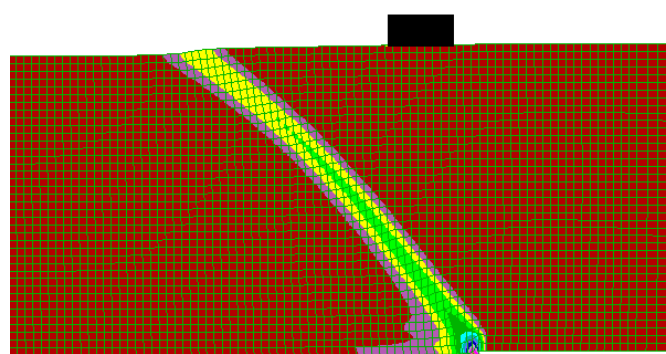
d=0.4m



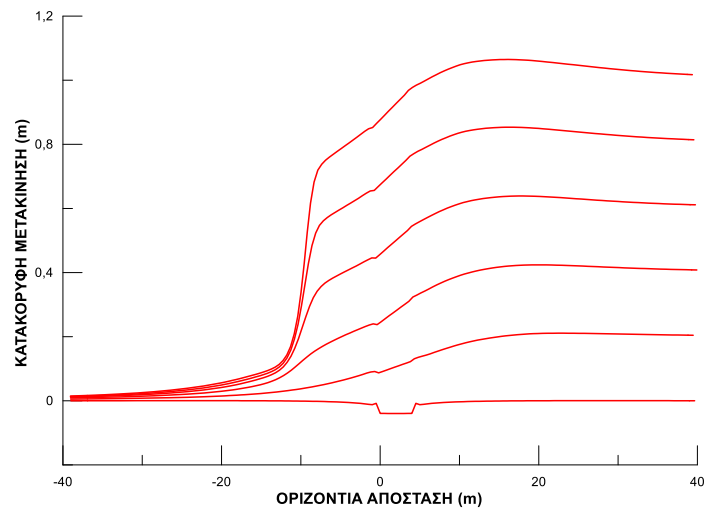
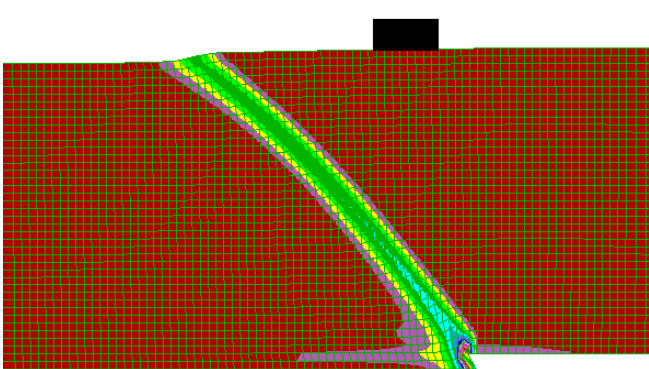
d=0.6m



d=0.8m



d=1.0m

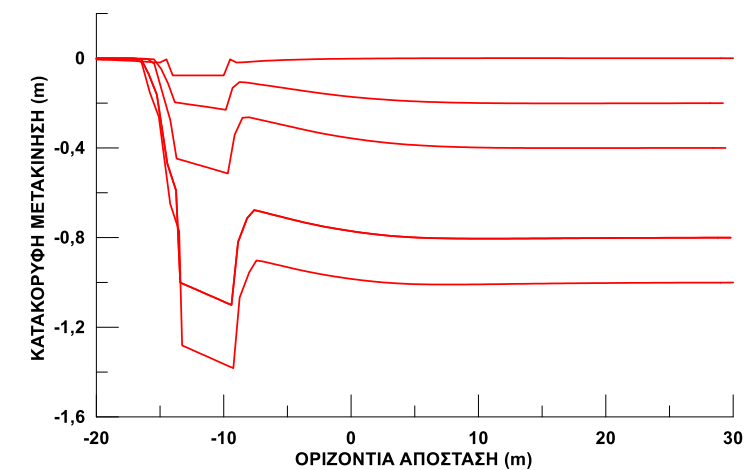
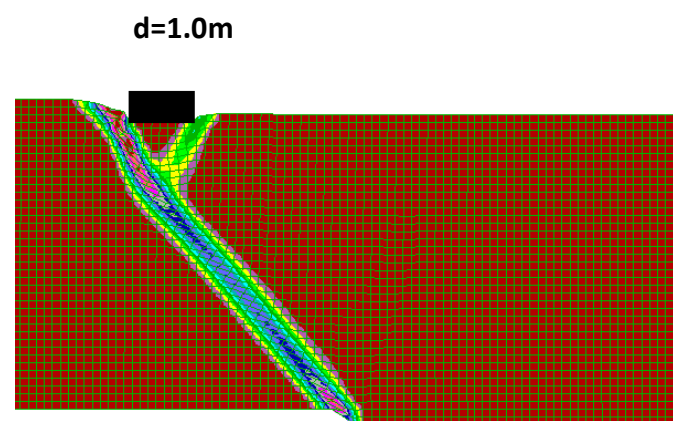
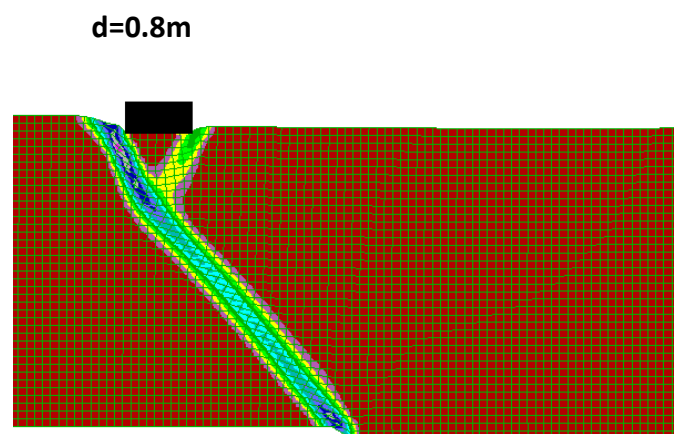
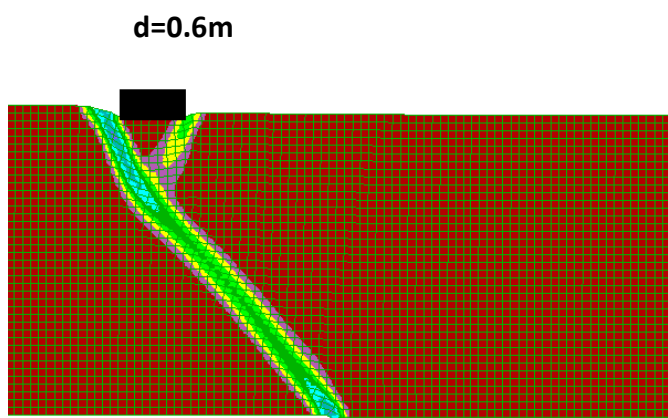
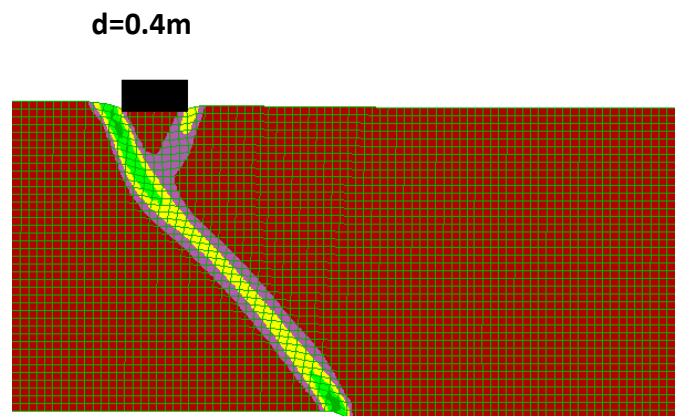
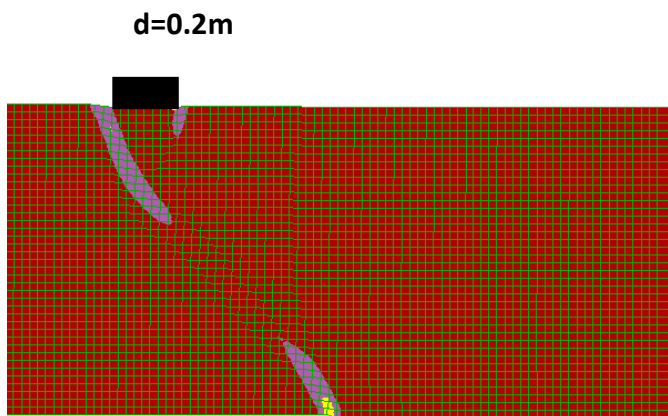


Max. shear strain increment

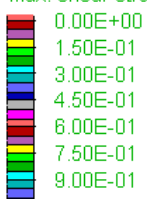


Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 31.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση θεμελίου  $C=4m$  και για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .



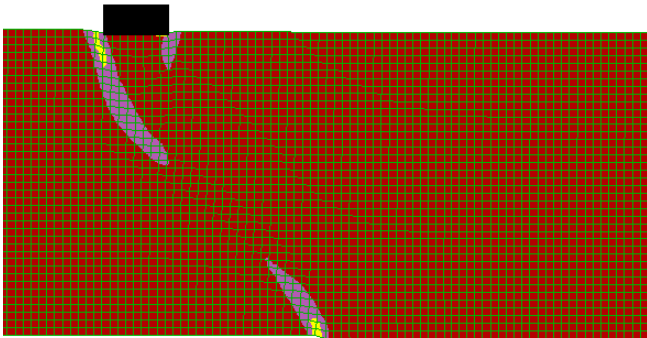
Max. shear strain increment



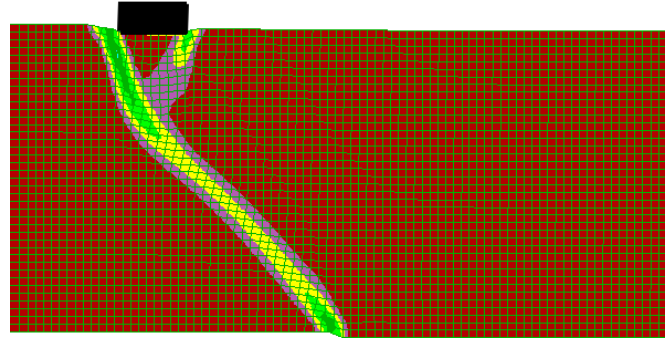
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 32.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=12\text{m}$  και φορτίου  $q=180\text{kPa}$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .

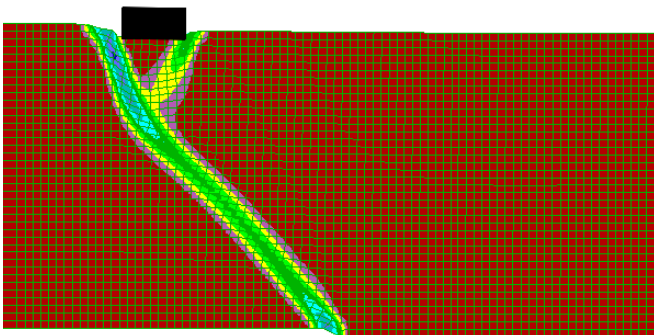
d=0.2m



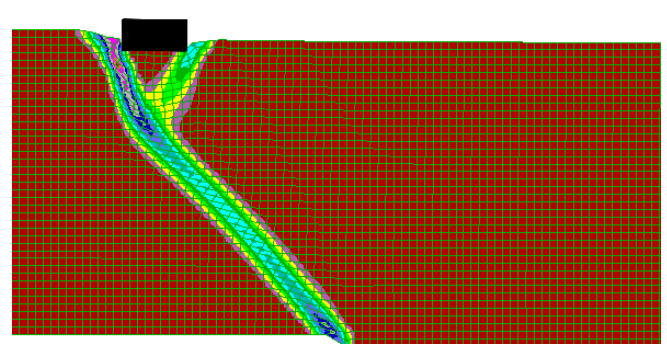
d=0.4m



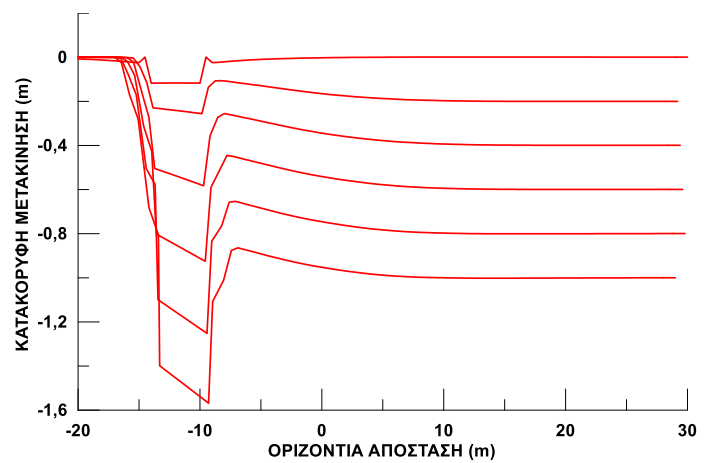
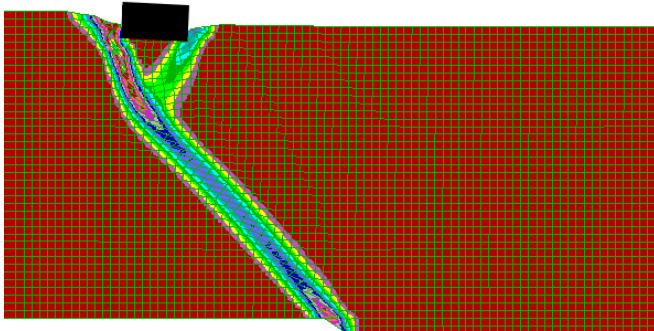
d=0.6m



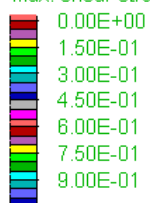
d=0.8m



d=1.0m



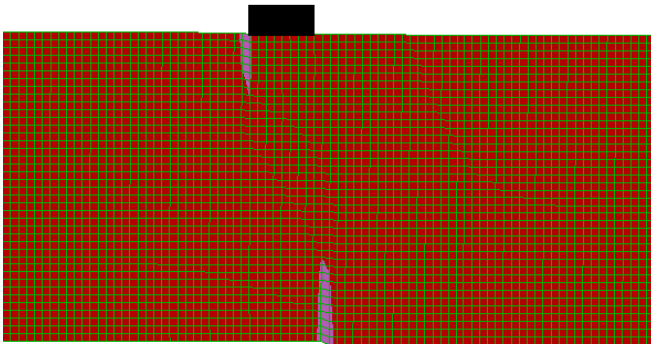
Max. shear strain increment



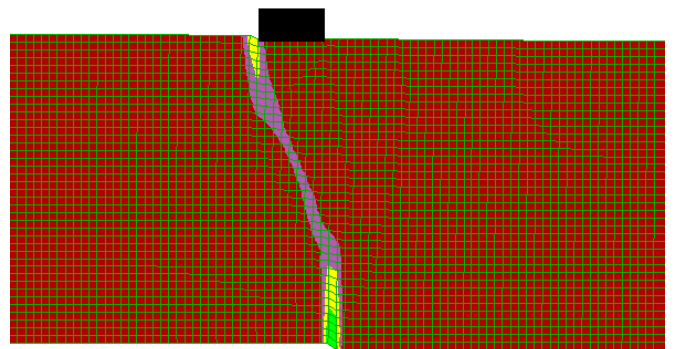
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 33.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για κανονικό ρήγμα  $\beta=45^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=12m$  και φορτίου  $q=270kPa$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0m$ .

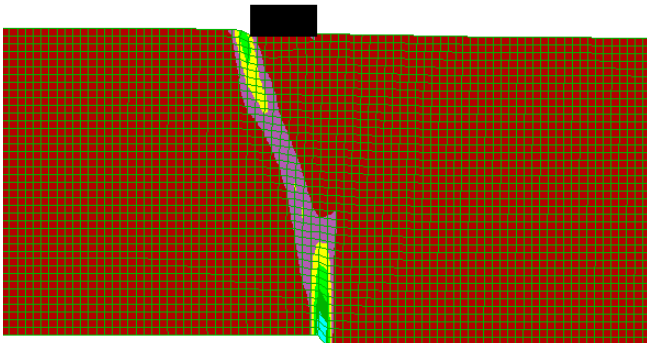
d=0.2m



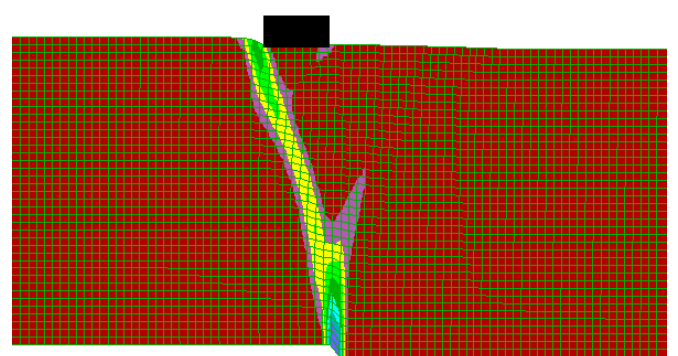
d=0.4m



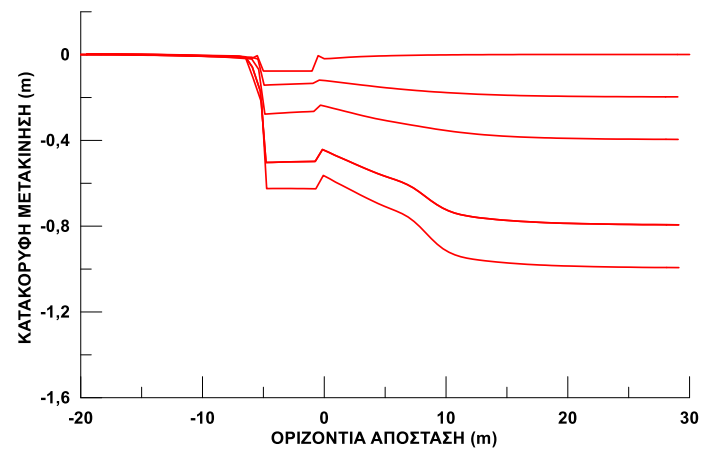
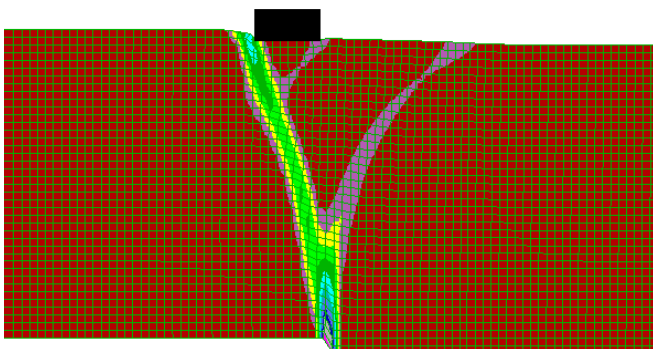
d=0.6m



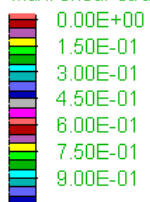
d=0.8m



d=1.0m



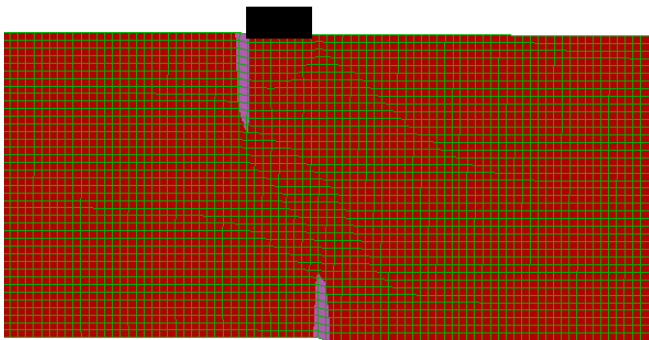
Max. shear strain increment



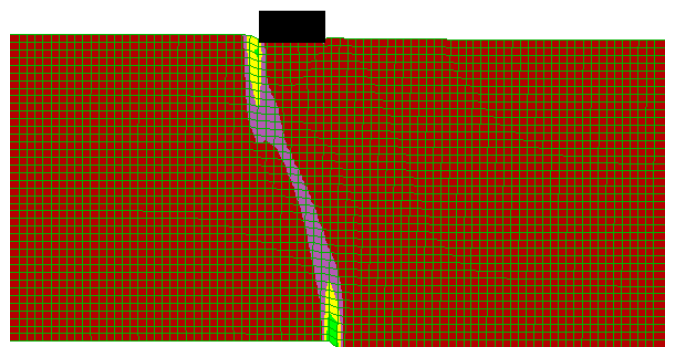
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 34.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για «κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=3\text{m}$  και φορτίου  $q=180\text{kPa}$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .

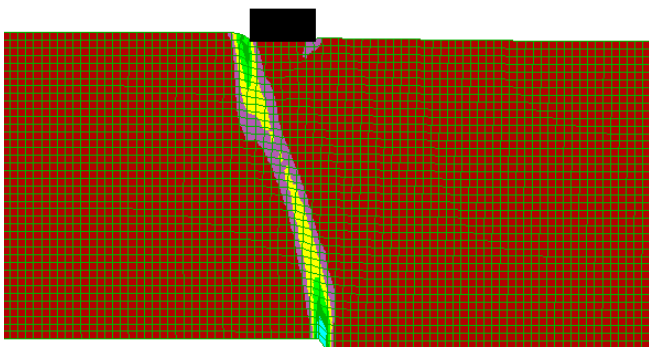
d=0.2m



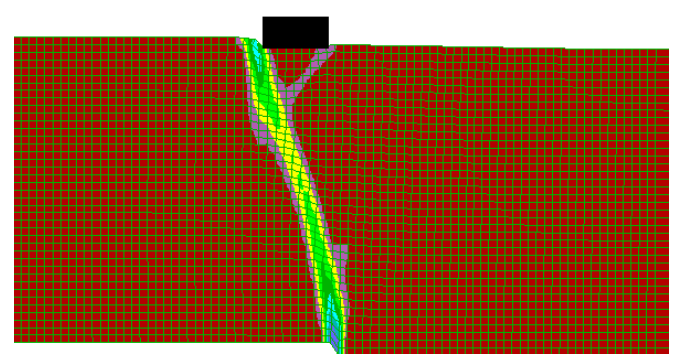
d=0.4m



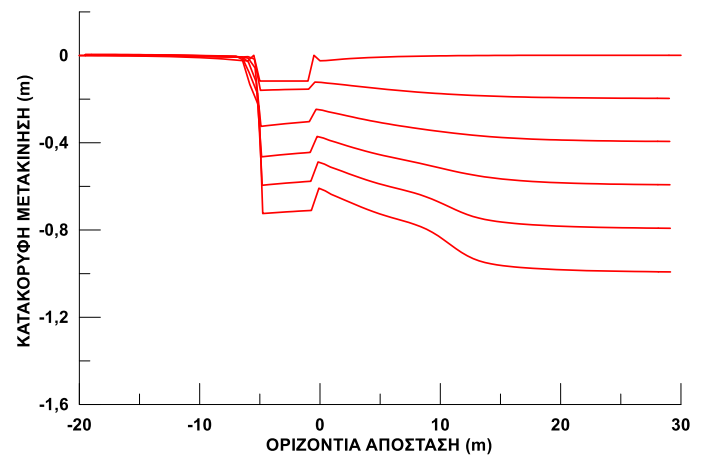
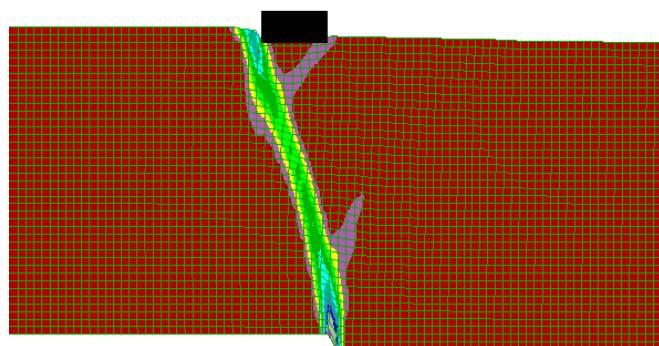
d=0.6m



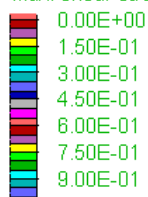
d=0.8m



d=1.0m



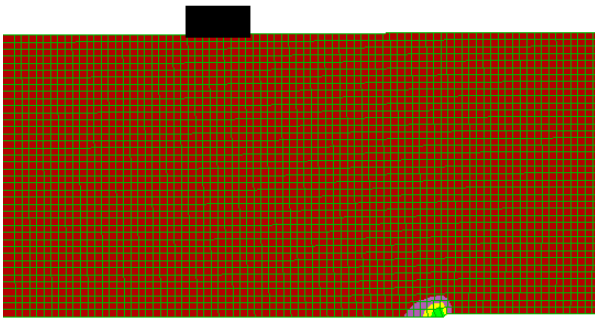
Max. shear strain increment



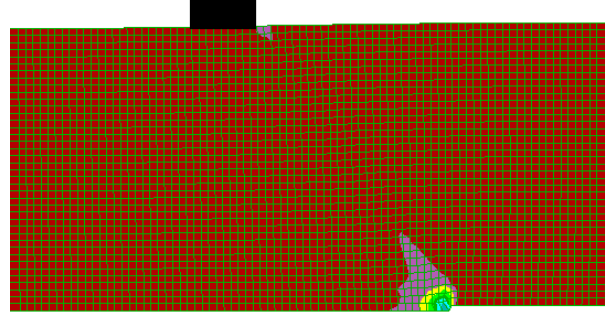
Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 35.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για «κατακόρυφο» ρήγμα  $\beta=85^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=3\text{m}$  και φορτίου  $q=270\text{kPa}$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2\text{-}1.0\text{m}$ .

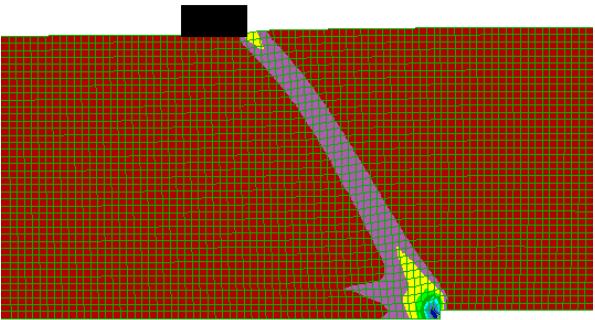
d=0.2m



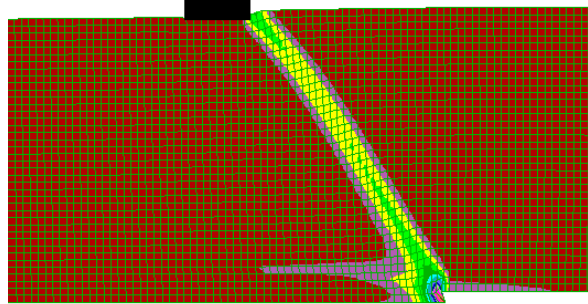
d=0.4m



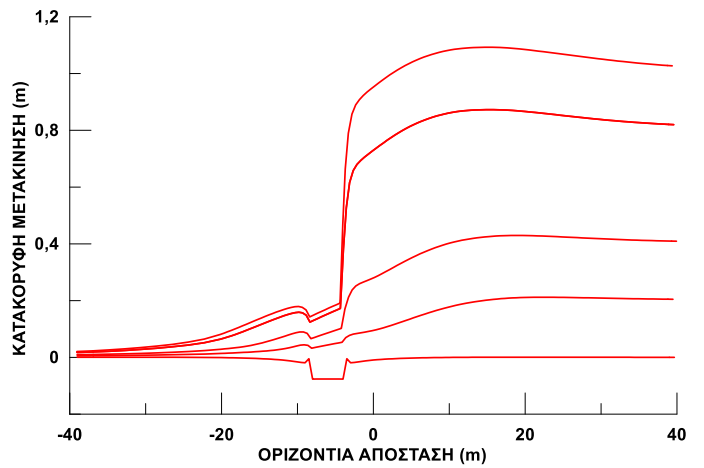
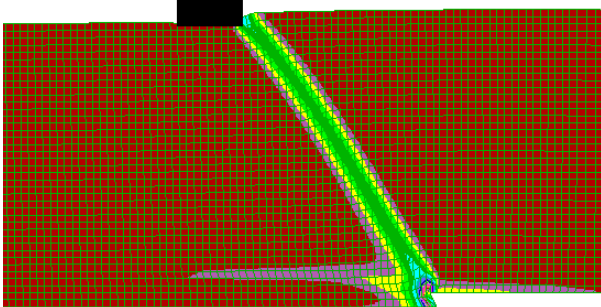
d=0.6m



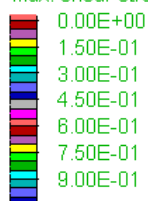
d=0.8m



d=1.0m



Max. shear strain increment

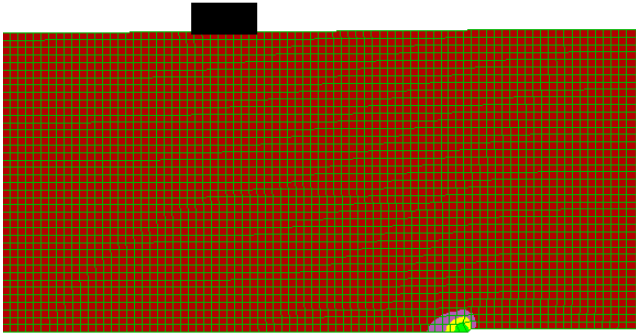


Contour interval= 5.00E-02

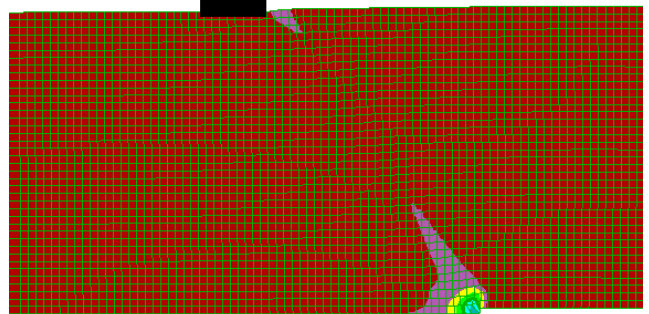
**Σχήμα 36.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=16\text{m}$  και φορτίου  $q=180\text{kPa}$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .



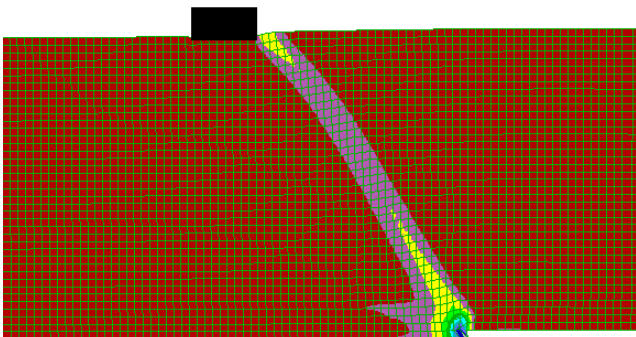
d=0.2m



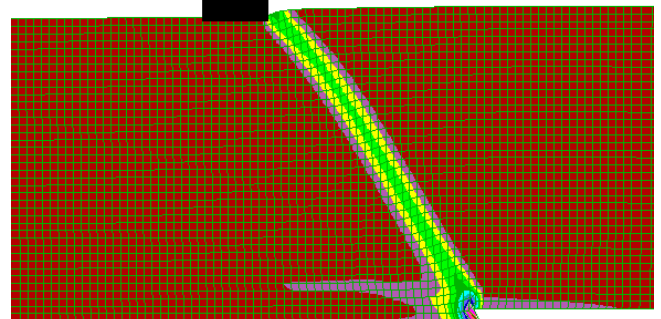
d=0.4m



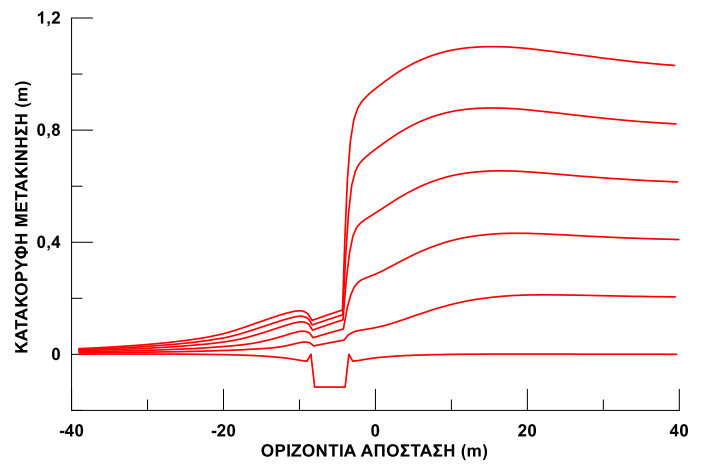
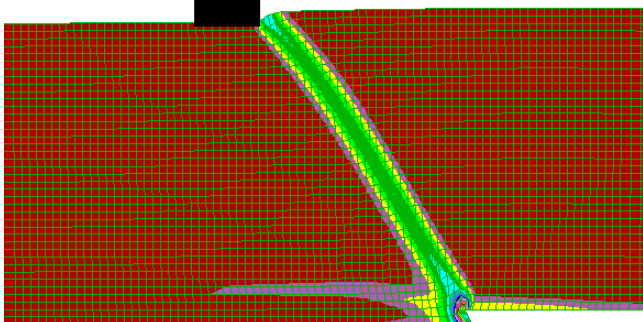
d=0.6m



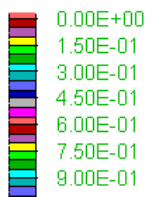
d=0.8m



d=1.0m



Max. shear strain increment



Contour interval= 5.00E-02

**Σχήμα 37.** Συσσωρευμένη διατμητική παραμόρφωση εδαφικής στρώσης για ανάστροφο ρήγμα  $\beta=135^\circ$ , για θέση κατασκευής  $C=16\text{m}$  και φορτίου  $q=270\text{kPa}$ , για κατακόρυφη μετακίνηση  $d=0.2-1.0\text{m}$ .