

# Αριθμητική Διερεύνηση της Διάδοσης της Διάρρηξης Ενεργού Ρήγματος μέσω Εδαφικής Στρώσης

## Numerical Evaluation of Active Fault Rupture Propagation through Soil Layer

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.  
ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτορας, Purdue University USA  
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ. Καθηγητής, Τομέας Γεωτεχνικής, Ε.Μ.Π.  
ΚΑΡΑΜΗΤΡΟΣ, Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτορας, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Παρουσιάζονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων διάδοσης της διάρρηξης ενεργού ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης. Η βαθμονόμηση της μεθοδολογίας βασίστηκε κυρίως σε λεπτομερή ανάλυση της καλά τεκμηριωμένης διάρρηξης του ρήγματος Νικομηδινού (λεκάνη Βόλβης, 20-6-1978). Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και διερεύνησαν παραμετρικά την επίδραση του τύπου του εδάφους, του πάχους της εδαφικής στρώσης και του τύπου και της γωνίας βύθισης του ρήγματος στο υπόβαθρο. Από τις αναλύσεις προκύπτουν νομογραφήματα για την προκαταρκτική εκτίμηση της μετατόπισης ρήγματος που απαιτείται για την επιφανειακή εκδήλωση της διάρρηξης και της θέσης και του εύρους της ζώνης σημαντικών επιφανειακών παραμορφώσεων.

**ABSTRACT:** This paper presents the methodology and the results of numerical analyses of the active fault rupture propagation through a soil layer. The calibration of the methodology was mostly based on a detailed analysis of the well documented rupture of the Nikomidino fault (Volvi basin, 20-6-1978). The analyses were performed with the finite difference method and evaluated parametrically the effect of the soil type, the thickness of the soil layer and the type and tip angle of the fault in the bedrock. The results of the analyses are presented in the form of design charts for the preliminary estimation of the fault displacement required for the propagation of the rupture to the ground surface and of the location and the width of the zone of significant surface distortion.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός τεχνικών έργων πλησίον ενεργών ρηγμάτων, ενδεχόμενο ιδιαίτερα σύνθητες στη χώρα μας, είναι ένα από τα πλέον ακανθώδη θέματα της αντισεισμικής μηχανικής. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι οι περισσότεροι αντισεισμικοί κανονισμοί, συμπεριλαμβανομένου του ΕΑΚ (2000), αποφεύγουν να ορίσουν ακόμη και το εύρος της επικίνδυνης για δόμηση ζώνης εκατέρωθεν του ρήγματος, αλλά απαιτούν ρητά την εκτέλεση ειδικής έρευνας και μελέτης.

Οι δυσκολίες αντιμετώπισης του προβλήματος κλιμακώνονται σημαντικά όταν δεν υπάρχει άμεση εποπτεία του ίχνους του ρήγματος στο γεωλογικό υπόβαθρο λόγω επικάλυψης από

εδαφική στρώση μερικών δεκάδων μέτρων. Έτσι, ακόμη και αν η θέση και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος (τύπος και γωνία βύθισης  $\beta$ ) στο γεωλογικό υπόβαθρο είναι δεδομένα, απομένουν τρία (3) πρακτικά ερωτήματα τα οποία θα πρέπει να διερευνηθούν πριν από το σχεδιασμό των έργων. Συγκεκριμένα:

- α) Θα αναδυθεί η διάρρηξη στην επιφάνεια του εδάφους και πού;
- β) Σε ποια περιοχή οι παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους θα είναι απαγορευτικές για τη δόμηση;
- γ) Θα υπάρξει τοπική ενίσχυση της σεισμικής δόνησης και πόση;

Στο παρόν άρθρο, η έμφαση δίνεται στην απάντηση των δύο (2) πρώτων ερωτημάτων, καθώς το τρίτο ερώτημα, το οποίο είναι ιδιαίτερα

πολύπλοκο και απαιτεί τη συνεργασία γεωτεχνικών και σεισμολόγων επιστημόνων για να απαντηθεί, δεν εμπίπτει στους στόχους της παρούσας έρευνας.

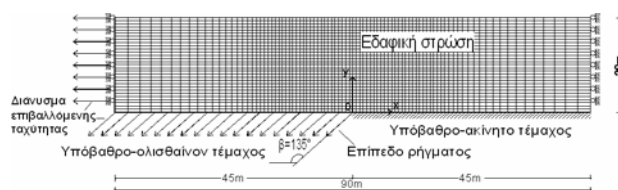
Για την απάντηση των δύο ερωτημάτων έγινε κατ' αρχήν εκτενής έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία απαρτίζεται από εξέταση ιστορικών περιστατικών (π.χ. ο σεισμός Θεσσαλονίκης του 1978, Mercier et al 1983, ο σεισμός Chi-Chi (Taiwan) του 1999, Kelson et al 2001), διενέργεια πειραμάτων μικρής κλίμακας (π.χ. Lade and Cole 1984) ή φυγοκεντριστή (π.χ. Roth et al 1981) και εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων (π.χ. Bray et al 1994). Η έρευνα αυτή υπέδειξε πλήθος πληροφοριών, οι οποίες όμως είναι αποσπασματικές και έχουν χρεία συστηματοποίησης και γενίκευσης. Στα πλαίσια της συστηματοποίησης εντάσσεται το παρόν άρθρο, στο οποίο εκτελούνται λεπτομερώς βαθμονομημένες παραμετρικές αναλύσεις και των οποίων τα αποτελέσματα γενικεύονται με κατάλληλη κανονικοποίηση, σε συμφωνία πάντα με τα ευρήματα από τη βιβλιογραφία.

## 2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προσομοίωση της διάδοσης της διάρρηξης ενός ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης γίνεται με την εκτέλεση ψευδο-στατικών αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca Inc 1993). Η έμφαση δίνεται σε κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, και όχι σε ρήγματα οριζόντιας ολισθησης των οποίων η διάρρηξη διαδίδεται σχεδόν κατακόρυφα και δεν επηρεάζεται από τις εδαφικές συνθήκες (π.χ. Bray et al 1994).

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένας τυπικός κάρναβος και οι συνοριακές συνθήκες των αναλύσεων. Χάριν απλότητας, η επιφάνεια του εδάφους και η διεπιφάνεια εδάφους-υποβάθρου θεωρούνται οριζόντιες. Στο Σχήμα 1 σημειώνεται επίσης η γωνία βύθισης του ρήγματος  $\beta$ , δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση κίνησης του ολισθαίνοντος τεμάχου με την οριζόντιο, η οποία είναι μικρότερη από  $90^\circ$  για κανονικά ρήγματα και μεγαλύτερη για ανάστροφα.

Ο λόγος του πλάτους προς ύψος του κάρναβου είναι τουλάχιστον 4:1 ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των πλευρικών κατακόρυφων συνόρων στην ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων. Στην περιοχή πάνω από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο ο κάρναβος είναι πυκνότερος και αποτελείται από τετραγωνικά στοιχεία ώστε να μην



Σχήμα 1. Τυπικός κάρναβος και συνοριακές συνθήκες αναλύσεων

Figure 1. Typical mesh and boundary conditions of analyses

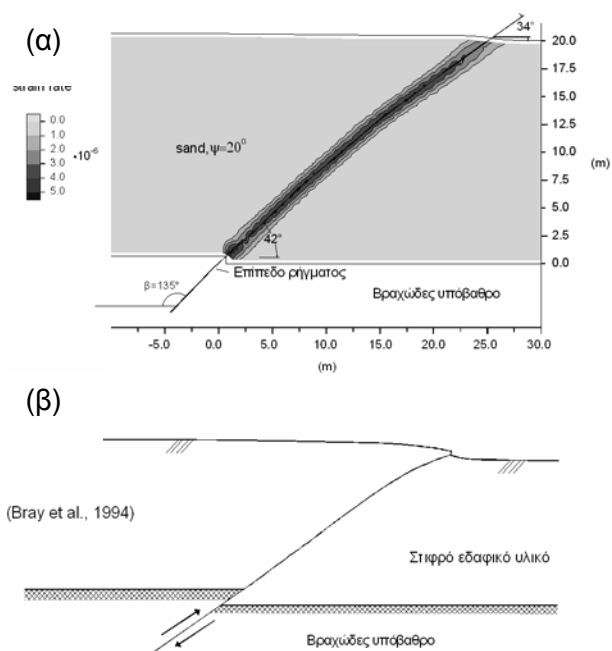
επηρεάζεται ο μηχανισμός διάδοσης της διάρρηξης.

Τα πλευρικά όρια του κάρναβου έχουν παγιωμένη οριζόντια μετακίνηση (μη μηδενική για το ολισθαίνον τεμάχος), αλλά είναι ελεύθερα να κινηθούν στην κατακόρυφη διεύθυνση. Στη διεπιφάνεια εδάφους-υποβάθρου, οι μετακινήσεις είναι επίσης παγιωμένες και μη μηδενικές μόνο για το ολισθαίνον τεμάχος. Όλες οι ανωτέρω μετακινήσεις των συνόρων επιβάλλονται σχετικά «αργά», ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αδρανειακές δυνάμεις.

Δεδομένου ότι η διάδοση της διάρρηξης ρήγματος εξαρτάται έντονα από την εδαφική συμπεριφορά, όχι μόνο στη διαρροή αλλά κυρίως μετά από αυτή, για μη συνεκτικά εδάφη έγινε χρήση του προσομοιώματος Mohr-Coulomb με χαλάρωση. Για τα συνεκτικά εδάφη, στα οποία η διάρρηξη διαδίδεται πρακτικά υπό αστράγγιστες συνθήκες, έγινε χρήση πάλι του ίδιου προσομοιώματος, αλλά η αντοχή βαθμονομήθηκε επί τη βάση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$ .

## 3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η βαθμονόμηση της μεθοδολογίας γίνεται με ποιοτική και ποσοτική σύγκριση με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα στο Σχήμα 2 συγκρίνονται ποιοτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα του Λουκίδη (1999) για την κατανομή του ρυθμού μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης σε στρώμα πυκνής άμμου επί ανάστροφου ρήγματος με κλίση  $\beta = 135^\circ$ , με αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου. Προσεκτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι η διαδιδόμενη διάρρηξη εκτρέπεται από την ευθεία προβολή του ρήγματος από το υπόβαθρο προς το ακίνητο τεμάχος. Αυτό είναι ένα γενικό συμπέρασμα από τη βιβλιογραφία για ανάστροφα ρήγματα (π.χ. Bray et al 1994), το οποίο αναπαράγουν με ακρίβεια οι αναλύσεις. Επισημαίνεται επίσης, ότι για κανονικά ρήγματα η εκτροπή της διάρρηξης από την



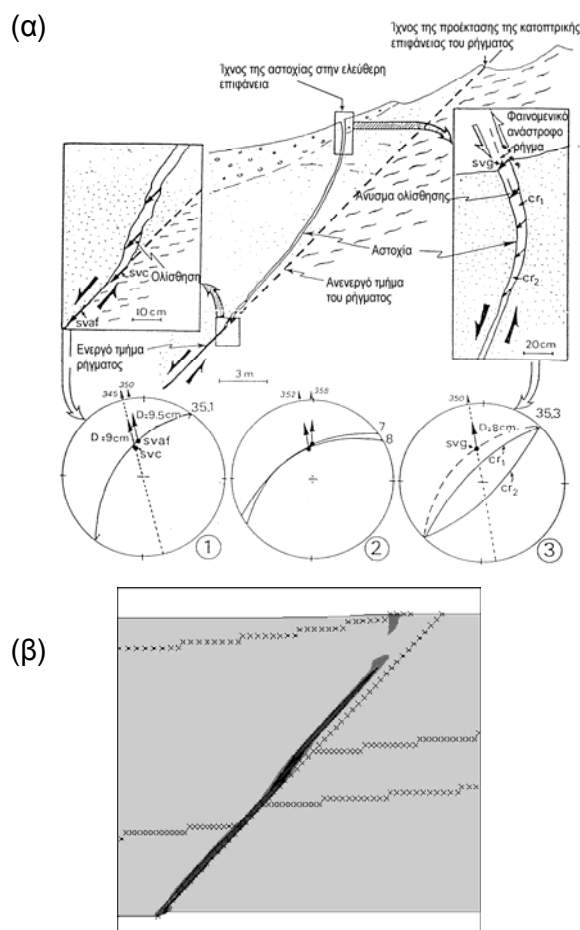
Σχήμα 2. α) Αποτύπωση επιφάνειας αστοχίας από ανάλυση για διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος με  $\beta=135^\circ$  μέσω πυκνής άμμου, β) αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου.

Figure 2. a) Depiction of failure surface from fault rupture propagation analysis of a reverse fault with  $\beta=135^\circ$  through dense sand, b) related field evidence.

ευθεία προβολή του ρήγματος είναι προς το ολισθαίνον τέμαχος.

Για την ποσοτική σύγκριση επελέγη προς ανάλυση το ρήγμα του Νικομηδινού, ένα από τα τέσσερα κανονικά ρήγματα της λεκάνης της Βόλβης, η διάρρηξη του οποίου προκάλεσε το μεγάλο σεισμό της Θεσσαλονίκης (20-6-1978).

Κατά το σεισμό του 1978, το συγκεκριμένο ρήγμα παρουσίασε επιφανειακή εκδήλωση και η επιφάνεια ολίσθησής του κατεγράφη λεπτομερώς από τους Mercier et al (1983), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3α. Με βάση πληθώρα γεωτεχνικών και γεωλογικών δεδομένων για την περιοχή της διάρρηξης εκτελέστηκε σειρά από αναλύσεις (Αντωνίου 2000, Μπουκοβάλας κ.α. 2001), λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των εδαφικών συνθηκών με το βάθος. Από τους διάφορους δείκτες τασικής και παραμορφωσιακής κατάστασης που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό της επιφάνειας διάρρηξης, η πιο ευκρινής απεικόνιση προκύπτει με τη χρήση ισοκαμπυλών του ρυθμού μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των Σχημάτων 3α και 3β.



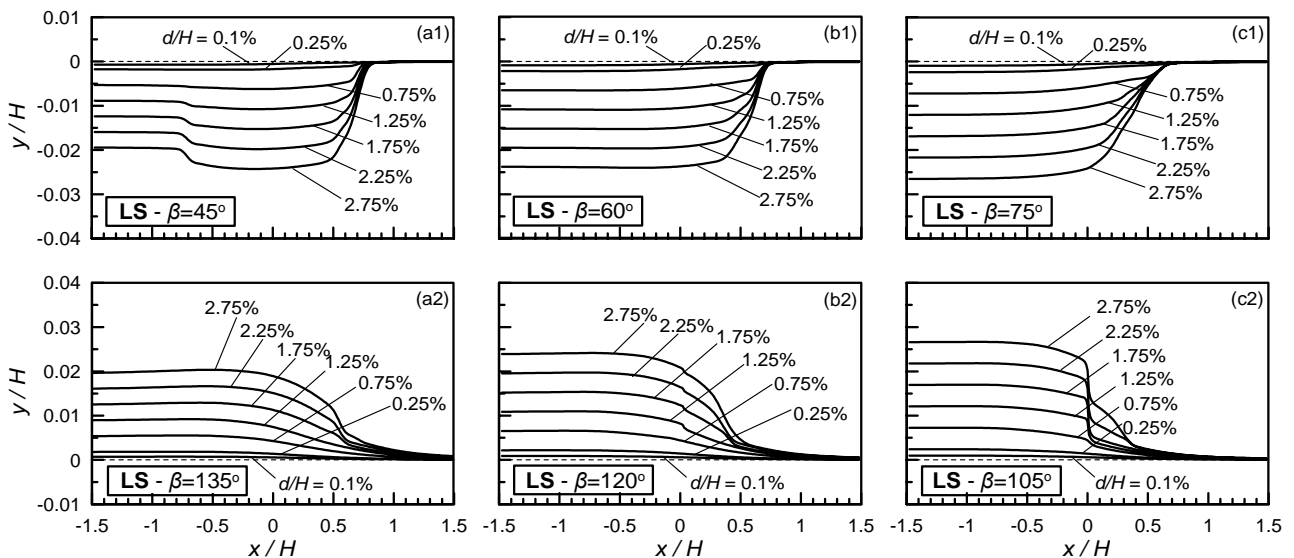
Σχήμα 3. α) Αποτύπωση επιφάνειας αστοχίας ρήγματος Νικομηδινού, β) αριθμητική αποτύπωση αυτής, (Αντωνίου 2000)

Figure 3. a) Depiction of propagated rupture of Nikomidino fault, b) its numerical depiction, (Antoniou 2000)

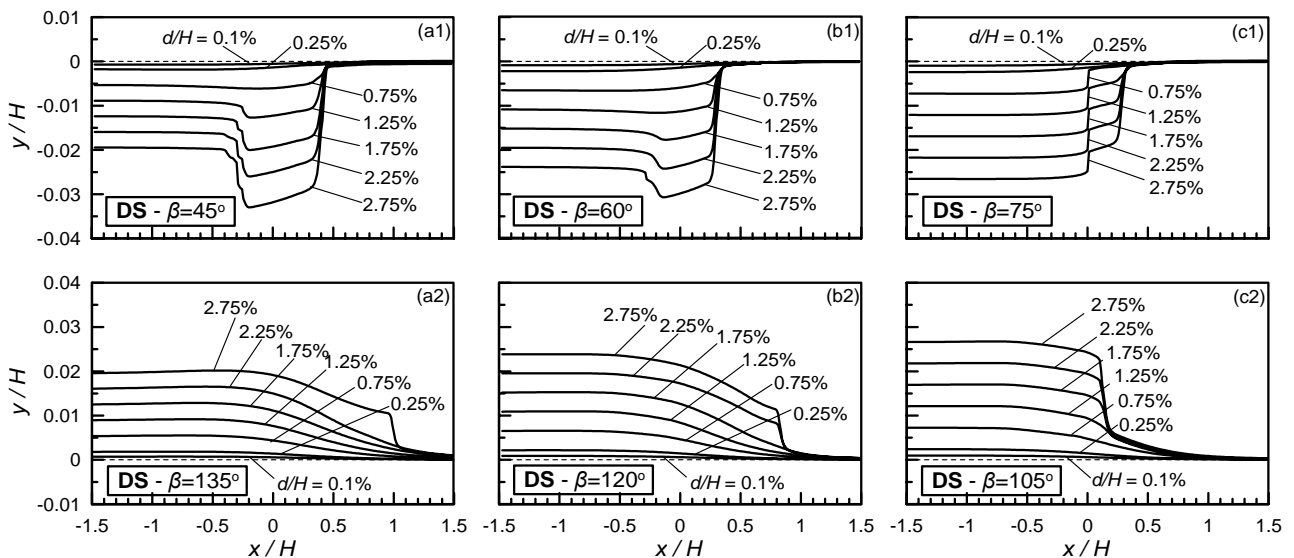
#### 4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Συνολικά εκτελέστηκαν είκοσι οκτώ (28) παραμετρικές αναλύσεις για τη μελέτη της διάδοσης της διάρρηξης και της παραμόρφωσης της επιφάνειας του εδάφους (κάμψη, εμφάνιση αναβαθμού ή κατακρημνίσματος), ως συνάρτηση της γωνίας βύθισης  $\beta$  του ρήγματος στο υπόβαθρο, της επιβαλλόμενης μετατόπισης  $d$  του ρήγματος, του πάχους  $H$  και του τύπου της εδαφικής στρώσης.

Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις αφορούσαν επτά (7) γωνίες βύθισης του ρήγματος στο υπόβαθρο  $\beta = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ$  και  $135^\circ$  και τέσσερις (4) τύπους εδάφους: Χαλαρή Άμμος (LS), Πυκνή Άμμος (DS), Μαλακή Άργιλος (NC) και Στιφρή Άργιλος (OC). Ένα ρήγμα θεωρείται κανονικό για  $\beta = 45^\circ, 60^\circ$  και  $75^\circ$ , και ανάστροφο για  $\beta = 105^\circ, 120^\circ$  και  $135^\circ$ , ενώ η περίπτωση  $\beta = 90^\circ$  είναι η οριακή περίπτωση κατακόρυφου ρήγματος.



Σχήμα 4. Παραμόρφωση επιφάνειας εδάφους κατά την αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$ , για ρήγματα με διάφορες τιμές γωνίες βύθισης  $\beta$  υπό στρώσης Χαλαρής Άμμου (LS)  
 Figure 4. Ground surface distortion with increasing fault displacement  $d/H$ , for faults with different dip angles  $\beta$  underlying a layer of Loose Sand (LS)

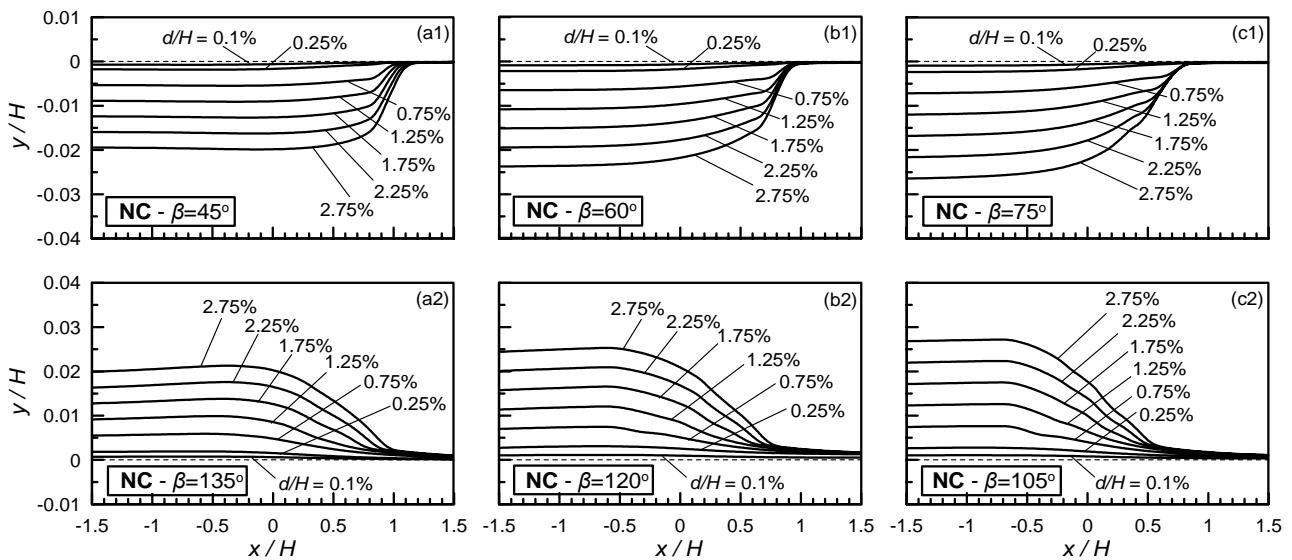


Σχήμα 5. Παραμόρφωση επιφάνειας εδάφους κατά την αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$ , για ρήγματα με διάφορες τιμές γωνίες βύθισης  $\beta$  υπό στρώσης Πυκνής Άμμου (DS)  
 Figure 5. Ground surface distortion with increasing fault displacement  $d/H$ , for faults with different dip angles  $\beta$  underlying a layer of Dense Sand (DS)

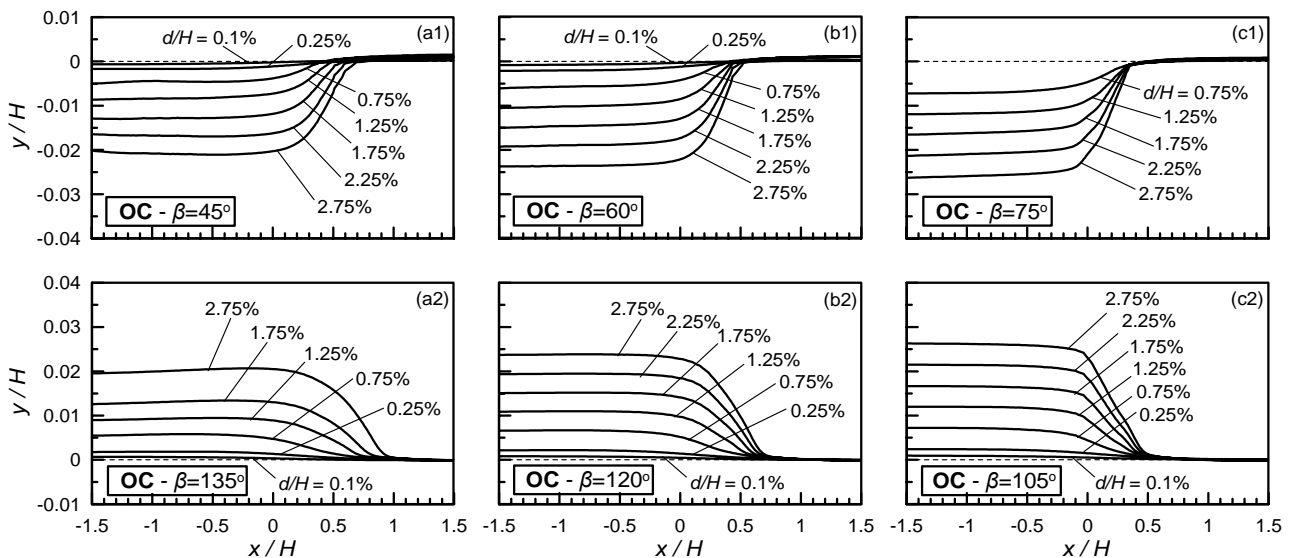
Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος Mohr-Coulomb με χαλάρωση βασίστηκε σε μια σειρά από προκαταρκτικές αναλύσεις (Λουκίδης 1999, Loukidis and Bouckovalas 2001) και στις παρατηρήσεις των Cole and Lade (1984) για την επίδραση της γωνίας διαστολικότητας  $\psi$  στο φαινόμενο. Επί της βαθμονόμησης αναφέρονται ενδεικτικά ότι:

- Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  για τα συνεκτικά εδάφη είναι ανάλογο του βάθους  $z$  (αλλά και του λόγου προστερεοποίησης OCR για τις OC αργίλους), ενώ για τα μη συνεκτικά εδάφη είναι αντίστοιχα ανάλογο του  $z^{1/2}$

- Για τα μη συνεκτικά εδάφη, η μέγιστη γωνία τριβής  $\phi_{max} = 30^\circ$  και  $45^\circ$  για LS και DS, η μέγιστη γωνία διαστολικότητας  $\psi_{max} = 0^\circ$  και  $10^\circ$ , αντίστοιχα, ενώ η χαλάρωση της πυκνής άμμου σε τιμές  $\phi_{res}=30^\circ$  και  $\psi_{res}=0^\circ$  ολοκληρώνεται σε διατμητική παραμόρφωση 10%.
- Για τα συνεκτικά εδάφη, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για μαλακή άργιλο είναι  $S_u(NC) = 0.25\sigma'_{vo}$ , για την σιφρη άργιλο  $S_u(OC) = S_u(NC)OCR^{0.8}$ , ενώ ορίζεται και



Σχήμα 6. Παραμόρφωση επιφάνειας εδάφους κατά την αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$ , για ρήγματα με διάφορες τιμές γωνίες βύθισης  $\beta$  υπό στρώσης Μαλακής Αργίλου (NC)  
 Figure 6. Ground surface distortion with increasing fault displacement  $d/H$ , for faults with different dip angles  $\beta$  underlying a layer of Normally Consolidated Clay (NC)



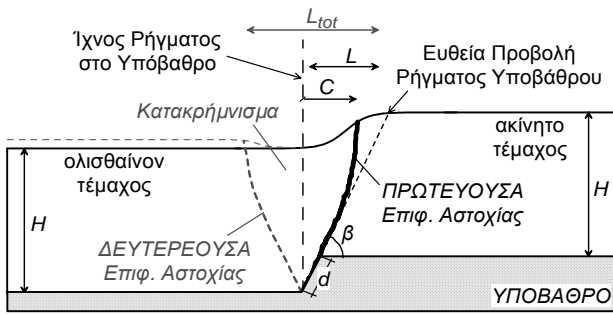
Σχήμα 7. Παραμόρφωση επιφάνειας εδάφους κατά την αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$ , για ρήγματα με διάφορες τιμές γωνίες βύθισης  $\beta$  υπό στρώσης Σπιφρής Αργίλου (OC)  
 Figure 7. Ground surface distortion with increasing fault displacement  $d/H$ , for faults with different dip angles  $\beta$  underlying a layer of Over-Consolidated Clay (OC)

εφελκυστική αντοχή ίση με  $S_u/2$ .

Και στις είκοσι οκτώ (28) αναλύσεις, το πάχος της εδαφικής στρώσης ήταν  $H = 20\text{m}$ . Όμως, σύμφωνα με τους Loukidis and Bouckonas (2001), η παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους για μια δεδομένη τιμή μετατόπισης ρήγματος  $d$  είναι πρακτικώς ανάλογη του πάχους της εδαφικής στρώσης  $H$ . Έτσι, όλα τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναλύσεων γενικεύονται άμεσα με κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων ως προς το πάχος  $H$ .

Στα Σχήματα 4, 5, 6 και 7 παρουσιάζεται ε-ξελικτικά η παραμόρφωση στην επιφάνεια του

εδάφους με την αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$ , για ρήγματα με κλίση  $\beta = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 105^\circ, 120^\circ$  και  $135^\circ$ , και για τους τέσσερις τύπους εδαφών LS, DS, NC και OC, αντίστοιχα. Η παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζεται επί τη βάση των συντεταγμένων των σημείων της ( $x$  και  $y$ ), κανονικοποιημένων ως προς το πάχος  $H$  της εδαφικής στρώσης. Σημειώνεται ότι πριν από την έναρξη της διάρρηξης, η επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται στο υψόμετρο  $y = 0$  και ότι το ίχνος του



Σχήμα 8. Ορισμός δεδομένων και τυπικών αποτελεσμάτων διάδοσης διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης  
 Figure 8. Definition of input and typical results of fault rupture propagation through soil layer

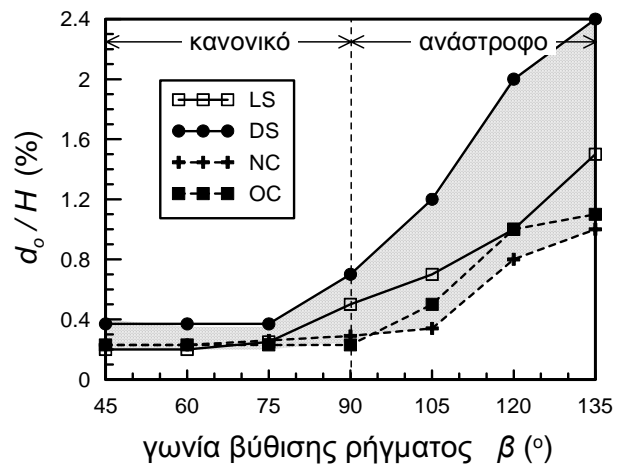
ρήγματος στο υπόβαθρο βρίσκεται στο  $x = 0$ .

Από τα Σχήματα 4 έως 7 προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Η αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος  $d/H$  αυξάνει εν γένει τις κλίσεις στην παραμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους.
- Η περιοχή με μεγάλες κλίσεις στην επιφάνεια έχει πρακτικά σταθερό πλάτος, που δεν αυξάνει για τιμές μετατόπισης ρήγματος  $d/H > 1\%$ .
- Στα μη συνεκτικά εδάφη (LS και DS), δημιουργείται αναβαθμός στην επιφάνεια του εδάφους (έντονη κλίση σε μικρό εύρος). Αντιθέτως, στα συνεκτικά εδάφη (NC και OC) δεν παρατηρείται αναβαθμός, αλλά βαθμιαία κάμψη της επιφάνειας του εδάφους (με πιθανές εφελκυστικές ρωγμές).
- Ειδικά για τα μη συνεκτικά εδάφη, δημιουργείται κατακρήμνισμα για μικρές τιμές κλίσεων κανονικών ρηγμάτων ( $\beta = 45^\circ$  για LS και DS, και  $\beta = 60^\circ$  για DS). Σύμφωνα και με τους Cole and Lade (1984), κατακρήμνισμα δημιουργείται μόνο όταν η γωνία  $\beta < (45^\circ + \psi/2)$ .

Επισημαίνεται ότι παρουσιάζονται αποτελέσματα για τιμές μετατόπισης ρήγματος έως  $d/H = 2.75\%$ , για την οποία η επιφάνεια ολίσθησης εντός του εδάφους έχει δημιουργηθεί πλήρως. Γενικότερα, η ακριβής μορφή της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους δεν παρουσιάζει σημαντικό πρακτικό ενδιαφέρον. Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό έργων μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η γνώση παραμέτρων, όπως (βλέπε Σχήμα 8):

- της οριακής τιμής μετατόπισης ρήγματος  $d_o/H$  για τη διάδοση της διάρρηξης έως την επιφάνεια του εδάφους,
- του εύρους  $L$  της ζώνης με μεγάλες παραμορφώσεις επιφάνειας και



Σχήμα 9. Μετατόπιση ρήγματος  $d_o/H$  για την ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια.  
 Figure 9. Fault displacement  $d_o/H$  for the rupture to reach the ground surface.

- της απόκλισης  $C$  του κέντρου της ως άνω ζώνης με μεγάλες παραμορφώσεις επιφάνειας από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο, οι οποίες αποτελούν το αντικείμενο των επόμενων παραγράφων.

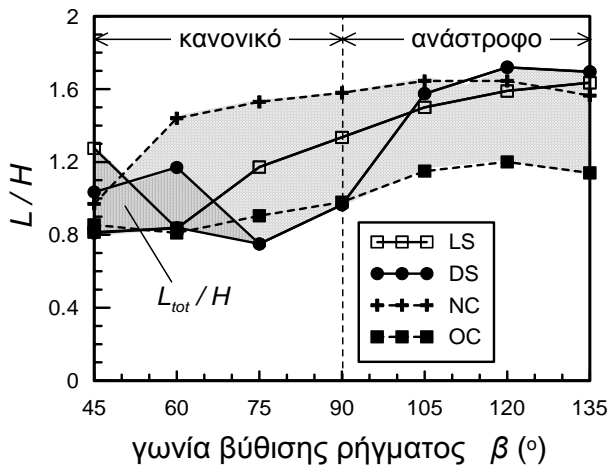
#### 4.1 Μετατόπιση για επιφανειακή εκδήλωση διάρρηξης

Προσεκτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι αύξηση της μετατόπισης ρήγματος  $d/H$  αυξάνει τη μέγιστη κλίση στην επιφάνεια του εδάφους, αρχικά με μικρό ρυθμό, μέχρι μια τιμή οριακής μετατόπισης  $d_o/H$  πάνω από την οποία η μέγιστη κλίση αυξάνει ραγδαία, γεγονός που πρακτικώς υποδηλώνει την επιφανειακή εκδήλωση της διάρρηξης. Η τιμή αυτής της οριακής μετατόπισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 9, ως συνάρτηση της γωνίας βύθισης  $\beta$  του ρήγματος και για τους τέσσερις (4) τύπους εδάφους που εξετάστηκαν.

Γίνεται σαφές ότι για κανονικά ρήγματα η διάρρηξη εκδηλώνεται στην επιφάνεια για πολύ μικρότερες μετατοπίσεις ( $d_o/H = 0.2 \div 0.4\%$ ) απ' ό τι για ανάστροφα ρήγματα ( $d_o/H = 0.3 \div 2\%$ ). Ο λόγος είναι ότι σε ανάστροφα ρήγματα η διαδιδόμενη διάρρηξη εκτρέπεται προς το ακίνητο τέμαχος, τείνοντας να οριζοντιωθεί, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται μεγάλες κλίσεις στην επιφάνεια για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος.

#### 4.2 Εύρος ζώνης σημαντικών κλίσεων της επιφάνειας του εδάφους

Ως ζώνη σημαντικών κλίσεων θεωρείται εδώ η



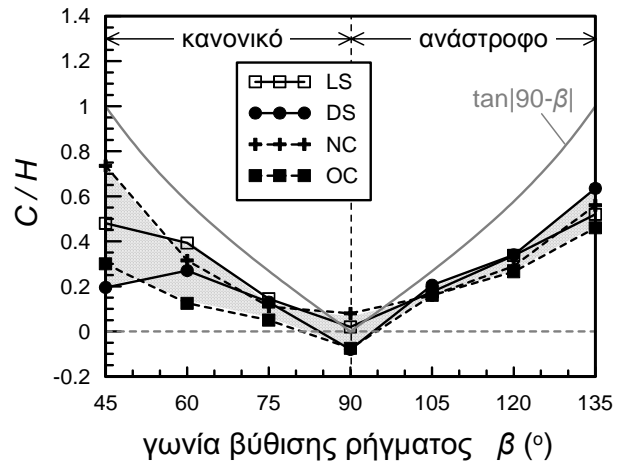
Σχήμα 10. Εύρος  $L/H$  ζώνης μεγάλων κλίσεων επιφανείας εδάφους  
Figure 10. Width  $L/H$  of zone with large surface inclinations

περιοχή όπου η κλίση της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από  $1/500$  ή  $0.2\%$ . Το όριο αυτό επελέγη με βάση κανονιστικές διατάξεις που καθορίζουν ότι διαφορικές καθιζήσεις μεγαλύτερες αυτού του ορίου οδηγούν σε έντονες διατμητικές ρωγμές σε συνήθεις τοιχοποιίες. Το εύρος της ζώνης  $L$  το οποίο πρακτικώς σταθεροποιείται μετά από μετατόπιση ρήγματος  $d/H > 1\%$  (βλέπε Σχήματα 4 έως 7) παρουσιάζεται κανονικοποιημένο ως προς  $H$  στο Σχήμα 10, ως συνάρτηση της γωνίας βύθισης  $\beta$  του ρήγματος και για τους τέσσερις (4) τύπους εδάφους που εξετάστηκαν. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται κατακρήμνισμα, παρουσιάζεται επιπλέον το ολικό εύρος της ζώνης σημαντικών κλίσεων  $L_{tot}/H$  που περιλαμβάνει και το εύρος του κατακρήμνισματος.

Για κανονικά ρήγματα προκύπτει ότι το εύρος  $L/H$  είναι σχετικά μικρότερο από αυτό για ανάστροφα ρήγματα. Και εδώ ο λόγος είναι ότι σε ανάστροφα ρήγματα η διαδιδόμενη διάρρηξη εκτρέπεται προς το ακίνητο τέμαχος, τείνοντας να οριζοντιωθεί, με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης μεγάλων κλίσεων να γίνεται μεγαλύτερο.

#### 4.3 Θέση ζώνης σημαντικών κλίσεων της επιφάνειας του εδάφους

Για τη χρήση του Σχήματος 10 σε πρακτικές εφαρμογές χρειάζεται και η θέση της ζώνης αυτής σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο. Έτσι, ορίζοντας ως  $C$  την απόσταση του κέντρου της ζώνης εύρους  $L$  από το ίχνος του ρήγματος με θετικές τιμές της  $C$  για



Σχήμα 11. Απόσταση κέντρου  $C/H$  ζώνης μεγάλων κλίσεων επιφανείας εδάφους από το ίχνος του ρήγματος στο υπόβαθρο  
Figure 11. Distance of center  $C/H$  of zone with large surface inclinations from the fault trace in the bedrock

ζώνες προς το ακίνητο τέμαχος (βλέπε Σχήμα 8), το Σχήμα 11 συνοψίζει τις τιμές του  $C$ , κανονικοποιημένες ως προς  $H$ , ως συνάρτηση της γωνίας βύθισης  $\beta$  του ρήγματος και για τους τέσσερις (4) τύπους εδάφους που εξετάστηκαν.

Γίνεται σαφές ότι οι τιμές της κανονικοποιημένης απόστασης  $C/H$  εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία βύθισης  $\beta$  του ρήγματος, και λιγότερο από τον τύπο του εδάφους. Συγκρίνοντας την τιμή του  $C/H$  με την ευθεία προβολή του ρήγματος από το υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους (γραμμή  $\tan|90-\beta|$ ) προκύπτει, ότι η θέση του κέντρου  $C/H$  είναι πάντα μεταξύ του ίχνους του ρήγματος στο υπόβαθρο ( $C/H = 0$ ) και της προβολής αυτού στην επιφάνεια του εδάφους. Για  $\beta = 90^\circ$ , όταν η διάρρηξη διαδίδεται κατακόρυφα, η ζώνη σημαντικών κλίσεων βρίσκεται ισόποσα εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος.

#### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη είναι τα κάτωθι:

- Η διάδοση διάρρηξης ρήγματος μέσω εδαφικής στρώσης πάχους  $H$  εκτρέπεται προς το ακίνητο τέμαχος για ανάστροφα ρήγματα και προς το ολισθαίνον για κανονικά ρήγματα.
- Για μη συνεκτικά εδάφη και μικρές γωνίες βύθισης ρήγματος ( $\beta < 45^\circ + \psi/2$ ), δημιουργείται κατακρήμνισμα στην επιφάνεια του εδάφους.

- Για μη συνεκτικά εδάφη, η ανάδυση της διάρρηξης δημιουργεί αναβαθμό στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ σε συνεκτικά εδάφη αναμένεται κάμψη της επιφάνειας (με πιθανές εφελκυστικές ρωγμές).
- Προτείνονται νομογραφήματα για την προκαταρκτική εκτίμηση της μετατόπισης  $d_0$  ρήγματος για τη διάδοση της διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, της θέσης  $C$  και του εύρους  $L$  ζώνης με κλίσεις επιφανείας μεγαλύτερες από  $1/500$  ή  $0.2\%$ . Τα νομογραφήματα αυτά δίνουν τις ανωτέρω τιμές (κανονικοποιημένες προς  $H$ ) ως συνάρτηση της γωνίας βύθισης  $\beta$  του κανονικού ή ανάστροφου ρήγματος και για τέσσερις τύπους εδαφών.
- Πρακτικώς, το εύρος  $L$  της ζώνης μεγάλων κλίσεων κυμαίνεται από  $0.8$  έως  $1.6H$ , με το κέντρο της  $C$  να βρίσκεται πάντα μεταξύ του ίχνους του ρήγματος στο υπόβαθρο και της ευθείας προβολής του στην επιφάνεια.
- Αντίστοιχα, η ανάδυση της διάρρηξης στην επιφάνεια αναμένεται για τιμές μετατόπισης  $d_0/H = 0.2 - 0.4\%$  σε κανονικά ρήγματα και  $d_0/H = 0.3 - 2.0\%$  σε ανάστροφα ρήγματα.

Τα αποτελέσματα αυτά προϋποθέτουν την πλήρη γνώση της θέσης, της κλίσης και της αναμενόμενης μετατόπισης του ρήγματος στο υπόβαθρο, όλα αντικείμενα σεισμο-τεκτονικής μελέτης. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προκαταρκτικό ορισμό ζωνών μη επιτρεπτής δόμησης πλησίον του ίχνους ενεργού ρήγματος στα πλαίσια μικρο-ζωνικής μελέτης. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το σχεδιασμό κατασκευών μικρού βάρους (π.χ. αγωγών) έναντι διάρρηξης ρήγματος.

Από την άλλη μεριά, τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν για το σχεδιασμό κατασκευών μεγάλου βάρους, καθώς στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ρήγματος – εδάφους – κατασκευής, η οποία μπορεί να διαφοροποιήσει ακόμη και τη θέση ανάδυσης της διάρρηξης.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να τονισθεί ότι το μελετούμενο πρόβλημα είναι εξαιρετικά σύνθετο και πολυ-παραμετρικό, και ίσως είναι πρόωρη επί του παρόντος η διατύπωση γενικών κριτηρίων, υπό μορφή διατάξεων αντισεισμικού κανονισμού.

## 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε μερικώς από το πρόγραμμα ΕΠΕΑΕΚ2 – Πυθαγόρας

που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το ΥΠ.Ε.Π.Θ.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνίου Κ. (2000), “Αριθμητική προσομοίωση της θραύσης του ρήγματος του Νικομηδινού”, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής ΕΜΠ.
- Bray, J. D., Seed R. B., Cluff L. S., Seed H. B. (1994a), “Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (3), 543-561
- Bray, J. D., Seed R. B., Seed H. B. (1994b), “Analysis of Earthquake Fault Propagation through Cohesive Soil”, *Journal of Geotechnical Eng.*, ASCE, 120 (3), 562-580
- Cole D. A. Jr., Lade P. V. (1984), “Influence zones in Alluvium over Dip-Slip Faults”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 110 (5), 599-615
- Kelson K. I., Kang K.-H., Page W. D., Lee C.-T., Cluff L. S. (2001), “Representative styles of deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-made structures”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 (5), 930-952
- Λουκίδης Δ. (1999), “Διάδοση ενεργού ρήγματος διαμέσου εδαφικού στρώματος”, Διπλωμ. Εργασία, Τομ. Γεωτεχνικής ΕΜΠ.
- Loukidis D., Bouckovalas G. D. (2001), “Numerical simulation of active fault rupture propagation through dry soil”, *Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Symposium in honor of Professor W. D. Liam Finn*, San Diego, CA, March 26-31, Paper 3.04
- Mercier J.-L., Carey-Gailhardis E., Mouyaris N., Simeakis K., Rondoyanis T., Anghelidis C. (1983), “Structural analysis of recent and active faults and regional state of stress in the epicentral area of the 1978 Thessaloniki earthquakes (Northern Greece)”, *Tectonics*, 2, 577-600
- Μπουκοβάλας Γ., Λουκίδης Δ., Αντωνίου Κ. (2001), “Διάδοση ενεργών ρηγμάτων σε προσχωματικές αποθέσεις”, Πρακτικά, 9<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Αθήνα, Σεπτέμβριος.
- Roth W. H., Scott R. F., Austin I. (1981), “Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils”, *Geophysical Research Letters*, 8 (6), 561-564