

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Αναλογικά πειράματα μελέτης σχηματισμού ρηγμάτων σε μεγάλα βάθη



#### ΣΑΜΑΡΤΖΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (Επιβλέπων) Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ. Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ

> ΧΑΝΙΑ Μάρτιος, 2008

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη
1. Εισαγωγή
2. Γεωλογία, τεκτονική και μορφολογία του Κορινθιακού κόλπου
3. Διαστασιολογική ανάλυση και επιλογή του υλικού του μοντέλου10
<ol> <li>Ορυκτολογική και κοκκομετρική ανάλυση της άμμου1</li> </ol>
5. Διατμητική αντοχή της άμμου18
5.1. Η Αντοχή και ο Βασικός Μηχανισμός Αστοχίας μη-Συνεκτικών Εδαφών. 18
5.2. Τριβή και Διασταλτικότητα
5.3. Δοκιμές άμεσης διάτμησης της άμμου
5.3.1. Επεξεργασία – Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης32
5.3.2. Υπολογισμός διασταλτικότητας
<ol> <li>Πειράματα σχηματισμού ορθών ρηγμάτων με την πειραματική διάταξη της</li> </ol>
Ολισθαίνουσας Βάσης
6.1. Αναλογικό μοντέλο
6.2. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας43
6.3. Αποτελέσματα πειραμάτων43
6.3.1. Αποτελέσματα του $1^{00}$ πειράματος
6.3.2. Αποτελέσματα του 2 <sup>ου</sup> πειράματος
7. Συμπεράσματα-Προτάσεις
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ПАРАРТНМА

# Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ερευνάται μηχανικό μοντέλο της εξέλιξης της ακολουθίας των ρηγμάτων σε ένα εφελκυστικό τεκτονικό πεδίο όπως είναι αυτό του Κορινθιακού κόλπου. Το κίνητρο γι' αυτή τη μελέτη είναι δεδομένα μικροσεισμικών καταγραφών πού δείχνουν την ύπαρξη μιας ενεργής ζώνης ολίσθησης μικρής κλίσης σε βάθος 7 -11 km σε ένα εφελκυστικό πεδίο υψηλής σεισμικότητας. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη μικρής κλίμακας «ολισθαίνουσας βάσης» η οποία σχεδιάστηκε για να αποδώσει την τεκτονική κίνηση της ζώνης ολίσθησης σε μία περιοχή που υφίσταται εφελκυσμό. Με τη βοήθεια διαστασιολογικής ανάλυσης βρέθηκε ότι το καταλληλότερο υλικό του μηχανικού μοντέλου είναι η ξηρή άμμος. Πριν την πραγματοποίηση του πειράματος με την διάταξη της ολισθαίνουσας βάσης, έγινε κοκκομετρική ανάλυση καθώς και δοκιμή διάτμησης της άμμου για τον προσδιορισμό της γωνίας εσωτερικής τριβής, της συνοχής και της διασταλτικότητας της. Εκτελέσθηκαν δύο δοκιμές με διαφορετικές συνοριακές συνθήκες εκ των οποίων στη μεν πρώτη η ζώνη μειωμένης τριβής επί της ολισθαίνουσας βάσεως ήταν μικρότερη, στη δε δεύτερη προσομοιώθηκε και το προστιθέμενο βάρος λόγω ιζηματογένεσης. Τα δύο αυτά πειράματα κατέδειξαν τους μηχανισμούς σχηματισμού κανονικών ρηγμάτων στις δύο όχθες του κόλπου και τον τρόπο που συνδέονται αυτά με την ζώνη ολίσθησης μικρής κλίσης, που μοιάζουν αρκετά με τα υπάρχοντα ρήγματα στην ξηρά και στη θάλασσα του κόλπου.

#### 1. Εισαγωγή

Ο σχηματισμός κανονικών ρηγμάτων μεγάλων κλίσεων είναι σημαντικό θέμα στην Τεκτονική και στη Σεισμολογία αφενός μεν για την κατανόηση της τεκτονικής δομής μιας περιοχής και αφετέρου για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου. Ο Κορινθιακός κόλπος χαρακτηρίζεται ως μία εκ των σεισμικά ενεργότερων «τάφρων» με ιστορικό επαναλαμβανόμενων σεισμών μεγάλου μεγέθους. Μεγάλοι σεισμοί έχουν καταγραφεί: το 1861 πλησίον της πόλης του Αιγίου ( $M_w$ =6.7) ο οποίος δημιούργησε επιφανειακά ρήγματα συνολικού μήκους 13 km, το 1981 κοντά στην πόλη της Κορίνθου με σειρά τριών σεισμών ( $M_w$ =6.7, 6.4, 6.4), το 1992 στο Γαλαξίδι ( $M_w$ =5.8), το 1995 στο Αίγιο ( $M_w$ =6.2), το 1997 στην Β. Ελευσίνα με σειρά σεισμών ( $M_w$ =4.1, 4.3) και στο Γαλαξίδι ( $M_w$ =5.4, 5.5), (εστιακό βάθος 20 km.).

Η γεωτεκτονική του Κορινθιακού κόλπου χαρακτηρίζεται από δύο κύριες οικογένειες μεγάλων κύριων και αντιθετικών ρηγμάτων. Σημειώνεται ότι «μεγάλα» ρήγματα είναι εκείνα των οποίων το μήκος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το σεισμογενές βάθος (λ.χ. σε σεισμό M=6 η ολίσθηση συμβαίνει σε ρήγμα μήκους 10-15 km) το οποίο στην Ελλάδα είναι 10-15 km με βάση ακριβείς μικροσεισμικές μετρήσεις. Ρήγματα με πολύ μικρότερα μήκη από το πάχος του σεισμογενούς στρώματος παράγουν σεισμούς μεγέθους M< 5 (λ.χ. M=4.0 αντιστοιχεί σε ρήγμα με L=100 m)

Οι δύο αυτές οικογένειες ρηγμάτων προσδιορίζουν την τοπογραφία και την υδρολογία της ευρύτερης περιοχής και είναι υπεύθυνες για την δημιουργία μεγάλων λεκανών όπως είναι ο Κορινθιακός κόλπος, η Β. Ευβοια και η λεκάνη ΒΑ του Παρνασσού.

Επιπρόσθετα, ο Κορινθιακός κόλπος είναι ιδανική περιοχή για την κατανόηση της εκκίνησης και των αρχικών σταδίων ηπειρωτικής έκτασης (extension). Από δεδομένα μικροσεισμικών καταγραφών φαίνεται η ύπαρξη μιας ενεργής ζώνης ολίσθησης μικρής κλίσης σε βάθος 7 – 11 km σε ένα εφελκυστικό πεδίο υψηλής σεισμικότητας.

Για τους παραπάνω λόγους, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση ένας πιθανού μηχανισμού που περιγράφει τον σχηματισμό και την κινηματική της τάφρου του Κορινθιακού κόλπου. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μια αναλογική συσκευή μικρής κλίμακας, η συσκευή «ολισθαίνουσας βάσης», η οποία σχεδιάστηκε για να αποδώσει την τεκτονική κίνηση της ζώνης ολίσθησης σε μία περιοχή που υφίσταται εφελκυσμό.

# Γεωλογία, τεκτονική και μορφολογία του Κορινθιακού κόλπου

Το βόρειο τμήμα του Κορινθιακού κόλπου περιβάλλεται από θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις μεταξύ τις περιοχής της Ναυπάκτου και του Αντιρρίου, από βουνά ως επί το πλείστων Κρητιδικών ασβεστόλιθων που εν μέρει καλύπτονται από φλύσχη και από ποτάμιες αποθέσεις στο δέλτα των ποταμών που εκβάλουν στον κόλπο (π.χ. το δέλτα του ποταμού Μόρνου). Η νότια πλευρά του, στις ακτές της Πελοποννήσου, περιβάλλεται από σύγχρονες προσχώσεις που αποτελούνται από διάφορα ασύνδετα υλικά. Ενώ στις ακτές της Στερεάς Ελλάδας δεν συναντώνται τεταρτογενείς αποθέσεις του νεογενούς, στις ακτές της βόρειας Πελοποννήσου καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις. Η βάση των αποθέσεων αυτών αποτελείται από αργίλους, μάργες και άμμους και επικαλύπτεται από συγκρίματα μεγάλου πάχους.

Μορφολογικά ο Κορινθιακός κόλπος αποτελεί μία ασύμμετρη τεκτονική τάφρο, η οποία πιστεύεται ότι σχηματίσθηκε 1.000.000 χρόνια πριν (Πλειόκαινο). Η Κορινθιακή τάφρος αποτελεί τμήμα ενός συστήματος τριών τάφρων (Πατραϊκής – Κορινθιακής – Μεγάρων) οι οποίες χωρίζονται από συστήματα ρηγμάτων ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης (Σχ. 2.1). Έχει πλάτος που κυμαίνεται από 10 – 30 km, μήκος 120 km και μέγιστο βάθος του πυθμένα της θάλασσας 900 m. και αποχωρίζει την Πελοπόννησο από την Στερεά Ελλάδα.



Σχήμα 2.1: Τεκτονική μορφολογία του Κορινθιακού κόλπου με τις οικογένειες των κανονικών και αντιθετικών ρηγμάτων (Bell et al, 2007).

Στο νότιο τμήμα του κόλπου και κατά μήκος των βορείων παραλίων της Πελοποννήσου έχουν κατά καιρούς ενεργοποιηθεί κανονικά ρήγματα με παράταξη Α-Δ και μεγάλη κλίση περίπου  $50^{\circ} - 80^{\circ}$  προς Βορρά. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από μετρήσεις στην βαθιά γεώτρηση που έγινε στο Αίγιο (δυτικός Κορινθιακός κόλπος) το 2003 και η οποία έτμησε **το ρήγμα του Αιγίου** σε βάθος 760 m. (Σχ. 2.2). Στην απέναντι πλευρά του κόλπου έχει παρατηρηθεί παρόμοια συστοιχία κανονικών ρηγμάτων με αντίρροπη κλίση ~60° – 65° προς νότο, που ονομάζονται **αντιθετικά**. Η διαχρονική δραστηριότητα αυτών των δύο συστοιχιών ρηγμάτων καθόρισε και καθορίζει την μορφοτεκτονική εξέλιξη του Κορινθιακού κόλπου (Σχ. 2.3 και 2.4).



(depths from refraction, m)

(depths from geological log, m)

Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του ρήγματος του Αιγίου που διαπεράσθηκε από την ερευνητική γεώτρηση AIG10 (Cornet et al, 2004).

Όπως έχουν καταδείξει σεισμικές μετρήσεις (*Rigo et al, 1996*) που έχουν γίνει στην ευρύτερη περιοχή του **Δυτικού Κορινθιακού Κόλπου**, φαίνεται ότι κάτω από αυτόν και σε βάθος 7 – 11 km υπάρχει μία ζώνη ολίσθησης πολύ μικρής κλίσης 5 ° – 10° προς Βορρά (Σχ. 2.3 και 2.4) που σχετίζεται με την συστοιχία των κανονικών ρηγμάτων που παρατηρούνται στην επιφάνεια.



(α)



(β)

Σχήμα 2.3: (α) Ο Γεωλογικός – τεκτονικός χάρτης περιοχών a και b, και (β) Η ζώνη ολίσθησης στις εγκάρσιες τομές a και b που εκτιμάται από μικροσεισμικές μετρήσεις (Exadaktylos et al, 2003).



Σχήμα 2.4: Η σχηματική αναπαράσταση της τεκτονικής του Κορινθιακού κόλπου -Ογκοδιάγραμμα τομής Αιγίου – Ερατινής (Vardoulakis et al, 1999).

Η παραμόρφωση του κόλπου, όπως έχουν δείξει γεωδαιτικές δορυφορικές μετρήσεις, έχει ρυθμό απομάκρυνσης της Στερεάς Ελλάδας από την Πελοπόννησο περίπου 10 – 25 mm ετησίως με αποτέλεσμα να είναι από τις ταχύτερες εκτεινόμενες περιοχές του κόσμου (Σχ. 2.5).



Σχήμα 2.5: Πεδίο ταχυτήτων εφελκισμού στον Κορινθιακό κόλπο από δεδομένα GPS 11 ετών με σταθερή την Ευρασιατική πλάκα (Bernard et al, 2006).

# Διαστασιολογική ανάλυση και επιλογή του υλικού του μοντέλου

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε ο μηχανισμός ολίσθησης κατά μήκος μιας ζώνης αποκόλλησης μικρής κλίσης όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1.



Σχήμα 3.1: Απλοποιημένο μοντέλο ασύμμετρης τάφρου FNS εξαιτίας της ολίσθησης κατά μήκος της ζώνης διάτμησης μικρής κλίσης FA.

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το δυναμοδιάγραμμα και ο οδογράφος του ελεύθερου στερεού σώματος κατά μήκος της περιοχής ολίσθησης. Η μετατόπιση κατά μήκος της ζώνης ολίσθησης συμβολίζεται με  $\delta$  και κατά μήκος των κανονικών ρηγμάτων με  $s_m$  (για το κύριο ρήγμα) και με  $s_a$  (για το αντιθετικό ρήγμα) αντίστοιχα. Οι δυνάμεις που δρουν στη σφήνα είναι το βάρος της W και οι δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους  $Q_m$  και  $Q_a$  οι οποίες ενεργούν στο κύριο και στο αντιθετικό ρήγμα αντίστοιχα. Δυτές οι κινηματικές και στατικές ιδιότητες της υποτιθέμενης τεκτονικής δομής θεωρούνται ότι είναι συναρτήσεις:

α) γεωμετρικών παραμέτρων, δηλαδή του ύψους της υπερκείμενης μάζας H, της γωνίας κλίσης  $\alpha$  της ζώνης ολίσθησης και των γωνιών  $\mathcal{G}_{V}$  που ορίζουν τη γεωμετρία

της σφήνας FNS, β) μηχανικών παραμέτρων, δηλαδή του μοναδιαίου βάρους  $\gamma$ , του μέτρου ελαστικότητας E, του λόγου του Poisson  $\nu$ , της συνοχής c, της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\varphi$  και της γωνίας διασταλτικότητας  $\psi$ . Έτσι υποθέτεται ότι: :

$$s_i = g_i \left( H, \delta, \psi, \mathcal{G}_{\nu}, \dots \right) \quad , i = m, a \tag{3.1}$$

$$Q_i = f_i \left( H, \gamma, E, c, \varphi, \vartheta_{\gamma}, \dots \right) \quad , i = m, a$$
(3.2)

Για να λυθούν οι γενικές εξισώσεις όπως η εξ. 3.1 και εξ. 3.2 χρησιμοποιείται το θεμελιώδεις θεώρημα της διαστασιολογικής ανάλυσης που είναι γνωστό και ως θεώρημα του Buckingham και το οποίο εκφράζεται ως εξής (Horning, 2006): Αν  $N_1$  είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων αδιάστατων μεταβλητών του προβλήματος,  $N_2$  ο αριθμός των διαστασιολογημένων μεταβλητών και  $N_3$  ο αριθμός των τυπικών διαστάσεων που χρειάζεται για να παράγει τις διαστάσεις των διαστασιολογημένων μεταβλητών, τότε ισχύει:

$$N_1 = N_2 - N_3 \tag{3.3}$$

Για την εξ. 3.1προκύπτει:  $N_2 = 3$  και  $N_3 = 1$ , έτσι  $N_1 = 3 - 1 = 2$ . Αυτό συνεπάγεται:

$$\frac{s_i}{H} = \tilde{g}_i \left( \frac{\delta}{H}, \psi, \mathcal{G}_{\psi}, \dots \right)$$
(3.4)

Για την εξ. 3.2 προκύπτει:  $N_2 = 5$  και  $N_3 = 2$ , έτσι  $N_1 = 5 - 2 = 3$ . Αυτό συνεπάγεται:

$$\frac{Q_i}{\gamma H^3} = \tilde{f}_i \left( \frac{E}{\gamma H}, \frac{c}{\gamma H}, \varphi, \mathcal{G}_{\mathcal{V}}, \dots \right)$$
(3.5)

Η γεωμετρική διάσταση του  $H_P$  (το βάθος της ζώνης ολίσθησης) της πραγματικής τεκτονικής της περιοχής (P=prototype) αντιστοιχεί σε μικρότερη κλίμακα στη

πειραματική διάταξη της «ολισθαίνουσας βάσης» στη τιμή  $H_M$  (M=model). Για παράδειγμα 1cm στο μοντέλο αντιστοιχεί σε 1 km στη φύση. Σ' αυτή την περίπτωση η γεωμετρική κλίμακα είναι:

$$\frac{H_M}{H_P} = \frac{1}{100000} \tag{3.6}$$

Λόγω της ομοιότητας μεταξύ μοντέλου και πρωτότυπου, οι εξισώσεις (3.4) και (3.5) μετατρέπονται ως εξής:

$$\left(\frac{s_i}{H}\right)_M = \left(\frac{s_i}{H}\right)_P \quad \Rightarrow \quad \frac{s_{iM}}{s_{iP}} = \frac{H_M}{H_P} = 10^{-5} \tag{3.7}$$

και

$$\left(\frac{\delta}{H}\right)_{M} = \left(\frac{\delta}{H}\right)_{P} \implies \frac{\delta_{M}}{\delta_{P}} = \frac{H_{M}}{H_{P}} = 10^{-5}$$
 (3.8)

Οι εξισώσεις (3.7) και (3.8) εκφράζουν τη γεωμετρική ομοιότητα και είναι χρήσιμες στην αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων των κινηματικών μετρήσεων του μοντέλου.

Αναμένεται ότι τα ρήγματα στο πρωτότυπο αντιπροσωπεύονται από ζώνες διάτμησης (shear bands) στο μοντέλο. Για μεγάλες μετατοπίσεις ολίσθησης η παραμόρφωση στις ζώνες διάτμησης μπορεί να υποτεθεί ως **ισοχωρική**. Σ' αυτήν την περίπτωση υποθέτεται ότι η γωνία διαστολής ψ είναι μηδέν (ψ=0) και όπως φαίνεται στο  $\Sigma \chi$ . 3.1, τα διανύσματα ολίσθησης είναι παράλληλα στο επίπεδο του ρήγματος. Με αυτή την επισήμανση η εξίσωση (3.4) απλοποιείται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{s_i}{H} = \hat{g}\left(\frac{\delta}{H}, \vartheta_V, \dots\right) \tag{3.9}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την αναλυτική έκφραση των ολισθήσεων που φαίνονται στο Σχ. 3.1.

Ομοίως και για τους επιμέρους όρους ισχύει:

$$\left(\frac{E}{\gamma H}\right)_{M} = \left(\frac{E}{\gamma H}\right)_{P} \quad \Rightarrow \quad \frac{E_{M}}{E_{P}} = \frac{\gamma_{M}}{\gamma_{P}} \cdot \frac{H_{M}}{H_{P}} \approx 10^{-5}$$
(3.10)

και

$$\left(\frac{c}{\gamma H}\right)_{M} = \left(\frac{c}{\gamma H}\right)_{P} \implies \frac{c_{M}}{c_{P}} = \frac{\gamma_{M}}{\gamma_{P}} \cdot \frac{H_{M}}{H_{P}} \approx 10^{-5}$$
(3.11)

Οι εξ. (3.10) και (3.11) δηλώνουν ότι οι ιδιότητες παραμόρφωσης και συνοχής του υλικού του μοντέλου πρέπει να απομειωθούν με τον ίδιο λόγο όπως και οι γεωμετρικές ιδιότητες. Για να ικανοποιηθούν αυτοί οι **νόμοι κλίμακας**, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό το οποίο να έχει αμελητέα ελαστικότητα και συνοχή. Γι' αυτό το λόγο επιλέχτηκε ως πειραματικό υλικό η ξηρή άμμος που δεν έχει συνοχή (*Hubbert, 1937, Carter et al, 1981*). Σ' αυτή την περίπτωση οι παραπάνω περιορισμοί εφαρμόζονται ικανοποιητικά στην εξίσωση (3.5) η οποία μετατρέπεται ως εξής:

$$\frac{Q_i}{\gamma H^3} = \hat{f}\left(\varphi, \vartheta_{\gamma}, \ldots\right) \tag{3.12}$$

Από την συνθήκη οριακής ισορροπίας συνεπάγεται ότι για ένα υλικό με τριβή όπως η ξηρή άμμος, η διεύθυνση των  $Q_m$  και  $Q_a$  σχηματίζει μία γωνία  $\varphi$  με την κάθετο των γραμμών SF και FN αντίστοιχα. Το στατικό πρόβλημα είναι απροσδιόριστο αλλά η λύση μπορεί να βρεθεί αν υποτεθεί ότι η σφήνα είναι μία **ενεργή ζώνη Rankine** (*Sokolovski, 1965*), (Σχ.3.2).



Σχήμα 3.2: Η ενεργή και παθητική ζώνη Rankine σε ένα πλήρως πλαστικοποιημένο κοκκώδες μέσο. Τα κόκκινα βέλη του παραπάνω σχήματος υποδηλώνουν την προς τα πάνω και προς τα κάτω κίνηση του μέσου. Παρατηρείται ότι στην ενεργή περίπτωση η κίνηση είναι προς τα κάτω ενώ η μέγιστη κύρια τάση είναι κατακόρυφη, ενώ στην παθητική περίπτωση η κίνηση είναι προς τα πάνω και η μέγιστη κύρια τάση είναι οριζόντια. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται αντίστοιχα οι κύκλοι του Mohr για τους τανιστές τάσης. Οι διαγώνιες γραμμές παριστάνουν τις γραμμές ολίσθησης (slip lines), οι οποίες αποτελούν τα ίχνη των επιπέδων ολίσθησης που ικανοποιείται η οριακή συνθήκη του υλικού Coulomb. Η υποτιθέμενη σφήνα είναι πλήρως πλαστικοποιημένη όπως καταδεικνύεται από το δίκτυο των διαγώνιων γραμμών ολίσθησης.

## 4. Ορυκτολογική και κοκκομετρική ανάλυση της άμμου

Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα του μοντέλου ολισθαίνουσας βάσης λήφθηκε άμμος από την παραλία του Καλαθά του Νομού Χανίων στη Κρήτη. Μετά την πλύση και την ξήρανση της άμμου ακολούθησε, η κοκκομετρική ανάλυση με δονούμενα κόσκινα στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων. Η ορυκτολογική σύσταση της άμμου προσδιορίστηκε μέσω ακτινοδιαγράμματος που διεξήχθη στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (*Τσουβάλα, 2007*). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίν. 4.1.

Ορυκτό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (%)	
Χαλαζίας	SiO <sub>2</sub>	50.1	
Ασβεστίτης	CaCO <sub>3</sub>	38.8	
Μαγνησιούχος	$(Mg_{400}Ca_{374})(CO_{3})$	89	
ασβεστίτης	(11912900871) (003)	0.0	
Δολομίτης	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.3	

Πίνακας 4.1: Η ορυκτολογική σύσταση της άμμου.

Για την εξακρίβωση της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων έγινε κοκκομετρική ανάλυση σε τρία δείγματα από την υπόψη άμμο. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται στους Πίν. 4.2 – 4.4.

Μέγεθος(μm)	Βάρος επί κοσκίνου (g)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος% αθροιστικά διερχομενο	Βάρος% αθροιστικά παραμένον
560.00	1.60	0.83	99.17	0.83
425.00	9.90	5.12	94.05	5.95
300.00	83.60	43.27	50.78	49.22
180.00	90.10	46.64	4.14	95.86
106.00	7.80	4.04	0.10	99.90
	0.20	0.10		
Σύνολο	193.20	100.00		

Πίνακας 4.2: Η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου για το 1° δείγμα.

Μέγεθος(μm)	Βάρος επί κοσκίνου (g)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος% αθροιστικά διερχομενο	Βάρος% αθροιστικά παραμένον
560.00	1.00	1.21	98.79	1.21
425.00	5.60	6.76	92.03	7.97
300.00	29.10	35.14	56.88	43.12
180.00	42.40	51.21	5.68	94.32
106.00	4.50	5.43	0.24	99.76
	0.20	0.24		
Σύνολο	82.80	100.00		

Πίνακας 4.3: Η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου για το 2° δείγμα.

Πίνακας 4.4: Η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου για το 3° δείγμα.

			Βάρος%	Βάρος%
	Βάρος επί	Βάρος επί	αθροιστικά	αθροιστικά
Μέγεθος(μm)	κοσκίνου (g)	κοσκίνου (%)	διερχομενο	παραμένον
560.00	0.90	2.29	97.71	2.29
425.00	3.90	9.92	87.79	12.21
300.00	9.80	24.94	62.85	37.15
180.00	22.00	55.98	6.87	93.13
106.00	2.60	6.62	0.25	99.75
	0.10	0.25		
Σύνολο	39.30	100.00		

Με βάση αυτές τις κοκκομετρικές αναλύσεις κατασκευάσθηκαν οι καμπύλες που φαίνονται στο Σχ. 4.1. Από αυτές σε πρώτη φάση προκύπτει ότι η άμμος έχει εύρος διαμέτρου κόκκων  $D = 0.1 \div 0.7$  mm και συνεπώς χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκη. Επίσης η κατανομή των κόκκων της άμμου χαρακτηρίζεται ως καλά διαβαθμισμένη



Σχήμα 4.1: Η κοκκομετρική καμπύλη για τα τρία δείγματα.

Για τον προσδιορισμό του σχήματος των κόκκων της άμμου, δημιουργήθηκε στιλπνή τομή και τραβήχτηκαν 10 συνολικά φωτογραφίες (Σχ. 4.2) με οπτικό μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός (*Τσουβάλα, 2007*). Στη συνέχεια, σε κάθε φωτογραφία σχεδιάστηκε κάνναβος για σύγκριση του εμβαδού μεταξύ των κόκκων.



(α)



Σχήμα 4.2: Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, από στιλπνή τομή δείγματος άμμου (Τσουβάλα, 2007).

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του μικροσκοπίου (Σχ. 4.2) συμπεραίνεται ότι η προς εξέταση άμμος αποτελείται από στρογγυλευμένα υπογωνιώδη σωματίδια.

#### 5. Διατμητική αντοχή της άμμου

# 5.1. Η Αντοχή και ο Βασικός Μηχανισμός Αστοχίας μη-Συνεκτικών Εδαφών

Για την κατασκευή μιας θεωρίας αντοχής των μη-συνεκτικών υλικών μπορεί να θεωρηθεί κάποιο μικρομηχανικό προσομοίωμα του εδάφους. Έτσι υποθέτεται ότι η αντοχή ενός μη-συνεκτικού, κοκκώδους υλικού οφείλεται στην δυνατότητα αναπτύξεως δυνάμεων επαφής μεταξύ δύο κόκκων (i) και (j),  $\vec{F}_{j}^{i}$ ,  $\vec{F}_{i}^{j} = -\vec{F}_{j}^{i}$  (βλ. Σχ. 5.1).



Σχήμα 5.1: Μικρομηχανικό μοντέλο δομής κοκκώδους υλικού και μακροσκοπικές τάσεις (Βαρδουλάκης, 2003).

Έστω  $N_j^i$  και  $T_j^i$  η ορθή και η διατμητική συνιστώσα αντιστοίχως της δυνάμεως επαφής στο κοινό επίπεδο επαφής μεταξύ δύο κόκκων. Υποθέτεται ότι στην επαφή αυτή δεν αναπτύσσονται δυνάμεις συνοχής οπότε γίνεται δεκτό ότι: α) η ορθή συνιστώσα είναι αυστηρά θλιπτική και β) η διατμητική συνιστώσα της δυνάμεως επαφής υπακούει στον νόμο τριβής κατά Coulomb:

$$\left|T_{j}^{i}\right| \leq \left|N_{j}^{i}\right| \tan \phi_{\mu} \tag{5.1}$$

Οι επαφές των κόκκων χαρακτηρίζονται από μία γωνία εσωτερικής τριβής (η γωνίας τριβής που χαρακτηρίζει τις επαφές μεταξύ των κόκκων)  $\phi_{\mu}$ , που εξαρτάται από την υφή και τη γεωμετρία της επιφάνειας των κόκκων. Ως συνέπεια αυτής της υποθέσεως θεωρείται ότι και οι μακροσκοπικές τάσεις, που εμφανίζονται σε κάποιο "επίπεδο" αστοχίας υπακούουν σε ένα μακροσκοπικό νόμο τριβής:

$$\tau = \sigma \tan \phi \tag{5.2}$$

Η γωνία φ καλείται γωνία τριβής του εδάφους. Για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής του εδάφους θα πραγματοποιηθούν είτε εργαστηριακές δοκιμές, είτε δοκιμές πεδίου, είτε ανάστροφες στατικές αναλύσεις πραγματικών περιπτώσεων αστοχίας ορυγμάτων, πρανών ή κατασκευών στο έδαφος.

Σχετικά με το τρόπο αστοχίας των εδαφών παρατηρείται ότι η "θραύση<sup>1</sup>" εντοπίζεται σε μία λεπτή ζώνη έντονης διατμήσεως του εδάφους, ενώ οι παρακείμενες εδαφικές μάζες εκατέρωθεν της "επιφάνειας" αστοχίας συμπεριφέρονται μάλλον ως απολύτως στερεά σώματα. Παρατηρείται δε ότι, όπως δείχνει το Σχ.5.2, τα πειραματικά δεδομένα ενισχύουν την υπόθεση του **Roscoe**, ότι το πάχος της ζώνης εντοπισμού της διατμήσεως (της "επιφάνειας" αστοχίας) δεν εξαρτάται από τις εξωτερικές γεωμετρικές διαστάσεις του εκάστοτε προβλήματος αλλά από τη μικροδομή του υλικού και κυρίως από την μέση διάσταση των κόκκων του υλικού.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ο όρος θραύση είναι μάλλον ατυχής εν προκειμένω αφού τα εδάφη είναι υλικά κατ' εξοχήν κατακερματισμένα και δεν δύνανται να θραυσθούν περαιτέρω, με εξαίρεση την περίπτωση φθοράς και κατακερματισμού των κόκκων που ενίοτε συμβαίνει κάτω από σημαντικές θλιπτικές και διατμητικές καταπονήσεις (άλεση).



Σχήμα 5.2: Ζώνη έντονης διατμήσεως, κατά την αστοχία ενός αμμώδους εδάφους καταπονούμενου σε διαζονική θλίψη. Στην αρνητική ραδιογραφία φαίνεται η ζώνη διατμήσεως σκιασμένη ως ζώνη έντονης αυζήσεως του πορώδους (Βαρδουλάκης, 2003).

Για παράδειγμα θεωρείται το πρόβλημα της παθητικής ωθήσεως γαιών (Σχ. 5.3), όπου ένας κατακόρυφος, λείος και άκαμπτος τοίχος ωθείται παραλλήλως εντός του εδάφους και το ζητούμενο είναι η εκτίμηση μίας "ασφαλούς" τιμής για την "παθητική" ώθηση  $E_p$ , που μπορεί να παραλάβει ο τοίχος χωρίς να καταρρεύσει το έδαφος επί του οποίου ο τοίχος αυτός αντιστηρίζεται.



(α)



(β)

Σχήμα 5.3: Μηχανικό προσομοίωμα υπό κλίμακα παθητκής ωθήσεως κατακορύφου αναβαθμού από ζηρή άμμο μέσω λείου και άκαμπτου τοίχου. Μηχανισμός καταρρεύσεως κατά Coulomb συνιστάμενος από μία επίπεδη επιφάνεια αστοχίας: α) φωτογραφία, β) ραδιογραφία (Βαρδουλάκης, 2003).

Από τα παραπάνω παραδείγματα καθίσταται φανερό ότι για τη στατική ανάλυση ενός γεωστατικού προβλήματος αστοχίας, όπως αυτό της παθητικής ωθήσεως γαιών, χρειάζεται η πληροφορία σχετικά με την αντοχή του εδάφους όταν αυτό διατέμνεται και σχηματίζει μία λεπτή διατμητική ζώνη ή "επιφάνεια" αστοχίας. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ.5.4, στο παράδειγμα της εκτιμήσεως της παθητικής ωθήσεως,

$$E_p = \min_o(E) \tag{5.3}$$

Γίνεται δεκτό ότι οι ορθές και διατμητικές τάσεις κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας υπακούουν τον νόμο του Coulomb, (εξ. 5.2), οπότε η συνισταμένη τους Q σχηματίζει γωνία  $\phi$  με την κάθετο στο επίπεδο αστοχίας.



Σχήμα 5.4: Στατική ανάλυση του προβλήματος της παθητικής ωθήσεως γαιών

#### 5.2. Τριβή και Διασταλτικότητα

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής ενός γεωυλικού συχνά πραγματοποιείται η σχετικά απλή δοκιμή της **απ' ευθείας διατμήσεως** (shear test) ( $\Sigma\chi$ , 5.5), η οποία υποτίθεται ότι επιβάλλει θραύση του δοκιμίου κατά μήκος μιάς οριζόντιας επιφάνειας στην θέση της σχισμής που χωρίζει το κινητό από το σταθερό τμήμα της συσκευής. Κατά τη δοκιμή αυτή το κατακόρυφο φορτίο N διατηρείται συνήθως σταθερό, ενώ επιβάλλεται η οριζόντια μετατόπιση του κινητού μέρους κάτω από σταθερή ταχύτητα. Μετρώνται συνεπώς η οριζόντια μετατόπιση  $u_h$  του κινητού μέρους, η κατακόρυφη μετατόπιση  $u_v$  της οριζόντιας πλάκας επιβολής του φορτίου N καθώς και η εκάστοτε τιμή της οριζόντιας δυνάμεως T. Για την περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων της διατμήσεως:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad , \quad \tau = \frac{T}{A} \tag{5.4}$$



Σχήμα 5.5: Σχηματική παράσταση της συσκευής κατ' ευθείαν διατμήσεως (Βαρδουλάκης, 2003).

Το κιβώτιο της συσκευής έχει ύψος Η και συνήθως τετραγωνική διατομή σε κάτοψη, αρχικού εμβαδού  $A_0 = L \cdot L$  (L = 6.cm). Η επιφάνεια διατμήσεως μειώνεται προοδευτικά με τη διατμητική μετατόπιση  $u_h$  ( $u_h << L$ )

$$A = A_0 \left( 1 - \frac{u_h}{L} \right) \tag{5.5}$$

Επειδή η δοκιμή ξεκινά από μία δεδομένη αρχική ορθή τάση, θα θεωρήσουμε, χωρίς σημαντικό λάθος, ότι η ορθή τάση παραμένει σταθερή,

$$\sigma \approx \frac{P}{A_0} = \sigma \tau \alpha \theta. \tag{5.6}$$

Ως παράδειγμα δοκιμής άμεσης διατμήσεως δίδονται στο παρακάτω διάγραμμα του Σχ. 5.6 και στον Πίν. 5.1 τα αποτελέσματα δύο πειραμάτων σε άμμο Ottawa-standard (*Taylor, 1948*). Τα εν λόγω πειράματα διατμήσεως αφορούν μία πυκνά διαστρωμένη (αρχικός δείκτης πόρων,  $e_0 = 0.562$ ) και μία σχετικά χαλαρά διαστρωμένη άμμο ( $e_0 = 0.652$ ). Ο χαρακτηρισμός βάσει πυκνότητας ενός κοκκώδους εδάφους θα αποδοθεί με τη λεγόμενη σχετική πυκνότητα  $D_r$ , που συσχετίζει το δείκτη πόρων της συγκεκριμένης άμμου με τις αντίστοιχες μέγιστες και ελάχιστες τιμές που μπορούν να επιτευχθούν στο εργαστήριο σε τυποποιημένες δοκιμές:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$
(5.7)



Σχήμα 5.6: Τυπικά διαγράμματα λόγου τάσεων και διασταλτικότητας σε άμμο Ottawastandard (Taylor, 1948)

siunaura.									
Π	υκνή άμμα	ος	χ¢	ιλαρή άμμ	ος				
uh	τ/σ	uv	uh	τ/σ	uv				
[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
0.15	0.38	-0.01	0.15	0.30	-0.03				
0.29	0.51	-0.01	0.29	0.38	-0.03				
0.59	0.61	0.03	0.59	0.45	-0.05				
0.98	0.64	0.11	0.98	0.48	-0.05				
1.42	0.66	0.18	1.42	0.50	-0.03				
1.81	0.62	0.21	1.81	0.51	-0.01				
2.20	0.59	0.31	2.20	0.52	0.01				
2.74	0.57	0.35	2.74	0.52	0.02				
3.27	0.55	0.38	3.27	0.52	0.04				
3.71	0.54	0.40	3.71	0.52	0.05				
4.20	0.53	0.41	4.20	0.52	0.06				
5.42	0.50	0.41	5.42	0.50	0.06				

Πίνακας 5.1: Δεδομένα του πειράματος κατ' ευθείαν διατμήσεως σε άμμο Ottawastandard.

Από τα σχετικά διαγράμματα του πειράματος της άμεσης διατμήσεως παρατηρείται ότι ο λόγος των τάσεων (stress ratio):

$$\frac{\tau}{\sigma} = \tan\phi \tag{5.8}$$

είναι γενικώς μία συνάρτηση της διατμητικής μετατόπισης. Για τον λόγο αυτό η τασική γωνία  $\phi$  (stress obliquity) καλείται και ενεργοποιημένη γωνία τριβής (mobilized friction angle) του υλικού και ο συντελεστής:

$$\tan\phi = \mu(u_h) \tag{5.9}$$

καλείται ενεργοποιημένος συντελεστής τριβής (mobilized friction coefficient). Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι σε μία σχετικά πυκνά διαστρωμένη άμμο ο λόγος των τάσεων αρχικά αυξάνει (**κρατυνόμενος κλάδος**) και εμφανίζει ένα μέγιστο (**κορυφή** = peak), που ακολουθείται από ένα **φθιτό κλάδο** (softening branch) (Σχ. 5.7). Μια χαλαρή άμμος αντιθέτως εμφανίζει μονοτόνως αύξοντα λόγο τάσεων.



Σχήμα 5.7: Χαρακτηριστική καμπύλη λόγου τάσεων διατμητικής μετατοπίσεως για πυκνή άμμο (Βαρδουλάκης, 2003).

Επίσης παρατηρείται ότι, όταν ένα κοκκώδες υλικό υφίσταται διάτμηση, τότε αυτό εμφανίζει παράλληλα και αλλαγές στον όγκο του. Το φαινόμενο αυτό καλείται διασταλτικότητα (dilatancy) και αποδίδεται στον Reynolds (Σχ. 5.8).



Σχήμα 5.8: Σχηματική εικόνα διασταλτικής λειτουργίας που οδηγεί από την κανονική πυκνή συσκευασία ομοειδών σφαιρών στην αντίστοιχη χαλαρή (Βαρδουλάκης, 2003).

Ως διασταλτικότητα ορίζεται ο λόγο του ρυθμού αλλαγής του όγκου προς τον ρυθμό διατμητικής παραμορφώσεως:

$$\tan \psi = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\gamma}} \tag{5.10}$$

Στο πείραμα της απ' ευθείας διατμήσεως η γωνία ψ εμφανίζεται ως η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας διατμήσεως με το επίπεδο διατμήσεως (τον

άξονα x) (Σχ. 5.9) και καλείται ως εκ τούτου (ενεργοποιημένη) γωνία διασταλτικότητας (mobilized dilatancy angle) του υλικού. Πράγματι, αν γίνει δεκτό ότι η διάτμηση εντοπίζεται μέσα σε μία λεπτή λωρίδα πάχους d και το πεδίο ταχυτήτων είναι γραμμικό,

$$v_x = \frac{z}{d}\dot{u}_h \quad , \quad v_z = \frac{z}{d}\dot{u}_v \tag{5.11}$$

ο ρυθμός αλλαγής όγκου στην λωρίδα διατμήσεως περιγράφεται από την ποσότητα:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{dv_z}{dz} = \frac{\dot{u}_v}{d} \tag{5.12}$$

ενώ ο ρυθμός της διατμητικής τροπής από την ποσότητα:



 $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz} = \frac{\dot{u}_h}{d} \tag{5.13}$ 

Σχήμα 5.9: Λεπτή λωρίδα από διατεμνόμενο κοκκώδες υλικό που εμφανίζει θετική διασταλτικότητα (αύζηση όγκου, αύζηση πορώδους) (Βαρδουλάκης, 2003).

Άρα με την προϋπόθεση ότι η παραμόρφωση μέσα στη ζώνη διατμήσεως είναι ομογενής, η διασταλτικότητα του υλικού υπολογίζεται ανεξάρτητα από το πάχος *d* της ζώνης διατμήσεως ως ο λόγος της ταχύτητας διατμήσεως προς τον ρυθμό μεταβολής του ύψους του δοκιμίου:

$$\tan\psi = \frac{du_v}{du_h} \tag{5.14}$$

Αυτό σημαίνει ότι ο ενεργοποιημένος συντελεστής διασταλτικότητας:

$$\tan \psi = \beta(u_h) \tag{5.15}$$

προκύπτει ως η κλίση της αντίστοιχης πειραματικής καμπύλης διασταλτικότητας:

$$u_v = u_v(u_h) \tag{5.16}$$

Εισάγοντας ως αδιάστατη παράμετρο την διατμητική τροπή:

$$\gamma = \frac{u_h}{d} \tag{5.17}$$

Παρατηρείται ότι τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να γραφούν υπό μορφή αντίστοιχων συναρτήσεων των συντελεστών ενεργοποιημένης τριβής και διασταλτικότητας:

$$\tan \varphi = \mu(\gamma) \quad , \quad \tan \psi = \beta(\gamma) \tag{5.18}$$

Σημειώνεται τέλος ότι η μεταβολή της ογκομετρικής τροπής συνδέεται με την αλλαγή του πορώδους.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{n}}{1 - n} \tag{5.19}$$

Αυτό σημαίνει ότι διαστολική συμπεριφορά ( $\psi > 0$ ) συνεπάγεται αύξηση του πορώδους ενώ συστολική συμπεριφορά ( $\psi < 0$ ) μείωση του πορώδους. Επίσης παρατηρείται ότι η διασταλτικότητα του κοκκώδους υλικού είναι γενικώς φθίνουσα συνάρτηση της μετατοπίσεως  $u_h$ . Ειδικότερα από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει, ότι όταν η άμμος είναι πυκνά διαστρωμένη αυτή έχει γενικώς την τάση να

διογκώνεται κατά την απ' ευθείας διάτμηση,  $\psi > 0$ . Αντιθέτως μία χαλαρά διαστρωμένη άμμος θα έχει την τάση να συρρικνώνεται ( $\psi < 0$ ). Τέλος παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές της διατμητικής μετατοπίσεως από το πείραμα προκύπτει ότι ο λόγος των τάσεων τείνει είτε εκ των άνω ή είτε εκ των κάτω προς μία σταθερή τιμή:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_{\infty} = \tan\phi_{cs} \tag{5.20}$$

ενώ παράλληλα η διασταλτικότητα του υλικού τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν (ισόχωρη παραμόρφωση):

$$\left(\frac{du_{v}}{du_{h}}\right)_{\infty} = \tan\psi_{cs} = 0$$
(5.21)

που αντιστοιχεί στην κατάσταση σταθερού όγκου. Η κατάσταση αυτή καλείται κρίσιμη κατάσταση (critical state (cs)). Άρα στην κρίσιμη κατάσταση η γωνία διασταλτικότητας μηδενίζεται ( $\psi_{cs} = 0$ ), το πορώδες του κοκκώδους υλικού δεν μεταβάλλεται και η γωνία τριβής τείνει σε μία τιμή  $\varphi_{cs} \approx \varphi_{cv}$  (κρίσιμη γωνία τριβής = friction angle at critical state). Ο δείκτης (cv = constant volume) υποδηλώνει ότι στην κρίσιμη κατάσταση ο ογκος διατηρείται. Η σταθερή τιμή του πορώδους  $n_{cs}$  στην κρίσιμη κατάσταση δεν εξαρτάται από την αρχική του τιμή αλλά μόνο από την τιμή της (σταθερής) ορθής (ενεργού) τάσεως σ.

#### 5.3. Δοκιμές άμεσης διάτμησης της άμμου

Στα Σχ. 5.10, 5.11 φαίνεται η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων διατμητικής αντοχής της άμμου.



Σχήμα 5.10: Άποψη της συσκευής άμεσης διάτμησης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (www.shambhaviimpex.com).



Σχήμα 5.11: Ο υποδοχέας που τοποθετήθηκε η άμμος (www.shambhaviimpex.com).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών άμεσης διάτμησης της άμμου ήταν η εξής :

- Ζυγίζεται ένας δίσκος με ξηρό (ή γνωστής περιεκτικότητας σε υγρασία), μη συνεκτικό έδαφος του οποίου οι εδαφοτεχνικές παράμετροι πρόκειται να προσδιοριστούν. Η ποσότητα του διαθέσιμου δείγματος πρέπει να είναι αρκετή για τρεις δοκιμές με δείγμα ίδιας πυκνότητας.
- Συναρμολογούνται τα τμήματα του υποδοχέα και μετρόνται οι διαστάσεις του (βάθος, πλάτος /μήκος ή διάμετρος κ.λ.π.) ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εγκάρσιας διατομής Α και της πυκνότητας του εδαφικού δοκιμίου. Έπειτα τοποθετείται ο υποδοχέας στη συσκευή διάτμησης.
- 3. Τοποθετείται ο πορόλιθος βάσης και το έδαφος υπό μορφή στρώσεων μέχρι 5 mm από την κορυφή του υποδοχέα. Έπειτα επιπεδώνεται η επιφάνεια του εδάφους και τοποθετείτε ο πορόλιθος της κορυφής και το εξάρτημα φόρτισης (μεταλλική πλάκα). Τέλος σημειώνεται το εξάρτημα φόρτισης περιμετρικά, σε σχέση με τον υποδοχέα του δοκιμίου προκειμένου να καταγραφούν ενδείξεις αναφοράς του αρχικού πάχους.
- Ζυγίζεται εκ νέου ο δίσκος με το εδαφικό δείγμα. Η διαφορά του βάρους αυτού και του προηγούμενου ζυγισθέντος παρέχει το βάρος του χρησιμοποιημένου δείγματος.
- 5. Μετριέται το βάρος του ζυγού φόρτισης (4,4 kg για τη συσκευή του εργαστηρίου) και προσαρμόζεται επί της μεταλλικής πλάκας φόρτισης (ή εξισορροπείται το σύστημα επιβολής του κατακόρυφου φορτίου, εάν υπάρχει διάταξη που το επιτρέπει, στη θέση που μόλις εφάπτεται της μεταλλικής πλάκας).
- 6. Εφαρμόζεται βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού φόρτισης ώστε να επιβληθεί στο δοκίμιο κατακόρυφο φορτίο N και να ασκηθεί η επιδιωκόμενη κατακόρυφη τάση σ. Ας σημειωθεί ότι για την εκτίμηση του επιβαλλόμενου φορτίου N θα πρέπει εκτός του βάρους W να ληφθεί υπόψη το βάρος του εξαρτήματος φόρτισης (μεταλλική πλάκα) και το βάρος του ζυγού φόρτισης όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση :

$$N = W + βάρος εξαρτηματος φόρτισης + βάρος ζυγού φόρτισης (5.22)$$

Ο υπολογισμός της αντίστοιχης ορθής τάσης σ για τετραγωνική διατομή LxL προκύπτει από τη σχέση :

$$\sigma \approx \frac{N}{A_0} \tag{5.23}$$

- 7. Τα μηκυνσιόμετρα προσαρμόζονται για τη μέτρηση των διατμητικών και κατακόρυφων μετατοπίσεων. Για τη μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης (δηλαδή της μεταβολής του πάχους του δοκιμίου) θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0.002 mm ενώ για τη μέτρηση των διατμητικών παραμορφώσεων, μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0.01 mm.
- 8. Αφαιρούνται οι κατακόρυφοι κοχλίες που συγκρατούν τα δύο τμήματα του υποδοχέα και ανυψώνεται το ανώτερο πλαίσιο στρέφοντας ανάλογα τους κοχλίες απομάκρυνσης. Επίσης συσφίγγονται οι κατάλληλοι κοχλίες για να επιτευχθεί καλή συναρμογή μεταξύ του ανώτερου πλαισίου του υποδοχέα με το οριζόντιο στέλεχος που επιβάλλει τη διατμητική δύναμη. Μεταξύ των δύο τμημάτων του υποδοχέα πρέπει να υπάρχει μία απόσταση μεγαλύτερη από τη διάμετρο του μεγαλύτερου κόκκου για να αποφεύγεται η εμπλοκή τους μεταξύ των τμημάτων. Αν η απόσταση είναι μικρή τότε υπάρχει θραύση των κόκκων που είναι μεταξύ των τμημάτων με αποτέλεσμα τις αιφνίδιες μεταβολές στις ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων. Για τα περισσότερα εδάφη η απόσταση αυτή είναι της τάξης του 1 mm.
- 9. Επιλέγεται η ταχύτητα της οριζόντιας μετατόπισης η οποία πρέπει να είναι της τάξης των 0.5 έως 2% της διαμέτρου του δοκιμίου ανά λεπτό (0.5 mm/min 2 mm/min) και η ολική διάρκεια της δοκιμής να μην ξεπερνά τα 3-5 λεπτά. Καταγράφονται οι αρχικές ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων (διατμητικής δύναμης, διατμητικών και κατακόρυφων παραμορφώσεων) και αρχίζει η διάτμηση η οποία συνεχίζεται μέχρι να αποκτήσει η διατμητική δύναμη σταθερή τιμή για αυξανόμενη διατμητική παραμόρφωση ή μέχρι η διατμητική

Σε μια δοκιμή ελεγχόμενης παραμόρφωσης καταγράφονται οι ενδείξεις όλων των μηκυνσιομέτρων ανά διαστήματα που καθορίζονται από την οριζόντια μετατόπιση. Αρχικά ανά 5 και στη συνέχεια (ανάλογα με τις μεταβολές των ενδείξεων ) ανά 10 ή 20 υποδιαιρέσεις του μηκυνσιομέτρου οριζόντιας μετατόπισης.

32

10. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, απομακρύνεται το εδαφικό δοκίμιο από τον υποδοχέα και επαναλαμβάνεται η διαδικασία σε άλλα δύο δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικά κατακόρυφα φορτία Ν<sub>.</sub> (προτείνεται ο διπλασιασμός κάθε φορά του επιβαλλόμενου βάρους W). Τέλος πρέπει να ελέγχεται η πυκνότητα του δοκιμίου που χρησιμοποιείται κάθε φορά, με βάση τα σημάδια που σημειώσαμε στο εξάρτημα φόρτισης (βήμα 3).

#### 5.3.1. Επεξεργασία – Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης

Κατά την εκτέλεση του πειράματος κατεγράφησαν τιμές για την κάθετη μετατόπιση  $u_v$  της οριζόντιας πλάκας επιβολής του φορτίου N, την οριζόντια διατμητική μετατόπιση  $u_h$  του κινητού μέρους και την οριζόντια διατμητική δύναμη T. Το πείραμα εκτελέσθηκε σε τρία δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικά κατακόρυφα φορτία N. Οι τιμές του N υπολογίζονται παρακάτω για εφαρμοζόμενο βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού 5 kg, 10 kg και 15 kg αντιστοίχως:

$$N = W + B_1 + B_2 \tag{5.24}$$

Όπου  $B_1 = \beta$ άρος εξαρτήματος φόρτισης και  $B_2 = \beta$ άρος του ζυγού φόρτισης

 $\gamma \iota \alpha W = 5 \text{ kg}$ N = 5 + 0,69 + 4.4 = 10,089 kg = 98.98 N $\gamma \iota \alpha W = 10 \text{ kg}$ N = 10 + 0,69 + 4.4 = 15,089 kg = 148.03 N $\gamma \iota \alpha W = 15 \text{ kg}$ N = 15 + 0,69 + 4.4 = 20,089 kg = 197.08 N

Ακολουθεί ο πίνακας της διατμητικής δύναμης Τ συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης  $u_h$  για N = 98.98 N, 148.03 N και 197.08 N καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

		$u_{\mu}$	h ·		
για N = 9	98.98 N	για N = 1	48.03 N	για N= 1	97.08 N
$u_h$ (mm)	T (N)	${\cal U}_h$ (mm)	T (N)	$\mathcal{U}_h$ (mm)	T (N)
0,00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
0,12	32,47	0,20	33,83	0,04	5,41
0,38	58,18	0,48	73,06	0,04	5,41
0,72	67,65	0,76	94,71	0,20	6,77
1,07	73,06	1,12	104,18	0,40	60,88
1,40	73,06	1,49	105,53	0,69	108,24
1,77	73,06	1,88	106,89	1.00	129,89
2,15	71,71	2,20	105,53	1,35	140,71
2,50	69,00	2,56	105,53	1,71	146,12
2,84	67,65	2,92	104,18	2,10	147,48
3,17	67,65	3,26	100,12	2,46	147,48
3,52	66,30	3,59	98,77	2,83	147,48
3,85	66,30	3,90	98,77	3,18	146,12
4,18	64,94	4,24	98,77	3,51	146,12
4,53	64,94	4,57	98,77	3,85	146,12
4,89	66,30	4,90	98,77	4,19	146,12
5,25	64,94	5,28	101,47	4,53	146,12
5,31	64,94	5,68	102,83	4,71	146,12
		5.76	102.83		

Πίνακας 5.2: Η οριζόντια διατμητική δύναμη Τ συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης



Σχήμα 5.12: Μεταβολή της οριζόντιας διατμητικής δύναμης Τ συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης  $u_h$  για N = 98.98 N, 148.03 N και 197.08 N.

Η κατακόρυφη τάση  $\sigma$ υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\sigma = \frac{N}{L^2} \tag{5.25}$$

Η διατμητική τάση τ υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\tau = \frac{T}{A} \tag{5.26}$$

όπου Α η διορθωμένη επιφάνεια (Α = μήκος x πλάτος). Επειδή η συσκευή είναι τετραγωνικής διατομής με πλευρά L =59,7 mm η επιφάνεια Α θα ισούταν με L<sup>2</sup>. Όμως λόγω της οριζόντιας μετατόπισης  $u_h$  η επιφάνεια ισούται με  $A = L(L - u_h)$ . Ακολουθούν οι πίνακες της διορθωμένης επιφάνειας Α, της κατακόρυφης τάσης  $\sigma$  και της διατμητικής τάσης  $\tau$  για τα πειράματα με ορθά φορτία N= 98.983 N, 148.033 N και 197.083 N, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3: Η διορθωμένη επιφάνεια Α, η κατακόρυφης τάσης  $\sigma_{\eta}$  και η διατμητική δύναμη τ για N = 98.98 N.

u <sub>h</sub> (mm)	L (mm)	L-u <sub>h</sub> (mm)	$A (mm^2)$	T (N)	τ (MPa)	N (N)	σ (MPa)	τ/σ
0.00	59.70	59.70	3564.09	0.00	0.00	98.98	0.03	0.00
0.12	59.70	59.58	3556.93	32.47	0.01	98.98	0.03	0.33
0.38	59.70	59.32	3541.40	58.18	0.02	98.98	0.03	0.59
0.72	59.70	58.98	3521.11	67.65	0.02	98.98	0.03	0.69
1.07	59.70	58.63	3500.21	73.06	0.02	98.98	0.03	0.75
1.40	59.70	58.30	3480.51	73.06	0.02	98.98	0.03	0.76
1.77	59.70	57.93	3458.42	73.06	0.02	98.98	0.03	0.76
2.15	59.70	57.55	3435.74	71.71	0.02	98.98	0.03	0.75
2.50	59.70	57.20	3414.84	69.00	0.02	98.98	0.03	0.73
2.84	59.70	56.86	3394.54	67.65	0.02	98.98	0.03	0.72
3.17	59.70	56.53	3374.84	67.65	0.02	98.98	0.03	0.72
3.52	59.70	56.18	3353.95	66.30	0.02	98.98	0.03	0.71
3.85	59.70	55.85	3334.25	66.30	0.02	98.98	0.03	0.72
4.18	59.70	55.52	3314.54	64.94	0.02	98.98	0.03	0.71
4.53	59.70	55.17	3293.65	64.94	0.02	98.98	0.03	0.71
4.89	59.70	54.81	3272.16	66.30	0.02	98.98	0.03	0.73
5.25	59.70	54.45	3250.67	64.94	0.02	98.98	0.03	0.72
5.31	59.70	54.39	3247.08	64.94	0.02	98.98	0.03	0.72

u <sub>h</sub> (mm)	L (mm)	L-u <sub>h</sub> (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	T (N)	τ (MPa)	N (N)	σ (MPa)	τ/σ
0.00	59.70	59.70	3564.09	0.00	0.00	148.03	0.04	0.00
0.20	59.70	59.50	3552.15	33.83	0.01	148.03	0.04	0.23
0.48	59.70	59.22	3535.43	73.06	0.02	148.03	0.04	0.50
0.76	59.70	58.94	3518.72	94.71	0.03	148.03	0.04	0.65
1.12	59.70	58.58	3497.23	104.18	0.03	148.03	0.04	0.72
1.49	59.70	58.21	3475.14	105.53	0.03	148.03	0.04	0.73
1.88	59.70	57.82	3451.85	106.89	0.03	148.03	0.04	0.75
2.20	59.70	57.50	3432.75	105.53	0.03	148.03	0.04	0.74
2.56	59.70	57.14	3411.26	105.53	0.03	148.03	0.04	0.74
2.92	59.70	56.78	3389.77	104.18	0.03	148.03	0.04	0.74
3.26	59.70	56.44	3369.47	100.12	0.03	148.03	0.04	0.72
3.59	59.70	56.11	3349.77	98.77	0.03	148.03	0.04	0.71
3.90	59.70	55.80	3331.26	98.77	0.03	148.03	0.04	0.71
4.24	59.70	55.46	3310.96	98.77	0.03	148.03	0.04	0.72
4.57	59.70	55.13	3291.26	98.77	0.03	148.03	0.04	0.72
4.90	59.70	54.80	3271.56	98.77	0.03	148.03	0.04	0.73
5.28	59.70	54.42	3248.87	101.48	0.03	148.03	0.04	0.75
5.68	59.70	54.02	3224.99	102.83	0.03	148.03	0.04	0.77
5.76	59.70	53.94	3220.22	102.83	0.03	148.03	0.04	0.77

Πίνακας 5.4: Η διορθωμένη επιφάνεια Α, η κατακόρυφης τάσης  $\sigma_{\eta}$  και η διατμητική δύναμη τ για N = 148.03 N.

Πίνακας 5.5: Η διορθωμένη επιφάνεια Α, η κατακόρυφης τάσης  $\sigma_{\eta}$  και η διατμητική δύναμη τ για N = 197.08 N.

u <sub>h</sub> (mm)	L (mm)	L-u <sub>h</sub> (mm)	$A (mm^2)$	T (N)	τ (MPa)	N (N)	σ (MPa)	τ/σ
0.00	59.70	59.70	3564.09	0.00	0.00	197.08	0.06	0.00
0.04	59.70	59.66	3561.70	5.41	0.00	197.08	0.06	0.03
0.04	59.70	59.66	3561.70	5.41	0.00	197.08	0.06	0.03
0.20	59.70	59.50	3552.15	6.77	0.00	197.08	0.06	0.03
0.40	59.70	59.30	3540.21	60.89	0.02	197.08	0.06	0.31
0.69	59.70	59.01	3522.90	108.24	0.03	197.08	0.06	0.56
1.00	59.70	58.70	3504.39	129.89	0.04	197.08	0.06	0.67
1.35	59.70	58.35	3483.50	140.71	0.04	197.08	0.06	0.73
1.71	59.70	57.99	3462.00	146.12	0.04	197.08	0.06	0.76
2.10	59.70	57.60	3438.72	147.48	0.04	197.08	0.06	0.78
2.46	59.70	57.24	3417.23	147.48	0.04	197.08	0.06	0.78
2.83	59.70	56.87	3395.14	147.48	0.04	197.08	0.06	0.79
3.18	59.70	56.52	3374.24	146.12	0.04	197.08	0.06	0.78
3.51	59.70	56.19	3354.54	146.12	0.04	197.08	0.06	0.79
3.85	59.70	55.85	3334.25	146.12	0.04	197.08	0.06	0.79
4.19	59.70	55.51	3313.95	146.12	0.04	197.08	0.06	0.80
4.53	59.70	55.17	3293.65	146.12	0.04	197.08	0.06	0.80
4.71	59.70	54.99	3282.90	146.12	0.04	197.08	0.06	0.80



Σχήμα 5.13: Ο λόγος τάσεων συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης για N = 98.98 N, 148.03 N και 197.08 N.

Πίνακας 5.6: Οι μέγιστες τιμές τις διατμητικής τάσης τ, της οριζόντιας διατμητικής δύναμης  $P_{hmax}$  και της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_n$ .

	5 11110000		
N (N)	T <sub>max</sub> (Nt)	$\tau_{max}(MPa)$	σ <sub>max</sub> (MPa)
98.98	73.06	0.02	0.03
148.03	102.83	0.03	0.04
197.08	146.12	0.04	0.06



Σχήμα 5.14: Η διατμητική τάση τ συναρτήσει της κατακόρυφης τάσης σ<sub>η</sub>.

Από την κλίση της ευθείας που προκύπτει από το διάγραμμα υπολογίζεται η γωνία εσωτερικής τριβής **φ** και από την τομή της με τον άξονα των τεταγμένων.

$$\tan \phi = 0.79 \implies \phi = 38.3^{\circ}$$

#### 5.3.2. Υπολογισμός διασταλτικότητας

Η διασταλτικότητα δίνεται από τον τύπο :

$$\psi = \arctan\left(\frac{\partial u_{\nu}}{\partial u_{h}}\right)$$
(5.27)

Ακολουθούν οι πίνακες με τις τιμές της διασταλτικότητας ψ, της οριζόντιας και της κάθετης μετατόπισης u<sub>h</sub> και u<sub>v</sub> αντίστοιχα, της διατμητικής τάσης τ και της μέγιστης τιμής της διασταλτικότητας ψ<sub>max</sub> για N = 98.98 N, 148.03 N και 197.08 N. Τέλος δίνονται, της κάθετης μετατόπισης συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης και της μέγιστης διασταλτικότητας συναρτήσει της μέγιστης διατμητικής τάσης.

u <sub>h</sub> (mm)	u <sub>v</sub> (mm)	τ/σ	τ(MPa)	Ψ( <sup>0</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.12	0.00	0.33	0.01	0.00
0.38	0.00	0.59	0.02	0.00
0.72	0.02	0.69	0.02	1.75
1.07	0.06	0.75	0.02	3.42
1.40	0.10	0.76	0.02	4.25
1.77	0.14	0.76	0.02	4.52
2.15	0.17	0.75	0.02	4.47
2.50	0.20	0.73	0.02	4.66
2.84	0.22	0.72	0.02	4.51
3.17	0.24	0.72	0.02	4.26
3.52	0.25	0.71	0.02	4.03
3.85	0.26	0.72	0.02	3.92
4.18	0.27	0.71	0.02	3.67
4.53	0.27	0.71	0.02	3.39
4.89	0.27	0.73	0.02	3.18
5.25	0.27	0.72	0.02	2.97
5.31	0.27	0.72	0.02	2.93

Πίνακας 5.7: Η διασταλτικότητα ψ, η οριζόντια και η κάθετης μετατόπιση  $u_h$  και  $u_v$ , η διατμητικής τάσης τ και η μέγιστη τιμή της διασταλτικότητας  $\psi_{max}$  για N = 98.98 N.

u <sub>h</sub> (mm)	u <sub>v</sub> (mm)	τ/σ	τ (MPa)	Ψ( <sup>0</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.00	0.23	0.01	0.00
0.48	0.00	0.50	0.02	0.24
0.76	0.00	0.65	0.03	0.15
1.12	0.02	0.72	0.03	1.23
1.49	0.06	0.73	0.03	2.38
1.88	0.09	0.75	0.03	2.74
2.20	0.14	0.74	0.03	3.69
2.56	0.18	0.74	0.03	4.07
2.92	0.21	0.74	0.03	4.07
3.26	0.25	0.72	0.03	4.35
3.59	0.27	0.71	0.03	4.27
3.90	0.29	0.71	0.03	4.22
4.24	0.31	0.72	0.03	4.13
4.57	0.31	0.72	0.03	3.88
4.90	0.33	0.73	0.03	3.81
5.28	0.33	0.75	0.03	3.55
5.68	0.33	0.77	0.03	3.30
5.76	0.33	0.77	0.03	3.26

Πίνακας 5.8: Η διασταλτικότητα ψ, η οριζόντια και η κάθετης μετατόπιση  $u_h$  και  $u_v$ , η διατμητικής τάσης τ και η μέγιστη τιμή της διασταλτικότητας  $\psi_{max}$  για N = 148.03 N.

Πίνακας 5.9: Η διασταλτικότητα ψ, η οριζόντια και η κάθετης μετατόπιση  $u_h$  και  $u_v$ , η διατμητικής τάσης τ και η μέγιστη τιμή της διασταλτικότητας  $\psi_{max}$  για N = 197.08 N.

u <sub>h</sub> (mm)	u <sub>v</sub> (mm)	τ/σ	τ (MPa)	Ψ( <sup>0</sup> )
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.040	0.000	0.027	0.002	0.000
0.040	0.000	0.027	0.002	0.000
0.200	0.000	0.034	0.002	0.000
0.400	-0.008	0.311	0.017	-1.146
0.690	-0.026	0.556	0.031	-2.158
1.000	-0.026	0.670	0.037	-1.489
1.350	-0.024	0.730	0.040	-1.018
1.710	-0.010	0.763	0.042	-0.335
2.100	0.018	0.776	0.043	0.491
2.460	0.056	0.780	0.043	1.304
2.830	0.078	0.786	0.043	1.579
3.180	0.116	0.783	0.043	2.089
3.510	0.136	0.788	0.044	2.219
3.850	0.156	0.793	0.044	2.320
4.190	0.174	0.797	0.044	2.378
4.530	0.176	0.802	0.044	2.225
4.710	0.176	0.805	0.045	2.140

Πίνακας 5.10: Οι μέγιστες τιμές διατμητικής τάσης – διασταλτικότητας για Ν = 98.98 Ν, 148.03 Ν και 197.08 Ν.

N(N)	τ(MPa)	ψmax( <sup>O</sup> )
98.98	0.02	4.7
148.03	0.03	4.4
197.08	0.04	2.4



Σχήμα 5.15: Μεταβολή της κάθετης μετατόπισης συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης για Ν = 98.98 Ν, 148.03 Ν και 197.08 Ν.



Σχήμα 5.16: Η μέγιστη διασταλτικότητα συναρτήσει τηςμέγιστης διατμητικής για Ν = 98.98 Ν, 148.03 Ν και 197.08 Ν.

## 6. Πειράματα σχηματισμού ορθών ρηγμάτων με την πειραματική διάταξη της Ολισθαίνουσας Βάσης

## 6.1. Αναλογικό μοντέλο

Σύμφωνα με τα σεισμολογικά στοιχεία (Rigo et al 1996), ένας τρόπος να ερευνηθεί η τεκτονική συμπεριφορά του Κορινθιακού κόλπου είναι να υποτεθεί η παρουσία μίας ζώνης ολίσθησης μικρής κλίσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η Πειραματική Διάταξη Ολισθαίνουσας Βάσης. Η πειραματική αυτή συσκευή βρίσκεται στο Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων και παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχ. 6.1, 6.2).



Σχήμα 6.1: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης ολισθαίνουσας βάσης (Vardoulakis et al, 1999).



Σχήμα 6.2:Η διάταζη ολισθαίνουσας βάσης (οι μετρήσεις σε dm) (Exadaktylos et al, 2003).

Το κουτί της άμμου σχεδιάστηκε για να αποδώσει την τεκτονική κίνηση της ζώνης ολίσθησης σε μια περιοχή που υφίσταται εφελκυσμό. Οι δύο πλευρικοί τοίχοι του κουτιού είναι από Plexiglas με εσωτερική επένδυση από γυαλί για να μειώσει την τριβή και να διευκολύνει την οπτική παρατήρηση του μηχανισμού αστοχίας. Η ολισθαίνουσα βάση (B) είναι σταθερά συνδεδεμένη με το κινούμενο τμήμα (A), το οποίο έλκεται προς τα δεξιά, και ολισθαίνει πάνω στην άκαμπτη βάση του τμήματος C η οποία έχει κλίση α=12°. Η κίνηση του τμήματος (A) και της κεκλιμένης βάσης (B) επιτυγγάνεται με τη βοήθεια του άξονα (F). Η μία άκρη του εφάπτεται στον τοίχο του κινούμενου τμήματος (Α) και η άλλη στην ακίνητη βάση. Κατά την περιστροφή του η κίνηση μεταδίδεται πρώτα στο κινούμενο τμήμα (A) και έπειτα στην κεκλιμένη βάση B. Η κίνηση του τμήματος (A) γίνεται σε βήματα των 5 mm. Η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης μετράται στο τέλος κάθε βήματος και καταγράφεται στο καντράν του βελομέτρου, το οποίο εφάπτεται στο δεξί κινούμενο τοίχο (Α). Για να αποφευχθεί ένα ολίσθημα από την αρχική αριστερή πλευρά του κουτιού, το εσωτερικό του καλύπτεται από γυαλόχαρτο (G) στα τμήματα D, A και ένα μέρος από το B. Τέλος ένα φύλλο από teflon (H) καλύπτει το υπόλοιπο τμήμα της κινούμενης βάσης B και ένα μέρος της ακίνητης βάσης του τμήματος (D). Έτσι δημιουργήθηκε οριζόντια στην κινούμενη βάση (B) μία ασυνέχεια. Το φύλλο από teflon παριστάνει ένα αδύναμο τμήμα χαμηλής αντίστασης τριβής στην ενεργή ζώνη ολίσθησης (κινούμενη βάση (B) που μπορεί να δημιουργήθηκε από προηγούμενη ολίσθηση ή από αύξηση της πίεσης των πόρων κατά μήκος αυτού του τμήματος.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής εκτελέσθηκαν δύο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα το μήκος του teflon ήταν 5.8 cm και το ύψος της άμμου στο κουτί έφτασε τα 17.5 cm, ενώ στο δεύτερο πείραμα το μήκος του teflon ήταν 12.8 cm και το ύψος της άμμου 16.78 cm. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πλήρωση του κουτιού με την άμμο ήταν η εξής: Η άμμος αποτέθηκε στο κουτί διαμορφώνοντας στρώματα 1.5 cm περίπου, τα οποία διαχωρίζονται από μαύρες γραμμές ίδιας άμμου βαμμένης περίπου 1 mm, για να διευκολύνεται οπτικά η παρατήρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων. Η επιφάνεια της άμμου κάθε στρώματος διαβαθμίστηκε με τη δημιουργία κατάλληλου συστήματος κενού. Η διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι την πλήρωση του κουτιού κουτιού στο επιθυμητό ύψος.

#### 6.2. Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Στα δύο πειράματα το ύψος της άμμου στο τμήμα της βάσης (D) ισούται με  $H_M = 17.5 \ cm$  και  $H_M = 16.8 \ cm$ , για το 1° και το 2° πείραμα αντίστοιχα. Το ύψος αυτό υποθέτουμε ότι αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο βάθος της υποθετικής ζώνης ολίσθησης  $H_P = 10 \ km$  (ο δείκτης P = πρωτότυπο). Έτσι προκύπτουν οι παράγοντες κλίμακας για τα δύο πειράματα m:

$$m = \frac{H_{\rm M}}{H_{\rm P}} = 1.75 \times 10^{-5}$$
,  $m = \frac{H_{\rm M}}{H_{\rm P}} = 1.68 \times 10^{-5}$  (6.1)

Η μετατόπιση της ολισθαίνουσας βάσης Β  $\delta_M$  (Σχ. 6.3) υπολογίζεται με βάση την οριζόντια μετατόπιση  $\delta_a$  και την γωνία κλίσης της κινούμενης βάσης (B) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta_{\rm M} = \frac{\delta_{\alpha}}{\cos a}$$
,  $\dot{\alpha} = 12^{\circ}$  (6.2)



hodograph Σχήμα 6.3: Οι μετατοπίσεις  $\delta_M$ ,  $\delta_{\alpha}$ . (Exadaktylos et al, 2003).

Τέλος η αντιστοιχία της πραγματικής μετατόπισης  $\delta_P$  με την μετατόπιση του μοντέλου  $\delta_M$ δίνεται συναρτήσει του λόγου των υψών  $H_M/H_P$ 

$$\frac{\delta_{\rm M}}{\delta_{\rm P}} = \frac{{\rm H}_{\rm M}}{{\rm H}_{\rm P}} \tag{6.3}$$

=> 
$$\delta_{\rm M} = 1.75 \times 10^{-5} \,\delta_{\rm P}$$
 ,  $\delta_{\rm M} = 1.68 \times 10^{-5} \,\delta_{\rm P}$  (6.4)

Για τα δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αφού στρώθηκε η άμμος στο κουτί και διαβαθμίστηκε με το σύστημα κενού, ξεκίνησε η διαδικασία του πειράματος. Στην αρχή περιστρέφεται ο άξονας F του κουτιού που δίνει κίνηση στο κινούμενο τμήμα (A) και στην κεκλιμένη βάση (B). Κάθε ακουστική εκπομπή λόγω διάδοσης ρήγματος κατά την περιστροφή του άξονα είναι και ένας «σεισμός». Μετά από κάθε σεισμό που δημιουργείται, μετράται η οριζόντια μετατόπιση μέσω του βελομέτρου που αναφέρθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια λαμβάνονται φωτογραφίες την κάθε χρονική στιγμή που πραγματοποιούνται οι σεισμοί. Από αυτές θα υπολογιστεί η καθίζηση που υπεισέρχεται λόγω των σεισμών, καθώς και το πλάτος της τάφρου που δημιουργείται, μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος AUTOCAD 2005<sup>®</sup>. Έπειτα περιστρέφεται ξανά ο άξονας, δημιουργείται ο επόμενος σεισμός και επαναλαμβάνονται τα βήματα που αναφέρονται παραπάνω. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ληφθούν μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζουν ικανοποιητικά την τεκτονική μορφή της τάφρου. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

# 6.3. Αποτελέσματα πειραμάτων 6.3.1. Αποτελέσματα του 1<sup>ου</sup> πειράματος

Από το Σχ. 6.4 παρατηρείται ότι από τα αρχικά στάδια του πειράματος αρχίζει να δημιουργείται το πρώτο κύριο ρήγμα. Η αρχική του θέση προσδιορίζεται εκεί που τελειώνει η λωρίδα του teflon και εκεί που χωρίζει η ενεργή ζώνη από την παθητική. Το ρήγμα σχηματίζεται από κάτω προς τα πάνω. Ακολουθεί το Σχ. 6.5 που δείχνει την εξέλιξη της δημιουργίας του 1<sup>ου</sup> κύριου ρήγματος μετά από πέντε βήματα. Με τον όρο βήμα εννοείται το βήμα προχώρησης του άξονα F μέχρι την πραγματοποίηση του επόμενου σεισμού.



Σχήμα 6.4: Η έναρξη του κύριου ρήγματος μετά από 4 βήματα (φωτ. 2771).



Σχήμα 6.5: Η εξέλιξη του κύριου ρήγματος μετά από 5 βήματα (φωτ. 2773).

Στην συνέχεια δημιουργείται το πρώτο αντιθετικό ρήγμα το οποίο διαδίδεται από κάτω προς τα πάνω όπως και το κύριο. Ο σχηματισμός αυτών των δύο ρηγμάτων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας τάφρου η οποία οριοθετείται από το κύριο και το αντιθετικό ρήγμα από αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Σχ.6.6), το κύριο ρήγμα έχει μία κλίση 80° με το οριζόντιο, ενώ το αντιθετικό 55°. Στην συνέχεια με προοδευτική ολίσθηση της κινούμενης βάσης B, σχηματίζεται αριστερά από το πρώτο κύριο ρήγμα, το δεύτερο κύριο (Σχ.6.7).



Σχήμα 6.6: Η δημιουργία του πρώτου αντιθετικού ρήγματος μετά από 8 βήματα (φωτ. 2778).



Σχήμα 6.7: Η δημιουργία του δεύτερου κύριου ρήγματος μετά από 12 βήματα (φωτ. 2785).

Αμέσως μετά τη δημιουργία του δεύτερου κύριου ρήγματος, σχηματίζεται και το δεύτερο αντιθετικό, στα πόδια του πρώτου αντιθετικού και από αριστερά του (Σχ.6.8).



Σχήμα 6.8: Η δημιουργία του δεύτερου αντιθετικού ρήγματος μετά από 14 βήματα (φωτ. 2787).

Τέλος μετά από 20 βήματα δηλαδή συνολική οριζόντια μετατόπιση  $\delta_a = 26.01 \, mm$ , μπορεί να παρατηρηθεί η τελική μορφολογία της τάφρου. Είναι μία ασύμμετρη τάφρος που αποτελείται όπως φαίνεται από δύο κύρια και δύο αντιθετικά ρήγματα. Η κλίση του αντιθετικού ρήγματος μειώνεται ελάχιστα με αύξηση της μετατόπισης, ενώ η κλίση του κύριου ρήγματος παραμένει σταθερή Από όλες τις εικόνες φαίνεται ότι η παραμόρφωση είναι πιο έντονη από την αριστερή μεριά της τάφρου (κύριο ρήγμα) από ότι από τη δεξιά που είναι πιο ήπια.



Σχήμα 6.9: Η τελική μορφή της τάφρου μετά από 20 βήματα (φωτ. 2793).

Στην συνέχεια υπολογίζεται η καθίζηση που υπεισέρχεται λόγω των σεισμών, καθώς και το πλάτος της τάφρου με τη βοήθεια του AUTOCAD®. Ακολουθεί ο Πίν. 6.1 των μετατοπίσεων  $\delta_M$ ,  $\delta_a$  και  $\delta_P$ , της καθίζησης  $s_M$  και του πλάτους της τάφρου  $D_M$ . Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και οι τιμές της καθίζησης  $s_p$  και του πλάτους της τάφρου  $D_P$  στην πλήρη κλίμακα. Ακολουθούν τα διαγράμματα της γραμμικής εξάρτησης της καθίζησης  $s_M$  συναρτήσει της ολίσθησης του μοντέλου  $\delta_M$  (Σχ.610), το πλάτους της τάφρου  $D_M$  συναρτήσει της  $\delta_M$  (Σχ.611) και η υπερβολική εξάρτηση του πλάτους του κόλπου  $D_P$  συναρτήσει της καθίζησης  $s_P$  σε πραγματική κλίμακα (Σχ.6.12).

photo	δ <sub>A</sub> (mm)	δ <sub>M</sub> (mm)	δ <sub>P</sub> (m)	s <sub>M</sub> (mm)	D <sub>M</sub> (mm)	sp(km)	D <sub>P</sub> (km)
2757	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2760	1.01	1.03	58.95	0.00	0.00	0.00	0.00
2761	2.65	2.71	154.81	0.00	0.00	0.00	0.00
2768	2.66	2.72	155.40	0.00	0.00	0.00	0.00
2771	3.76	3.84	219.66	0.07	0.00	0.00	0.00
2773	7.35	7.51	429.38	0.43	125.04	0.02	11.14
2774	8.56	8.75	500.13	0.94	128.96	0.05	11.30
2775	8.95	9.15	522.97	1.88	183.41	0.11	12.94
2778	12.41	12.69	725.10	3.76	240.50	0.22	13.74
2779	12.97	13.26	757.82	4.47	247.09	0.26	14.12
2781	12.99	13.28	758.69	6.42	259.18	0.37	14.81
2782	13.00	13.29	759.57	7.90	259.30	0.45	14.82
2785	14.68	15.00	857.42	9.55	264.21	0.55	15.10
2786	16.11	16.47	940.96	10.91	264.30	0.62	15.10
2787	17.52	17.91	1023.51	13.09	269.73	0.75	15.41
2788	18.03	18.43	1053.13	13.32	272.09	0.76	15.55
2789	20.58	21.04	1202.39	14.74	272.99	0.84	15.60
2790	22.12	22.61	1292.06	16.83	274.05	0.96	15.66
2791	23.40	23.92	1366.72	17.42	278.92	1.00	15.94
2792	24.74	25.30	1445.53	18.92	279.37	1.08	15.96
2793	26.01	26.59	1519.20	20.89	280.74	1.19	16.04

Πίνακας 6.1: Οι μετατοπίσεις, η καθίζηση και το πλάτος της τάφρου στη μικρή και στη μεγάλη κλίμακα.



Σχήμα 6.10: Η μέγιστη καθίζηση του μοντέλου s<sub>M</sub> με τη μετατόπιση της ολισθαίνουσας βάσης δ<sub>M</sub>.



Σχήμα 6.11: Το πλάτος της τάφρου  $D_M$  συναρτήσει της μετατόπισης  $\delta_M$ .



Σχήμα 6.12: Το πλάτος του κόλπου D<sub>P</sub> συναρτήσει της μέγιστης καθίζησης s<sub>P</sub> σε πραγματική κλίμακα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται τα αποτελέσματα από την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου. Παρατηρείται η ομοιότητα με την τάφρο που σχηματίστηκε στο αναλογικό μοντέλο στο πρώτο πείραμα (Σχ.6.13).



Σχήμα 6.13: Διαφορετικά στάδια επίλυσης αριθμητικού μοντέλου (Exadaktylos et al., 2003).

#### 6.3.2. Αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> πειράματος

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου, στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο μήκος teflon για να διερευνηθεί η επίδραση του στην δημιουργία της τάφρου. Το μήκος του ήταν 12.8 cm ενώ το αρχικό ύψος της άμμου έφτασε τα 16.78 cm.

Και σ' αυτό το πείραμα όπως και στο πρώτο ο σχηματισμός των ρηγμάτων φαίνεται από τα πρώτα στάδια του πειράματος. Μετά από δύο βήματα έχουν σχηματιστεί το πρώτο κύριο ρήγμα και το πρώτο αντιθετικό ( $\Sigma \chi$ .6.15). Η αρχική τους θέση προσδιορίζεται εκεί που τελειώνει η λωρίδα του teflon και εκεί που χωρίζει η ενεργή ζώνη από την παθητική όπως και στο πρώτο πείραμα... Τα ρήγματα σχηματίστηκαν από κάτω προς τα πάνω και πρώτο φαίνεται να δημιουργήθηκε το κύριο ρήγμα αριστερά της τάφρου ( $\Sigma \chi$ .6.14).



Σχήμα 6.14: Η έναρξη του 1<sup>ου</sup> κύριου ρήγματος μετά από 1 βήμα (φωτ. 952).



Σχήμα 6.15: Η έναρξη του 1<sup>ου</sup> κύριου ρήγματος και του 1<sup>ου</sup>αντιθετικού μετά από 2 βήματα (φωτ. 953).

Όπως φαίνεται στην εικόνα του  $\Sigma \chi$ . 6.15 το πρώτο κύριο ρήγμα έχει κλίση 73° με το οριζόντιο ενώ το πρώτο αντιθετικό 70°, δηλαδή παρατηρείται μια συμμετρική τάφρος μεταξύ των δύο ρηγμάτων η οποία διαδίδεται από κάτω προς τα πάνω.

Στην συνέχεια σχηματίζεται το δεύτερο κύριο ρήγμα αριστερά του πρώτου κύριου ρήγματος (Σχ.6.16), και ακολουθεί η δημιουργία του δεύτερου αντιθετικού δεξιά του

πρώτου αντιθετικού(Σχ.6.17). Αποτέλεσμα αυτών των ρηγμάτων είναι να χαλάσει η συμμετρία της τάφρου και να αποτελέσει έτσι μία ασύμμετρη τάφρο.

Έπειτα προστέθηκε άμμος στο κουτί, στο σημείο της τάφρου, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο την προσομοίωση μιας πρώτης φάσης ιζηματογένεσης του κόλπου για να μελετηθεί η επίδρασή της στη μορφολογία της τάφρου (Σχ.6.18).



Σχήμα 6.16: Η έναρξη του  $2^{ov}$  κύριου ρήγματος μετά από 3 βήματα ( $\varphi \omega \tau$ . 956).



Σχήμα 6.17: Η έναρζη του 2<sup>ου</sup>αντιθετικού ρήγματος μετά από 5 βήματα (φωτ. 959).



Εικόνα 6.18: Η  $1^{\eta}$  επίχωση μετά από 7 βήματα (φωτ. 967).

Ακολουθεί το τρίτο αντιθετικό ρήγμα στο πόδι του πρώτου και αριστερά του (Σχ.6.19).



Σχήμα 6.19: Η έναρξη του 3<sup>ου</sup>αντιθετικού ρήγματος μετά από 13 βήματα (φωτ. 978).

Ακολουθεί η δεύτερη επίχωση της τάφρου, με το σχηματισμό συγχρόνως του τρίτου κύριου ρήγματος (Σχ.6.20) το οποίο σχηματίζεται περίπου στη μέση της τάφρου.



Σχήμα 6.20: Η 2<sup>η</sup> επίχωση καθώς και ο σχηματισμός 3<sup>ου</sup> κύριου ρήγματος μετά από 17 βήματα (φωτ. 987).

Στο Σχ.6.21 σχηματίζεται το τέταρτο κύριο ρήγμα σχεδόν παράλληλα με το τρίτο και ανάμεσα πρώτου και τρίτου. Ακολουθεί η τρίτη επίχωση. Επίσης δημιουργείται το πέμπτο κύριο ρήγμα παράλληλο του τρίτου και τέταρτου κύριου, καθώς και το τέταρτο αντιθετικό (Σχ.6.22).

![](_page_56_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 6.21: Ο σχηματισμός  $4^{ov}$  κύριου ρήγματος μετά από 21 βήματα (φωτ. 995).

![](_page_56_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 6.22: Η 3<sup>η</sup> επίχωση καθώς και ο σχηματισμός 5<sup>ου</sup> κύριου ρήγματος και του 4<sup>ου</sup> αντιθετικού μετά από 27 βήματα (φωτ. 1011).

Ακολουθεί η τέταρτη και τελευταία επίχωση η οποία συνοδεύεται με το σχηματισμό του έκτου κύριου ρήγματος και του πέμπτου και έκτου αντιθετικού (Σχ.6.23).

![](_page_57_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 6.23: Η 4<sup>η</sup> επίχωση καθώς και ο σχηματισμός  $6^{ov}$  κύριου ρήγματος και του  $5^{ov}$  και  $6^{ov}$  αντιθετικού μετά από 38 βήματα (φωτ. 1034).

Τέλος στα Σχ.6.24 και Σχ.6.25 η τάφρος παίρνει την τελική της μορφή. Αποτελεί μία ασύμμετρη τάφρο που σχηματίστηκε από συζυγία ρηγμάτων κύριων και αντιθετικών μεγάλης κλίσης. Στο Σχ.6.25 παρατηρείται ότι σχηματίστηκε πιθανόν άλλο ένα ρήγμα έξω από την τάφρο, δεν είναι σίγουρο ότι είναι ρήγμα, διότι μπορεί να οφείλεται στην πτώση της άμμου όπως φαίνεται και στην εικόνα (ο κύκλος).

![](_page_58_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 6.24: Η εξέλιζη της τάφρου μετά από 52 βήματα (φωτ. 1050).

![](_page_58_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 6.25: Η τελική μορφή της τάφρου μετά από 58 βήματα (φωτ. 1058).

Στην συνέχεια υπολογίζεται η καθίζηση που υπεισέρχεται λόγω των σεισμών, καθώς και το πλάτος της τάφρου μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος AUTOCAD 2005. Ακολουθεί ο Πίν.6.3 των μετατοπίσεων  $\delta_M$ ,  $\delta_a$  και  $\delta_P$ , της καθίζησης  $s_M$  και του πλάτους της τάφρου  $D_M$ . Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και οι τιμές της καθίζησης s<sub>p</sub> και του πλάτους της τάφρου  $D_P$  στην πλήρη κλίμακα. Έπειτα, τα διαγράμματα της

γραμμικής εξάρτησης της καθίζησης  $s_M$  συναρτήσει της ολίσθησης του μοντέλου  $\delta_M$  (Σχ.6.26), το πλάτος της τάφρου  $D_M$  συναρτήσει της  $\delta_M$  (Σχ.627) και η υπερβολική εξάρτηση του πλάτους του κόλπου  $D_P$  συναρτήσει της καθίζησης  $s_P$  σε πραγματική κλίμακα (Σχ.6.28).

1.4	547 )	ST (12)				a a v	
photos	oA(mm)	olv1(mm)	op(m)	sm(mm)	Dm(mm)	Sp(km)	DP(km)
950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
952	0.23	0.24	14.01	0.00	0.00	0.00	0.00
953	5.53	5.66	337.17	3.55	154.45	0.21	9.19
956	6.96	7.11	423.92	5.11	187.40	0.30	11.15
957	8.39	8.57	510.87	6.30	204.65	0.38	12.18
959	9.77	9.99	595.49	7.43	206.27	0.44	12.28
961	11.27	11.52	686.52	9.04	207.28	0.54	12.34
967	12.73	13.01	775.59	10.26	208.16	0.61	12.39
969	14.00	14.31	852.72	12.43	210.27	0.74	12.52
970	15.23	15.57	927.66	13.15	210.82	0.78	12.55
972	16.54	16.91	1007.96	14 10	212.29	0.84	12.55
974	17.98	18.38	1095.33	15.81	214.13	0.01	12.01
076	10.46	10.00	1105.00	17.01	214.15	1.02	12.75
970	19.40	17.07	1054.10	17.27	220.02	1.05	12.14
970	20.75	21.21	1204.10	10.15	222.00	1.00	12.42
980	22.08	22.57	1345.07	18.86	220.00	1.12	13.43
982	23.58	24.10	1436.39	20.81	229.01	1.24	13.63
984	24.32	24.86	1481.54	22.92	230.74	1.36	13.73
987	26.74	27.33	1628.98	23.58	232.13	1.40	13.82
989	28.17	28.80	1716.11	24.53	232.64	1.46	13.85
991	29.42	30.08	1792.33	25.27	234.03	1.50	13.93
993	30.74	31.42	1872.75	26.93	235.03	1.60	13.99
995	32.03	32.74	1951.34	28.11	237.54	1.67	14.14
997	33.34	34.09	2031.46	28.92	239.32	1.72	14.25
999	34.59	35.36	2107.13	30.20	239.86	1.80	14.28
1001	35.96	36.76	2190.72	31.20	241.83	1.86	14.39
1003	37.57	38.41	2288.87	32.00	242.21	1.91	14.42
1005	38.21	39.07	2328.17	32.90	243.41	1.96	14.49
1011	40.81	41.72	2486.58	33.69	251.93	2.01	15.00
1013	42.64	43.59	2597 77	35.24	258.20	2 10	15 37
1015	44.17	45.16	2691.29	36.62	272.27	2.18	16.21
1017	45.57	46.59	2776.65	36.89	273.37	2.20	16.27
1019	47.09	48.15	2869.19	37.90	273.62	2.26	16.29
1021	48.99	50.09	2985.02	39.63	281.14	2.20	16.73
1021	50.63	51.76	3084.87	40.12	201.14	2.50	16.99
1025	52.05	52.42	210/ 10	40.12	200.02	2.55	17.10
1025	52.54	5474	2060.10	42.21	207.30	2.51	17.10
1027	55.10	56.40	3202.17	45.12	200.04	2.57	17.10
1029	55.19	56.42	3302.39	44.02	290.87	2.02	17.51
1030	50.07	20.92	3391.94	45.40	296.23	2.70	17.03
1034	58.31	59.62	3002.79	47.60	300.55	2.83	17.89
1036	60.79	62.15	3703.76	48.15	307.53	2.87	18.31
1037	63.23	64.65	3852.60	49.18	314.25	2.93	18.71
1038	63.77	65.19	3885.20	50.10	314.35	2.98	18.71
1039	65.16	66.62	3970.13	51.77	315.22	3.08	18.76
1040	66.59	68.08	4057.32	53.02	315.27	3.16	18.77
1041	68.19	69.72	4154.80	54.33	317.44	3.23	18.90
1042	69.66	71.22	4244.36	54.84	318.58	3.26	18.96
1043	70.99	72.58	4325.21	56.89	323.88	3.39	19.28
1044	72.11	73.72	4393.32	57.80	324.49	3.44	19.31
1045	72.53	74.15	4419.22	58.02	326.60	3.45	19.44
1046	75.00	76.67	4569.28	59.95	327.29	3.57	19.48
1047	76.56	78.27	4664.75	60.30	328.14	3.59	19.53
1048	78.19	79.93	4763.63	62.06	330.91	3.69	19.70
1050	80.18	81.98	4885.30	65.02	388.94	3.87	23.15
1052	82.45	84.29	5023.06	67.23	395.27	4,00	23.53
1053	85.11	87.02	5185.67	67.76	396.56	4.03	23.60
1054	85.76	87.62	5225.09	68.91	398.69	4 10	23.73
1055	87.22	89.17	5313.00	68.82	400.40	4 10	23.75
1055	90 61	00.67	5/10//2	70.02	400.40	IV A 01	20.00
1050	00.04	02.02	5400.45	70.00	405.20	4.21	24.00
8001	J 30.04	≯∠.∪⊃	7485.48	14.45	400.32	4.50	24.19

Πίνακας 6.3: Οι μετατοπίσεις, η καθίζηση και το πλάτος της τάφρου στη μικρή και στη μεγάλη κλίμακα.

![](_page_61_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 6.26: Η μέγιστη καθίζηση  $s_M$  συναρτήσει της μετατόπισης  $\delta_M$ .

![](_page_61_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 6.27: Το πλάτος της τάφρου  $D_M$  συναρτήσει της μετατόπισης  $\delta_M$ .

![](_page_62_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 6.28: Το πλάτος του κόλπου D<sub>P</sub> συναρτήσει της μέγιστης καθίζησης αυτού s<sub>P</sub> σε πραγματική κλίμακα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην αρχή της ολίσθησης το κύριο ρήγμα και το αντιθετικό έχουν περίπου την ίδια κλίση 70° – 73°. Στα επόμενα στάδια η κλίση του αντιθετικού ρήγματος μειώνεται με αύξηση της μετατόπισης, ενώ η κλίση του κύριου ρήγματος παραμένει σταθερή (Σχ.6.29). Αυτή η συμπεριφορά είναι σε συμφωνία με τα γεωμορφολογικά στοιχεία που δείχνουν την ασυμμετρία του Κορινθιακού κόλπου.

![](_page_62_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 6.26: Οι κλίσεις του 1<sup>ου</sup> κύριου και 1<sup>ου</sup> αντιθετικού μετά από 38 βήματα (φωτ. 1034).

Οι αρχικές κλίσεις  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ , του πρώτου κύριου και αντιθετικού ρήγματος μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση του ορίου ισορροπίας (limit equilibrium analysis LEA) της θεωρίας της πλαστικότητας. Για το σκοπό αυτό θεωρείται μηχανισμός αστοχίας που φαίνεται στο Σχ.6.27a.

![](_page_63_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 6.27: Ο μηχανισμός αστοχίας και το πολύγωνο των δυνάμεων (α), η ζώνη Rankine και η οριακή κατάσταση των τάσεων στο τασικό επίπεδο του Mohr (b) (Exadaktylos et al, 2003).

Για τις συνθήκες ισορροπίας συμπεραίνεται ότι οι γραμμές της δράσης των δυνάμεων πρέπει να τέμνονται σε ένα σημείο και το πολύγωνο των δυνάμεων w, Qm, Qa πρέπει

να κλείσει. Για υλικό με μικρή τριβή οι κατευθύνσεις των Qm και Qa σχηματίζουν γωνία φ με τα AD και DC αντίστοιχα. Για τη λύση του προβλήματος εισάγουμε την ενεργή δύναμη της γης<sup>2</sup> E<sub>al</sub> και E<sub>ar</sub> που ασκείται κατά μήκος της αριστερής και δεξιάς θέσης του κάθετου διακεκομμένου επιπέδου BD αντίστοιχα. Αυτές οι δυνάμεις είναι ίσες σε μέγεθος και έχουν αντίθετες διευθύνσεις. Σημειώνεται ότι w = w<sub>1</sub> + w<sub>2</sub>. Έτσι από τα τρίγωνα του Σχ.6.27aπροκύπτει:

$$E_{al} = \frac{1}{2} \gamma \operatorname{H}^{3} \operatorname{tan} \left( \frac{\pi}{2} - \psi_{1} \right) \operatorname{tan} \left( \psi_{1} - \phi \right)$$
(6.5)

$$E_{ar} = \frac{1}{2}\gamma \operatorname{H}^{3} \operatorname{tan}\left(\frac{\pi}{2} - \psi_{2}\right) \operatorname{tan}(\psi_{2} - \phi)$$
(6.6)

Όμως με βάση την ανάλυση του ορίου ισορροπίας (LEA) πρέπει:

$$\frac{\mathscr{9}E_{ai}}{\mathscr{9}\psi_i} = 0 \tag{6.7}$$

Έτσι, όταν  $E_{al} = E_{ar}$ ισχύει:

$$\psi_1 = \psi_2 = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \tag{6.8}$$

Από την εξ.6.8 προκύπτουν οι κλίσεις  $\psi_1 = \psi_2 = 64.17$  για γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου φ = 38.337, οι οποίες είναι λίγο χαμηλότερες σε λογική συμφωνία με τα αποτελέσματα. Στο Σχ.6.27bφαίνεται η οριακή κατάσταση των τάσεων στο τασικό επίπεδο του Mohr καθώς και οι γραμμές ολίσθησης μέσα στη συμμετρική τάφρο που σημαίνει ότι συμπεριφέρεται σαν ζώνη Rankine.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Οι όροι ενεργητική και παθητική χρησιμοποιούνται στην εδαφομηχανική στα πλαίσια των κλασικών θεωριών της πίεσης της γης (classical earth pressure theories) των Coulomb και Rankine, για να περιγράψουν τις δυνάμεις που ενεργούν σε έναν τοίχο αντιστήριζης. Υπάρχει ενεργητική πίεση όταν το έδαφος σπρώχνει τον τοίχο και παθητική όταν το έδαφος αντιστέκεται στη κίνηση του τοίχου προς αυτό.

## 7. Συμπεράσματα-Προτάσεις

- Από το αναλογικό μοντέλο παρατηρείται η δημιουργία μίας ακολουθίας κανονικών ρηγμάτων μεγάλης κλίσης. Η δημιουργία τους ξεκινάει στην αρχή της ενεργής περιοχής της κεκλιμένης βάσης, στη ζώνη ολίσθησης η οποία έχει μικρή κλίση. Τα κανονικά ρήγματα διαδίδονται από κάτω προς τα πάνω, αυξάνοντας συγχρόνως και τη μετατόπιση πάνω στη ζώνη ολίσθησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συμμετρικής τάφρου. Στη συνέχεια δημιουργούνται περισσότερα κύρια και αντιθετικά ρήγματα με αποτέλεσμα την τελική ασυμμετρία της τάφρου. Η κλίση των αντιθετικού ρηγμάτος μειώνεται, ενώ η κλίση του κύριου παραμένει σταθερή. Όλα τα ρήγματα είναι ενεργά μέχρι το τέλος του πειράματος.
- Η καθίζηση καθώς και το πλάτος της τάφρου αυξάνει γραμμικά με τη μετατόπιση κατά μήκος της κεκλιμένης βάσης.
- Από την ανάλυση του ορίου ισορροπίας των αρχικών κανονικών ρηγμάτων προκύπτει ότι ο σχηματισμός της τάφρου συμπεριφέρεται σαν μια ζώνη Rankine. Οι κλίσεις των ρηγμάτων από την θεωρία των ορίων είναι παραπλήσιες με αυτές του πειράματος.
- Πρόταση για επίλυση αριθμητικού μοντέλου για επαλήθευση των αποτελεσμάτων καθώς και πραγματοποίηση νέου αναλογικού μοντέλου αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγιουτάντης. Ζ., Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2001.

Βαρδουλάκης. Ι., Σημειώσεις μαθήματος Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.

Τσουβάλα. Κ., Διερεύνηση παραμέτρων συμπιεστότητας δοκιμών άμμου Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.

Στειακάκης . Ε., Σημειώσεις μαθήματος Τεχνική Γεωλογία – Εδαφομηχανική Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.

Bell. R., McNeill. L., Bull. J., Henstock. T., Evolution of the offshore western Gulf of Corinth, GSA Bulletin, 120 (1-2) : 156-178, 2007.

Bernard. P. et al, Seismicity, deformation and seismic hazard in the western rift of Corinth : New insights from the Corinth Rift Laboratoty (CRL), Tectonophysics volume 426, issues 1-2 : 7-30, 2006.

Coulomb. C. A., Essai sur une application des règles des maximis et des minimis à quelques problèmes de statique. Mémoires Académie Royale des Sciences, Vol. 7, Paris, 1776.

Cornet. et al, Comptes Rendus Geosciences, 336, 4-5, 395-406, 2004.

Exadaktylos. G.E., Vardoulakis. I., Stavropoulou. M.C., and Tsombos. P., Anologue and numerical modeling of normal fault patterns produced due to slip along a detachment zone: Tectonophysics, v.376, p. 117-134,doi : 10.1016/j.tecto. 2003.08.005, 2003.

Hornung H.G., Dimensional Analysis, Dover, 2006.

Hubbert, M.K., Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geological Society of America Bulletin 48, 1459-1520, 1937.

Mühlhaus. H.-B. and Vardoulakis. I., The thickness of shear bands in granular materials, Géotechnique, 37, 271-283, 1987.

Reynolds. O., On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations. <u>Phil. Mag.</u> (2) 20, 469-481, 1885.

Rigo. A., Lyon-Caen. H., Armijo. R., Deschamps. A., Hatzfeld. D., Makropoulos. K., Papadimitriou. P., Kassaras. I., A mi-croseismic study in the western part of the Gulf of Corinth (Greece): implications for large-scale normal faulting mechanisms. Geophysical Journal International 126, 663-688, 1996.

Roscoe. K.H., The influence of strains in soil mechanics, Géotechnique, 20, 129-170, 1970.

Sokolovski, V., Statics of Granular Media, Elsevier, New York, 1965.

Taylor. D.W., Fundamentals of Soil Mechanics, Wiley, 1948.

Truesdell. C. and Noll. W., The Non-Linear Field Theories of Mechanics, Handbuch der Physik Band III/3, section 119, 1965.

Vardoulakis. I., Schefugenbildung in Sandkörpern als Verzweigungsproblem, Disertation, Unversität Karlruhe, Veröffentlichungen, I.B.F. Heft Nr.70, 1977.

Vardoulakis. I., Graf. B., Hettler. A., Shear-band formation in a fine-grained sand. 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, 1, 517-521, Balkema, Rotterdam, 1985.

http://geosim.engr.mun.ca/progmob\_files/progmob(1)simulation.htm

http://www.shambhaviimpex.com/direct-shear-apparatus.htm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ