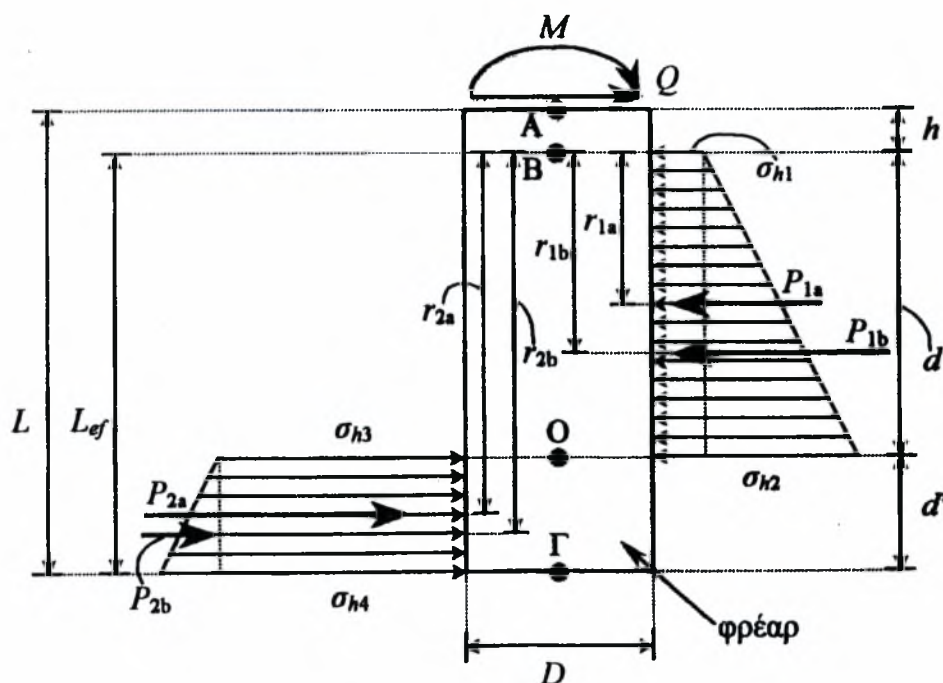


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:**

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ & ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΦΑΛΗ ΤΟΥΣ ΩΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.**



**Επιβλέποντες :** Σπ. Κωστόπουλος Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ  
Π. Ντακούλας Αναπλ. Καθηγητής Π.Θ  
Δ. Καραμπατάκης Διδάκτωρ Π.Θ

**Φοιτητής:** Μπουκοβάλας Δημήτριος

**ΒΟΛΟΣ , ΜΑΪΟΣ 2007**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5308/1  
Ημερ. Εισ.: 11-10-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ  
2007  
ΜΠΟ

Αφιερωμένη στους γονείς μου Χαράλαμπο Χαρίκλεια  
και στην αδερφή μου Μαρία.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	3
2. Βιβλιογραφική αναδρομή.....	5
2.1. Εισαγωγή.....	5
2.2. Συμπεριφορά φρεάτων πακτώσεως.....	5
2.3. Ενδοσιμότητα φρεάτων πακτώσεως σε εγκάρσια φόρτιση.....	7
2.3.1. Η μέθοδος των Douglas and Davis (1964).....	7
2.3.2. Η μέθοδος των Carter and Kulhawy (1992).....	9
3. Αναλυτικές μέθοδοι.....	17
3.1. Εισαγωγή.....	17
3.2. Παραδοχές και μερική ανάλυση των μεθόδων.....	17
4. Περιγραφή και ανάλυση του αριθμητικού προσομοιώματος.....	20
4.1. Εισαγωγή.....	20
4.2. Ο κώδικας Flac 2D.....	20
4.3. Το αριθμητικό προσομοίωμα.....	22
4.4. Αναλύσεις με το αριθμητικό προσομοίωμα.....	31
5. Παράμετροι και σύγκριση των εξεταζόμενων μεθόδων.....	34
5.1. Παραδοχές.....	34
6. Συμπεράσματα.....	40
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	42
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	44
Α. Σχέδια φρεάτος εξεταζόμενου προβλήματος.....	45
Β. Μέθοδος των ‘Douglas and Davis’ (1964).....	47
Γ. Μέθοδος των ‘Carter and Kulhawy’ (1992).....	50
Δ. Ο κώδικας προγραμματισμού FLAC <sup>2D</sup> .....	53
Ε. Αποτελέσματα επιλύσεων των ‘CARTER AND KULHAWY’ (1992) και ‘DOUGLAS AND DAVIS’ (1964).....	59
ΣΤ. Αποτελέσματα επιλύσεων με το FLAC <sup>2D</sup> .....	66

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ χρέος μου να ευχαριστήσω ιδιαίτέρως τους καθηγητές μου Κκ. Σπ .Κωστόπουλο, Π. Ντακούλα και Δ. Καραμπατάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν, στα πλαίσια της άψογης συνεργασίας που είχαμε τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας όσο και καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Ειδικότερα οφείλω να ευχαριστήσω κατά πρώτο λόγο τον Δρ. Σπ. Κωστόπουλο, Αν. Καθηγητή ΠΘ για την σύλληψη και την ανάλυση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, για την βιβλιογραφία που επέλεξε και μου διέθεσε, καθώς και για την βοήθεια στην τελική διαμόρφωση του κειμένου. Επιπλέον, ευχαριστώ τους Δρ. Π. Ντακούλα Αν.Καθηγητή ΠΘ για τις συμβουλές που μου έδωσε σε κρίσιμα σημεία της διαμόρφωσης του αναλυτικού προσομοιώματος.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον πολύ καλό μου φίλο Νίκο Καπτή, Γεωτεχνικό Πολιτικό Μηχανικό για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ,τις γνώσεις που μου προσέφερε και τον χρόνο που μου διέθεσε.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχαν με κάθε δυνατό τρόπο καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια τα πολλά και μεγάλα τεχνικά έργα που υλοποιήθηκαν στην Ελλάδα ( Ολυμπιακά έργα, γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου, Μετρό, Π.Α.Θ.Ε, Εγνατία οδός, κ.α ) προσέφεραν έντονες εμπειρίες και τεχνογνωσία που μέχρι πριν λίγα χρόνια ήταν σχεδόν άγνωστη στην χώρα μας.

Τα φρέατα χρησιμοποιούνται συνήθως για την θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων, όπως λόγω χάριν των μεσοβάθρων χαραδρογεφυρών με σημαντικά πολλαπλά ανοίγματα σε σχετικώς πτωχούς βραχοσχηματισμούς ή εδάφη, αλλά και για την ανάσχεση κατολισθήσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το φρέαρ είναι συμπαγές. Πολλές όμως φορές ένα φρέαρ υλοποιείται για τον αερισμό σηράγγων ή ως προσωρινό μέσον πρόσβασης των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων μητροπολιτικού σιδηροδρόμου (Μετρό), οπότε είναι διάκενο.

Ένα φρέαρ θεμελίωσης αποτελεί συνήθως μια κατακόρυφη οπή στην γεωμάζα πληρωμένη με σκυρόδεμα, ενισχύεται δε ενδεχομένως με έναν κεντρικό κλωβό οπλισμού. Με δεδομένη την μεγάλη του διάμετρο και το όχι ιδιαίτερος σημαντικό βάθος του, το φρέαρ λειτουργεί ως απαραμόρφωτο στερεό κατά την ανάληψη των φορτίων της ανωδομής την οποίαν φέρει. Η αναζήτηση της βέλτιστης γεωμετρίας του φρέατος συνδέεται άρρηκτα με το είδος και την ποιότητα της περιβάλλουσας γεωμάζας, την μέθοδο διάνοιξης της οπής και αντιστήριξης των παρειών της, καθώς και με την φύση και την κυριαρχούσα διεύθυνση της εξαίτισης.

Παράδειγμα των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω είναι τα φρέατα πακτώσεως των μεγάλων τεχνικών έργων. Οι περιορισμένες έως πρόσφατα γνώσεις δεν επέτρεπαν την χρήση και κατ' επέκταση την αξιοπιστία σε καινούριες μεθόδους, όπως την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (FLAC) και έτσι οι υπολογισμοί γίνονταν ως επί το πλείστον με εμπειρικές μεθόδους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική μελέτη της συμπεριφοράς των φρεάτων πακτώσεως έναντι εγκάρσιας φόρτισης και τέμνουσας στην στέψη τους. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τις αναλυτικές μεθόδους των Douglas – Davis και των Kulhawy & Carter, καθώς και με την υπολογιστική προσομοίωση μέσω FLAC. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα από τις τρεις μεθόδους

συγκρίνονται προκειμένου να διαπιστωθούν και ερμηνευθούν οι όποιες μεταξύ των ενδεχόμενες διαφορές.

Στα επόμενα κεφάλαια θα αναφερθούν οι εμπειρικές λύσεις και οι κανονισμοί, θα αναπτυχθούν δε εκτενώς οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, δηλαδή, των Douglas – Davis και του Kulhawy με τις παραδοχές, τους περιορισμούς που υπάρχουν τα διαγράμματα και τις σχέσεις που προκύπτουν. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στο FLAC, όπως το τι είναι, πως λειτουργεί, τον τρόπο εισαγωγής των στοιχείων και τέλος ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί για τις αναλύσεις.

Όπως έχει αναφερθεί, τα αποτελέσματα θα συγκριθούν μεταξύ των προκειμένου για να διαπιστωθεί η ορθότητα των εμπειρικών λύσεων, καθώς εξ' αρχής θεωρείται δεδομένη η ορθότητα των αποτελεσμάτων του FLAC, εφόσον βεβαίως ο κώδικας αυτός εφοδιασθεί με τα πρέποντα δεδομένα εισαγωγής και η αναλυτική προσομοίωση είναι ρεαλιστική.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις μεθοδολογίες των Douglas – Davis και των Kulhawy & Carter, οι οποίες στοχεύουν τόσο στην πρόβλεψη των πλευρικών μετακινήσεων, όσο και στην εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των φρεάτων πάκτωσης.

Κατά την διάρκεια συλλογής στοιχείων που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στην εργασία αυτή διαπιστώθηκε η έλλειψη στην διεθνή βιβλιογραφία δημοσιευμένων εργασιών σχετικά με την μελέτη των φρεάτων πάκτωσης. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι κατά τον σχεδιασμό τέτοιων θεμελιώσεων δίδεται μεγαλύτερη έμφαση στις επιτρεπόμενες μετακινήσεις. Όλα τα παραπάνω είναι θεωρητικά, αλλά με την βοήθεια των αναλύσεων θα προσεγγισθεί η ορθή λύση σε έναν τομέα ο οποίος προβληματίζει εξαιτίας των πολλών παραγόντων οι οποίοι υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

#### 2.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ

Γενικώς, ως κυλινδρικά φρέατα πακτώσεως ορίζονται εκείνα τα στοιχεία θεμελίωσης με μικρή σχετικώς λυγηρότητα, δηλαδή με τιμές του λόγου  $L/D$  μεταξύ 1.5 έως 3.0, όπου  $L$  είναι το μήκος και  $D$  είναι η διάμετρος του φρέατος.

Η λυγηρότητα ενός φρέατος είναι συνάρτηση της αντίστοιχης δυσκαμψίας του υλικού από το οποίο συντίθεται, καθώς και της γεωμάζας που το περιβάλλει. Έτσι λοιπόν προκύπτει ο δείκτης  $\lambda$ , ο οποίος εκφράζει την σχετική δυσκαμψία του δομικού υλικού ως προς την γεωμάζα κατά την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt[4]{\frac{E_P I_P}{kD}}} \quad (2.1)$$

όπου:

$E_P$  : το μέτρο ελαστικότητας του δομικού υλικού του φρέατος

$E_S$  : το μέτρο ελαστικότητας της περιβάλλουσας γεώμαζας



$$I_p = \frac{\pi D^4}{64} : \text{η ροπή της αδρανείας της διατομής του φρέατος}$$

$$k = \frac{E_s}{D} : \text{ο δείκτης αντίστασης του εδάφους}$$

D, L : οι γεωμετρικές διαστάσεις του φρέατος ( διάμετρος και μήκος ).

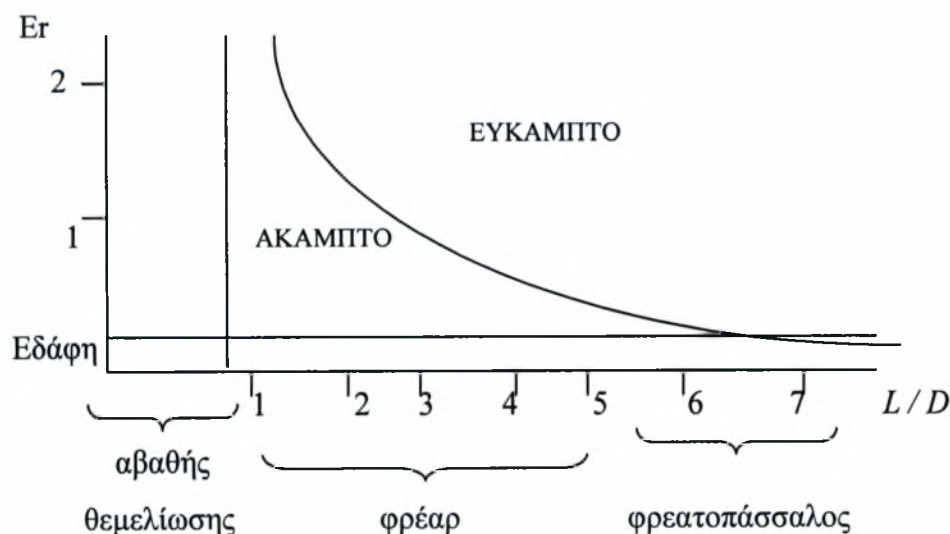
Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην προηγούμενη σχέση (2.1), προκύπτει :

$$\lambda = \frac{L/D}{0.471 \sqrt[4]{E_p/E_s}} \tag{2.2}$$

Η ερευνητική εργασία των Kulhawy & Carter (1992), οι οποίοι προβληματίστηκαν στο ζήτημα, έγκειται στην ανάλυση της ελαστικής αλληλεπίδρασης φρέατος – γεωμάζας με την βοήθεια της ΜΠΣ. Το θεμελιώδες συμπέρασμα της έρευνας αυτής είναι ότι ένα φρέαρ θεμελίωσης μπορεί να εκλαμβάνεται ως άκαμπτο εφ’ όσον ισχύει η ακόλουθη ανισότητα:

$$(E_c / E_r) (D / 2L) > 2 \tag{2.3}$$

όπου  $E_c$  και  $E_r$  τα μέτρα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και της γεωμάζας αντίστοιχα. Εάν υποτεθεί ότι  $E_c=25Gpa$  και  $L/D=1$  έως 5, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα (Κωστόπουλος, 2003). Συνεπώς φρέατα πακτώσεως με  $L$  μέχρι  $3D$  θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται ως πρακτικώς στερεά σώματα. Τέτοια φρέατα θα εξετασθούν σε αυτήν την εργασία .



### 2.3 ΕΝΔΟΣΙΜΟΤΗΤΑ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΗΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ

Αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι να περιγράψει τις μεθόδους υπολογισμού της ενδοσιμότητας – απόκρισης για τα φρέατα πακτώσεως υπό καθεστώς εγκάρσιας φόρτισης. Ακολούθως παρουσιάζεται η προαναφερθείσα μέθοδος για την εκτίμηση της απόκρισης των φρεάτων πακτώσεως έναντι εγκάρσιας φόρτισης

#### 2.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ DOUGLAS AND DAVIS (1964)

Η μέθοδος των “Douglas and Davis” (1964) περιγράφεται συνοπτικά στο βιβλίο των Poulos and Davis, “Elastic Solutions in Soil and Rock Mechanics”. Αναφέρεται στην περίπτωση ενός άκαμπτου φορέα, πλάτους  $B$  και μήκους  $D$ , ο οποίος είναι εγκιβωτισμένος σε έναν ελαστικό ημίχωρο με μέτρο ελαστικότητας  $E$  και λόγο Poisson  $\nu$  ίσο με 0.50. Αν και η μέθοδος αναφέρεται στην περίπτωση όπου ο λόγος Poisson είναι ίσος με 0.50, μπορεί να εφαρμοσθεί και για άλλες τιμές του λόγου Poisson χωρίς σημαντικά σφάλματα.

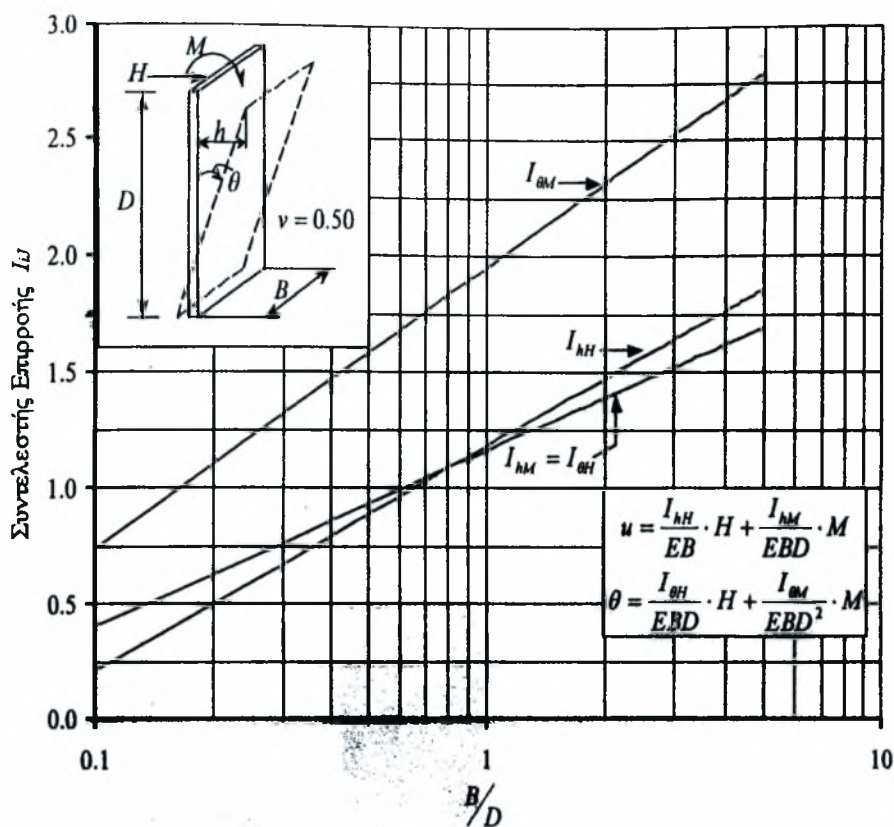
Τα αποτελέσματα της μεθόδου, μετά το πέρας των σχετικών αναλύσεων, καταλήγουν στην έκφραση της μετακίνησης  $u$  και της στροφής  $\theta$  της κεφαλής του φρέατος πακτώσεως, μέσω των ακόλουθων σχέσεων :

$$\begin{aligned} u &= \frac{I_{hH}}{EB} \cdot H + \frac{I_{hM}}{EBD} \cdot M \\ \theta &= \frac{I_{\theta H}}{EBD} \cdot H + \frac{I_{\theta M}}{EBD^2} \cdot M \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου  $I_U$  είναι ο συντελεστής επιρροής για την μετατόπιση  $i$  υπό την φόρτιση στον βαθμό ελευθερίας  $J$ . Οι τιμές αυτών των συντελεστών εξαρτώνται από τον λόγο  $B/D$  του φορέα, και κατά προσέγγιση δίνονται από τις παρακάτω αναλυτικές σχέσεις :

$$\begin{aligned} I_{hH} &= 1.18 - 0.97 \cdot \log\left(\frac{D}{B}\right) \\ I_{hH} = I_{\theta H} &= 1.16 - 0.76 \cdot \log\left(\frac{D}{B}\right) \\ I_{\theta M} &= 1.95 - 1.21 \cdot \log\left(\frac{D}{B}\right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Στην συνέχεια, ακολουθεί η γραφική παράσταση των σχέσεων (2.5) συναρτήσει του λόγου  $B/D$ , καθώς και ένας πίνακας με τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής  $I_U$ .



Σχήμα 2.3 : Προσδιορισμός των συντελεστών επιρροής της μεθόδου “Douglas and Davis” (1964)

$D/B$	$I_{\kappa H}$	$I_{\kappa M} = I_{\theta H}$	$I_{\theta M}$
1	1.18	1.16	1.95
1.5	1.01	1.03	1.74
2	0.89	0.93	1.59
3	0.72	0.80	1.37
4	0.60	0.70	1.22

Πίνακας 2.2 : Τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής της μεθόδου “Douglas and Davis”

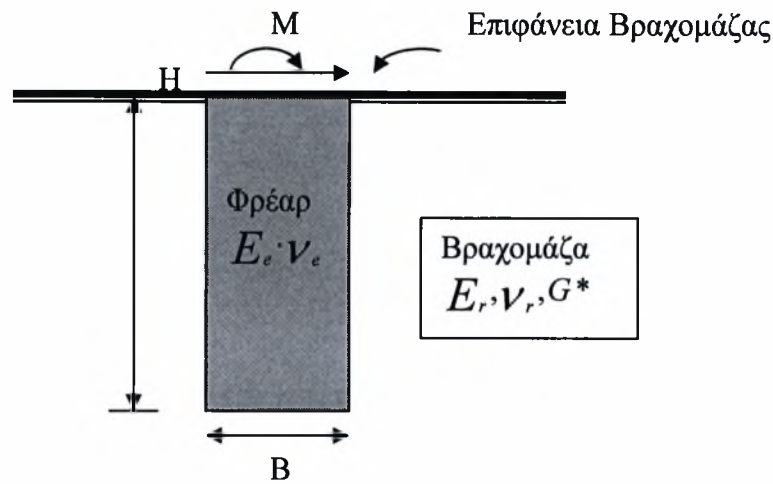
### 2.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ CARTER AND KULHAWY (1992)

Η μέθοδος προσδιορισμού της σύνθετης δυσκαμψίας των Carter and Kulhawy (1992) αφορά στην συμπεριφορά τόσο των εύκαμπτων όσο και των δύσκαμπτων φρεάτων, τα οποία εγκιβωτίζονται στην βραχομάζα και υπόκεινται σε εγκάρσια φόρτιση και ροπή. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εξέτασαν την συμπεριφορά αξονοσυμμετρικών σωμάτων υποκειμένων σε μη - συμμετρική φόρτιση, οδηγούμενοι σε παραμετρικές αναλυτικές σχέσεις που αφορούν φορτίσεις – μετατοπίσεις. Χρησιμοποιώντας αυτές τις λύσεις αναπτύσσονται απλές, προσεγγιστικές, κλειστής μορφής σχέσεις για να περιγράψουν την απόκριση για όλο το εύρος των συνθηκών φορτίσεως, των παραμέτρων του εδαφικού υλικού, και της ακαμψίας των φρεάτων πακτώσεως τα οποία απαντώνται στην συνήθη πράξη. Η πραγματικότητα έχει καταδείξει ότι τα αποτελέσματα πλησιάζουν τα διαθέσιμα διαγράμματα για τις οριακές καταστάσεις των εύκαμπτων και των δύσκαμπτων φρεάτων. Τέλος, η μέθοδος δίδει στο επίπεδο της επιφάνειας της βραχομάζας οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές, παρέχει δε την δυνατότητα να συμπεριληφθεί και ένα υπερκείμενο στρώμα εδάφους.

Η απεικονιστική θεώρηση του εξεταζόμενου προβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3, όπου αναπαρίστανται οι συνθήκες όπου το φρέαρ είναι στην επιφάνεια του εδάφους και φορτίζει εγκαρσίως με τέμνουσα και ροπή καλύπτεται και η πιθανή ύπαρξη κάποιου υπερκείμενου στρώματος εδάφους επάνω από την βραχομάζα. Για το φρέαρ γίνεται η παραδοχή ότι είναι ένα κυλινδρικό ελαστικό δομικό στοιχείο με μέτρο ελαστικότητας Young  $E_e$ , λόγο Poisson  $\nu_e$ , ύψος D και διάμετρο B. Για ένα συμπαγές φρέαρ, το οποίο έχει μία πραγματική καμπτική δυσκαμψία ίση με  $(EI)_e$ , το μέτρο ελαστικότητας Young δίνεται από την σχέση :

$$E_e = \frac{(EI)_e}{\frac{\pi B^4}{64}} \quad (2.6)$$

Γίνεται η παραδοχή ότι το φρέαρ, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως απολύτως ελαστικό υλικό, κατασκευάζεται σε μία ομογενή, ισότροπη, ελαστική βραχομάζα με παραμέτρους αντοχής  $E_r$  και  $\nu_r$ . Στην επιφάνεια της βραχομάζας το φρέαρ πακτώσεως φορτίζεται με μία γνωστή εγκάρσια ( οριζόντια ) δύναμη H και με μία ροπή ανατροπής M. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η παρούσα μέθοδος εφαρμόζεται σε βραχομάζες οι οποίες δεν έχουν κλίση ως προς την οριζόντια. Έτσι, σε περίπτωση απότομων κλίσεων, δεν λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της κλίσεως της βραχομάζας.



Σχήμα 2.3 :Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως σε βραχομάζα

Όπως αναφέρθηκε, η ανάλυση των εγκαρσίων μετατοπίσεων θα αποδώσει μερικές απλές, κλειστής μορφής αναλυτικές εκφράσεις, τόσο για τα σχετικώς εύκαμπτα όσο και για τα σχετικώς άκαμπτα φρέατα τα οποία υπόκεινται σε εγκάρσια φόρτιση. Μία εκτενής παραμετρική μελέτη υλοποιήθηκε για φρέατα πακτώσεως με μεγάλο εύρος σχετικής δυσκαμψίας, απ' όπου προέκυψε ότι οι συνέπειες των μεταβολών του λόγου του Poisson στην διατμητική ακαμψία της βραχομάζας  $G^*$  εκφράζεται ως εξής :

$$G^* = G_r \cdot \left(1 + \frac{3\nu_r}{4}\right) \quad (2.7)$$

όπου  $G_r$  : το μέτρο διάτμησης της ελαστικής βραχομάζας. Σε μία ισότροπη βραχομάζα το μέτρο διάτμησης συσχετίζεται με τα  $E_r, \nu_r$  σύμφωνα με την σχέση :

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} \quad (2.8)$$

Σε μία ομογενή βραχομάζα βρέθηκε ότι η οριζόντια μετατόπιση  $u$  και η στροφή  $\theta$  του φρέατος στο επίπεδο της επιφάνειάς της, μετρούμενα και τα δύο προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης φόρτισης, εξαρτώνται από το σχετικό μέγεθος  $(E_e/G^*)$  φρέατος - βραχομάζας, καθώς και από την γεωμετρία του φρέατος  $(D/B)$ . Έτσι, οι αδιάστατες μετατοπίσεις θα πρέπει να συσχετισθούν με τον λόγο των μέτρων  $(E_e/G^*)$  ή με την λυγηρότητα  $(D/B)$ .

Έχει υποστηριχθεί ότι ένα φρέαρ θα συμπεριφερότο ως να είχε άπειρο μήκος , εφόσον ισχύει η ακόλουθη σχέση :

$$\frac{D}{B} \geq \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (2.9)$$

Σε αυτή την περίπτωση η απόκριση του φρέατος εξαρτάται μόνον από τον λόγο των μέτρων  $(E_e/G^*)$ , και τον λόγο Poisson της βραχομάζας  $\nu_r$ , τα αποτελέσματα μέσω πεπερασμένων στοιχείων υποδεικνύουν ότι είναι αυτά ανεξάρτητα του λόγου  $(D/B)$ , εφόσον ικανοποιείται η σχέση (2.9). Ένα τέτοιο φρέαρ είναι εύκαμπτο και οι ακόλουθες κλειστής μορφής εκφράσεις αποδίδουν προσεγγιστικά το παραμορφωσιακό καθεστώς:

$$\begin{aligned} u &= 0.50 \cdot \left( \frac{H}{G^* B} \right) \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} + 1.08 \cdot \left( \frac{M}{G^* B^2} \right) \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} \\ \theta &= 1.08 \cdot \left( \frac{H}{G^* B^2} \right) \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} + 6.40 \cdot \left( \frac{M}{G^* B^3} \right) \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Οι ως άνω εξισώσεις οδηγούν σε επαρκείς προβλέψεις της συμπεριφοράς των εύκαμπτων φρεάτων πακτώσεως, τα οποία εγκαθίσταται σε βραχομάζες με ελαστική συμπεριφορά. Στην παρούσα μελέτη προέκυψε ότι το εύρος ισχύος των ως άνω σχέσεων αναφέρεται στις ακόλουθες τιμές των παραμέτρων :

$$\begin{aligned} 1 \leq \frac{E_e}{E_r} \leq 10^6 \\ \frac{D}{B} \geq 1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Στην πράξη ανακύπτουν περιπτώσεις όπου συμπεριφέρονται αυτά ως άκαμπτα δομικά στοιχεία όπως φρέατα με λόγο  $D/B < 1$  που εγκαθίστανται σε ασθενή βραχομάζα. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μετατοπίσεις του φρέατος θα είναι ανεξάρτητες του λόγου των μέτρων  $(E_e/E_r)$  και θα εξαρτώνται μόνον από την λυγηρότητα  $(D/B)$  και τον λόγο Poisson της βραχομάζας  $\nu_r$ .

Γενικώς, ένα φρέαρ πακτώσεως θα συμπεριφέρεται ως απολύτως άκαμπτο δομικό στοιχείο όταν ισχύει η σχέση :

$$\frac{D}{B} \leq 0.05 \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

Σε ενάντια περίπτωση η τελευταία σχέση με αναδιάταξη οδηγεί στην ακόλουθη ανισότητα:

$$\frac{\left( \frac{E_e}{G^*} \right)}{\left( \frac{2D}{B} \right)^2} \geq 100 \quad (2.13)$$

Η παρούσα μελέτη υποδεικνύει ότι οι μετατοπίσεις των άκαμπτων φρέατων μπορούν να εκφραστούν με αρκετή ακρίβεια από τις ακόλουθες απλές, κλειστής μορφής αναλυτικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} u &= 0.40 \cdot \left( \frac{H}{G^* B} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-1/3} + 0.30 \cdot \left( \frac{M}{G^* B^2} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-7/8} \\ \theta &= 0.30 \cdot \left( \frac{H}{G^* B^2} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-7/8} + 0.80 \cdot \left( \frac{M}{G^* B^3} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-5/3} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις οδηγούν με ικανοποιητική προσέγγιση στα αποτελέσματα που προκύπτουν από ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Επειδή το φρέαρ μετακινείται ως άκαμπτο σώμα μέσα σε μία ελαστική βραχομάζα, το βάθος από την εδαφική επιφάνεια μέχρι το κέντρο στροφής του φρέατος  $z_c$  μπορεί να υπολογισθεί ως ακολούθως :

$$z_c = \frac{u}{\theta} = \frac{0.40 \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-1/3} + 0.30 \cdot \left( \frac{e}{B} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-7/8}}{0.30 \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-7/8} + 0.80 \cdot \left( \frac{e}{B} \right) \cdot \left( \frac{2D}{B} \right)^{-5/3}} \cdot B \quad (2.15)$$

όπου  $e = \frac{M}{H}$  : η κατακόρυφη εκκεντρότητα του εφαρμοζόμενου οριζόντιου φορτίου  $H$ . Θα πρέπει να τονισθεί ότι η ακρίβεια των σχέσεων (2.21) – (2.24) έχει ελεγχθεί για τις ακόλουθες τιμές των παραμέτρων :

$$\begin{aligned} 1 \leq \frac{D}{B} \leq 10 \\ \frac{E_e}{E_r} \geq 1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Παραδοσιακά, οι συντελεστές επιρροής για του εγκάρσιως φορτιζόμενους πασσάλους και φρέατα πακτώσεως παρουσιάζονται υπό μορφήν διαγραμμάτων. Οι προσεγγιστικές εξισώσεις που εκτίθενται σε αυτή την εργασία είναι πλέον χρήσιμες στον σχεδιασμό εξ' αιτίας της ευκρίνειάς των.

Τα φρέατα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν ενδιάμεση ακαμψία όταν η λυγηρότητα κυμαίνεται προσεγγιστικά μέσα στα ακόλουθα όρια :

$$0.05 \cdot \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} < \frac{D}{B} < \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (2.17)$$

Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι προβλέψεις από τα πεπερασμένα στοιχεία υπερβαίνουν σχεδόν πάντοτε τις προβλέψεις από τις σχέσεις (2.10) για τα εύκαμπτα φρέατα και (2.11) για τα

άκαμπτα φρέατα, τυπικώς, οι μετατοπίσεις σε μία ενδιάμεση περίπτωση υπερβαίνουν τις προβλέψεις για τα άκαμπτα και τα εύκαμπτα φρέατα όχι περισσότερο από 25% περίπου, και συχνά κατά πολύ ολιγότερο. Για λόγους απλότητας, χωρίς να απαιτείται περισσότερη ακρίβεια, προτείνεται οι μετατοπίσεις στην ενδιάμεση περίπτωση να λαμβάνονται αυξημένες κατά 25% της μεγαλύτερης τιμής στις ακόλουθες περιπτώσεις :

- στην προβλεπόμενη μετατόπιση ενός άκαμπτου φρέατος με την ίδια λυγηρότητα ( $D/B$ ) όπως και το πραγματικό φρέαρ
- στην προβλεπόμενη μετατόπιση ενός εύκαμπτου φρέατος με τον ίδιο λόγο μέτρων ( $E_e / G^*$ ) όπως και το πραγματικό φρέαρ.

Οι τιμές που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες εκείνων που προκύπτουν από αυστηρότερη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενός φρέατος με ενδιάμεση δυσκαμψία.

Από την σχέση (2.15) διακρίνεται ότι το βάθος πακτώσεως  $z_c$  δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά εξαρτάται από τα γεωμετρικά μεγέθη  $B$  και  $D$ , από τις παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας  $E$  και  $\nu$ , καθώς και από τα εντατικά μεγέθη στην κεφαλή του φρέατος  $M$  και  $H$ . Η εξάρτηση του βάθους πακτώσεως από τα εντατικά μεγέθη δεν επιτρέπει την προσομοίωση του φρέατος με πάκτωση σε κάποιο βάθος, δεδομένου ότι τα εντατικά μεγέθη στο σημείο πακτώσεως εξαρτώνται και από το βάθος πακτώσεως.

Σε αυτήν την μέθοδο θεωρείται ότι το φρέαρ, ως δομικό στοιχείο, έχει ικανή αντοχή έναντι τέμνουσας και ροπής προκειμένου να αναλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο. Η αστοχία του φρέατος επισυμβαίνει όταν η περιβάλλουσα βραχομάζα δεν μπορεί να αναλάβει πρόσθετη εγκάρσια φόρτιση. Η υπόθεση αυτή θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται. Όταν προσδιορισθεί η κατανομή των τάσεων επί του φρέατος κατά την αστοχία, θα πρέπει να γίνει σύγκριση των υπολογιζόμενων τιμών της μέγιστης καμπτικής ροπής και της αξονικής δύναμης στο φρέαρ με τις αντίστοιχες αντοχές του σκυροδέματος. Εάν κάποια από αυτές τις τιμές υπερβαίνει την αντίστοιχη αντοχή του σκυροδέματος, τότε η επερχόμενη αστοχία θα οφείλεται στην αντοχή του φρέατος ως δομικού στοιχείου.

Κατά μήκος των πλευρών του φρέατος, μπορεί να αναπτυχθεί διατμητική αντίδραση, η οποία θα είναι περίπου ίση με την μέγιστη πλευρική αντίσταση υπό αξονική συμπίεση,  $\tau_{\max}$ . Σε μεγαλύτερο βάθος, ισχύει η παραδοχή ότι η τάση εμπροσθεν του φρέατος μπορεί να αυξάνει από την αρχική γεωστατική τιμή της οριζόντιας τάσης  $\sigma_{hi}$  στην οριακή τάση  $p_L$ , η οποία προκύπτει κατά την διάρκεια της διαστολής μίας μακράς κυλινδρικής κοιλότητας, όπου έχει εφαρμογή η συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain condition). Όπισθεν του φρέατος οι οριζόντιες τάσεις θα μειούνται, και μετά την αποκόλληση λόγω των εφελκυστικών



δυνάμεων στην διεπιφάνεια φρέατος – βραχόμαζας οι οριζόντιες τάσεις θα μηδενισθούν. Στις άλλες πλευρές του φρέατος αναπτύσσεται κάποια μικρή διατμητική αντίσταση  $\tau_{\max}$ . Επομένως, εις βάθος η οριακή δύναμη ανά μονάδα μήκους που αντιστέκεται στην εγκάρσια φόρτιση θα είναι περίπου ίση με  $B(p_L + \tau_{\max})$ .

Κλειστής μορφής αναλυτικές λύσεις έχουν προταθεί για τις οριακές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της διαστολής μίας μακράς κυλινδρικής κοιλότητας σε ένα ελαστοπλαστικό, συνεκτικό και με εσωτερική τριβή μέσον. Η οριακή αυτή τάση ( $p_L$ ) μπορεί να προσδιορισθεί από την ακόλουθη παραμετρική εξίσωση μέσω της αδιάστατης ποσότητας  $\rho$ :

$$\frac{2G_r}{\sigma_{hi} + c_r \cdot \cot \phi_r} = \left( \frac{N-1}{N+1} \right) \cdot (T\rho^n - Z_\rho) \quad (2.18)$$

όπου :

$$\rho = \frac{p_L + c_r \cdot \cot \phi_r}{\sigma_R + c_r \cdot \cot \phi_r} \quad (2.19)$$

$$T = 2 \left( 1 + \frac{\chi}{\alpha + \beta} \right) \quad (2.20)$$

$$Z = 2 \left( \frac{\chi}{\alpha + \beta} \right) \quad (2.21)$$

$$\sigma_R = \left[ \left( \frac{2N}{N+1} \right) \cdot (\sigma_{hi} + c_r \cdot \cot \phi_r) \right] - c_r \cdot \cot \phi_r \quad (2.22)$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{1}{N} \quad (2.24)$$

$$n = \frac{1+\alpha}{1-\beta} \quad (2.25)$$

$$L = \frac{1 + \sin \psi_r}{1 - \sin \psi_r} \quad (2.26)$$

$$N = \frac{1 + \sin \phi_r}{1 - \sin \phi_r} \quad (2.27)$$

$$\chi = \frac{(1 - \nu_r) \cdot (1 + LN) - \nu_r \cdot (L + N)}{LN} \quad (2.28)$$

και:  $G_r$  : ελαστικό μέτρο διάτμησης

$\nu_r$  : λόγος Poisson

$c_r$  : συνοχή της βραχομάζας

$\phi_r$  : γωνία διατμητικής αντοχής της βραχομάζας

$\psi_r$  : γωνία διαστολικότητας

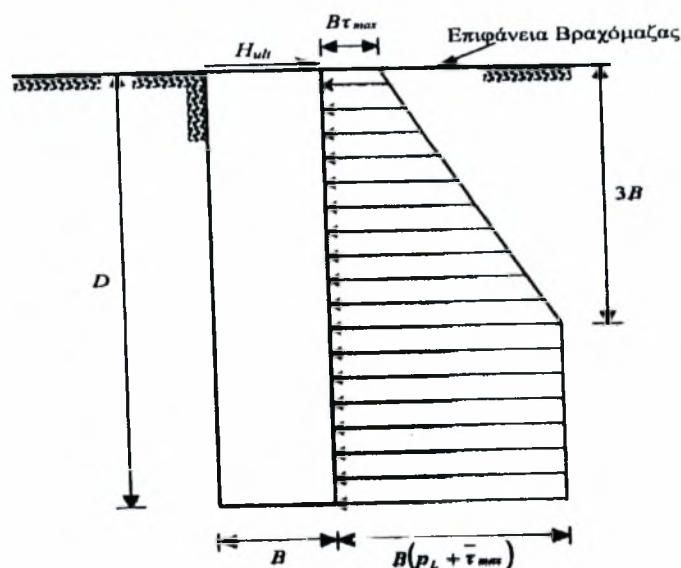
Όλα τα ως άνω μεγέθη αναφέρονται στην βραχομάζα η οποία θεωρείται ότι ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, και η διαστολικότητα συνδέεται με την διαρροή σύμφωνα με τον ακόλουθο νόμο πλαστικής ροής (Davis 1968) :

$$\frac{d\varepsilon_{3p}}{d\varepsilon_{1p}} = -L \quad (2.29)$$

όπου  $d\varepsilon_{1p}, d\varepsilon_{3p}$  : η μεγαλύτερη και η μικρότερη αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τους κύριους άξονες αντιστοίχως.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η γεωστατική οριζόντια τάση  $\sigma_{hi}$  θα είναι μικρή συγκρινόμενη με την συνοχή  $c_r$  και επομένως η σχέση (2.18) μπορεί να απλοποιηθεί ελαφρώς θεωρώντας ότι  $\sigma_{hi} = 0$ .

Ένα ζήτημα το οποίο τίθεται αφορά στον προσδιορισμό του βάθους στο οποίο αναπτύσσεται η οριακή τάση. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε παλαιότερα (Randolph, 1984) προτάθηκε ότι σε ένα συνεκτικό υλικό το βάθος αυτό θα είναι περίπου ίσο με τρεις διαμέτρους του φρέατος ( $3B$ ). Επειδή στοιχεία από άλλες έρευνες δεν υπάρχουν υιοθετείται αυτή υπόθεση. Η προτεινόμενη κατανομή της δύναμης ανά μονάδα μήκους που ασκείται στο φρέαρ κατά την αστοχία απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.4 : Κατανομή της Οριακής Εγκάρσιας Δύναμης ανά Μονάδα Μήκους

Η οριακή εγκάρσια δύναμη που μπορεί να εφαρμοσθεί για τις ως άνω συνθήκες έχει ως ακολούθως:

$$H_{ult} = \left( \frac{p_L D}{6} + \tau_{\max} B \right) D, \text{ για } D < 3B \quad (2.30)$$

$$H_{ult} = \left( \frac{p_L}{2} + \tau_{\max} \right) \cdot 3B^2 + (p_L + \tau_{\max}) \cdot (D - 3B) \cdot B \text{ για } D > 3B \quad (2.31)$$

Η μέγιστη καμπτική ροπή στο φρέαρ υπολογίζεται τότε από την δύναμη  $H_{ult}$  και την κατανομή της αντίδρασης κατά το σχήμα 2.4. Εάν στο φρέαρ ασκείται και μία ροπή, τότε για να υπολογισθεί μία κατάλληλη κατανομή της αντίδρασης η φόρτιση αντικαθίσταται ισοδύναμα με μία δύναμη ίδιου μεγέθους που εφαρμόζεται σε ύψος  $e = M/H$  επάνω από την επιφάνεια της βραχομάζας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η αναλυτική προσομοίωση του συστήματος φρέαρ – βραχομάζα με χρήση αναλυτικών μεθόδων προκειμένου να προκύψει η ενδοσιμότητα της κεφαλής του φρέατος έναντι εγκάρσιας φόρτισης. Η ενδοσιμότητα, δηλαδή η μετακίνηση και η στροφή της κεφαλής του φρέατος, θα εκφράζεται μέσω των σχέσεων που αναλύθηκαν εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας.

Για τις ανάγκες του κεφαλαίου πραγματοποιήθηκε ικανός αριθμός αναλύσεων ενός φρεάτος πακτώσεως έναντι εγκάρσιας φόρτισης. Όλες αυτές οι αναλύσεις αναφέρονται σε στατικές συνθήκες εξαίτισης. Στόχος των αναλύσεων ήταν η διερεύνηση της απόκρισης της κεφαλής του φρέατος για κάθε εφαρμοζόμενη φόρτιση.

Γίνεται κατ' αρχήν αναφορά στους κώδικες λογισμικού που δημιουργήθηκαν επί τούτου και αφορούν στις μεθοδολογίες Douglas – Davis και Kulhawy & Carter. Γίνεται εν συνεχεία αναφορά σε καταγραφή μερικών σημαντικών στοιχείων των κωδικών, ακολούθως δε αναφέρονται οι παράμετροι του προβλήματος, καθώς και οι τιμές που αυτές λαμβάνουν σε συνήθεις περιπτώσεις της πράξης. Γίνεται επίσης αναφορά στις παραδοχές που υιοθετούνται και αφορούν στην γεωμετρία και την διαμόρφωση των στοιχείων του προσομοιώματος.

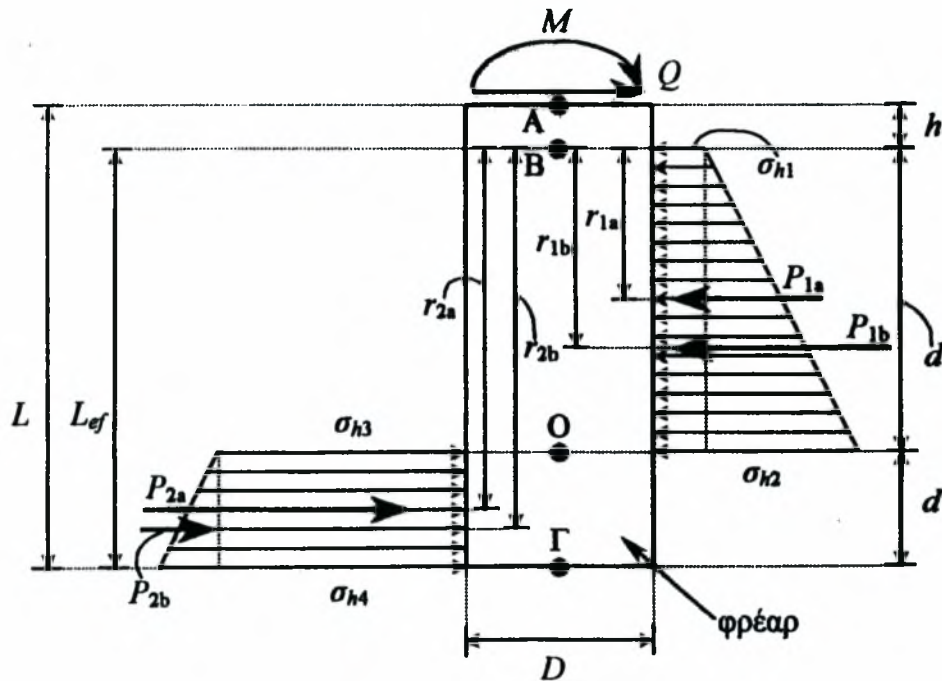
#### **3.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

Η μελέτη του προβλήματος εκκινά με την θεώρηση της κατανομής των τάσεων επάνω στο φρέαρ κατά την στιγμή της αστοχίας υιοθετώντας ταυτόχρονα τις απαραίτητες παραδοχές. Πρέπει να τονισθεί ότι η ενδοσιμότητα της κεφαλής του φρέατος έναντι εγκάρσιας φόρτισης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις παραδοχές που διέπουν την παραπάνω κατανομή, επομένως, η εκλογή της έχει ιδιαίτερη σημασία για την ανάλυση του προβλήματος.

Στην υπολογιστική προσομοίωση όσο και στις αναλυτικές μεθόδους ως αρχικές συνθήκες υιοθετήθηκαν οι γεωστατικές συνθήκες ισορροπίας. Επομένως, όλες οι παραδοχές που θα γίνουν και αφορούν στην διαμόρφωση και την γεωμετρία του δικτύου των ζωνών ισχύουν σε αυτό και στο επόμενο κεφάλαιο. Ειδική μνεία θα γίνει μόνον για νέες παραδοχές που τυχόν εισάγονται στην προσέγγιση του προβλήματος.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη κατανομή τάσεων εδράζεται στην υπόθεση ότι η αστοχία προκύπτει στην περιβάλλουσα το φρέαρ βραχομάζα (κρίσιμος τύπος αστοχίας) και όχι στο φρέαρ αυτό - τούτο ως δομικό στοιχείο, το οποίο αστοχεί μετά την περιβάλλουσα βραχομάζα.

Στο ακόλουθο σχήμα, διακρίνονται οι κατανομές των τάσεων που ασκούνται στο φρέαρ την στιγμή της αστοχίας, μαζί με το ζεύγος των εντατικών μεγεθών  $Q$  και  $M$  στην κεφαλή του φρέατος.



Σχήμα 3.1: Ισορροπία του Φρέατος την στιγμή της Αστοχίας

Η οριζόντια τάση  $\sigma_h$  εις βάθος  $z$  συνδέεται με την κατακόρυφη τάση  $\sigma_v$  στο ίδιο βάθος, με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (M-C) της βραχομάζας κατά την σχέση :

$$\sigma_h = 2c\sqrt{N_\phi + N_\phi\sigma_v} \Rightarrow \sigma_h = 2c\sqrt{N_\phi + N_\phi\gamma z} \quad (3.1)$$

όπου :

$\sigma_h, \sigma_v$  : η οριζόντια και η κατακόρυφη τάση αντιστοίχως εις

βάθος  $z$  από την επιφάνεια της βραχομάζας

$c, \phi$ : η συνοχή και η γωνία διατμητικής αντοχής της βραχομάζας

(παράμετροι στο κριτήριο M-C)

$N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$  : ο συντελεστής παθητικής ώθησης κατά Rankine

$\gamma$ : το ειδικό βάρος της περιβάλλουσας βραχομάζας .

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.1, που αφορά στην κατανομή των τάσεων στο φρέαρ, παρατηρείται ότι στο τμήμα (BO) μήκους  $d$  η παθητική πίεση της βραχομάζας ασκείται εμπροσθεν του φρέατος και η κατανομή των τάσεων αυξάνει γραμμικά από την αρχική τιμή  $\sigma_{h1}$  μέχρι την μέγιστη τιμή  $\sigma_{h2}$  .

Στο τμήμα (OG) μήκους  $d'$  η παθητική πίεση της βραχομάζας ασκείται στο όπισθεν τμήμα του φρέατος και η κατανομή των τάσεων στο φρέαρ αυξάνει γραμμικά από την αρχική τιμή  $\sigma_{h3}$  μέχρι την μέγιστη τιμή  $\sigma_{h4}$  . Το σημείο O αποτελεί κατά προσέγγιση το θεωρητικό σημείο περιστροφής του φρέατος. Τα αυτά ισχύουν ακριβώς και στο τμήμα (BO) όπου ο υπολογισμός της παθητικής ώθησης περιλαμβάνει τις τιμές των μεγεθών  $\sigma_{\omega}, c, \phi$  σε μεγαλύτερο βάθος.

Για την συγκεκριμένη κατανομή των τάσεων κατά την στιγμή της αστοχίας το φρέαρ θεωρείται ότι είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$  . Η ισοδύναμη διατομή του κυκλικού φρέατος για ανάλυση σε δύο διαστάσεις είναι ορθογωνική μήκους  $D$  και πλάτους  $L$ .

Σύμφωνα με όλες τις παραπάνω παραδοχές το προσομοίωμα είναι πλέον ορισμένο. Ως δεδομένα η προτεινόμενη μεθοδολογία ορίζει την γεωμετρία του φρέατος (διάμετρος  $D$ , μήκος  $L$ ), την περιβάλλουσα βραχομάζα γνωστής αντοχής (μέτρο ελαστικότητας  $E$ , συνοχή  $c$  και γωνία διατμητικής αντοχής  $\Phi$ ) και το δεδομένο ύψος βάθρου  $H$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ**

#### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η αριθμητική προσομοίωση του συστήματος φρέαρ – βραχομάζα, με απώτερο στόχο την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων για την ενδοσιμότητα της κεφαλής του φρέατος έναντι εγκάρσιας φόρτισης και την σύγκριση των αναλυτικών μεθόδων. Για τον λόγον αυτό πραγματοποιήθηκε σειρά παραμετρικών αναλύσεων φρεάτων πακτώσεως έναντι εγκάρσιας φόρτισης που δρα στην επιφάνεια της βραχομάζας.

Προτού αναπτυχθούν οι αναλύσεις θα γίνει εκτενής αναφορά στον κώδικα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Αναφέρονται τα κύρια στοιχεία του προγράμματος που συνετάγη επί τούτου και γίνεται ανάλυση του τρόπου επίλυσης του εκάστοτε προκύπτοντος προβλήματος. Ταυτοχρόνως, θα αναφερθούν οι παράμετροι του προβλήματος, καθώς και οι τιμές που αυτές λαμβάνουν σε πολλές περιπτώσεις της πράξης. Οι διάφορες παραδοχές που αφορούν στους συντελεστές, στις διαστάσεις, ακόμη και στις ιδιότητες του “εδάφους” θα βοηθήσουν ώστε να οριοθετηθεί το σύνολο των αναλύσεων οι οποίες εκτελέστηκαν.

#### **4.2 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ FLAC<sup>2D</sup>**

Το FLAC<sup>2D</sup> είναι ένας κώδικας ανάλυσης γεωτεχνικών κατασκευών που λειτουργεί σε περιβάλλον MS-Windows και χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές στον δισδιάστατο χώρο. Το πρόγραμμα έχει δημιουργηθεί από την αμερικανική εταιρία κατασκευής λογισμικού ITASCA και τα αρχικά F.L.A.C. που σημαίνουν Fast Lagrangian Analysis of Continua. Προσφέρει την δυνατότητα ανάλυσης σε δύο διαστάσεις προσομοιώνοντας την συμπεριφορά δισδιάστατων δομών εδάφους ή και βράχου, καθώς και άλλων υλικών τα οποία εισέρχονται σε περιοχή πλαστικής συμπεριφοράς όταν υπερβληθεί το όριο διαρροής των.

Το πρόγραμμα έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην μελέτη και τον σχεδιασμό γεωτεχνικών κατασκευών καλύπτοντας όλο σχεδόν το φάσμα των έργων ενός Γεωτεχνικού Μηχανικού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις αβαθείς και βαθιές θεμελιώσεις, στην ευστάθεια πρανών, στον σχεδιασμό τοίχων αντιστήριξης και διαφραγμάτων, καθώς και σε υπόγεια έργα όπως σήραγγες και υπόγειες κοιλότητες. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση κατασκευών υπό δυναμική καταπόνηση (σεισμικές διεγέρσεις), αλλά και σε έργα με παρουσία ροής και μεταφορά ενέργειας.

Μία από τις δυνατότητες του FLAC<sup>2D</sup> που το κατατάσσουν στα κορυφαία προγράμματα γεωτεχνικής μηχανικής είναι οι μεθοδολογίες ανάλυσης που διαθέτει. Στο FLAC<sup>2D</sup> μπορεί να επιλεγεί η στατική ανάλυση, η ανάλυση υπόγειων ροών (υδραυλική ανάλυση) ή η μεταφορά θερμότητας και ενέργειας (θερμική ανάλυση), τέλος δε, ανάλογα με την φύση του προβλήματος μπορεί να γίνει συνδυασμός των παραπάνω αναλύσεων. Όλες αυτές οι αναλύσεις μπορούν να υλοποιηθούν τόσο υπό στατικές συνθήκες όσο και υπό δυναμικές. Τα χαρακτηριστικά αυτά του FLAC<sup>2D</sup> δίνουν στον χρήστη την δυνατότητα εναλλακτικών στρατηγικών και σεναρίων προσομοίωσης, όπου όμως όσο πιο πολύπλοκες είναι αυτές τόσο οι απαιτήσεις υπολογιστικής μνήμης ισχύος και χρόνου αυξάνουν.

Τα πρότυπα μοντέλα συμπεριφοράς που ενσωματώνει το FLAC<sup>2D</sup> είναι δέκα (10), εκ των οποίων τρία προσομοιώνουν την ελαστική συμπεριφορά και έξι την πλαστική συμπεριφορά της γεωμάζας. Μερικά από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην πλαστικότητα είναι εκείνο των Drucker-Prager, των Mohr-Coulomb και το τροποποιημένο μοντέλο Cam-Clay. Στο απλό μοντέλο Mohr – Coulomb, το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι που οι κύριες τάσεις να λάβουν τιμές που παραβιάζουν το κριτήριο αστοχίας, οπότε και σημειώνεται αστοχία διατμητική ή εφελκυστική. Είναι γνωστόν ότι η συμπεριφορά του εδάφους παρεκκλίνει από τα όρια της γραμμικής ελαστικότητας ακόμη και για μικρά βήματα φόρτισης, για τον λόγον αυτό τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κρατυνόμενη ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους και άλλων υλικών μέσων, η οποία κατά το δυνατόν προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά τους. Κάθε ζώνη στον κάρναβο του FLAC<sup>2D</sup> μπορεί να αποτελείται από διαφορετικό υλικό ή να έχει διάφορες ιδιότητες, να χαρακτηρίζεται δε από συνεχή βαθμωτή ή στατιστική κατανομή οιασδήποτε ζητούμενης ιδιότητας προσδιοριστεί. Κατά την διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας του FLAC-2D δεν απαιτείται πουθενά ο σχηματισμός μητρώων, καθώς



και πράξεις μητρώων μεταξύ των. Αυτό έχει ως συνέπεια το μέγεθος της απαιτούμενης μνήμης στον υπολογιστή να είναι πολύ μικρότερο από εκείνο που θα απαιτούσε μία ανάλυση του ίδιου προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Με την απουσία των μητρώων, ο λογισμός σε μεγάλες παραμορφώσεις απαιτεί μικρή πρόσθετη υπολογιστική προσπάθεια. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διεπιφανειών οι οποίες είναι διαθέσιμες για να αντιπροσωπεύσουν τις ευδιάκριτες επαφές μεταξύ δύο ή περισσότερων τμημάτων του καννάβου στοιχείων. Στις διεπιφάνειες λαμβάνει χώρα ολίσθηση ή και διαχωρισμός, προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την παρουσία ελαττωμάτων, ενώσεων κόμβων ή και τριβή ορίων.

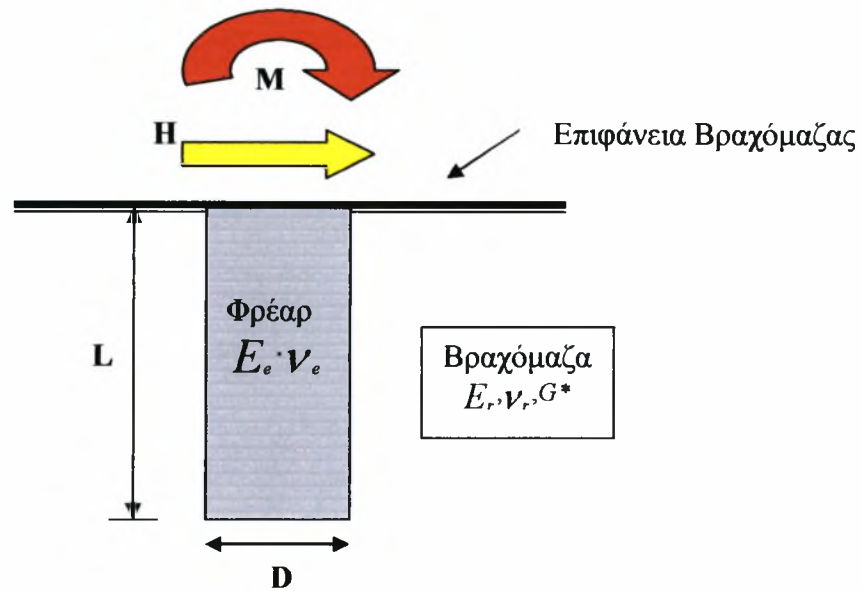
Το πρόγραμμα έχει την ικανότητα αυτόματης δημιουργίας δισδιάστατου καννάβου- πλέγματος, ο οποίος δημιουργείται με τον χειρισμό και την σύνδεση των προ-καθορισμένων μορφών στοιχείων που υπάρχουν στην βάση δεδομένων του προγράμματος. Έτσι, το FLAC<sup>2D</sup> παρέχει την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας οποιουδήποτε δισδιάστατου σχήματος με στόχο την καλύτερη προσομοίωση του καννάβου στο πραγματικό πρόβλημα. Ο δισδιάστατος χώρος ορίζεται από ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων, γεγονός που παρέχει ευελιξία στην δημιουργία του προσομοιώματος και ευκολία στον καθορισμό των παραμέτρων των δισδιάστατων ζωνών.

Το FLAC<sup>2D</sup> μπορεί να προσομοιάσει με αρκετά ικανοποιητικό τρόπο διάφορα είδη φόρτισης, καθώς και το τασικό πεδίο που επικρατεί στο εκάστοτε πρόβλημα. Για παράδειγμα, μπορεί να προσομοιάσει το αρχικό εντατικό πεδίο λόγω της βαρύτητας, καθώς και εκείνο λόγω της ύπαρξης υπόγειας ροής. Επίσης, την εφαρμογή συγκεντρωμένων και κατανεμημένων δυνάμεων ή και μετακινήσεων στα σύνορα του εδαφικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα υπολογισμού ενεργών και ολικών τάσεων ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το FLAC<sup>2D</sup> είναι ένα ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο για τον Γεωτεχνικό Μηχανικό. Πάντοτε όμως, τα αποτελέσματα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με κριτικό πνεύμα, σκέψη και επιφύλαξη.

### **4.3 ΤΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ**

Η δημιουργία του προσομοιώματος έγινε με τέτοιον τρόπον ώστε να υπάρχει αναλυτική διατύπωση, για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων, τα οποία διέπουν την σχεδίαση και κατασκευή ενός φρέατος σε όλα τα στάδια της.



Σχήμα 4.1 : Σχηματική Παράσταση του Εξεταζόμενου Προβλήματος

Οι πρακτικές διαστάσεις των φρεάτων πακτώσεως, που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο για τις θεμελιώσεις γεφυρών είναι διαμέτρου  $D$  από 6m έως και 8m και με ύψος  $L$  από 8m έως και 12m. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης θα εξετασθούν μόνον ορισμένες περιπτώσεις φρεάτων πακτώσεως σύμφωνα με τις διαστάσεις του παρακάτω πίνακα :

D(m)	4	4	6	6
L(m)	8	12	10	12

Πίνακας 4.1 : Τυπικές Διαστάσεις των Φρεάτων Πακτώσεως στον Ελλαδικό χώρο

Πριν πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις που αποσκοπούν στην μελέτη της συμπεριφοράς του φρέατος είναι αναγκαίο να προσομοιωθεί το αρχικό πεδίο βαρύτητας της γης, καθώς και οι επιφορτικές τάσεις εάν αυτές υφίσταντο. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται σχηματική παράσταση του εξεταζόμενου προβλήματος.

Η αριθμητική προσομοίωση της προβλήματος περιλαμβάνει αρκετά στάδια επιλύσεων προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και η καλύτερη δυνατή προσέγγιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

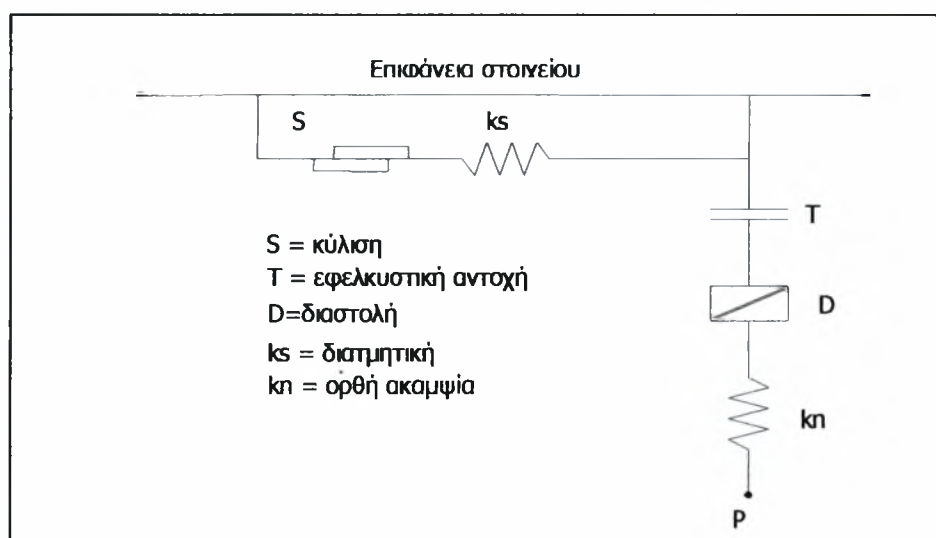
Στο πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε κάναβος ορθογώνιου σχήματος, ο οποίος έχει διαστάσεις 40 m μήκος 40 m ύψος και διακρίνεται σε στοιχεία πλάτους 1.0m. Η βάση

του προσομοιώματος έχει δεσμευθεί και κατά τις δύο διευθύνσεις x,y. Επίσης, δεσμεύσεις μετακινήσεων έχουν τοποθετηθεί και στα πλευρικά σύνορα του προσομοιώματος κατά την x διεύθυνση (Σχήμα 4.2).



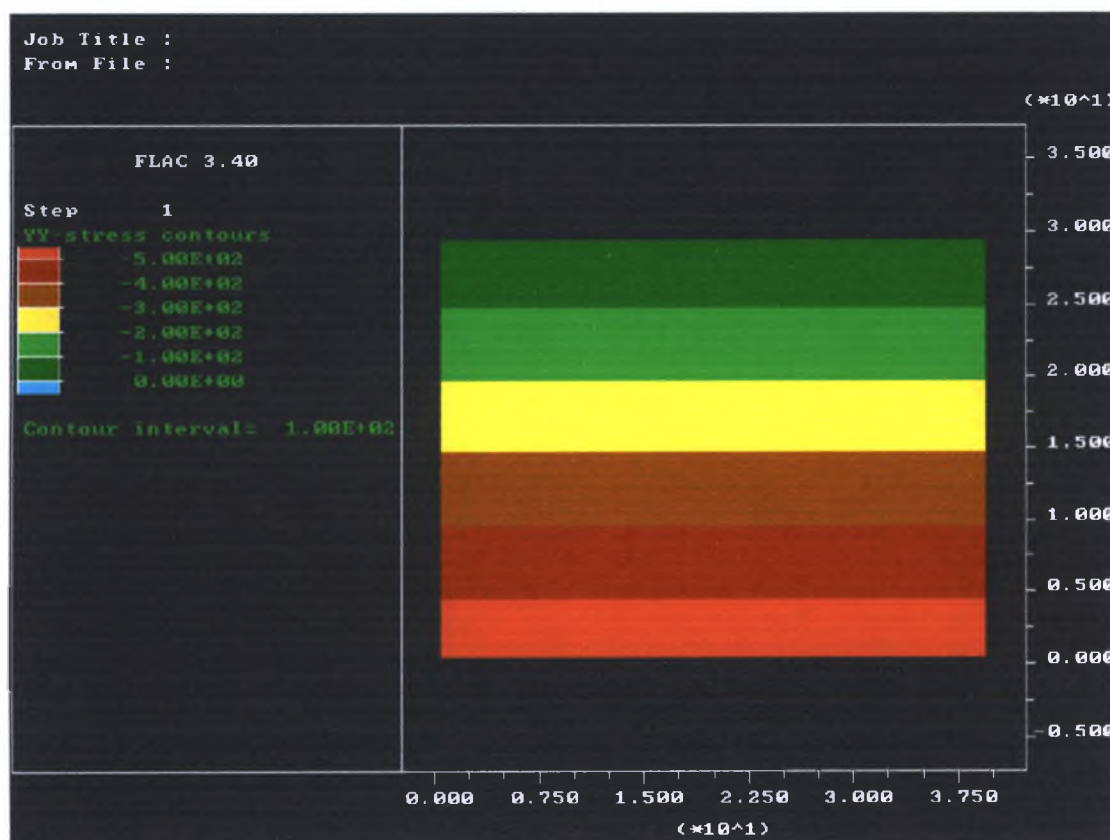
Σχήμα 4.2 : Κάνναβος στοιχείων εδάφους στο αρχικό στάδιο επίλυσης.

Έτσι, ο αρχικός κάνναβος απαρτίζεται από 3200 στοιχεία και 3453 κόμβους. Εν συνεχεία ορίζεται το εύρος των εδαφικών στρώσεων, οι ιδιότητές των και ακολούθως ορίζονται οι θέσεις των διεπιφανειών εκεί ακριβώς όπου θα τοποθετηθεί στα επόμενα στάδια επίλυσεων το φρέαρ. Σκοπός της εισαγωγής των στοιχείων διεπιφάνειας είναι η “συνένωση” των περιοχών που έχουν διαφορετικές ιδιότητες και μέγεθος (φρέαρ-περιβάλλουσα γεωμάζα). Οι διεπιφάνειες έχουν ιδιότητες τριβής, συνοχής, διαστολής, ορθής και διατμητικής ακαμψίας και εφελκυστικής αντοχής. Στην περίπτωση αυτή η συνοχή και η γωνία διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας είναι αντιστοίχως η συνάφεια και η γωνία τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του φρέατος και της γεωμάζας, ενώ η εφελκυστική αντοχή έχει μηδενική τιμή (Σχήμα 4.3).



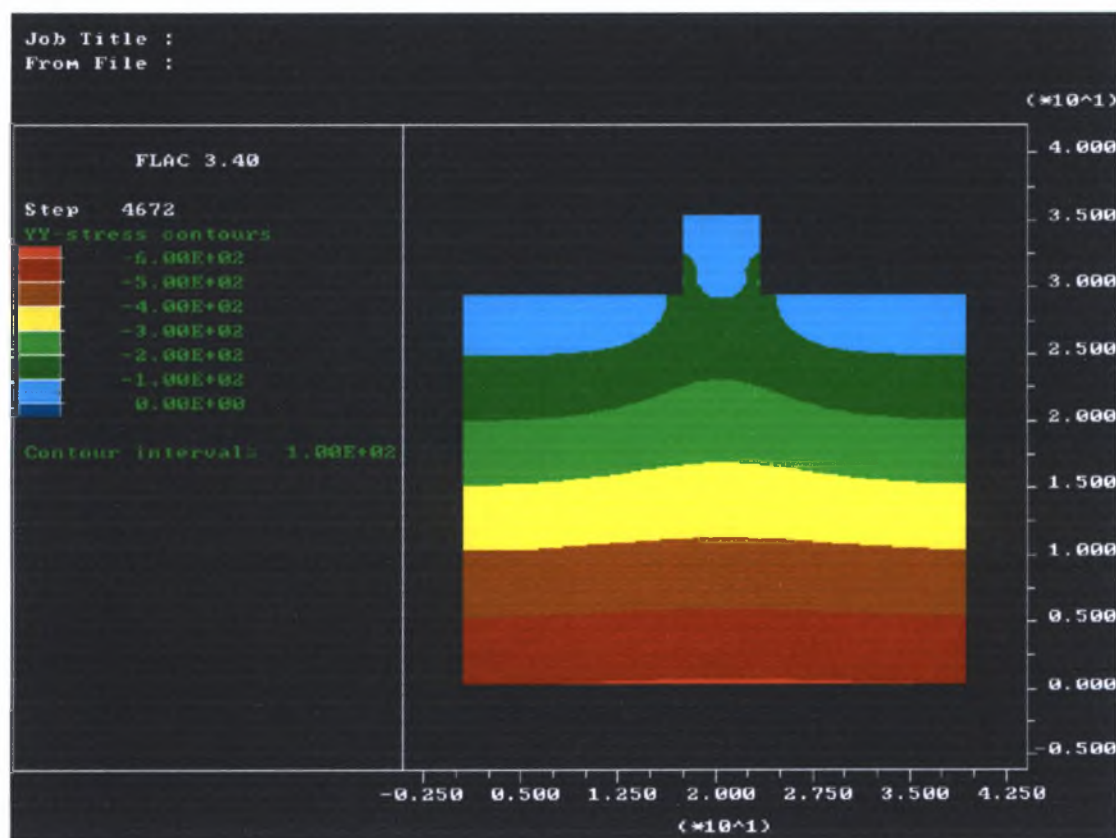
Σχήμα 4.3 : Τα στοιχεία της διεπιφάνειας του καταστατικού προσομοιώματος.

Ακολουθεί η πρώτη επίλυση. Το μοντέλο έρχεται σε πρώτη ισορροπία δυνάμεων κάτω από την επίδραση του γεωστατικού πεδίου τάσεων. Αρχικά ο σχεδιασμός θα γίνει μέχρι το στάδιο θεμελίωσης του φρέατος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4.

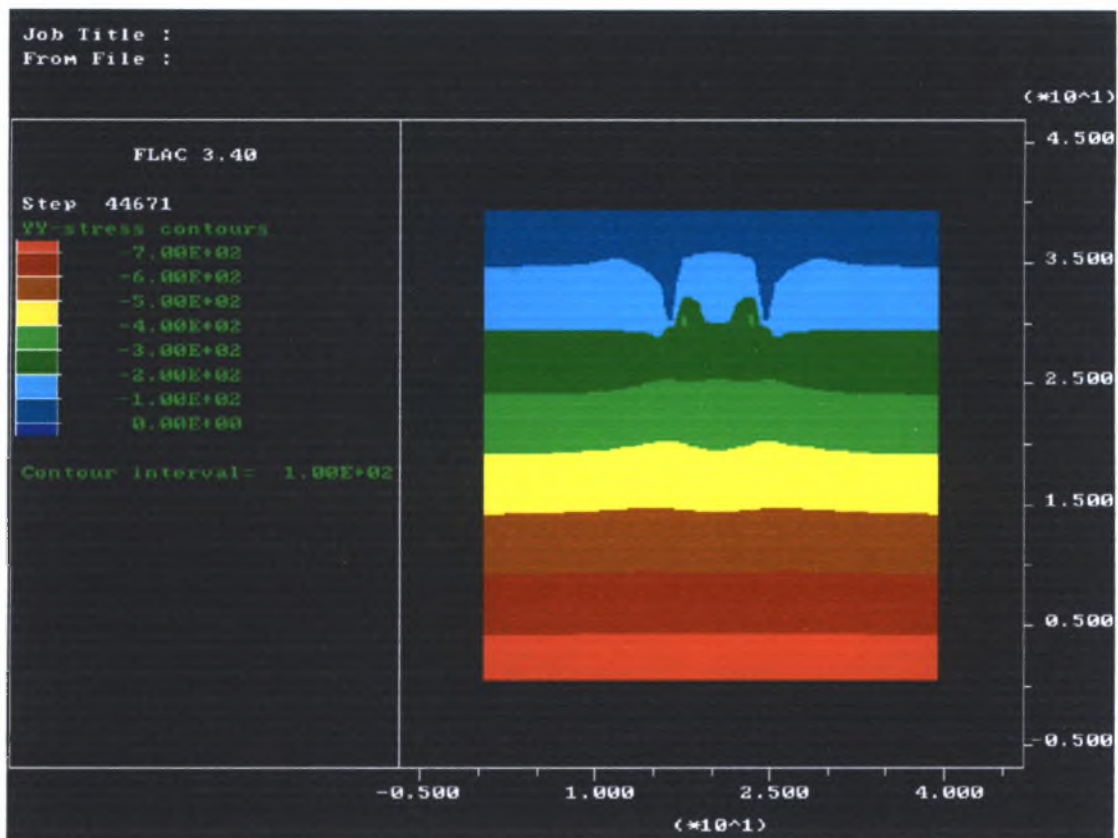


Σχήμα 4.4 : Ισοτιμές γεωστατικών τάσεων μέχρι την στάθμη θεμελίωσης.

Στο επόμενο βήμα θα αρχίσει σταδιακά να μορφώνεται το κομμάτι στο οποίο αντιστοιχεί το φρέαρ μέχρι την μέση του (Σχήμα 4.5), ενώ στο επόμενο βήμα θα ολοκληρωθεί λαμβάνοντας την τελική του μορφή, δηλαδή το συνολικό του ύψος. Ακολουθεί η προσομοίωση της γειτνιαζουσας με το φρέαρ εκσκαφής και από τις δύο πλευρές του. Όλα τα ως άνω οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς επελέγη η δημιουργία των εδαφικών στρώσεων σε μικρά υπολογιστικά βήματα και όχι η άμεση δημιουργία ολόκληρου του καννάβου. Η επίλυση ολοκληρώνεται μετά από μία σειρά υπολογιστικών βημάτων, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται αυτόματα από τον κώδικα ή καθορίζεται από τον χρήστη εάν ο αριθμός βημάτων δεν επαρκεί για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας. Στο Σχήμα 4.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ισοτιμές των κατακόρυφων γεωστατικών τάσεων υπό την επίρριαν του βαρυτικού πεδίου.



Σχήμα 4.5 : Ισοτιμές γεωστατικών τάσεων μέχρι το 1/2 του ύψους του φρεάτος.



Σχήμα 4.6 : Ισοτιμές γεωστατικών τάσεων στο πρώτο στάδιο ανάλυσης.

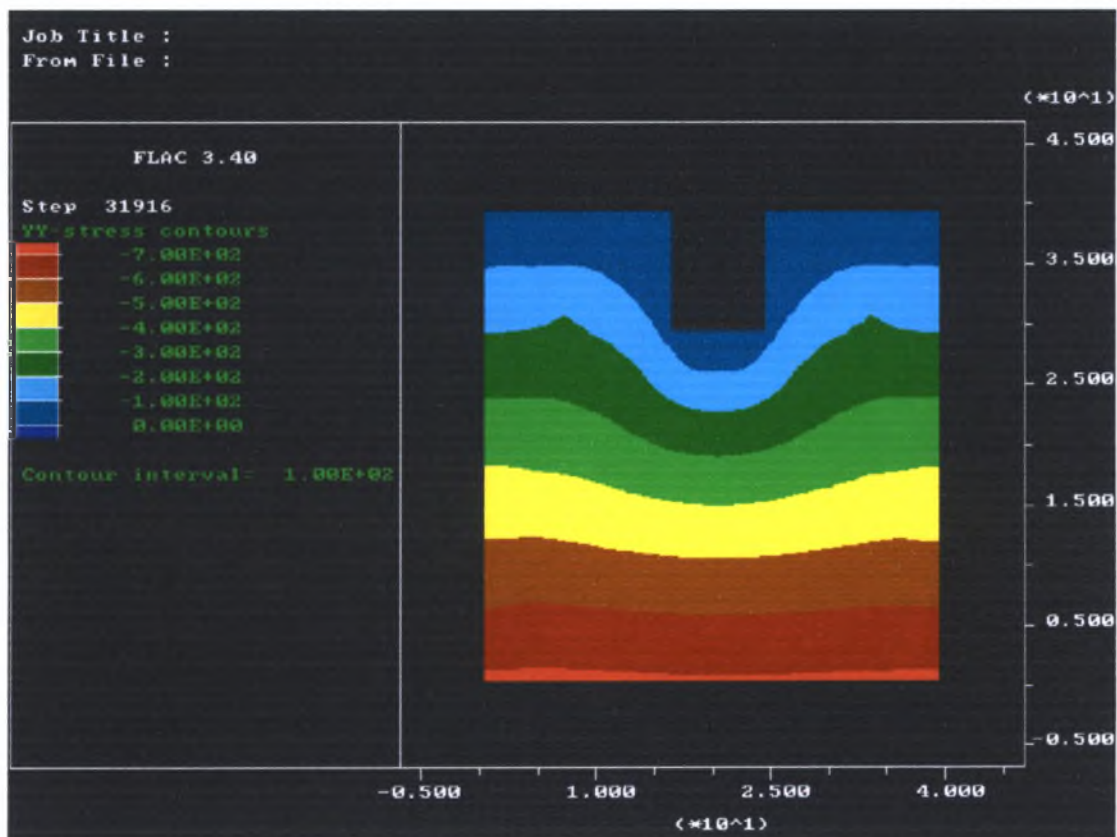
Το δεύτερο στάδιο επίλυσης πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικώς γίνεται εκσκαφή της γεώμαζας (Σχήμα 4.7), ακολουθεί επίλυση και όταν το μοντέλο έρθει σε ισορροπία εισάγεται το φρέαρ (Σχήμα 4.8).

Σε σχέση με το παραπάνω θέμα, η διαδικασία κατασκευής ξεκινά με την εκσκαφή του φρέατος στην βραχομάζα. Η εκσκαφή γίνεται είτε με την χρήση εκρηκτικών υλών είτε με την συμβατική μέθοδο. Επομένως μέσα στην βραχομάζα, πλευρικώς του φρέατος, υπάρχουν πολύ τραχείες επιφάνειες του εδάφους. Εν συνεχεία εκτελείται μέσα σε αυτή την κοιλότητα η έγχυση του σκυροδέματος με σκοπό την δημιουργία του φορέα του φρέατος. Μετά την πήξη του σκυροδέματος υπάρχει πλήρης συνάφεια μεταξύ του πασσάλου και της βραχομάζας, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται σχετική ολίσθηση ούτε άνοιγμα στην διεπιφάνεια.

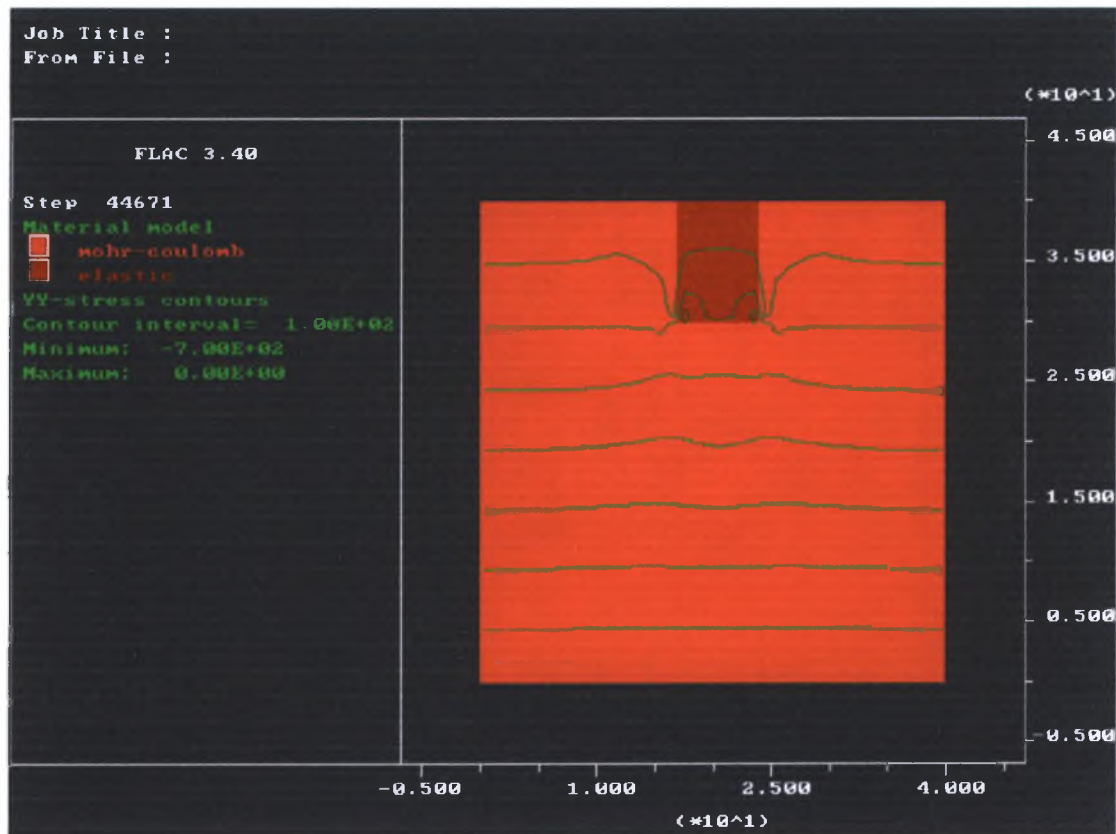
Για την υπολογιστική προσομοίωση του προβλήματος θεωρείται ότι στην διεπιφάνεια μεταξύ του φρέατος και της βραχομάζας αναπτύσσεται πλήρης συνάφεια. Τα δύο υλικά θα μετακινούνται ως ένα συσσωμάτωμα, μέχρις ότου υπερβληθεί η εφελκυστική αντοχή της βραχομάζας, οπότε θα αποκολληθούν και θα δημιουργηθεί

μία ρωγμή μεταξύ των. Το σκυρόδεμα έχει την δυνατότητα να αναπτύξει σημαντική εφελκυστική αντοχή κατά την κατακόρυφη λόγω της εγκάρσιας συμπίεσης. Έτσι, δεν αναμένεται να εμφανίσει πρώτο εφελκυστική αστοχία.

Η παραδοχή της πλήρους ταύτισης της βραχομάζας με την επιφάνεια του φρέατος είναι απλή για τον κώδικα του προγράμματος και δεν απαιτεί ειδικές εντολές για την προσομοίωση. Γενικώς, μία άλλη παραδοχή για την διεπιφάνεια, η οποία να επιτρέπει την ολίσθηση του φρέατος ως προς την βραχώμαζα καθώς και την αποκόλληση των, είναι απειροστό ανώτερης τάξεως σε σχέση με τις λοιπές αβεβαιότητες του προβλήματος.



Σχήμα 4.7 : Προσομοίωση εκσκαφής φρέατος στη βραχώμαζα.



Σχήμα 4.8 : Προσομοίωση κατασκευής του φρέατος στη βραχομάζα.

Για την περιβάλλουσα βραχομάζα του φρέατος το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε στις επιλύσεις είναι εκείνο των Mohr-Coulomb, το οποίο βασίζεται στον θεμελιώδη νόμο τριβής του Coulomb. Μαθηματικώς το κριτήριο εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau = c + \tan \Phi \sigma_n \quad (4.1)$$

από την οποία προκύπτει η σχέση :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \Phi + c \cdot \cos \Phi$$

Πλεονέκτημα του κριτηρίου Mohr-Coulomb αποτελεί η αποδεδειγμένη ισχύς του για πολλές κατηγορίες εδαφών. Η βραχομάζα είναι ομογενής, με σταθερές παραμέτρους σε όλο το βάθος. Για την εισαγωγή του παραπάνω κριτηρίου, απαιτείται από το FLAC 2D να εισαχθούν από τον χρήστη οι ακόλουθες παράμετροι σε κάθε ζώνη του δικτύου.

Η πυκνότητα  $\rho_r$  ( density ) της βραχομάζας , που θεωρείται σε όλες τις περιπτώσεις ίση προς  $\rho_p = 24 \text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$



Οι παράμετροι εδαφικής αντοχής  $c$  (cohesion) και  $\Phi$  (friction angle) λαμβάνουν τιμές που δίδονται στον πίνακα 4.2. Μία ακόμη σημαντική παράμετρος του προβλήματος είναι η αντοχή της βραχομάζας, η οποία επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Οι αντοχές που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο, έχουν μεγάλο εύρος τιμών εξαιτίας της εδαφικής ποικιλίας της χώρας τόσο σε τύπους εδαφών. Οι κατηγορίες βράχων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

α/α	Ποιότητα Βραχομάζας	Συνοχή $c$ (kPa)	Γωνία τριβής $\phi$ (°)	Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (Mpa)
1	Ασθενής	30	25	200
2	Μέτρια	60	30	600
3	Καλή	100	35	1000
4	Πολύ Καλή	200	38	2000

Πίνακας 4.2 : Χαρακτηριστικοί Τύποι Βραχομάζας

Η εφελκυστική αντοχή της βραχομάζας, είναι πολύ μικρή, αλλά για απλοποίηση θεωρείται ότι είναι αυτή μηδενική σε όλες τις αναλύσεις. Η γωνία διαστολικότητας του υλικού  $\psi$  επίσης θεωρείται μηδενική. Το μέτρο ισοδιάστατης συμπίεσης  $K$  (bulk modulus), καθώς και το μέτρο διάτμησης  $G$  (shear modulus) συνδέονται με το μέτρο Ελαστικότητας Young  $E$ , και τον λόγο Poisson  $\nu$  με τις ακόλουθες σχέσεις :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \text{ \& } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.2)$$

Ο λόγος Poisson  $\nu$  στις βραχομάζες λαμβάνει τιμές από 0.25 έως και 0.35. Για τις αναλύσεις θεωρείται μία μέση τιμή ίση  $\nu = 0.30$ .

Από τα ως άνω, είναι φανερό ότι για να προσδιορισθεί απολύτως το προσομοίωμα Mohr – Coulomb απαιτείται σε κάθε ανάλυση η εισαγωγή των μέτρων διάτμησης και ισοδιάστατης συμπίεσης,  $G$  και  $K$  αντιστοίχως.

Για την απλοποίηση του υπολογιστικού προσομοιώματος θεωρήθηκε ότι το φρέαρ συμπεριφέρεται ως ένα απολύτως ελαστικό υλικό. Το φρέαρ προσομοιώθηκε με

στοιχεία εδάφους τα οποία συμπεριφέρονταν απολύτως ελαστικά, με ιδιότητες που αντιστοιχούν στο σκυρόδεμα. Η χρήση των στοιχείων εδάφους για την προσομοίωση του φρέατος είναι επιτρεπτή, εφόσον το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης.

Η πυκνότητα  $\rho_c$  του σκυροδέματος, είναι ίση με :

$$\rho_c = 24 \text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$$

Ο λόγος Poisson  $\nu$  του σκυροδέματος μπορεί να ληφθεί Σε μία μέση τιμή ίση με 0.20, εφόσον αυτό συμπεριφέρεται απολύτως ελαστικά. Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα :

$f_{ct} \text{ (MPa)}$	30	35	40	45	50
$E \text{ (Gpa)}$	32	34	35	36	37

Πίνακας 4.3: Μέτρο Ελαστικότητας του Σκυροδέματος

Από τον ως άνω πίνακα γίνεται σαφές ότι η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την κατηγορία του σκυροδέματος είναι μικρή. Η θεώρηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος ως απολύτως ελαστικού υλικού συνιστά μία σημαντική απλοποίηση στην προσομοίωση του προβλήματος.

#### **4.4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ**

Γενικώς στα γεωτεχνικά προβλήματα οι αρχικές συνθήκες επιβάλλουν τον προσδιορισμό των αρχικών ενεργών γεωστατικών τάσεων, οι οποίες μεταβάλλονται γραμμικώς με το βάθος από την επιφάνεια. Επίσης, προσδιορίζονται οι οριζόντιες τάσεις ως το γινόμενο των κατακόρυφων με τον συντελεστή οριζόντιας πίεσης  $K_0$  κατά την σχέση  $\sigma_h^1 = K_0 \cdot \sigma_v^1$ . Μετά από το πρώτο στάδιο επίλυσης θα έπρεπε να υιοθετηθεί ένας επιπλέον αλγόριθμος, ο οποίος θα προσομοίαζε την φόρτιση στην κεφαλή του φρέατος. Ως εξαγόμενα αποτελέσματα θα προέκυπταν τότε οι «καθαρές» μετακινήσεις της κεφαλής του φρέατος από τα φορτία της προσομοίωσης. Σε αυτό το

«χρονικό» βήμα φόρτισης ως αρχικά πεδία τάσεων θα χρησιμοποιούνταν τα πεδία που θα προέκυπταν από τις γεωστατικές συνθήκες του πρώτου σταδίου .

Σκοπός των αναλύσεων ήταν να προσδιορισθεί η απόκριση των φρεάτων πακτώσεως, για φόρτιση στην κεφαλή των. Η απόκριση της κεφαλής του φρέατος σχετίζεται με την τέμνουσα δύναμη και την ροπή, που ασκούνται σε αυτήν. Είναι δύσκολο να εκτελεσθούν αναλύσεις με ταυτόχρονη την μεταβολή της τέμνουσας δύναμης  $Q$  και της ροπής  $M$ , διότι ο απαιτούμενος αριθμός υπολογιστικών βημάτων είναι μεγάλος. Για τον λόγο αυτόν επελέγη η εφαρμογή να γίνουν δύο ειδών φόρτισης στην κεφαλή του φρέατος: η πρώτη αφορά μόνον στην τέμνουσα δύναμη , ενώ δεύτερη μόνον στην ροπή.

Αναλυτικώς, η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των συντελεστών ευκαμψίας , υπό την μορφή βημάτων είναι η ακόλουθη:

- 1<sup>ο</sup> Βήμα : Γεωστατικές συνθήκες

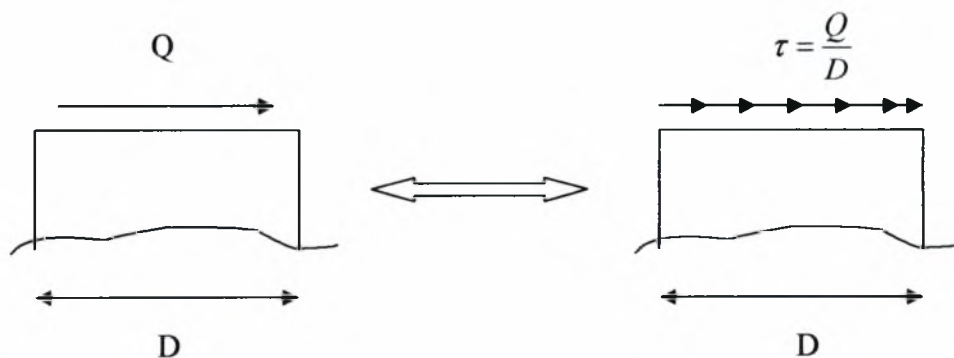
Με την εκτέλεση των αλγορίθμων προκύπτουν οι αρχικές συνθήκες για το εξεταζόμενο πρόβλημα .

- 2<sup>ο</sup> Βήμα : Προσομοίωση ελαστικής φόρτισης φρέατος

#### 1<sup>η</sup> Φόρτιση : Μόνον τέμνουσα δύναμη

Σε αυτή την περίπτωση ασκούνται μόνον τέμνουσες δυνάμεις στην κεφαλή του φρέατος απουσία ροπής ( $M = 0$ ) . Οι σχέσεις λαμβάνουν την μορφή :

$$\begin{aligned} \delta &= A \cdot Q \\ \theta &= B \cdot Q \end{aligned} \quad (4.5)$$

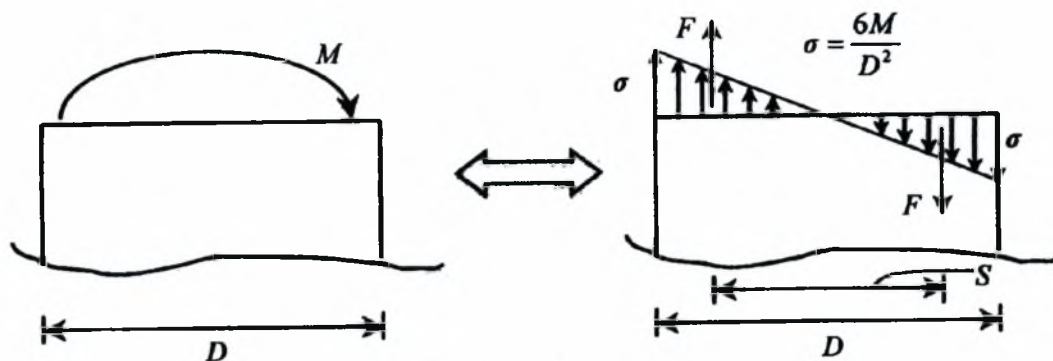


Σχήμα 4.9: Εφαρμογή των Διατμητικών Τάσεων για τις Τέμνουσες Δυνάμεις

2<sup>η</sup> Φόρτιση : Μόνον ροπή

Σε αυτή την περίπτωση ασκούνται μόνον ροπές στην κεφαλή του φρέατος, απουσία τέμνουσας δύναμης ( $Q = 0$ ). Οι σχέσεις παίρνουν την μορφή :

$$\begin{aligned}\delta &= B \cdot M \\ \theta &= \Gamma \cdot M\end{aligned}\quad (4.6)$$



Σχήμα 4.10: Εφαρμογή των Ορθών Τάσεων για τις Ροπές

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ

### ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

#### 5.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Στόχος των παραμετρικών αναλύσεων ήταν η κατά το δυνατόν επίτευξη σύμπτωσης μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών, ειδικότερα δε των μετακινήσεων ( $u$ ) στην κεφαλή όσο και κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του φρέατος υπό συνθήκες λειτουργίας (πραγματικές συνθήκες). Στα σενάρια που υιοθετήθηκαν εισήχθησαν ως αρχικά δεδομένα οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού οι οποίες προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής διασκόπησης πριν από τον σχεδιασμό της αντιστήριξης.

Η διάκριση των αναλύσεων εστιάζεται σε τρεις κυρίως παραμέτρους: το μέτρο παραμορφωσιμότητας, την συνοχή των εδαφικών στρώσεων υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και τον λόγο Poisson ( $\nu$ ). Ένας επιπλέον περιορισμός επιβάλλει το μέτρο παραμόρφωσης να μην μεταβάλλεται κατ αναλογία προς την μετακίνηση, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερες μετακινήσεις από τις «πραγματικές» για μικρότερες στάθμες εδαφικής πίεσης. Αποδίδεται αυτό στο γεγονός ότι το «πραγματικό» μέτρο παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο εκείνου που χρησιμοποιείται στις επιλύσεις του κώδικα FLAC.

Οι τυπικές διαστάσεις των φρεάτων πακτώσεως, που χρησιμοποιούνται φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

D(m)	4	4	6	6
L(m)	8	12	10	12

Άλλη σημαντική παράμετρος του προβλήματος είναι η αντοχή της βραχώμαζας , η οποία είναι προφανές ότι επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα τελικά αποτελέσματα . Οι αντοχές που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο , έχουν μεγάλο εύρος τιμών εξαιτίας της εδαφικής ποικιλίας της χώρας τόσο σε τύπους εδαφών , όσο και στα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά τους .

α/α	Ποιότητα Βραχώμαζας	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής φ ( ° )	Μέτρο Ελαστικότητας E (Μρα)
1	Ασθενής	30	25	200
2	Μέτρια	60	30	600
3	Καλή	100	35	1000
4	Πολύ Καλή	200	38	2000

Όπως έχει αναφερθεί, η βραχώμαζα θεωρείται ότι υπακούει στο κριτήριο αστοχίας των Mohr – Coulomb , με παραμέτρους εδαφικής αντοχής c , φ. Η πυκνότητα  $\rho_r$  ( density ) της βραχώμαζας , που θεωρείται σε όλες τις περιπτώσεις ίση με :

$$\rho_r = 2400 \text{kg} / \text{m}^3$$

Οι παράμετροι εδαφικής αντοχής c ( cohesion ) , φ ( friction angle ) , Η εφελκυστική αντοχή της βραχώμαζας ( tensile strength ) , που στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρή , αλλά για απλοποίηση σε όλες τις αναλύσεις θεωρείται ότι είναι μηδενική .

Η γωνία διαστολικότητας του υλικού  $\psi$  ( dilatation angle ) , που επίσης θεωρείται μηδενική .

Το μέτρο ισοδιάστατης συμπίεσης K ( bulk modulus ) , καθώς και το μέτρο της διάτμησης G ( shear modulus ) , τα οποία συνδέονται με το μέτρο Ελαστικότητας Young E , και τον λόγο Poisson  $\nu$  ,

$G_r$  : ελαστικό μέτρο διάτμησης

$\nu_r$  : λόγος Poisson

$c_r$  : συνοχή της βραχώμαζας

$\phi_r$  : γωνία εσωτερικής τριβής

$\psi_r$  : γωνία διαστολικότητας

Όλα τα μεγέθη αναφέρονται στην βραχώμαζα και ισχύουν για όλες τις μεθόδους (FLAC 2D, Douglas and Davis, Carter and Kulhawy).

### μη Δεδομένων Douglas and Davis, Carter and Kulhawy

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	$d =$	8.8	m
Εσωτερική διάμετρος θεμελίου	$d_o =$	0	m
Ισοδύναμη διάσταση τετραγωνικής διατομής	$d_{equ} =$	7.71	m
Βάθος φρέατος	$L =$	23	m
Εμβαδόν επιφάνειας βάσης θεμελίου	$A =$	60.8	m <sup>2</sup>
Διακριτοποίηση εδαφικού προφίλ	$dz =$	0.49	m
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	$E_{σκυρ} =$	2.30E+06	t/m <sup>2</sup>
Ισοδύναμος δείκτης "εδάφους" στην βραχομάζα	$K =$	30000	t/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας	$E_{rock} =$	1	GPa
Συντελεστής ασφάλειας στην εδαφική αντίδραση (βάση του φρέατος)	$FS_b =$	1.05	
Συντελεστής ασφάλειας στις εδαφικές ωθήσεις $p(z)$	$FS_p =$	1.9	ok
Πλάτος μετώπου εδαφικών ωθήσεων = $fac \cdot d$	$fac =$	2.5	
Τέμνουσα στην κεφαλή του φρέατος	$F_x =$	1800	t
Ροπή στην κεφαλή του φρέατος	$M_y =$	42600	tm
Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων	$Kp =$	0.5	

**Σύνοψη Δεδομένων Flac2D**

```
;freatio diplomatikis  
title  
frear
```

```
new  
set log on
```

```
grid 40 40  
model mohr i 1,41 j 1,41
```

```
;suntentagmenes komvwn kai pli8os stoixeiwn  
gen 0 0 0 40 40 40 40 0
```

```
;boundary and initial conditions  
fix x i 1  
fix x i 41  
fix x y j 1
```

```
;idiotites edafous  
prop den=2.5 bul=5e+5 she=2.3e+5 coh=112 fri=54 i=1,41 j=27,41  
prop den=2.5 bul=5e+5 she=2.3e+5 coh=143 fri=50 i=1,41 j=13,27  
prop den=2.5 bul=5e+5 she=2.3e+5 coh=174 fri=47 i=1,41 j=1,13
```

```
; Arxiko entatiko pedio  
set gravity 9.81
```

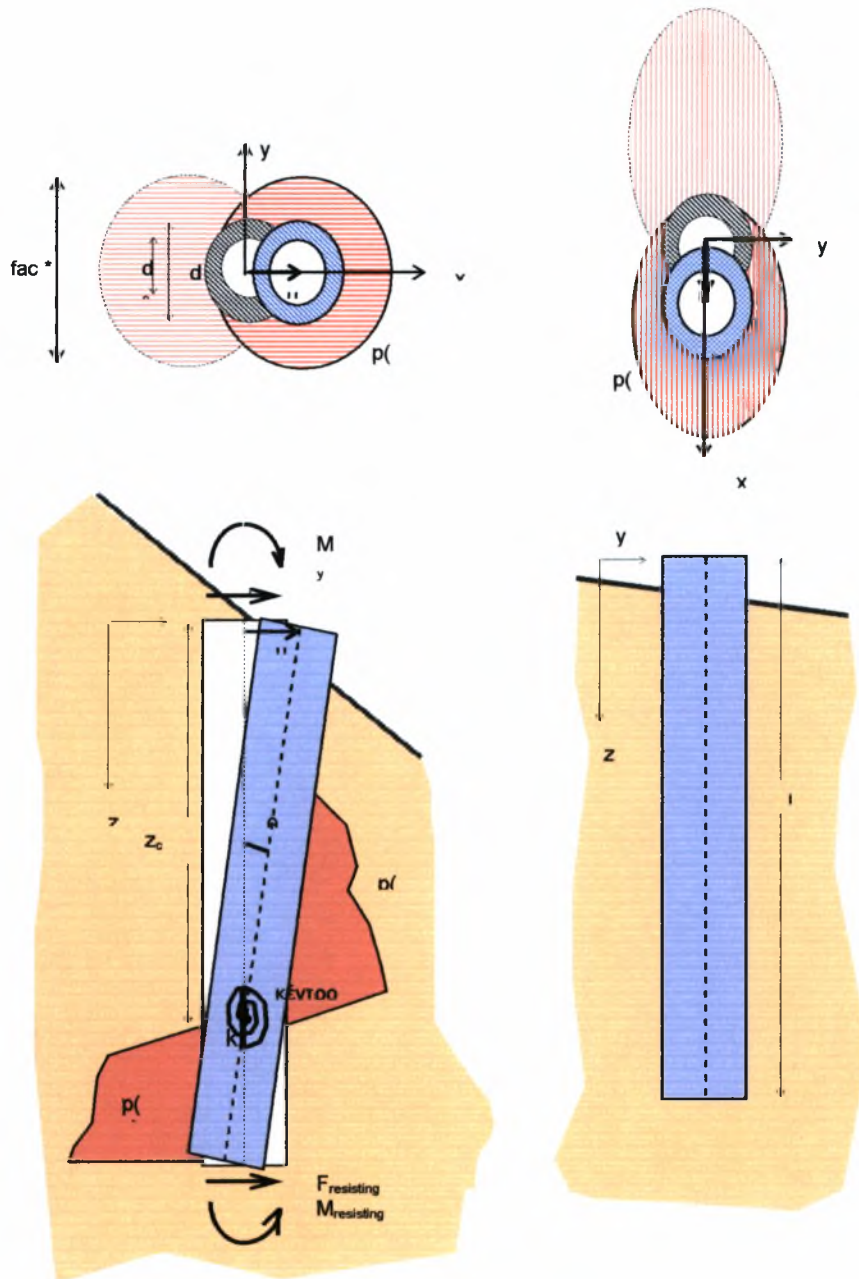
```
solve sratio 0.01  
save frear_0_.sav
```

```
; idiotites freatos  
model el i=17,23 j=31,41  
prop den=2.400 bul=1.27e+7 she=9.58e+6 i=17,23 j=31,41
```

```
set force 0.005  
solve  
save frear_1.sav  
; initial disp, taseis  
ini xd 0 yd 0
```

```
;efarmogi dunamewn
```





Σχήμα 5.1: Σχηματική Παράσταση του Εξεταζόμενου Προβλήματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την αλληλεπίδραση φρέατος-περιβάλλοντος εδάφους βάση των φορτίων που ασκήθηκαν χρησιμοποιήθηκε προσομοίωμα του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D καθώς και οι αναλυτικές μέθοδοι των Douglas – Davis και των Kulhawy & Carter με τις πραγματικές διαστάσεις των έργων, καθώς και με τα πραγματικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας γεωμάζας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των αναλύσεων είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η δισδιάστατη ανάλυση παρέχει ρεαλιστική πρόβλεψη των μέγιστων μετακινήσεων καθώς δίδει την δυνατότητα της προσομοίωσης σε πραγματική κλίμακα. Συνέπεια αυτού είναι η αναπαράσταση των φαινόμενων στην πραγματική τους διάσταση, με ταυτόχρονη μείωση των υπολογιστικών παραδοχών για την ορθή προσομοίωση της κατασκευής.
- 2) Η υιοθέτηση σταθερής τιμής στο μέτρο παραμόρφωσης  $E$  της περιβάλλουσας γεωμάζας σε όλες τις φάσεις εξαίτησης οδηγεί σε απόκλιση των μετακινήσεων του αριθμητικού προσομοιώματος από τις μετρηθείσες τιμές. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στην μη-γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας να μεταβάλλεται συνεχώς με την αύξηση του φορτίου ή/και της παραμόρφωσης.
- 3) Η συμπεριφορά ενός φρέατος μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση κατάλληλων συνδυασμών στις τιμές των εδαφικών παραμέτρων. Ιδιαίτερη βαρύτητα στο προσομοίωμα έχει η συνοχή, το μέτρο παραμόρφωσης και ο λόγος Poisson.
- 4) Η ακαμψία της κατασκευής σε σχέση με την μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, η οποία δίνεται μέσω του λόγου της διαμέτρου προς το μήκος του φρέατος ( $D/L$ ), καθώς και της γωνίας εσωτερικής τριβής ( $\varphi$ ), ορίζει την αλληλεπίδραση των δύο στοιχείων, του φρέατος και της περιβάλλουσας γεωμάζας. Η χρήση του κατάλληλου καταστατικού νόμου (Mohr-Coulomb) δίδει στον χρήστη την δυνατότητα αξιόπιστης προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος.
- 5) Η αναλυτική προσομοίωση των φάσεων κατασκευής ενός φρέατος απαιτεί ο κάρναβος των στοιχείων να αντιπροσωπεύει όλα τα στάδια κατασκευής τα οποία προκαλούν αλλαγή στο πεδίο των τάσεων. Υπεραπλούστευση της κατασκευαστικής διαδικασίας στην προσομοίωση αποτελεί σοβαρό αίτιο απόκλισης της ανάστροφης ανάλυσης από τα μετρούμενα μεγέθη.

6) Οι εδαφικές μετακινήσεις επηρεάζονται από έναν αριθμό παραγόντων:

- Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους
- Ακαμψία του φρέατος
- Αλληλουχία των φάσεων κατασκευής
- Μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων
- Αρχική τασική κατάσταση

7) Η σύγκριση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D με τις αναλυτικές μεθόδους των Douglas – Davis και των Kulhawy & Carter οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, οι αναλυτικές μέθοδοι μας οδήγησαν σε συντηρητικά αποτελέσματα. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση του FLAC 2D θεωρούμε ενιαίο τον ελαστικό ημιχώρο και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας είναι σταθερά με το βάθος ενώ στις αναλυτικές μεθόδους μεταβάλλονται με το βάθος σύμφωνα με το κριτήριο του Hoek & Brown δίνοντάς μικρότερα αποτελέσματα.

8) Η μέτρηση των μετακινήσεων και της γωνίας στις κατασκευές φρεάτων με χρήση των αναλυτικών μεθόδων του Douglas – Davis και του Kulhawy & Carter θεωρείται έγκυρη μέθοδος παρακολούθησης. Οι μετρήσεις των μετακινήσεων στην παρούσα εργασία κατέδειξαν την αναμενόμενη (τυπική) μορφή μετακίνησης των φρεάτων.

9) Τέλος, κάθε αποτέλεσμα που προκύπτει από επίλυση μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων πρέπει να ελέγχεται από τον χρήστη με κριτική σκέψη και να μην εκλαμβάνεται ως η απόλυτη αλήθεια.

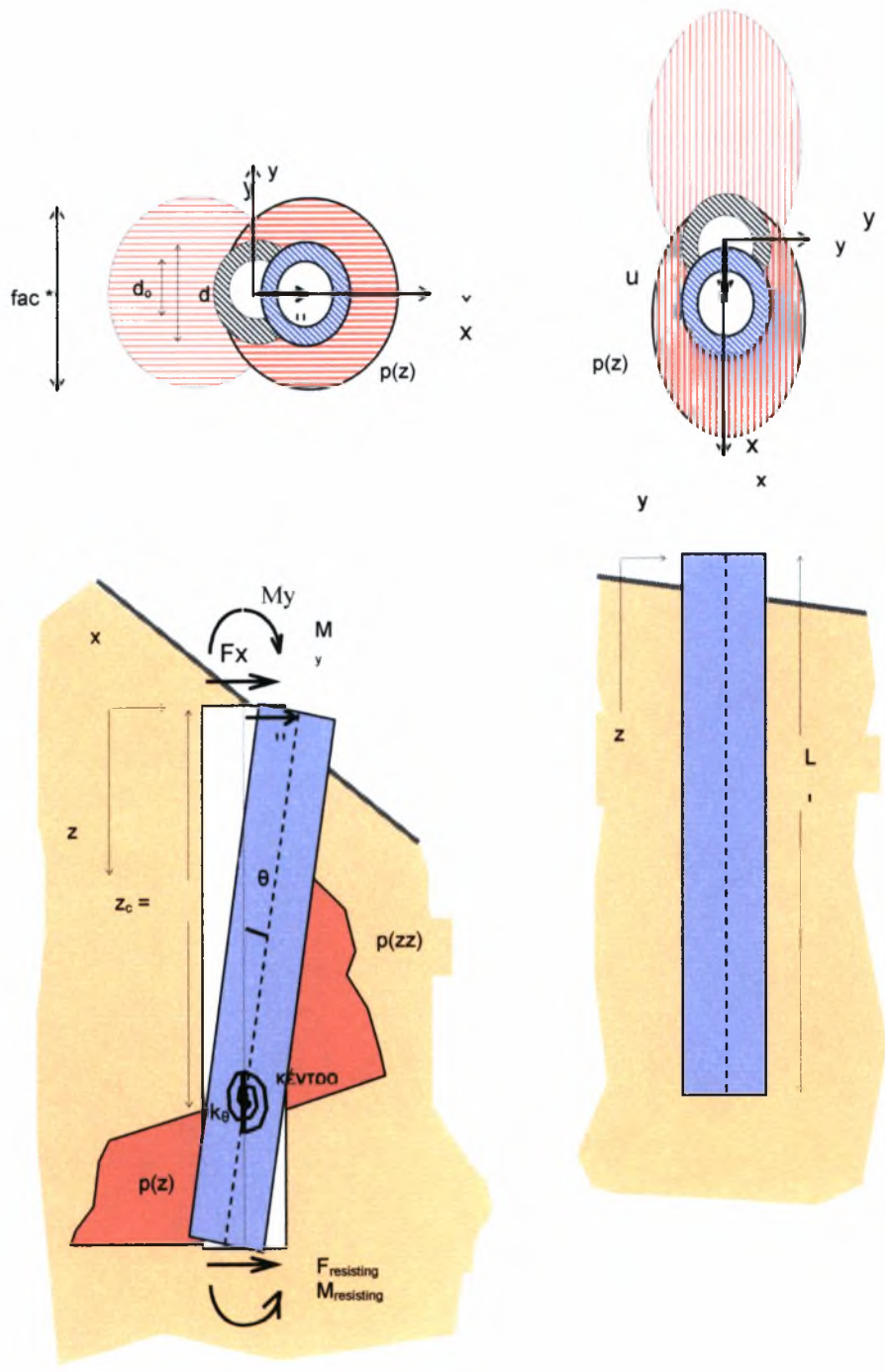
**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Σ. Κωστόπουλος. (2003). ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ – Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού και κατασκευής, Ι. Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε (1993). ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ ΑΘΗΝΩΝ - ΚΟΡΙΝΘΟΥ, ΤΜΗΜΑ ΙΣΘΜΟΣ – ΓΑΛΟΤΑ .
3. J.P.Carter , F.H. Kulhawy. (1992). Analysis of Laterally Loaded Shafts in Rock Journal of Geotechnical Engineering , ASCE, Vol.118, No 6, 839-855.
4. Y. K. Chow , J. T. Chin , Y. C. Kog , S. L. Lee. (1990). “Settlement Analysis of Socketed Pile Groups” Journal of Geotechnical Engineering , ASCE , Vol.116, No 8, 1171-1184.
5. W. D. Guo , M. F. Randolph. (1998). “Rationality of load transfer approach for pile analysis”, Computers and Geotechnics , Vol.23, 85-112.
6. Itasca Consulting Group , Inc. (1998). “FLAC 2D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions”, Version 3.40, Minneapolis, Minnesota.
7. Μ. Καββαδάς. (2000). «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
8. H. G. Poulos , E. H. Davis. (1974). « Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics », John Wiley and Sons Inc., New York.
9. R. Radhakrishnan, C.F.Leung. (1989). “Load Transfer Behavior of Rock – Socketed Piles”, Journal of Geotechnical Engineering , ASCE, Vol115, No6, 755-768.

10. Terzaghi, K. & Peck, R. B (1948).Soil Mechanics in Engineering Practice.  
John Wiley, New York, p.436.
  
11. Terzaghi, K. & Peck, R. B (1948).Soil Mechanics in Engineering 2<sup>nd</sup> edition,  
Practice. John Wiley and Sons, New York, p.729.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α  
ΣΧΕΔΙΑ ΦΡΕΑΤΟΣ  
ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα Π1: Σχηματική Παράσταση του Εξεταζόμενου Προβλήματος



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β  
ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ  
DOUGLAS AND DAVIS (1964)

**ΣΥΝΟΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	$d =$	<b>8.8</b>	m
Εσωτερική διάμετρος θεμελίου	$d_o =$	<b>0</b>	m
Ισοδύναμη διάσταση τετραγωνικής διατομής	$d_{equ} =$	<b>7.71</b>	m
Βάθος φρέατος	$L =$	<b>23</b>	m
Εμβαδόν επιφανείας βάσης θεμελίου	$A =$	<b>60.8</b>	m <sup>2</sup>
Διακριτοποίηση εδαφικού προφίλ	$dz =$	<b>0.49</b>	m
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	$E_{σκυρ} =$	<b>2.30E+06</b>	t/m <sup>2</sup>
Ισοδύναμος δείκτης "εδάφους" για βραχώμαζα	$K =$	<b>30000</b>	t/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας	$E_{rock} =$	<b>1</b>	GPa
Συντελεστής ασφαλείας στον υπολογισμό εδαφικής αντίδρασης στην βάση του φρέατος	$FS_b =$	<b>1.05</b>	
Συντελεστής ασφαλείας στον υπολογισμό εδαφικών ωθήσεων $p(z)$	$FS_p =$	<b>1.9</b>	<b>ok</b>
Πλάτος μετώπου εδαφικών ωθήσεων = $fac \cdot d$	$fac =$	<b>2.5</b>	
Τέμνουσα στην κεφαλή του φρέατος	$F_x =$	<b>1800</b>	t
ροπή στην κεφαλή του φρέατος	$M_y =$	<b>42600</b>	tm
Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων	$K_p =$	<b>0.5</b>	

**ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Κρίσιμο βάθος	$L_{cr} =$	7.1	m	
	$2L_{cr} =$	14.2	m	
Μέγιστη επιτρεπόμενη αντίδραση στην βάση του φρέατος	$F_{allowable-base} =$	1311	t	
Σταθερά ισοδύναμου στρωφικού ελατηρίου στο κέντρο περιστροφής	$k_{\theta} =$	2.28E+08	tm/rad	
Βάθος κέντρου περιστροφής	$L_o = z_c =$	17.58	m	
Μετατόπιση κορυφής φρέατος	$u =$	3.30	mm	
Στροφή φρέατος	$\theta =$	0.0123	deg	
Ενεργοποιούμενη δύναμη αντίδρασης στην βάση του φρέατος <sup>(1) (2)</sup>	$F_{resisting} =$	1305	t	
Ενεργοποιούμενη ροπή αντίδρασης στην βάση του φρέατος <sup>(1)</sup>	$M_{resisting} =$	5131	tm	17.4
	max τέμνουσα =	7292	t σε βάθος	8.6
			:	
	max ροπή =	54505		

Παρατηρήσεις :

Αρνητικές τιμές των μεγεθών αυτών επισημαίνουν ότι δεν ενεργοποιείται αντίδραση στην περιοχή της βάσης η μη ενεργοποίηση αντιδρώσας δύναμης έχει σαν συνέπεια την κατάπι αύξηση της υπολογιζόμενης αντιδρώσας ροπής

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ισχύει  $F_{resisting} \leq F_{all-base}$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ  
ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ  
CARTER AND KULHAWY (1992)

ΣΥΝΟΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	$d =$	8.8	m
Εσωτερική διάμετρος θεμελίου	$d_o =$	0	m
Ισοδύναμη διάσταση τετραγωνικής διατομής	$d_{\text{equ}} =$	7.71	m
Βάθος φρέατος	$L =$	23	m
Εμβαδόν επιφανείας βάσης θεμελίου	$A =$	60.8	m <sup>2</sup>
Διακριτοποίηση εδαφικού προφίλ	$dz =$	0.49	m
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	$E_{\text{σκυρ}} =$	2.30E+06	t/m <sup>2</sup>
Ισοδύναμος δείκτης "εδάφους" για βραχώμαζα	$K =$	30000	t/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας	$E_{\text{rock}} =$	1	GPa
Λόγος poisson της βραχώμαζας	$\nu_r =$	0.5	
Συντελεστής ασφαλείας στον υπολογισμό εδαφικής αντίδρασης στην βάση του φρέατος	$FS_b =$	1.05	
Συντελεστής ασφαλείας στον υπολογισμό εδαφικών ωθήσεων $p(z)$	$FS_p =$	1.9	ok
Πλάτος μετώπου εδαφικών ωθήσεων = $fac \cdot d$	$fac =$	2.5	
Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων	$K_p =$	0.5	
Τέμνουσα στην κεφαλή του φρέατος	$F_x =$	1800	t
ροπή στην κεφαλή του φρέατος	$M_y =$	42600	tm

**ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Κρίσιμο βάθος	$L_{cr} =$	7.1	m
	$2L_{cr} =$	14.2	m
Ροπή αδρανείας φρέατος	$I_x =$	294.23	m <sup>4</sup>
Μέγιστη επιτρεπόμενη αντίδραση στην βάση του φρέατος	$F_{allowable-base} =$	1260	t
Σταθερά ισοδύναμου στροφικού ελατηρίου στο κέντρο περιστροφής	$k_{\theta} =$	3.98E+07	tm/rad
Βάθος κέντρου περιστροφής	$L_o = z_c =$	17.85	m
Μετατόπιση κορυφής φρέατος	$u =$	1.88	mm
Στροφή φρέατος	$\theta =$	0.0060	deg
Ενεργοποιούμενη δύναμη αντίδρασης στην βάση του φρέατος <sup>(1) (2)</sup>	$F_{resisting} =$	2406	t
Ενεργοποιούμενη ροπή αντίδρασης στην βάση του φρέατος <sup>(1)</sup>	$M_{resisting} =$	280	tm
	max τέμνουσα =	7843	t σε βάθος : 17.9
	max ροπή =	54505	tm σε βάθος : 8.6

Παρατηρήσεις :

Αρνητικές τιμές των μεγεθών αυτών επισημαίνουν ότι δεν ενεργοποιείται αντίδραση στην περιοχή της βάσης· η μη ενεργοποίηση αντιδρώσας δύναμης έχει σαν συνέπεια την κατάπι αύξηση της υπολογιζόμενης αντιδρώσας ροπής

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ισχύει  $F_{resisting} \leq F_{all-base}$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ FLAC<sup>2D</sup>

Κώδικας του input – file για φρέαρ πακτώσεως διαμέτρου  $D = 6\text{m}$  & μήκους  $L = 10\text{m}$

---

```
;freatio diplomatikis
title frear
new
set log on

grid 40 40
;suntentagmenes komvwn kai pli8os stoixeiwn
gen 0 0 0 40 40 40 40 0
model elas j 1,40
his unbal

;boundary and initial conditions
fix x i 1
fix x i 41
fix y j 1

; Arxiko entatiko pedio

m null j 31,40
;idiotites edafous
prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 j=1,30

pause

ini syy -588.6 var 0,588.6 j 1,31
ini sxx -251.9 var 0,251.9 j 1,31
ini szz -251.9 var 0,251.9 j 1,31
set gravity 9.81

solve sratio 0.01
plot hold syy f
```



; idiotites freatos

m el i 18,24 j 31,36

prop den 2.4 bulk 1.27e7 sh 9.58e6 i 18,24 j 31,36

solve sratio 0.01

plot hold syy f

m el i 18,24 j 37,40

prop den 2.4 bulk 1.27e7 sh 9.58e6 i 18,24 j 37,40

solve sratio 0.01

plot hold syy f

; idiotites edafous ano stathmis themeliosis

m el i 1,17 j 31,36

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 i=1,17 j=31,36

m el i 25,40 j 31,36

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 i=25,40 j=31,36

solve sratio 0.01

plot hold syy f

m el i 1,17 j 37,40

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 i=1,17 j=37,40

m el i 25,40 j 37,40

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 i=25,40 j=37,40

solve sratio 0.01

plot hold syy f

;2nd phase MC

m m j 1,30

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 0 fric 25 j 1,30

m m i 1,17 j 31,40

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 0 fric 25 j 31,40

m m i 25,40 j 31,40

prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 0 fric 25 j 31,40

solve sratio 0.01

```
plot hold syy f
```

```
ini xd 0.0
```

```
ini yd 0.0
```

```
pause
```

```
;pragmatikes idiotites edafous
```

```
m m j 1,30
```

```
prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 50 fric 0 j 1,30
```

```
m m i 1,17 j 31,40
```

```
prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 50 fric 0 j 31,40
```

```
m m i 25,40 j 31,40
```

```
prop den=2.0 bul=5e+3 she=2.3e+3 coh 50 fric 0 j 31,40
```

```
solve sratio 0.01
```

```
ini xd 0
```

```
ini yd 0
```

```
plot hold syy f
```

```
solve
```

```
save frear_0.sav
```

```
restore frear_0.sav
```

---

Κώδικα του input – file, με την προσομοίωση της φόρτισης. Φρέαρ διαμέτρου

$D = 6\text{m}$ , μήκους  $L = 10\text{ m}$ .

---

---

```
;efarmogi dunamewn
```

```
apply sxy -10 i 18,25 j 41
```

```
his xd i 18 j 41
```

```
his yd i 18 j 41
```

```
his xd i 24 j 41
```

```
his yd i 24 j 41
```

```
his xd i 21 j 41
```

```
his yd i 21 j 41
```

```
plot hold model grid blue appl yellow
```

```
solve
```

```
apply sxy -20 i 18,25 j 41
```

```
solve
```

```
plot hold plas
```

```
plot hold his 2
```

```
apply sxy -30 i 18,25 j 41
```

```
solve
```

```
plot hold plas
```

```
plot hold his 2
```

```
apply sxy -40 i 18,25 j 41
```

```
solve
```

```
plot hold plas
```

```
plot hold his 2
```

apply sxy -50 i 18,25 j 41

solve

plot hold plas

plot hold his 2

apply sxy -60 i 18,25 j 41

solve

plot hold plas

plot hold his 2

apply sxy -70 i 18,25 j 41

solve

plot hold plas

plot hold his 2

apply sxy -80 i 18,25 j 41

solve

plot hold plas

plot hold his 2

apply sxy -90 i 18,25 j 41

;apply ss -90 .....

;apply syy -10 i 18,19 j 41

;apply syy -5 i 19,20 j 41

solve

plot hold plas

plot hold his 2

---

---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΤΩΝ  
CARTER AND KULHAWY (1992) ΚΑΙ  
DOUGLAS AND DAVIS (1964)

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	d(m) =	6
Βάθος φρέατος	L(m) =	10
Βήμα της Fx (τόνοι) =		50

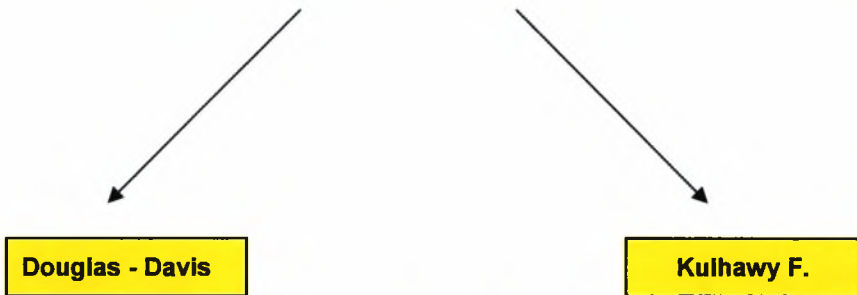


**Douglas - Davis**

**Kulhawy F.**

Fx (τόνοι)	U(mm)	Θ(degrees)	α/α	Fx (τόνοι)	U(mm)	Θ(degrees)
50	0.14	0.0009	1	50	0.08	0.0003
100	0.27	0.0017	2	100	0.16	0.0006
150	0.41	0.0026	3	150	0.24	0.0009
200	0.55	0.0035	4	200	0.32	0.0012
250	0.68	0.0043	5	250	0.39	0.0015
300	0.82	0.0052	6	300	0.47	0.0018
350	0.95	0.006	7	350	0.55	0.0021
400	1.09	0.0069	8	400	0.63	0.0024
450	1.23	0.0078	9	450	0.71	0.0027
500	1.36	0.0086	10	500	0.79	0.0029
550	1.5	0.0095	11	550	0.87	0.0032
600	1.64	0.0104	12	600	0.95	0.0035
650	1.77	0.0112	13	650	1.03	0.0038
700	1.91	0.0121	14	700	1.11	0.0041
750	2.05	0.013	15	750	1.18	0.0044
800	2.18	0.0138	16	800	1.26	0.0047
850	2.32	0.0147	17	850	1.34	0.005
900	2.45	0.0155	18	900	1.42	0.0053
950	2.59	0.0164	19	950	1.5	0.0056
1000	2.73	0.0173	20	1000	1.58	0.0059

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	$d(m) =$	<b>6</b>
Βάθος φρέατος	$L(m) =$	<b>10</b>
Βήμα της $F_x$ (τόνοι) =		<b>200</b>



$F_x$ (τόνοι)	$U(mm)$	$\Theta(degrees)$	$\alpha/\alpha$	$F_x$ (τόνοι)	$U(mm)$	$\Theta(degrees)$
200	0.55	0.0035	1	200	0.32	0.0012
400	1.09	0.0069	2	400	0.63	0.0024
600	1.64	0.0104	3	600	0.95	0.0035
800	2.18	0.0138	4	800	1.26	0.0047
1000	2.73	0.0173	5	1000	1.58	0.0059
1200	3.27	0.0207	6	1200	1.9	0.0071
1400	3.82	0.0242	7	1400	2.21	0.0083
1600	4.36	0.0276	8	1600	2.53	0.0094
1800	4.91	0.0311	9	1800	2.84	0.0106
2000	5.45	0.0345	10	2000	3.16	0.0118
2200	6	0.038	11	2200	3.47	0.013
2400	6.55	0.0414	12	2400	3.79	0.0141
2600	7.09	0.0449	13	2600	4.11	0.0153
2800	7.64	0.0484	14	2800	4.42	0.0165
3000	8.18	0.0518	15	3000	4.74	0.0177
3200	8.73	0.0553	16	3200	5.05	0.0189
3400	9.27	0.0587	17	3400	5.37	0.02
3600	9.82	0.0622	18	3600	5.69	0.0212
3800	10.36	0.0656	19	3800	6	0.0224
4000	10.91	0.0691	20	4000	6.32	0.0236

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	d(m) =	6
Βάθος φρέατος	L(m) =	10
Βήμα της M (τόνοι) =		100

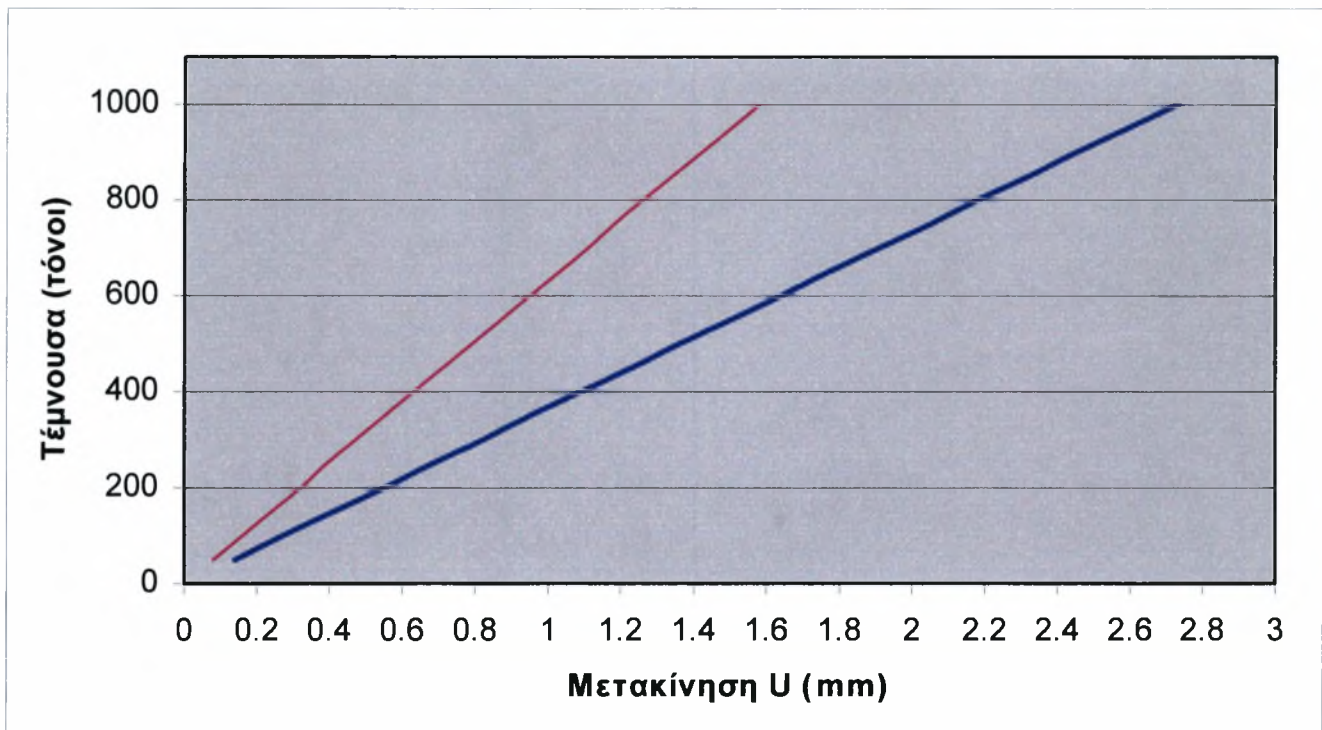
Douglas - Davis

Kulhawy F.

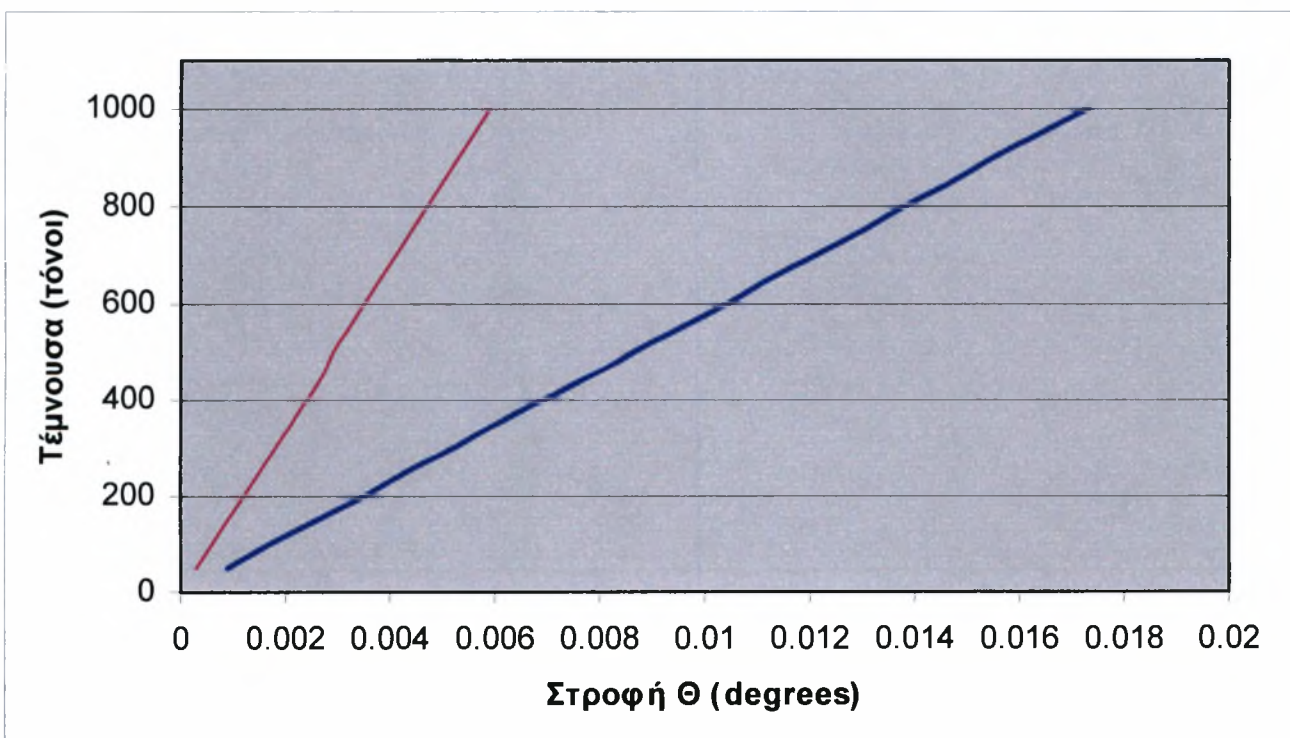
M (t/m)	U(mm)	Θ(degrees)	α/α	M (t/m)	U(mm)	Θ(degrees)
100	0.03	0.0003	1	100	0.01	0.0001
200	0.06	0.0006	2	200	0.021	0.0002
300	0.09	0.0009	3	300	0.031	0.0003
400	0.12	0.0012	4	400	0.041	0.0004
500	0.15	0.0015	5	500	0.051	0.0005
600	0.18	0.0018	6	600	0.062	0.00061
700	0.2	0.002	7	700	0.072	0.00071
800	0.23	0.0023	8	800	0.082	0.00081
900	0.26	0.0026	9	900	0.093	0.00091
1000	0.29	0.0029	10	1000	0.103	0.00101
1100	0.32	0.0032	11	1100	0.113	0.00111
1200	0.35	0.0035	12	1200	0.123	0.00121
1300	0.38	0.0038	13	1300	0.134	0.00131
1400	0.41	0.0041	14	1400	0.144	0.00141
1500	0.44	0.0044	15	1500	0.154	0.00151
1600	0.47	0.0047	16	1600	0.164	0.00162
1700	0.5	0.005	17	1700	0.175	0.00172
1800	0.53	0.0053	18	1800	0.185	0.0018
1900	0.55	0.0056	19	1900	0.2	0.0019
2000	0.58	0.0059	20	2000	0.21	0.002



Σειρά μπλε =	Douglas
Σειρά μωβ =	Kulhawy

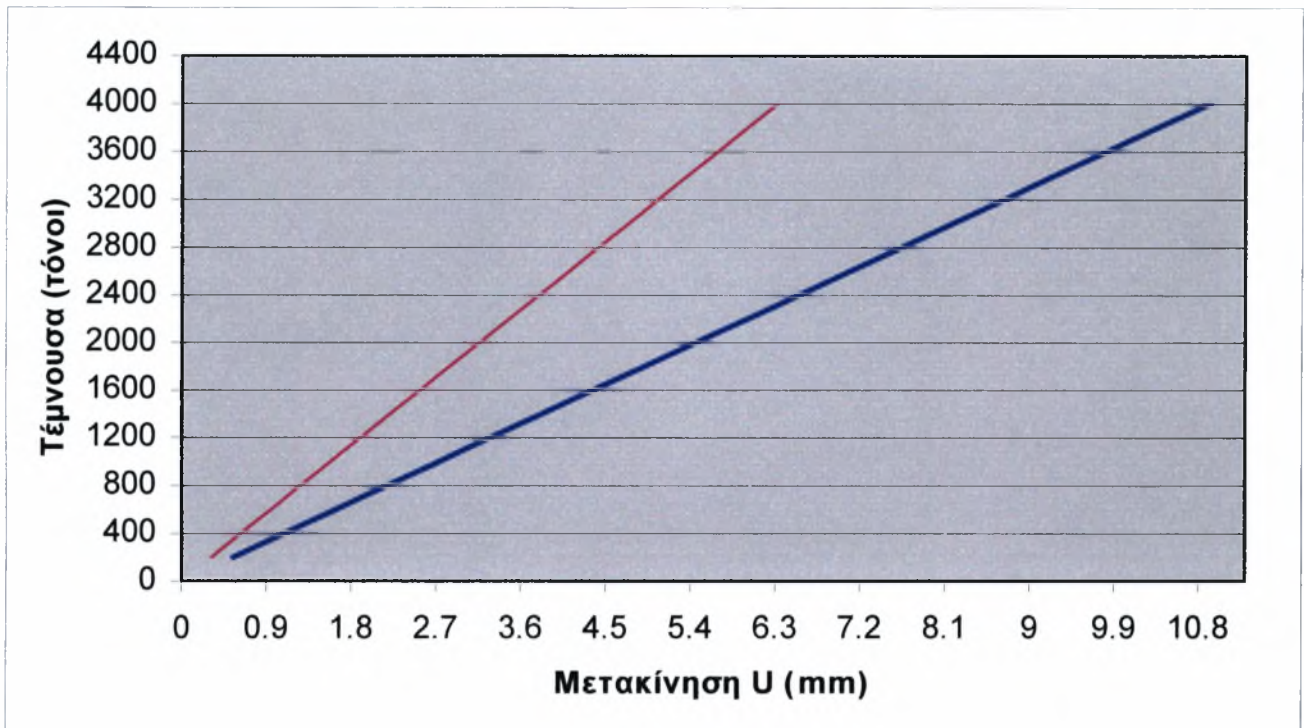


Σχήμα Π3. Διάγραμμα τεμνουσών και μετακινήσεων με βήμα 50 τόνων.

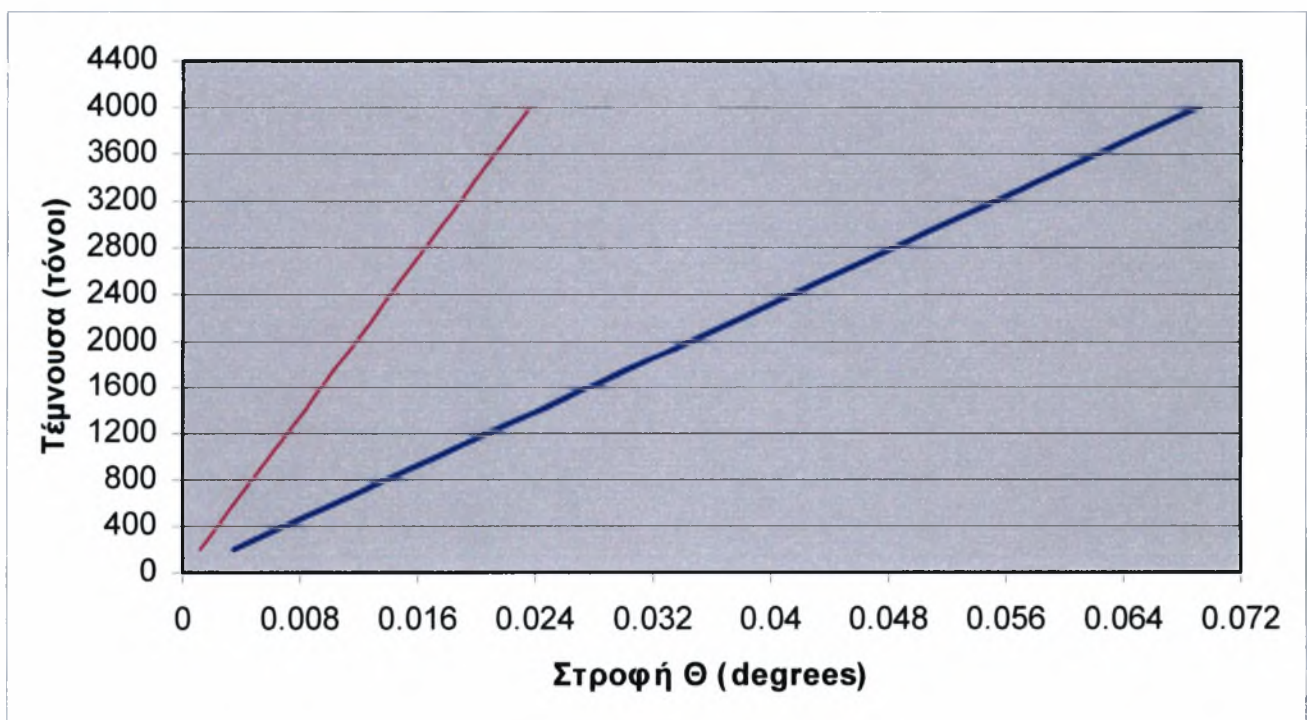


Σχήμα Π4. Διάγραμμα τεμνουσών και στροφών με βήμα 50 τόνων.

Σειρά μπλε =	Douglas
Σειρά μωβ =	Kulhawy

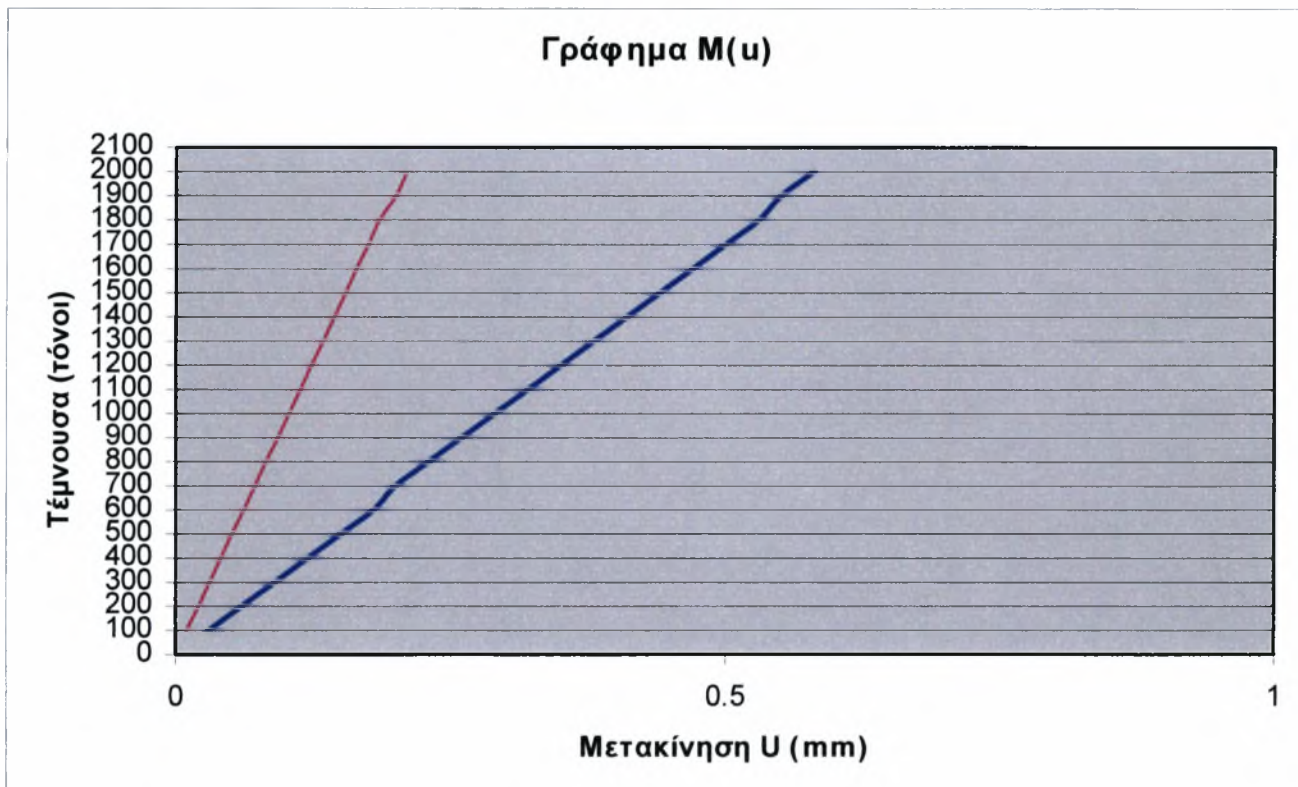


Σχήμα Π5. Διάγραμμα τεμνουσών και μετακινήσεων με βήμα 200 τόνων.

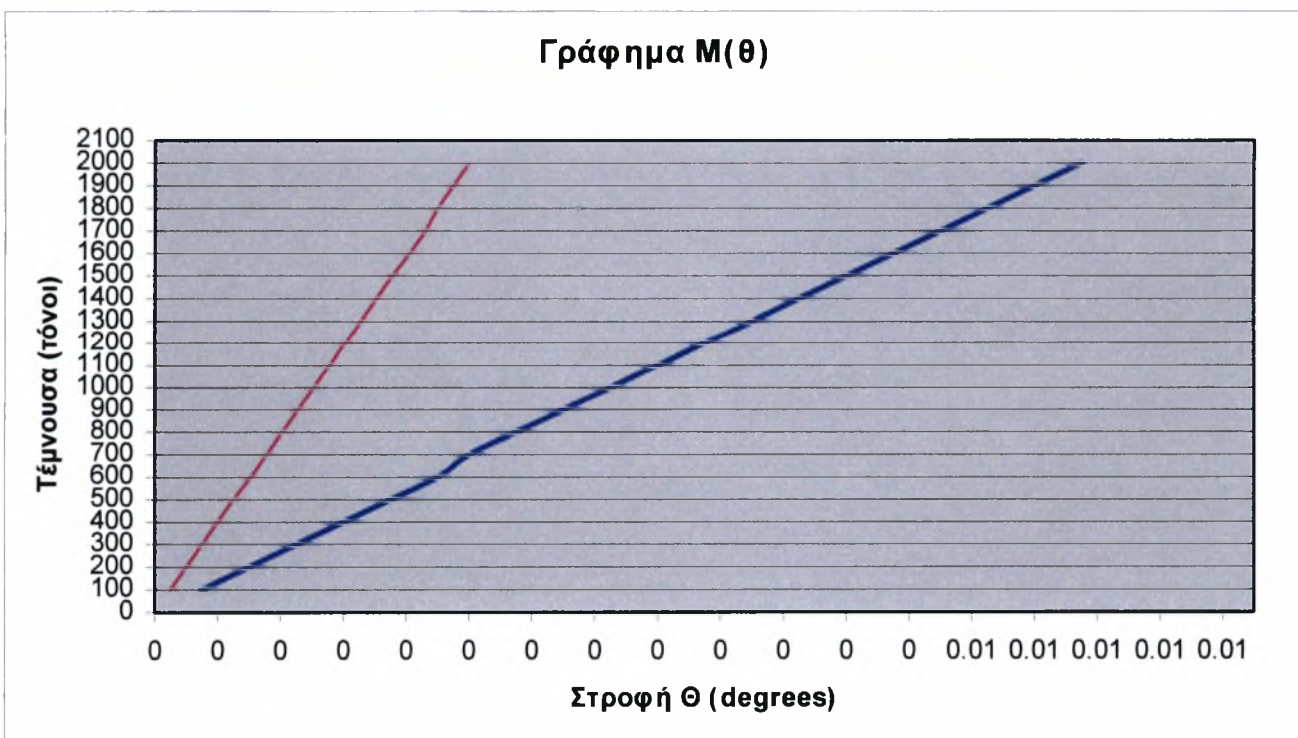


Σχήμα Π6. Διάγραμμα τεμνουσών και στροφών με βήμα 200 τόνων.

Σειρά μπλε =	Douglas
Σειρά μωβ =	Kulhawy



Σχήμα Π17. Διάγραμμα ροπών και μετακινήσεων με βήμα 100 τόνων.



Σχήμα Π18. Διάγραμμα ροπών και στροφών με βήμα 100 τόνων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ FLAC<sup>2D</sup>

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	$d(m) =$	<b>6</b>
Βάθος φρέατος	$L(m) =$	<b>10</b>
Βήμα της τέμνουσας	$F_x(\text{τόνοι}) =$	<b>50</b>

**Flac 2D**

α/α	$F_x$ (τόνοι)	$U(\text{mm})$
1	50	0.19
2	100	0.32
3	150	0.5325
4	200	0.745
5	250	0.9625
6	300	1.18
7	350	1.3925
8	400	1.605
9	450	1.8225
10	500	2.04
11	550	2.255
12	600	2.47
13	650	2.685
14	700	2.9
15	750	3.115
16	800	3.33
17	850	3.545
18	900	3.76
19	950	3.975
20	1000	4.19
21	1050	4.405
22	1100	4.62
23	1150	4.8375
24	1200	5.055
25	1250	5.27
26	1300	5.485
27	1350	5.7
28	1400	5.915
29	1450	6.13
30	1500	6.345

Εξωτερική διάμετρος θεμελίου	d(m) =	6
Βάθος φρέατος	L(m) =	10

**Flac 2D**

α/α	M (t/m)	U(mm)
1	100	0.139
2	200	0.18
3	300	0.22
4	400	0.26
5	500	0.3
6	600	0.341
7	700	0.371
8	800	0.411
9	900	0.452
10	1000	0.492
11	1100	0.532
12	1200	0.572
13	1300	0.613
14	1400	0.653
15	1500	0.693
16	1600	0.733
17	1700	0.774
18	1800	0.814
19	1900	0.849
20	2000	0.889
21	3000	
22	4000	
23	5000	
24	6000	
25	7000	
26	8000	
27	9000	
28	10000	
29	15000	
30	20000	

