



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ | ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ | ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ | ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΙΩΑΝΝΑ ΜΑΚΡΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

Καθηγητής Π.Θ.

Διευθυντής Εργαστηρίου Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής

Βόλος,
Σεπτέμβριος 2018

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ

υπεβλήθη από την

Ιωάννα Μακρή

με στόχο την εκπλήρωση μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού.

Η Διπλωματική Εργασία έλαβε έγκριση των μελών της τριμελούς
εξεταστικής επιτροπής.

.....
Γεώργιος Θ.Εφραιμίδης
Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

.....
Πολυξένη Καλλιόγλου
Λέκτορας Π.Θ.

.....
Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος
Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος,
12 Σεπτεμβρίου 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Αιμίλιο Κωμοδρόμο, για τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη που παρείχε, την εμπιστοσύνη και το ενδιαφέρον που έδειξε κατά την ανάθεση της εργασίας και διεκπεραίωση αυτής. Η επιστημονική συνεισφορά του ήταν εξίσου σημαντική καθ' όλη τη διάρκεια του προπτυχιακού προγράμματος.

Επιπλέον χρέος μου είναι να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μας για την πολύτιμη γνώση που μας προσέφεραν. Η προσπάθειά τους για την παροχή υψηλού επιπέδου εκπαίδευσης στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας είναι αξιέπαινη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
Γενικά περί θεμελιώσεων	15
1.1 Επιφανειακές (αβαθείς) θεμελιώσεις	15
1.2 Βαθείς θεμελιώσεις	15
1.2 Περιγραφή Πασσάλων – Ταξινόμηση	16
1.2.1 Περιγραφή επιμέρους κατηγοριών	16
1.3 Έλεγχοι βαθιών θεμελιώσεων έναντι εγκάρσιων φορτίσεων	18
1.3.1 Απόκριση πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση	18
1.4 Μέθοδοι υπολογισμού επιτρεπόμενης οριζόντιας μετακίνησης	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
Ενοργάνωση με χρήση αποκλισιομετρικών σωλήνων	22
2.1 Αποκλισιόμετρο βολίδας	22
2.2 Διαδικασία μέτρησης και καταγραφής	24
2.2.1 Ακρίβεια αποκλισιομέτρου	25
2.2.2 Πεδίο ακρίβειας	25
2.2.3 Βασικά συστηματικά σφάλματα- Ορισμοί και διόρθωση	27
2.3 Διεξαγωγή και επεξεργασία μετρήσεων: Δεδομένα αποκλισιομέτρου	31
2.4 Επεξεργασία μετρήσεων: Δεδομένα απόκρισης πασσάλου	42
2.5 Αποκλισιόμετρο σταθερής θέσης	48
2.5.1 Τρόπος λειτουργίας	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	50
Ενοργάνωση με οπτικές ίνες	50
3.1 Λειτουργία οπτικών ινών	50
3.2 Εγκατάσταση	52
3.3 Θερμοκρασιακή μεταβολή	54
3.4 Σύγκριση με τη μέθοδο των αποκλισιομέτρων	55
3.4.1 Πλεονεκτήματα -Μειονεκτήματα οπτικών ινών	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	58
Προσδιορισμός εξίσωσης από δεδομένα αποκλισημέτρου	58
4.1 Προσδιορισμός προφίλ παραμόρφωσης	58
4.2 Προσδιορισμός δευτερευόντων χαρακτηριστικών μεγεθών	62
4.2.1 Εξέλιξη καμπυλότητας- Κλίση πασσάλου	62
4.2.2 Υπολογισμός οριζόντιας μετακίνησης	64
4.2.3 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών	66
4.3 Αντίστροφη ανάλυση	68
4.4 Χρήση αποτελεσμάτων απόκρισης πασσάλου	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	75
Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	75
5.1 Ανακεφαλαίωση.....	75
5.2 Συμπεράσματα	75
5.2 Προτάσεις.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	80

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικός υπολογισμός του μέσου όρου των δεδομένων της αρχικής μέτρησης του κύριου άξονα A0A180.....	32
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα από την ανάλυση απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου υπό την επίδραση δοκιμαστικής φόρτισης.....	70
Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες του κέντρου του πασσάλου, x και y, σε συνάρτηση του μήκους του, z_i	74
Πίνακας 5.1: Παρουσίαση μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων σε σχέση με την αύξηση της τιμής της οριζόντιας δοκιμαστικής φόρτισης.....	76

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ανάπτυξη πλευρικών ωθήσεων και κατανομή τάσεων πριν την πρόκληση οριζόντιας μετακίνησης (α) και μετά (β).....	19
Σχήμα 1.2: Απεικόνιση της εντατικής και κινηματικής κατάστασης του πασσάλου. Οριζόντια μετακίνηση, κλίση, καμπτική ροπή, τέμνουσα δύναμη, εδαφικές ωθήσεις υπό ελαστικές συνθήκες.....	19
Σχήμα 1.3: Αντιπροσώπευση του παραμορφωμένου πασσάλου μέσω των καμπυλών «φ-γ». Απεικόνιση των καμπυλών για διαφορετικά βάρη (α), και (β) παρουσίαση αυτών σε κοινό άξονα.....	20
Σχήμα 1.4: Απεικόνιση της παραμόρφωσης του άξονα του πασσάλου εξαιτίας της υφιστάμενης οριζόντιας μετακίνησης.....	21
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση κύριας A0-A180 και δευτερεύουσας B0-B180 διεύθυνσης των αυλάκων μίας διατομής αποκλισημετρικού σωλήνα.....	22
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της τμηματικής οριζόντιας μετατόπισης u , δεδομένου του βήματος μέτρησης, L και της γωνιακής απόκλισης θ	23
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της συνολικής οριζόντιας μετατόπισης (cumulative displacement), δεδομένου των τμηματικών οριζοντίων μετατοπίσεων και γωνιακών αποκλίσεων.....	24
Σχήμα 2.4: Γραφική αναπαράσταση του τυχαίου και συστηματικού σφάλματος στα πλαίσια του πεδίου ακριβείας τους μετά την επεξεργασία πασσάλου μήκους 30m (Mikkelsen 1996).....	26
Σχήμα 2.5: Γραφική αναπαράσταση της μετατόπισης της βολίδας εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησής της κατά την περιστροφή για τη διαδικασία της συμπληρωματικής μέτρησης στον κύριο ή δευτερεύοντα άξονα του αποκλισημέτρου.....	27
Σχήμα 2.6: Απεικόνιση του σφάλματος στροφής, α και ο υπολογισμός του με βάση του προφίλ του δευτερεύοντα άξονα B0-B180.....	30
Σχήμα 2.7: Απεικόνιση τριών περιπτώσεων τοποθέτησης της τορπίλης σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα στην οριζόντια μετακίνηση.....	31
Σχήμα 2.8: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισημέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για την αρχική κατάσταση του αποκλισημετρικού σωλήνα Μέτρηση 0, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων A0-B'0 και (β) B0-A'0 σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.....	34
Σχήμα 2.9: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισημέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για τη Μέτρηση 1, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων A0-B'0 και (β) B0-A'0, σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.....	35
Σχήμα 2.10: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισημέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για τη Μέτρηση 2, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων A0-B'0 και (β) B0-A'0, σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.....	36
Σχήμα 2.11: τοποθέτησης του κύριου άξονα του αποκλισημέτρου A0-A180 σε σχέση με το παράλληλο επίπεδο του αποκλισημετρικού σωλήνα και τη μέση κύρια διεύθυνση μετακίνησης αυτού.....	37

Σχήμα 2.12: Διαγραμματική απεικόνιση των κύριων αποστάσεων από το κατακόρυφο επίπεδο του (α) κύριου άξονα A0 και (β) του δευτερεύοντα B0, συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από την επεξεργασία και το συνδυασμό της κύριας και συζυγούς εγκατάστασης.....	38
Σχήμα 2.13: Διαγραμματική απεικόνιση των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου (α), και (β) οι διευθύνσεις των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων ανά βήμα μέτρησης συναρτήσει του μήκους του πασσάλου.....	39
Σχήμα 2.14: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων από το κατακόρυφο επίπεδο του πασσάλου συναρτήσει του μήκους του (α) κατά τη μέση κύρια διεύθυνση, δ_{aver} και (β) κατά τη μέση δευτερεύουσα διεύθυνση, κάθετη στην κύρια, $\delta_{aver}+90$	40
Σχήμα 2.15: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου (α) κατά την κύρια διεύθυνση, δ και (β) κατά τη δευτερεύουσα, κάθετη στην κύρια διεύθυνση, $\delta+90$	41
Σχήμα 2.16: Διαγραμματική απεικόνιση αθροιστικού ελέγχου (α) κατά τον κύριο άξονα του αποκλισιομέτρου A0-A180 και (β) κατά το δευτερεύοντα αυτού B0-B180.....	43
Σχήμα 2.17: Διαγραμματική απεικόνιση απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα του πασσάλου και σύγκριση των μετρήσεων διεξαγωγής αποτελεσμάτων, (α) για τον κύριο άξονα A0-A180 και (β) και το δευτερεύοντα άξονα B0-B180.....	44
Σχήμα 2.18: Διαγραμματική απεικόνιση (α) των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου σε σύγκριση όλων των μετρήσεων και (β) των διευθύνσεων των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων ανά βήμα φόρτισης.....	45
Σχήμα 2.19: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων (α) κατά τη μέση κύρια διεύθυνση δ_{aver} και (β) τη μέση δευτερεύουσα διεύθυνσης $\delta_{aver}+90$. Παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που διεξάχθηκαν.....	46
Σχήμα 2.20: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων (α) κατά την κύρια διεύθυνση εφαρμογής της εκάστοτε δύναμης, δ και (β) κατά τη δευτερεύουσα διεύθυνση, $\delta+90$	47
Σχήμα 2.21: Διαγραμματική απεικόνιση οριζοντίων μετακινήσεων ανάλογα με την τιμή της εκάστοτε εγκάρσιας δοκιμαστικής φόρτισης σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.....	48
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση τομής A-A πασσάλου, η οποία αναπαριστά την παραμόρφωση του ουδέτερου άξονα του βασιζόμενη στην ενοργάνωση με οπτικές ίνες(Hisham Mohamad, Peter J.Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).....	51
Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση εγκατάστασης οπτικών ινών σε πάσσαλο. Παρουσίαση τομής A-A του πασσάλου που υπόκειται σε δοκιμαστική φόρτιση.....	53
Σχήμα 3.3: Εργαστηριακή προσομοίωση προστατευτικού σωλήνα από χάλυβα.....	54
Σχήμα 3.4: Διαγραμματική αναπαράσταση του μέσου όρου μετρήσεων μετά τη διόρθωση της θερμοκρασιακής μεταβολής. Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται ο μέσος όρος μετρήσεων κατά την πρώτη ανάγνωση πριν την εκσκαφή και με τη διακεκομμένη οι μετρήσεις της δεύτερης ανάγνωσης μετά την εκσκαφή (Hisham Mohamad, Peter J.Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).....	55
Σχήμα 3.5: Διαγραμματική απεικόνιση σύγκρισης της τεχνικής των οπτικών ινών (BOTDR) με τη μέθοδο του αποκλισιομέτρου . Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου και στο (β) η καμπυλότητα του σε συνάρτηση με το μήκος μήκος (Hisham Mohamad, Peter J.Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).....	56
Σχήμα 4.1: Παράδειγμα προσαρμογής ευθείας ελαχίστων τετραγώνων με πειραματικά δεδομένα δύο διαστάσεων.....	59

Σχήμα 4.2: Διατομή του πασσάλου σε κάτοψη, όπου 1,2,3,4 τα σημεία που λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, θ_N η απόκλιση από το Βορρά και θ_{MN} η διεύθυνση καμπυλότητας.....	59
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απεικόνισης της αξονικής παραμόρφωσης, ϵ_a , του κέντρου πασσάλου μήκους 18,5m με δεδομένα από αποκλισιομετρικούς σωλήνες και εγκατάσταση οπτικών ινών.....	62
Σχήμα 4.4: Διαγραμματική απεικόνιση καμπυλότητας πασσάλου μήκους 18,5m κατά τον (α) άξονα xx' και (β) κάθετο σε αυτόν άξονα yy'	63
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα κλίσεων, α , του πασσάλου μήκους 18,5m κατά τον (α) άξονα xx' και κατά τον κάθετο σε αυτόν άξονα (β), yy'	64
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα οριζοντίων μετακινήσεων του κεντρικού άξονα του πασσάλου και σύγκριση της τμηματικής (incremental displacement) και αθροιστικής μετατόπισης (cumulative displacement), (α) ως προς τον άξονα xx' και (β) yy'	66
Σχήμα 4.7: Διαγραμματική απεικόνιση καμπτικών ροπών, M , κατά μήκων του πασσάλου και ως προς τον άξονα (α) xx' και (β) yy'	67
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα τιμών διατμητικής δύναμης, Q , σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου, (α) ως προς τον άξονα xx' και (β) yy'	68
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση του μήκους πασσάλου ύστερα από επεξεργασία αποτελεσμάτων απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου.....	71

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας γεωτεχνικός μηχανικός αναλαμβάνει την κατασκευή και τον σχεδιασμό μεγάλων έργων υποδομής όπως οι σήραγγες και τα φράγματα καθώς και η κατασκευή θεμελιώσεων και έργων αντιστήριξης. Επιπλέον, η αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών όπως οι κατολισθήσεις και οι σεισμοί αποτελούν αρμοδιότητές που καλείται να αναλάβει. Ο υπολογισμός και η ανάλυση της κατασκευής, καθώς και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κατέχουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ενός έργου. Είναι γνωστό πως κάθε πιθανή αστοχία στοιχείου ενός υπόγειου έργου επηρεάζει άμεσα το κομμάτι της ανωδομής. Για το λόγο αυτό, ως συνέπεια προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού και παρακολούθησης πιθανών αιτιών αστοχίας, μέσα στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και οι οριζόντιες μετακινήσεις της εδαφικής μάζας. Η επιτόπου μέτρηση αυτών των μετακινήσεων κατέχει σε οποιαδήποτε περίπτωση ένα σημαντικό ρόλο στο γενικό σχεδιασμό ενός έργου.

Στην εργασία που εκπονήθηκε παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η ενόργανη παρακολούθηση οριζοντίων μετακινήσεων, παραμορφώσεων και γωνιακών αποκλίσεων με τη βοήθεια αποκλισημετρικών σωλήνων, οι οποίοι είτε τοποθετούνται καταλλήλως σε οπές γεωτρήσεων είτε μέσα σε πασσάλους όταν πρόκειται για στοιχείο θεμελίωσης ή αντιστήριξης. Επιπλέον, γίνεται η σύγκριση αυτής της μεθόδου με τη μέθοδο εγκατάστασης οπτικών ινών στο εσωτερικό των πασσάλων, η οποία εκτός από την πλευρική και αξονική μετατόπιση υπολογίζει και το πλήρες προφίλ παραμόρφωσης των τοιχωμάτων τους. Τέλος, παρουσιάζεται πρόγραμμα με τη βοήθεια της γλώσσας Visual Basic και του λογισμικού «Microsoft excel», το οποίο με τη χρήση πειραματικών δεδομένων αποκλισημετρικών σωλήνων και δοκιμαστικών φορτίσεων υπολογίζει επίσης το προφίλ των οριζόντιων μετακινήσεων, των παραμορφώσεων του τοιχώματος και κατά επέκταση των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται.

Η εργασία πλαισιώνει τη συμπεριφορά της περίπτωσης βαθιών θεμελιώσεων και πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά των πασσάλων υπό την επίδραση οριζόντιων φορτίων ή δύναμης. Οι εγκάρσιες δυνάμεις που επηρεάζουν το έργο μιας κατασκευής οφείλονται συνήθως σε σεισμική δράση, στην ανεμοπίεση, στους κυματισμούς, καθώς επίσης και στην επιτάχυνση, επιβράδυνση ή και πρόσκρουση οχημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Γενικά περί θεμελιώσεων

Η ασφαλής θεμελίωση όλων των έργων ενός πολιτικού μηχανικού αποτελεί βασικό στόχο του σχεδιασμού τους και αυτό γιατί καθένα από αυτά εδράζεται στο έδαφος. Ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε έργου, αλλά και τον τύπο του εδάφους, τον διαθέσιμο μηχανικό εξοπλισμό και τις οικονομικές συνθήκες παρουσιάζονται ποικίλες μέθοδοι θεμελίωσης. Ο διαχωρισμός αυτών γίνεται σε δύο κατηγορίες.

- Τις επιφανειακές θεμελιώσεις
- Τις βαθιές θεμελιώσεις

1.1 Επιφανειακές (αβαθείς) θεμελιώσεις

Ως επιφανειακή θεμελίωση χαρακτηρίζεται μία θεμελίωση, της οποίας η στάθμη έδρασης της τοποθετείται σε βάθος D μικρότερο του πλάτους της B ή γενικότερα της μικρότερης διάστασής της σε κάτοψη ($D < B$). Διαφορετικά, μία επιφανειακή θεμελίωση κατασκευάζεται σε σύνηθες βάθος εκσκαφής 2-3 m.

Σε αβαθείς θεμελιώσεις εδράζονται συνήθως άκαμπτα δομήματα , χαμηλού ύψους και της τάξης των 20m.

Η γεωμετρία τους είναι ορθογωνική και πιο σπάνια κυκλική σε κάτοψη και αυτό γιατί πρέπει να μεταφέρουν με ασφάλεια το συγκεντρωμένο ή γραμμικό φορτίο της ανωδομής σε πίεση έδρασης ή επαφής σε όλη την επιφάνεια της θεμελίωσης. Οι τρεις βασικές κατηγορίες αυτών των θεμελιώσεων είναι οι εξής:

- Μεμονωμένα πέδιλα
- Πεδιλοδοκοί
- Κοιτοστρώσεις

1.2 Βαθείς θεμελιώσεις

Σε αντίθεση με τις αβαθείς, επιφανειακές θεμελιώσεις, σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται τα δομικά, επιμήκεις στοιχεία, τα οποία έχουν ως κύριο στόχο τη μεταφορά των φορτίων που βρίσκονται στην κεφαλή τους σε βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί, οι οποίοι σχετίζονται πλήρως με τη μεταφορά των φορτίων. Αρχικά, η ανάπτυξη και κινητοποίηση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια της γεωμάζας και του δομικού στοιχείου κατέχουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη μεταφοράς των φορτίων, αλλά και στη δημιουργία της πλευρικής τριβής και συνάφειας του εδάφους. Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη της αντίστασης αιχμής αποτελεί αρωγό της όλης διαδικασίας.

Η επιλογή των βαθιών θεμελιώσεων γίνεται όταν η βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους δεν είναι εφικτή όχι μόνο πρακτικώς, αλλά και οικονομικώς. Οι πιο συνηθισμένες μορφές παρατίθενται παρακάτω και διαφοροποιούνται με βάση τη γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής τους.

- Πάσσαλοι
- Φρέατα
- Καταδύομενα κιβώτια

1.2 Περιγραφή Πασσάλων – Ταξινόμηση

Οι πάσσαλοι θεωρούνται τα ιστορικά παλαιότερα δομοστατικά στοιχεία. Η διάμετρος αυτών κυμαίνεται συνήθως από 0,40 έως και 1,20m και επιπρόσθετα είναι πολύ μικρότερη του μήκους τους. με αναλογία από 1,20 μέχρι 1,40. Η ταξινόμησή τους σε κατηγορίες γίνεται με βάση τα παρακάτω:

- τη χρήση τους,
- τον τρόπο τοποθέτησής του,
- τα υλικά κατασκευής τους,
- τον μηχανισμό που ακολουθούν για την παραλαβή των φορτίων τους που βρίσκονται στη στέψη τους.

1.2.1 Περιγραφή επιμέρους κατηγοριών

α) Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τη χρήση

1. πάσσαλοι θεμελίωσης
2. πάσσαλοι τοίχων αντιστήριξης
3. πάσσαλοι διαφραγματικών τοίχων
4. μικτοί πάσσαλοι

Αναφορικά με τη χρήση τους, οι πάσσαλοι κατηγοριοποιούνται αρχικά σε πασσάλους θεμελίωσης, οι οποίοι κατέχουν ως κύριο στόχο τη μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων σε υψομετρικά κατώτερα στρώματα του υπεδάφους. Φορτίζονται κυρίως σε θλίψη, ενώ σε περίπτωση οριζόντιας καταπόνησης φορτίζονται επιπλέον σε κάμψη ή διάτμηση. Η επιφάνεια μεταξύ αυτών και της γεωμάζας φορτίζεται διατμητικά, είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής τους διαδικασίας, είτε κατά τη μεταφορά του φορτίου.

Η δεύτερη κατηγορία, ανάλογα με το σκοπό χρήσης τους, είναι οι πάσσαλοι τοίχων αντιστήριξης. Η διαμόρφωσή τους περιλαμβάνει ένα εμπυγνύομενο τμήμα και ένα ελεύθερο. Τα παραλαμβανόμενα φορτία προέρχονται από τις παθητικές και ενεργητικές ωθήσεις γαιών και το ελεύθερό τους τμήμα λειτουργεί ως υποστηρικτικός μηχανισμός του αντιστηριζόμενου πρανούς. Ανάλογα με τις σχεδιαστικές επιλογές υπάρχει περίπτωση το ελεύθερο τμήμα να φέρει διάταξη αγκυρίων με αποτέλεσμα την προφόρτιση ή και πλευρική φόρτιση λόγω της μετακίνησης του υποστηριζόμενου πρανούς. Η συγκεκριμένη κατηγορία πασσάλων καταπονείται κυρίως υπό κάμψη, ενώ ανάλογα με τον τρόπο ενσωμάτωσής τους στην κατασκευή είναι δυνατό να παραλάβουν και κατακόρυφα φορτία.

Η επόμενη κατηγορία αναφέρεται σε πασσάλους διαφραγματικών τοίχων, οι οποίοι είναι ειδικής μορφής πασσαλοσανίδες. Ο ρόλος τους είναι η λήψη των μηχανικών καταπονήσεων που προκύπτουν από τη διαδικασία τοποθέτησής τους, αλλά και από τις πιέσεις πόρων των ροών που ελέγχουν.

Τέλος, υπάρχουν οι μικτοί πάσσαλοι, οι οποίοι δεν αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία κατασκευαστικά ή λειτουργικά. Εφαρμόζονται στις περισσότερες των περιπτώσεων σε υπόγεια έργα και κατασκευάζονται εν εκχώσει. Καταπονούνται κυρίως σε κάμψη, θλίψη, αλλά και σε διάτμηση.

β) Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης

Η συγκεκριμένη ταξινόμηση εμπλέκεται και με το επόμενο κριτήριο αξιολόγησης το οποίο εμπλέκεται με τα υλικά κατασκευής των πασσάλων. Αυτό συμβαίνει καθώς η μέθοδος τοποθετήσεως δημιουργεί διαφορετικές απαιτήσεις από τα υλικά κατασκευής.

1. εμπυγνύομενοι πάσσαλοι,

2. έγχυτοι πάσσαλοι

Οι πρώτοι κατασκευάζονται επί του εδάφους και στη συνέχεια αναρτώνται και εμπηγνύονται με μία σφύρα. Η αιχμή τους είναι ενισχυμένη και ειδικά διαμορφωμένη, ώστε να εξυπηρετείται η διείσδυσή τους στο έδαφος. Επιπλέον, διαθέτουν προστατευτικό κάλυμμα ενάντια της σφύρας. Η μέγιστη διάμετρος τους φτάνει τα 50cm. Τέλος, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη και η λήψη των φορτίων επιτυγχάνεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της δια τριβής.

Οι δεύτεροι χυτεύονται σε διάτρημα, το οποίο έχει ανοιχθεί στη θέση τοποθέτησής του, από ειδικό γεωτρήπανο. Αφού καταβιβαστεί στον αυλό του διατρήματος, στο τέλος χυτεύεται το υλικό πληρώσεως, το οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι σκυρόδεμα. Η διάμετρός τους είναι μεγάλη και λόγω της κατασκευαστικής τους διαδικασίας μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις των εδαφών και πετρωμάτων.

γ) Κατηγοριοποίηση με βάση τα υλικά κατασκευής

Οι πάσσαλοι αυτής της κατηγορίας διαχωρίζονται σε πασσάλους με:

1. πυρήνα από χαλύβδινη δοκό
2. με κυλινδρικό περίβλημα και υλικό πληρώσεως
3. έγχυτοι πάσσαλοι με κλωβό οπλισμού

Στην περίπτωση του πασσάλου με πυρήνα από χαλύβδινη δοκό, το κυρίως φέρον στοιχείο του, δηλαδή ο κεντρικός πυρήνας, αποτελείται από τυποποιημένη διατομή χαλύβδινης δοκού. Είναι είτε ολόσωμος, είτε συναρμολογημένος, δηλαδή από δύο ή περισσότερες δοκούς. Ως υλικό πληρώσεως χρησιμοποιείται κυρίως σκυρόδεμα, το οποίο και χυτεύεται γύρω από τον πυρήνα.

Στην δεύτερη κατηγορία, ο πάσσαλος αποτελείται από ένα κυλινδρικό περίβλημα αποτελούμενο από χαλύβδινα ελάσματα, το οποίο είναι το κυριότερο στοιχείο του τουλάχιστον μέχρι τη σταθεροποίησή του. Ο κύλινδρος πληρείται με σκυρόδεμα αφού γίνει η τοποθέτησή του στο έδαφος.

Η τελευταία περίπτωση αφορά την κατασκευή έγχυτων πασσάλων, οι οποίοι συνήθως είναι μεγάλης διαμέτρου. Αφού κατασκευαστεί ο αυλός του φρέατος, γίνεται τοποθέτηση ενός κλωβού αποτελούμενου από τυποποιημένες ράβδους χαλύβδινου οπλισμού συγκεκριμένης διαστασιολόγισης. Στο τέλος, χυτεύεται στο φρέαρ και το σκυρόδεμα.

δ) Κατηγοριοποίηση με βάση το μηχανισμό παραλαβής φορτίων

Σκοπός των πασσάλων είναι η παραλαβή των λειτουργικών φορτίων της ανωδομής. Ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται κάθε φορά, διαχωρίζονται σε :

1. πάσσαλοι αιχμής,
2. πάσσαλοι τριβής και
3. πάσσαλοι αιχμής-τριβής

Αναφορικά των πασσάλων αιχμής, το λειτουργικό φορτίο παραλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την αιχμή του πασσάλου. Με αυτό τον τρόπο, η ενεργή διατομή του συμπεριφέρεται ως συμβατικό πέδιλο, το οποίο φορτίζει τη συγκεκριμένη περιοχή του εδάφους σε θλίψη.

Σύμφωνα με τους πασσάλους τριβής, το λειτουργικό φορτίο παραλαμβάνεται μεταξύ της περιβάλλουσας του πασσάλου και των παρακείμενων εδαφικών στρωμάτων με τη μορφή διατμητικής τάσεως, τριβής ή και συνάφειας. Υπολογιστικά, η θλιπτική λειτουργία της αιχμής θεωρείται αμελητέα.

Τέλος, οι πάσσαλοι αιχμής- τριβής χρησιμοποιούνται σε περίπτωση εγκάρσιας φόρτισης όπως για παράδειγμα εξαιτίας των ωθήσεων των γαιών. Συγκεκριμένα, η παραλαβή του λειτουργικού τους φορτίου πραγματοποιείται μέσω του κορμού των πασσάλων, με αποτέλεσμα να υφίστανται καμπτική παραμόρφωση. Σαν ενισχυτική βοήθεια χρησιμοποιούνται αγκύρια, τα οποία λειτουργούν σαν πάσσαλοι αιχμής, μειώνουν τον αριθμό των πασσάλων που τοποθετούνται σε περίπτωση ομάδας πασσάλων, ενώ ταυτόχρονα δεν αναιρούν την παραπάνω καμπτική παραμόρφωση.

1.3 Έλεγχοι βαθιών θεμελιώσεων έναντι εγκάρσιων φορτίσεων

Η εξέλιξη της προκειμένης εργασίας βασίζεται στη βαθιά θεμελίωση με πασσάλους και στη συμπεριφορά αυτής έναντι των εγκάρσιων φορτίσεων. Γενικά, οι έλεγχοι που πρέπει να υλοποιηθούν για την εξασφάλιση της επάρκειας μιας θεμελίωσης, είναι οι εξής:

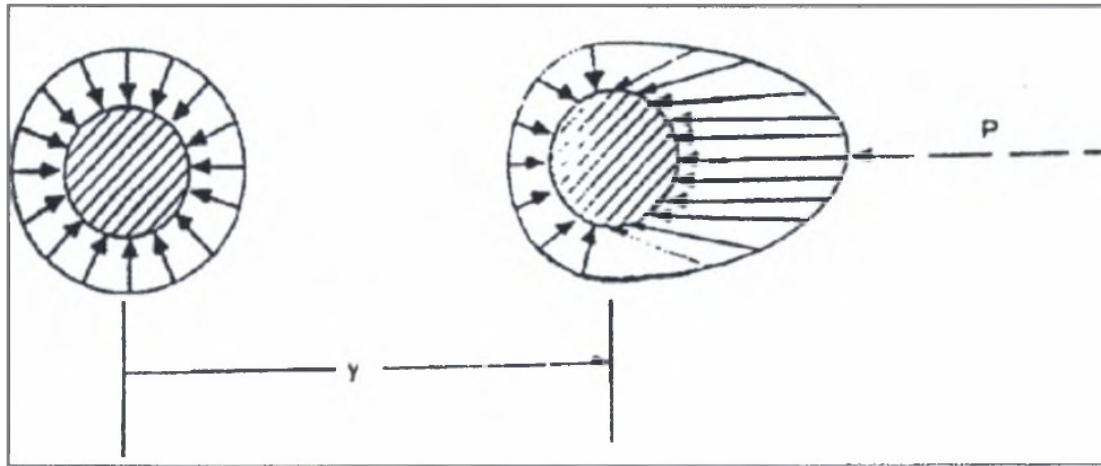
- Έλεγχος υπέρβασης της παθητικής αντίστασης του πασσάλου, ο οποίος αναφέρεται στην ασφαλή επάρκεια της θεμελίωσης έναντι της υπέρβασης της οριζόντιας φέρουσας ικανότητας του πασσάλου.
- Έλεγχος της επαρκούς ασφάλειας έναντι της υπέρβασης της καμπτικής αντοχής του πασσάλου.
- Έλεγχος έναντι της υπέρβασης των οριζόντιων μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου εξαιτίας των φορτίων λειτουργίας.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται και συγκρίνονται μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των οριζόντιων μετακινήσεων του άξονα ενός πασσάλου και κατά επέκταση το προφίλ παραμόρφωσης αυτού.

1.3.1 Απόκριση πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση

Σημαντικό ρόλο στην απόκριση ενός πασσάλου υπό τη δράση οριζόντιας δύναμης κατέχει η δυσκαμψία του, καθώς και η μεταβολή των εδαφικών ωθήσεων που πραγματοποιείται από το κινηματικό πεδίο εξαιτίας της εξωτερικής δράσης. Δηλαδή από τη μετακίνηση που ο πάσσαλος υφίσταται.

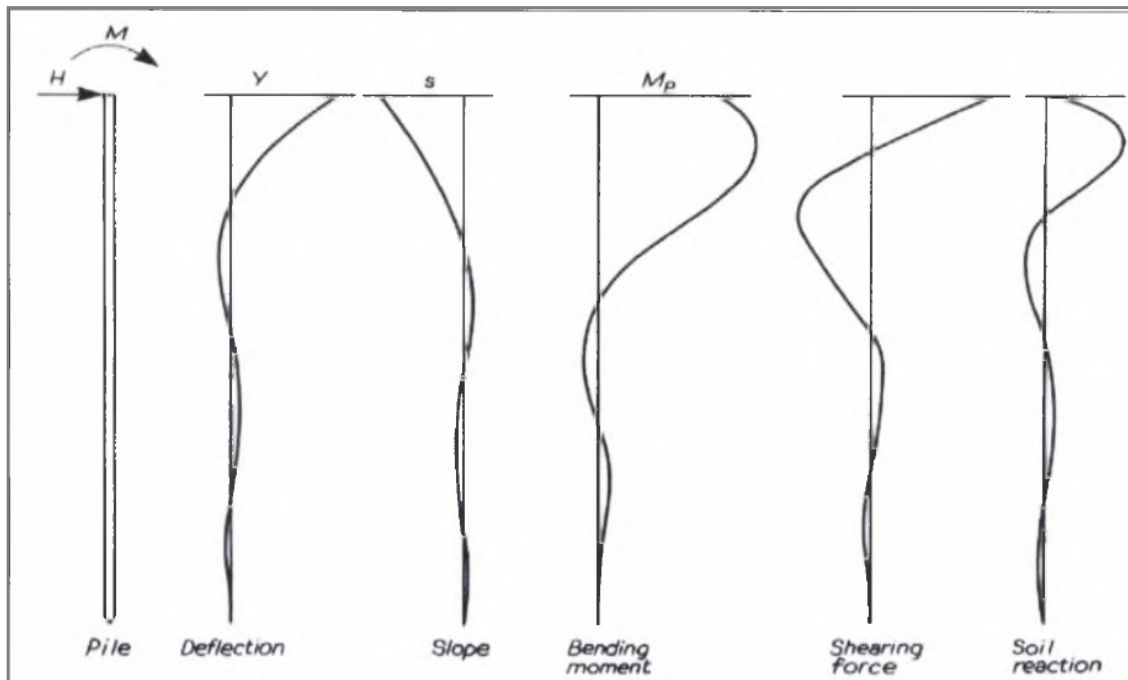
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων γύρω από τον πάσσαλο πριν επιβληθεί η οριζόντια δύναμη. Μετά την επιβολή της, φαίνεται πως οι τάσεις δεν κατανέμονται πλέον ομοιόμορφα στην περιφέρεια του πασσάλου. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανάπτυξης μίας οριζόντιας μετακίνησης, *y*. Τώρα οι τάσεις μειώνονται στο πίσω μέρος του πασσάλου, ενώ αυξάνονται στο αντίθετο.



(α)

(β)

Σχήμα 1.1: Ανάπτυξη πλευρικών ωθήσεων και κατανομή τάσεων πριν την πρόκληση οριζόντιας μετακίνησης (α) και μετά (β).



Σχήμα 1.2: Απεικόνιση της εντατικής και κινηματικής κατάστασης του πασσάλου. Οριζόντια μετακίνηση, κλίση, καμπτική ροπή, τέμνουσα δύναμη, εδαφικές ωθήσεις υπό ελαστικές συνθήκες

Με την επιβολή της οριζόντιας δύναμης και της ροπής στην κεφαλή ενός πασσάλου προκύπτουν διαγράμματα που παρουσιάζουν την κινητική και εντατική κατάσταση του πασσάλου. Αυτό φαίνεται παραπάνω και σχηματικά.

1.4 Μέθοδοι υπολογισμού επιτρεπόμενης οριζόντιας μετακίνησης

Για το σχεδιασμό των κατασκευών με έδραση σε πασσάλους, καθοριστικό ρόλο λαμβάνει η οριζόντια μετακίνηση, καθώς και η πρόκληση καταναγκασμών από μία δεδομένη φόρτιση. Έτσι εκτός των άλλων, προκύπτει και η ανάγκη υπολογισμού της οριζόντιας μετακίνησης από οριζόντιο φορτίο.

Η πρώτη μέθοδος υπολογισμού αφορά τη μέθοδο ελατηριακών σταθερών «Reeze and Matlok». Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το έδαφος προσομοιώνεται με γραμμικά ελαστικά ελατήρια, ανεξάρτητα μεταξύ τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής:

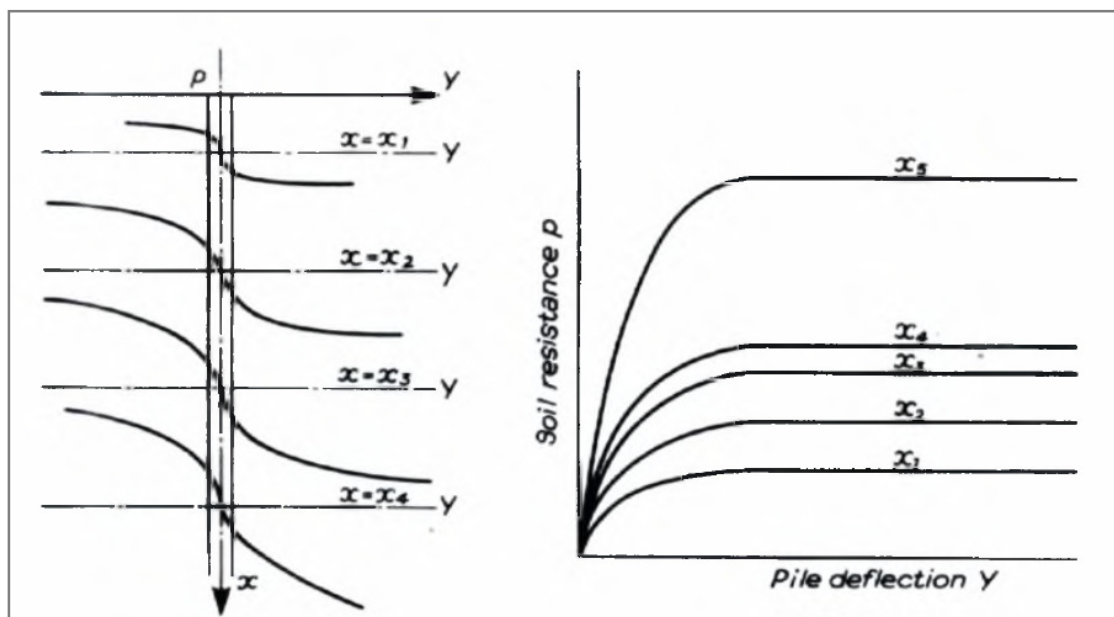
1. Είναι μία απλή σχετικά μέθοδος.
2. Μπορεί να αντιμετωπίσει παράγοντες, όπως η μεταβολή των ελατηριακών σταθερών με το βάθος και η μη-γραμμική απόκριση. Έτσι εφαρμόζεται και σε στρωσιγενή εδάφη.
3. Υπάρχει ευρεία εφαρμογή.

Παρόλο που η συγκεκριμένη μέθοδος προτιμάται, έχει και μειονεκτήματα, στα οποία συγκαταλέγονται τα παρακάτω:

1. Η τιμές των ελατηριακών σταθερών εξαρτώνται και από το επίπεδο παραμόρφωσης του εδάφους.
2. Το πρόβλημα απαιτεί κατάλληλη διακριτοποίηση για να επιλυθεί.

Η δεύτερη μέθοδος αφορά το σχεδιασμό των καμπύλων « p - y ». Η προσομοίωση του εδάφους με αυτές τις καμπύλες είναι δυνατό να αντιμετωπίσει τη μετελαστική συμπεριφορά του εδάφους. Για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων με τη χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται η θεώρηση ότι οι καμπύλες δεν εξαρτώνται από τη φόρτιση των κατωτέρων ή ανωτέρων εδαφικών στρωμάτων. Επίσης είναι ανεξάρτητες από τη δυσκαμψία και τη γεωμετρία του πασσάλου. Έτσι, πρακτικά, η μετακίνηση εξαρτάται μόνο από την αντίδραση του εδάφους σε συγκεκριμένο βάθος.

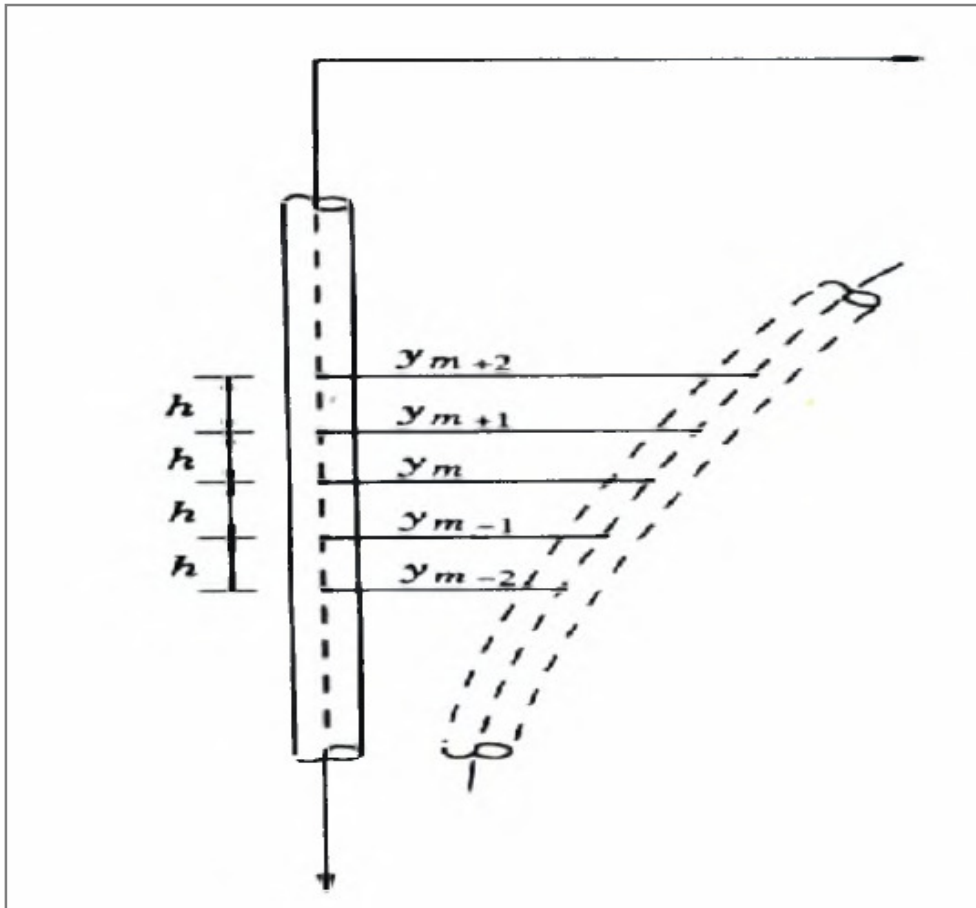
Τελικά, το έδαφος είναι δυνατό να αντικατασταθεί και από έναν μηχανισμό καμπύλων « p - y ». Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζεται η οριζόντια μετακίνηση μέχρι την έναρξη διαρροής του εδάφους.



(α)

(β)

Σχήμα 1.3: Αντιπροσώπευση του παραμορφωμένου πασσάλου μέσω των καμπύλων « p - y ». Απεικόνιση των καμπύλων για διαφορετικά βάθη (α), και (β) παρουσίαση αυτών σε κοινό άξονα.



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση της παραμόρφωσης του άξονα του πασσάλου εξαιτίας της υφιστάμενης οριζόντιας μετακίνησης.

Εκτός από τις προαναφερθέντες εμπειρικές μεθόδους, χρησιμοποιούνται επίσης αριθμητικές μέθοδοι και δοκιμαστικές φορτίσεις. Οι αριθμητικές μέθοδοι τίθενται σε εφαρμογή κυρίως όταν η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους είναι αδύνατο να εκτιμηθεί με βάση τις εμπειρικές μεθόδους. Το πρόβλημα προσδιορίζεται με ακρίβεια και παρέχει αποτελέσματα όχι μόνο για την εντατική και κινηματική κατάσταση του πασσάλου, αλλά και για την εδαφική κατάσταση της περιβάλλουσας περιοχής. Ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδων πασσάλων, οι εμπειρικές μέθοδοι κρίνονται ανεπαρκείς, καθώς είναι δυνατή η επεξεργασία μόνο ενός πασσάλου.

Επιπροσθέτως, η μέθοδος της δοκιμαστικής φόρτισης είναι απαραίτητη για την κατασκευή σημαντικών έργων. Παρόλο που η δοκιμή είναι χρονοβόρα, συλλέγεται ο μεγαλύτερος και ακριβέστερος όγκος πληροφοριών που αφορούν την κατάσταση των πασσάλων. Ένα πρόγραμμα φόρτισης απαιτεί τη σταδιακή επιβολή φορτίου και τη μέτρηση των μετακινήσεων ανάλογα με τη χρονική εξέλιξη. Για παράδειγμα, τα μηκυσιόμετρα, τα αποκλισιόμετρα και η χρήση των οπτικών ινών αποτελούν μεθόδους δοκιμαστικών φορτίσεων με σκοπό τον προσδιορισμό της μετακίνησης, της απόκλισης και της παραμόρφωσης του κεντρικού άξονα ενός πασσάλου. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι αναπτύσσονται διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια.

Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση αριθμητικών μεθόδων και δοκιμαστικών φορτίσεων δίνουν τη δυνατότητα διεξαγωγής αντίστροφης ανάλυσης για την εξασφάλιση της ορθότητας των συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

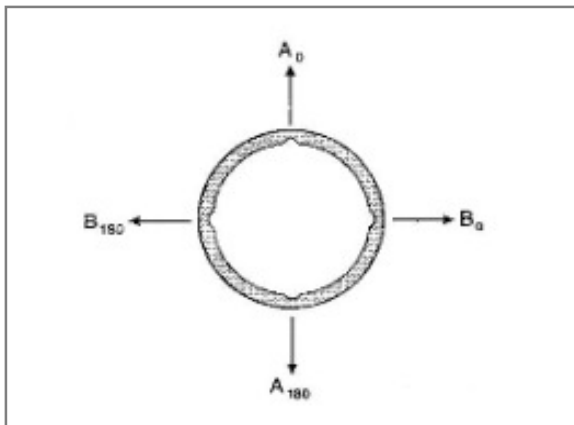
Ενοργάνωση με χρήση αποκλισιομετρικών σωλήνων

Πρόκειται για ειδικούς σωλήνες, οι οποίοι αποτελούνται από ειδικούς αύλακες τοποθετούμενοι στο εσωτερικό τους και σε κάθετες διευθύνσεις μεταξύ τους. Με τα όργανα αυτά πραγματοποιείται η μέτρηση των μετακινήσεων του εδάφους μόνο κάθετα στον άξονα της γεώτρησης. Δηλαδή, είναι σχεδιασμένα μόνο για λειτουργία σε κατακόρυφες γεωτρήσεις με αποτέλεσμα την καταγραφή της οριζόντιας μετακίνησης του εδάφους. Τα αποκλισιόμετρα διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν η θέση τους είναι σταθερή ή όχι:

1. Στα αποκλισιόμετρα βολίδας (probe inclinometer)
2. Στα αποκλισιόμετρα σταθερής θέσης σε γεώτρηση

2.1 Αποκλισιόμετρο βολίδας

Τα αποκλισιόμετρα βολίδας αποτελούνται από μία βολίδα ή τορπίλη με προσαρμοσμένες καθοδηγητικές ρόδες και έναν αισθητήρα κλίσης. Οι προαναφερόμενοι ειδικοί αύλακες στο εσωτερικό των σωλήνων αποτελούν απαραίτητο χαρακτηριστικό για την ομαλότητα και την ακρίβεια της κίνησης της τορπίλης μέσα στο σωλήνα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διευθύνσεις των αυλακών στη διατομή του σωλήνα.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση κύριας A0-A180 και δευτερεύουσας B0-B180 διεύθυνσης των αυλακών μίας διατομής αποκλισιομετρικού σωλήνα.

Οι καθοδηγητικές ρόδες και ο αισθητήρας κλίσης με τη σειρά τους οδηγούνται από τη βαρύτητα και παράγουν ηλεκτρικό σήμα. Η βολίδα συνδέεται με μια πηγή ενέργειας, αλλά και με μία συσκευή ανάγνωσης έτσι ώστε να καταγράφεται άμεσα η γωνία «θ» μεταξύ του άξονα της κατακόρυφου και αυτού της βολίδας. Εν συνεχεία πραγματοποιείται η καταγραφή της επαυξητικής μετατόπισης. Ο καθοδηγητικός σωλήνας, μέσα στον οποίο μετακινείται η τορπίλη, είναι πακτωμένος στη γεώτρηση και βυθίζεται σταδιακά προς τα υψομετρικά κατώτερα στρώματα του διατρήματος, μετρώντας την κλίση «θ» σε κάθε στάδιο. Παράλληλα, με τη μέτρηση της κλίσης και ανάλογα με το βάθος της βολίδας επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της βηματικής απόκλισης του καθοδηγητικού σωλήνα «u» από την κατακόρυφο και κατ' επέκταση και της συνολικής. Σημαντικό προς σημείωση είναι το γεγονός ότι η βολίδα παρουσιάζει μετρήσεις ανά 0,5m έτσι ώστε ο αναγνώστης να λαμβάνει

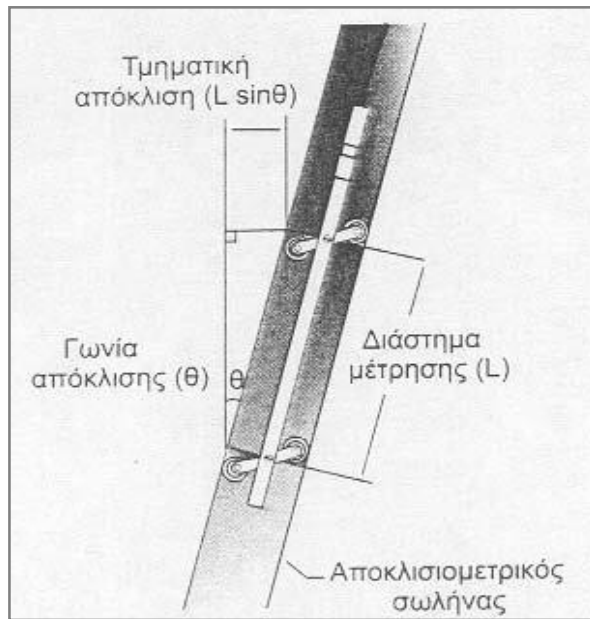
γνώση του βάθους στο οποίο το καλώδιο βρίσκεται σε κάθε δεδομένη στιγμή. Αυτό σημαίνει πως τα ζεύγη των καθοδηγητικών ρόδων βρίσκονται μεταξύ τους σε απόσταση 0,5m, πράγμα που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της βηματικής μετατόπισης. Επομένως, ο τύπος της οριζόντιας μετακίνησης είναι ο εξής:

$$u = L \sin \theta \quad (2.1)$$

όπου,

L , το σταθερό βήμα ανάγνωσης, δηλαδή 0,5m.

θ , η γωνιακή απόκλιση ανά βήμα μέτρησης



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της τμηματικής οριζόντιας μετατόπισης, u , δεδομένου του βήματος μέτρησης, L , και της γωνιακής απόκλισης, θ .

Έπειτα του σταδιακού υπολογισμού των οριζοντίων αποκλίσεων, είναι δυνατός και ο επιπλέον υπολογισμός της αθροιστικής οριζόντιας μετατόπισης, με βάση τις ακόλουθες αρχές:

1. Ο πυθμένας του αποκλισιομετρικού σωλήνα θεωρείται αμετακίνητος.
2. Η άθροιση των οριζοντίων αποκλίσεων γίνεται από το τέλος και αλγεβρικά. Το πρόσημο κάθε απόκλισης διατηρείται.

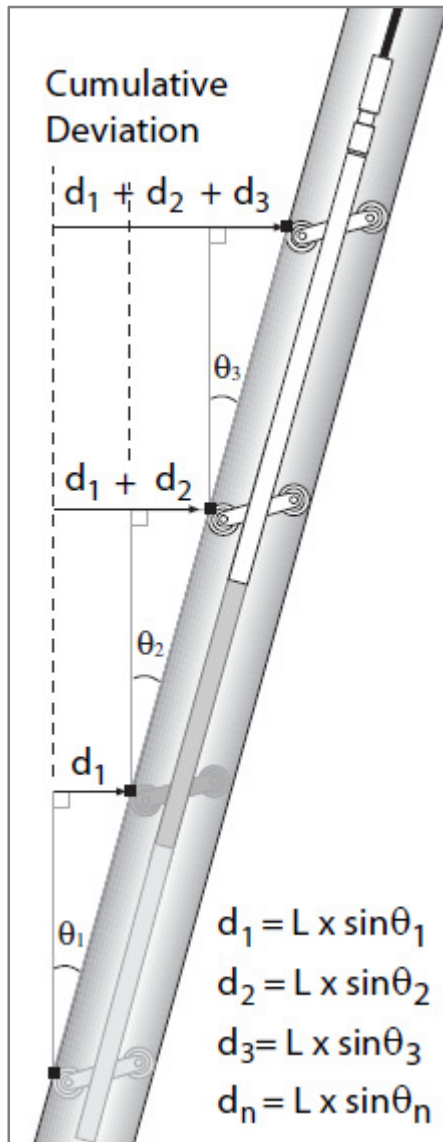
Ο τύπος που ακολουθείται είναι ο εξής:

$$U = d_1 + d_2 + d_3 = \sum_1^n L_1 \sin \theta_n \quad (2.2)$$

όπου,

d_1, d_2, d_3 , οι εκάστοτε τμηματικές οριζόντιες μετακινήσεις

θ_n , η γωνιακές αποκλίσεις του σωλήνα ανά βήματος μέτρησης, L



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού της συνολικής οριζόντιας μετατόπισης (cumulative displacement), δεδομένου των τμηματικών οριζοντίων μετατοπίσεων και γωνιακών αποκλίσεων.

2.2 Διαδικασία μέτρησης και καταγραφής

Ουσιαστικά το μέγεθος που καταγράφεται στο αναγνωστικό όργανο, το οποίο συνδέεται με τη βολίδα και αποθηκεύεται στη συνέχεια από τον καταγραφέα, είναι η κλίση του σωλήνα στις δύο κάθετες κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) στην οθόνη του χρήστη δεν εμφανίζεται ο πραγματικός αριθμός της κλίσης, αλλά πολλαπλασιασμένος με μία σταθερά του οργάνου «k», η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση βασισμένη στο S.I. ισούται με 25,000. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέγεθος της κλίσης είναι πάρα πολύ μικρό. Σε περίπτωση χρήσης του βρετανικού συστήματος μονάδων, η τιμή της σταθεράς «k» ισούται με 20,000. Εν τέλει, ο αριθμός που εμφανίζεται είναι ο ακόλουθος:

$$\alpha = 25,000 * \sin\theta \quad (2.3)$$

όπου,

α , ο πραγματικός καταγεγραμμένος αριθμός της κλίσης

θ, οι γωνιακή απόκλιση του σωλήνα

Η αξιολόγηση των μετρήσεων υλοποιείται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων.

Για την πραγματοποίηση της σωστής ανάληψης των δεδομένων από τον αποκλισιομετρικό σωλήνα είναι απαραίτητη η μέτρηση κατά τον κύριο «A0-A180» και δευτερεύοντα άξονα του «B0-B180». Ο κύριος άξονας ταυτίζεται ιδανικά με τον πάσσαλο (είτε αυτός λειτουργεί ως πάσσαλος θεμελίωσης, είτε ως πάσσαλος διαφραγματικού τοίχου). Υπό τις συνθήκες εργοταξίου όμως αυτή η τοποθέτηση του κύριου άξονα δεν είναι εφικτή, οπότε γίνεται τυχαία, αρκεί πάντα ο δευτερεύοντας άξονας να έχει κάθετη διεύθυνση στον κύριο. Αρχικά, οι μετρήσεις γίνονται με βάση τον πρωτεύοντα άξονα. Με τη βοήθεια της τορπίλης λαμβάνονται τα δεδομένα ανά βήμα και με κατεύθυνση από τον πυθμένα του σωλήνα μέχρι την κορυφή του. Έπειτα, με σκοπό την ακριβή και βέλτιστη λήψη των μετρήσεων, η τορπίλη περιστρέφεται κατά 180 μοίρες, ώστε να επιτευχτεί η επανάληψη της διαδικασίας. Για την αποφυγή μεγάλων σφαλμάτων και τη σωστή λήψη των δεδομένων, ως ασφαλιστική δικλείδα λαμβάνεται η διαδικασία μετά την περιστροφή της τορπίλης. Οι ενδείξεις που θα ληφθούν θα πρέπει να ισούνται κατά απόλυτη τιμή με τις αρχικές. Ταυτόχρονα με την επεξεργασία των δεδομένων του κύριου άξονα, πραγματοποιούνται και οι μετρήσεις στο δευτερεύοντα.

Βέβαια, η εξάλειψη όλων των σφαλμάτων είναι απίθανη, πράγμα που οφείλεται είτε στη μετακίνηση της τορπίλης κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των ενδείξεων, είτε στην πρακτική υψομετρική διαφορά θέσης κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μέτρησης. Γι αυτό το λόγο, οι επιπλέον στατιστικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι πολύ χρήσιμοι. Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αναλαμβάνει την περαιτέρω επεξεργασία.

2.2.1 Ακρίβεια αποκλισιομέτρου

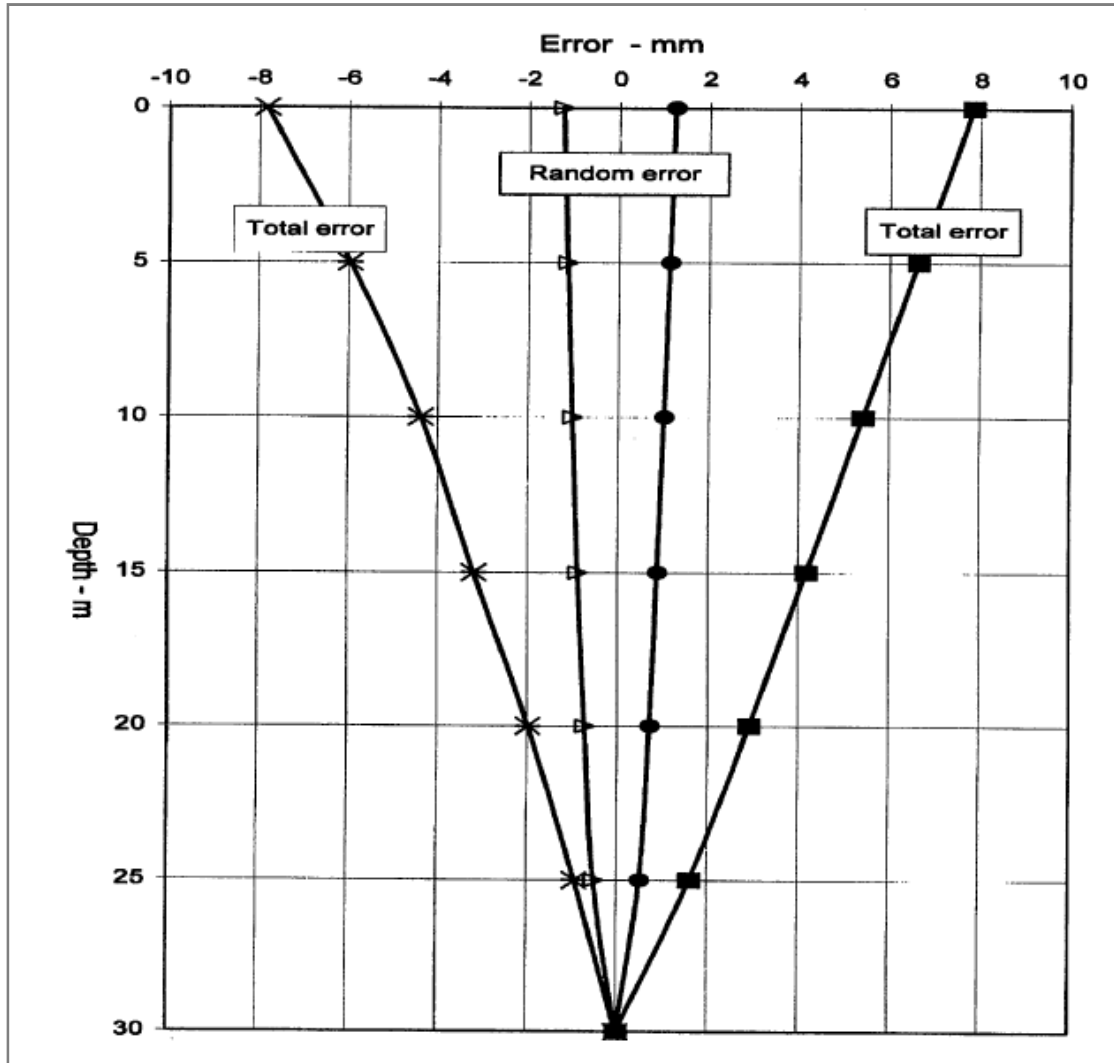
Σε γενικές γραμμές, η διεξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου του αποκλισιομέτρου είναι ακριβής. Παρόλα αυτά όμως η πλήρης απαλοιφή των συστηματικών σφαλμάτων (systematic errors) είναι αδύνατη. Ανάλογα με την περίπτωση, τα σφάλματα αυτά είναι δυνατόν να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τις ενδείξεις και εν συνεχεία τον υπολογισμό των μετακινήσεων. Τα λανθασμένα συμπεράσματα προκύπτουν κυρίως όταν ο χρήστης δεν είναι γνώστης της τάξης αυτών των σφαλμάτων.

2.2.2 Πεδίο ακρίβειας

Με βάση εμπειρικούς και στατιστικούς ελέγχους τη δεκαετία του 1970 στις Ηνωμένες Πολιτείες, διεξήχθη το γεγονός ότι το πεδίο ακρίβειας σε έναν πάσσαλο βάθους 30m βρίσκεται στα +/- 7,8mm. Το συνολικό αυτό σφάλμα παράγεται από το άθροισμα του τυχαίου και του συστηματικού σφάλματος, με βάση τη μελέτη 60 ενδείξεων βήματος μέτρησης 0,5m. Οι τυπικές τιμές ενός τυχαίου σφάλματος για μία μέτρηση κυμαίνονται στην κλίμακα των +/-0,16mm, η οποία βασίζεται στον αθροιστικό έλεγχο (checksum performance). Για την ισοδύναμη τιμή στο συνολικό βάθος του πασσάλου το σφάλμα της μίας μέτρησης αρκεί να πολλαπλασιαστεί με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού 60. Ουσιαστικά πραγματοποιούνται 2 μετρήσεις ανά μέτρο πασσάλου. Αντιθέτως, αναφορικά των συστηματικών σφαλμάτων, οι τυπικές τιμές για μία μέτρηση κυμαίνονται στην κλίμακα των +/-0,11mm, ενώ για την ισοδύναμη τιμή γίνεται ο πολλαπλασιασμός με τον αριθμό 60. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \text{Συνολικό σφάλμα} &= \text{Τυχαίο σφάλμα} + \text{Συστηματικό σφάλμα} \\ &= 0,16\text{mm} * \sqrt{60} + 0,11 * 60 \\ &= 1,24 + 6,60 = 7,8\text{mm} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της σύγκρισης τιμών του τυχαίου και συστηματικού σφάλματος στα πλαίσια του πεδίου ακριβείας τους. Η γραφική παράσταση (Mikkelsen, 1996) βασίζεται στη μελέτη πασσάλου μήκους 30m.



Σχήμα 2.4: Γραφική αναπαράσταση του τυχαίου και συστηματικού σφάλματος στα πλαίσια του πεδίου ακριβείας τους μετά την επεξεργασία πασσάλου μήκους 30m (Mikkelsen 1996).

Τα τυχαία σφάλματα παραμένουν σταθερά, καθώς δε μπορούν να διορθωθούν παρά μόνο να μειωθούν με τη χρήση καλύτερης εγκατάστασης. Αντιθέτως, τα συστηματικά σφάλματα διαφοροποιούνται ανάλογα με την έρευνα που διεξάγεται και μπορούν να μειωθούν λαμβάνοντας τον μέσο όρο μεγάλου πλήθους μετρήσεων ή χρησιμοποιώντας καλύτερες εγκαταστάσεις. Έτσι το συνολικό σφάλμα πασσάλου μήκους 30m είναι δυνατό να μειωθεί από την τιμή των 7,8mm στην τιμή των 1,24mm.

Τα αίτια που προκαλούν την ανάπτυξη των συστηματικών σφαλμάτων είναι ο συνδυασμός των παρακάτω παραγόντων:

1. Μετατόπιση της βολίδας (bias, zero offset)
2. Εκτροπή της τορπίλης (sensitivity drift)
3. Ευθυγράμμιση αισθητήρα, στροφή (sensor alignment shift, rotation)

4. Σφάλμα βάθους τοποθέτησης (depth positioning error)
5. Κλίση του περιβλήματος (casing inclination)
6. Καμπυλότητα (curvature)

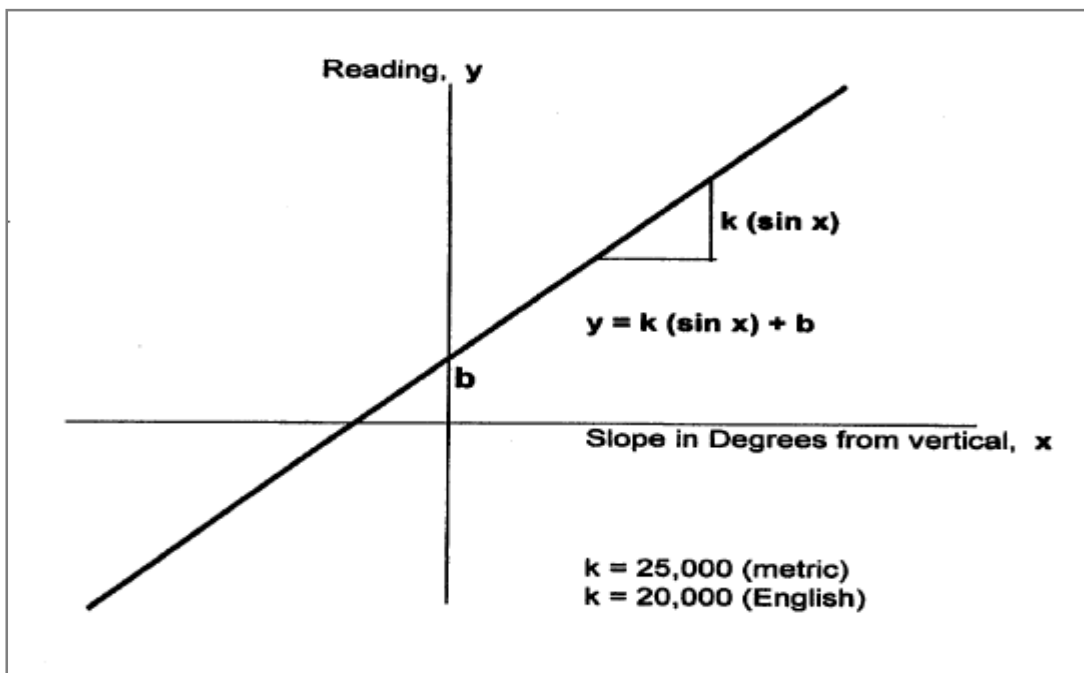
2.2.3 Βασικά συστηματικά σφάλματα- Ορισμοί και διόρθωση

1. Μετατόπιση της βολίδας (bias, zero offset)

Το πιο συχνό συστηματικό σφάλμα προκύπτει από τη μετατόπιση της βαθμονόμησης της βολίδας (sensor bias shift) κατά την περιστροφή της για τη διαδικασία μέτρησης στον κύριο ή δευτερεύοντα άξονα. Πρόκειται για ένα μικρό σφάλμα της τιμής «b», το οποίο μπορεί να μειωθεί δραστικά με την πρακτική.

Κατά την περιστροφή, η τορπίλη δεν τοποθετείται συνήθως από το χρήστη κάθετα, αλλά με απόκλιση της τάξης των +/-30 μοιρών. Ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο υπολογισμός της κλίσης του αποκλισιομέτρου μέσω του ημιτόνου της γωνίας «θ». Όπως προαναφέρθηκε, για τη διευκόλυνση και απλοποίηση της διαδικασίας γίνεται ο πολλαπλασιασμός των ενδείξεων με τη σταθερά του αποκλισιομέτρου «k». Έπειτα ακολουθεί η προσθαφαίρεση της τιμής του σφάλματος «b».

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της απόκλισης της βολίδας μετά τη διαδικασία της περιστροφής της, καθώς και η δημιουργία του σφάλματος «b».



Σχήμα 2.5: Γραφική αναπαράσταση της μετατόπισης της βολίδας εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησής της κατά την περιστροφή για τη διαδικασία της συμπληρωματικής μέτρησης στον κύριο ή δευτερεύοντα άξονα του αποκλισιομέτρου.

Η απαλοιφή του σφάλματος γίνεται με τη χρήση της αλγεβρικής διαφοράς (Algebraic Difference), ενώ με το αλγεβρικό άθροισμα (Checksum Performance) εξαλείφονται οι ενδείξεις από τους αισθητήρες και λαμβάνεται το σφάλμα επί 2. Ο αθροιστικός έλεγχος είναι απαραίτητος για την εύρεση αδύναμων σημείων και ελλιπών δεδομένων. Εάν το σφάλμα έπειτα από το συγκεκριμένο έλεγχο παραμένει σταθερό, τότε δεν τίθεται κάποιο πρόβλημα, εφόσον κατά τη λήψη των δεδομένων από έναν άξονα τηρηθεί και η αντίστροφη διαδικασία. Έτσι πρόκειται για ένα κατασκευαστικό σφάλμα. Η τυπική απόκλιση για τον κύριο άξονα

«A0-A180» κυμαίνεται στα 0,08mm ,ενώ για τον δευτερεύοντα άξονα «B0-B180» είναι 0,16mm.

Για την καλύτερη κατανόηση της απαλοιφής του σφάλματος παρατίθεται το παρακάτω παράδειγμα. Ως σφάλμα «b» λαμβάνεται η τιμή 10, το οποίο προστίθεται στην εκάστοτε τυπική θεωρητική ένδειξη του άξονα του αποκλισιομέτρου. Παρατηρείται πως με τη διαίρεση της αλγεβρικής διαφοράς με τον αριθμό δύο, καθώς δύο είναι οι υπό επεξεργασία ενδείξεις, λαμβάνεται η αρχική θεωρητική ένδειξη, $k \times \sin \theta$. Η τιμή της γωνιακής απόκλισης που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα ισούται με $\theta = 1$ μοίρα.

$$A0(\text{reading}) = (25,000 * \sin 1) + 10 = 436 + 10 = 446$$

$$A180(\text{reading}) = [25,000 * \sin(-1)] + 10 = -436 + 10 = -426$$

$$\text{Algebraic Difference} = (A0 - A180) = 436 - (-436) + 10 - 10 = 872$$

$$\frac{\text{Alg. Dif}}{2} = \frac{876}{2} = 436$$

$$\text{Checksum Performance} = (A0 + A180) = 446 + (-426) + 10 + 10 = 20$$

Για τη λήψη των διορθωμένων τιμών και τη χρήση αυτών λαμβάνεται υπόψη η ακόλουθη σχέση:

$$bs = \frac{BSE}{N * C} \quad (2.5)$$

όπου,

bs , η διόρθωση του σφάλματος ανά βήμα μέτρησης

BSE , το συνολικό σφάλμα για έναν πάσσαλο συγκεκριμένου ύψους

N , ο αριθμός των βημάτων λήψης των δεδομένων

C , το βήμα λήψης των δεδομένων διαιρεμένο με $2k$. Ισοδυναμεί με την τιμή των 0,01mm για βήμα ανάγνωσης $L = 0,5m$ ή 0,0006 inches .

1. Εκτροπή του αισθητήρα (sensitivity drift)

Σε πιο σπάνιες περιπτώσεις, παρουσιάζεται σφάλμα λόγω της εκτροπής του αισθητήρα (sensitivity drift). Αυτό διορθώνεται με την τακτική βαθμονόμηση του αποκλισιομέτρου, τουλάχιστον μία φορά το χρόνο. Μία εκτροπή της τάξης των 2% είναι δυνατόν να παρουσιάσει σφάλμα ως και 20mm. Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση που δημιουργείται, τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα.

2. Στροφή (rotation, sensor alignment shift)

Μία μικρή στροφή στους αισθητήρες του ενός άξονα έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία συστηματικού σφάλματος σε συνδυασμό με την αλλαγή στην κλίση του δευτερεύοντα κάθετου άξονα. Για τη διόρθωση του σφάλματος αυτού επιβάλλεται η αλλαγή

του αρχικού συστήματος συντεταγμένων και των δύο κάθετων αξόνων. Το μαθηματικό μοντέλο για τη στροφή και κλίση του άξονα του αισθητήρα εκφράζεται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$x = x' * \cos\alpha - y' * \sin\alpha \quad (2.6)$$

$$y = y' * \sin\alpha + x' * \cos\alpha \quad (2.7)$$

όπου,

x, y , είναι οι συντεταγμένες του αρχικού συστήματος

x', y' , συντεταγμένες του συστήματος μετά τη στροφή του άξονα

α , η γωνία στροφής του άξονα

Οι παραπάνω εξισώσεις απλοποιούνται, καθώς πρόκειται για μικρές έως αμελητέες τιμές των γωνιών κλίσης. Ως αποτέλεσμα, τα συνημίτονα της γωνίας να ισούνται πλέον με τη μονάδα. Έτσι οι μαθηματικές σχέσεις (2.6) και (2.7), υποθέτοντας το γεγονός ότι ο κύριος άξονας «A0-A180» αναπαριστά τις x-συντεταγμένες και ο δευτερεύον άξονας «B0-B180» τις y-συντεταγμένες, γίνονται:

$$B = B' - A' * \sin\alpha \quad (2.8)$$

$$A = B' * \sin\alpha + A' \quad (2.9)$$

Ο υπολογισμός του σφάλματος στροφής και η μετέπειτα διόρθωση αυτού βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις (2.10), (2.11):

$$\text{Σφάλμα στροφής (A – άξονα)} = A' - A = -B' * \sin\alpha \quad (2.10)$$

$$\text{Σφάλμα στροφής (B – άξονα)} = B' - B = A' * \sin\alpha \quad (2.11)$$

όπου,

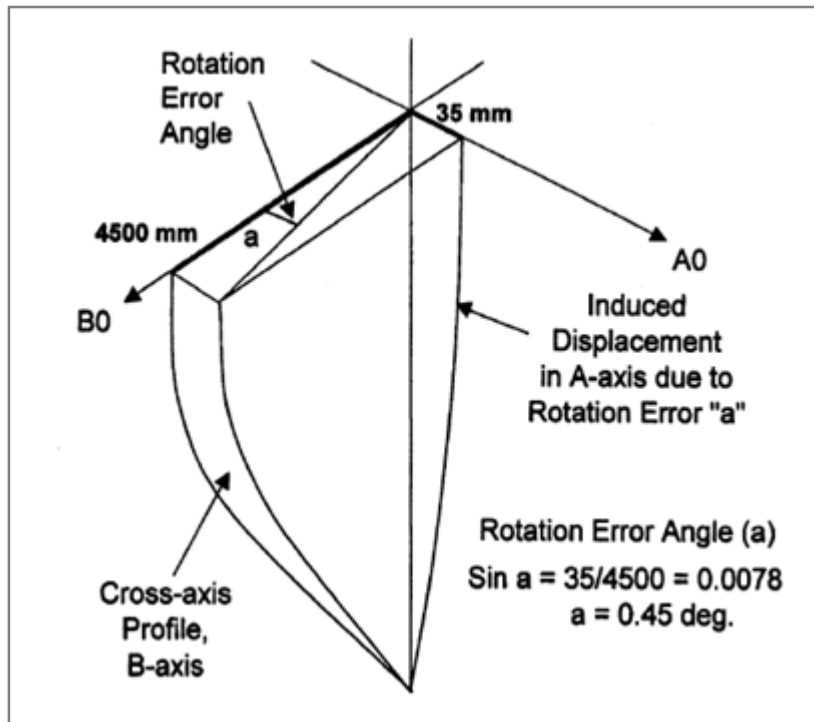
A, B , οι ενδείξεις του αποκλισιομέτρου πριν τη στροφή του άξονα ανά βήμα μέτρησης

A', B' , οι ενδείξεις του αποκλισιομέτρου μετά τη στροφή του άξονα ανά βήμα μέτρησης

α_w , η γωνία στροφής του κυρίου άξονα «A0-A180»

α_b , η γωνία στροφής του δευτερεύοντα άξονα «B0-B180»

Στο Σχήμα 2.6 αναπαριστάται το σφάλμα λόγω στροφής των αξόνων, ο γεωμετρικός υπολογισμός της γωνίας στροφής, α και η αλληλεπίδραση των δύο κάθετων αξόνων. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι γωνίες των δύο αξόνων, α_a και α_b διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση του σφάλματος στροφής, a και ο υπολογισμός του με βάση του προφίλ του δευτερεύοντα άξονα B0-B180.

3. Σφάλμα βάθους τοποθέτησης (depth positioning error)

Σημαντικά σφάλματα δημιουργούνται επίσης από τον τρόπο τοποθέτησης της βολίδας μέσα στον σωλήνα. Τα σφάλματα βάθους επηρεάζουν τις οριζόντιες μετακινήσεις του πασσάλου ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης της τορπίλης. Παρατίθενται παραδείγματα τοποθέτησης της τορπίλης σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που φέρουν στη συνολική οριζόντια μετακίνηση.

Απεικονίζονται τρεις περιπτώσεις διαφορετικής τοποθέτησης σε καμπύλο σωλήνα. Στην πρώτη εικόνα η τοποθέτηση είναι «κανονική», στη δεύτερη «χαμηλή», ενώ στην τρίτη «υψηλή». Διαπιστώνεται ότι η «χαμηλή» τοποθέτηση προσδίδει θετικές αλλαγές στη λήψη των μετρήσεων και εν συνεχεία στη συνολική μετατόπιση, ενώ η «υψηλή» αρνητικές.

Η διόρθωση αυτών των σφαλμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση των λογισμικών «Gtilt» και «DigiPro» ή διαφορετικά με τη χρήση της παρακάτω γενικευμένης μαθηματικής σχέσης:

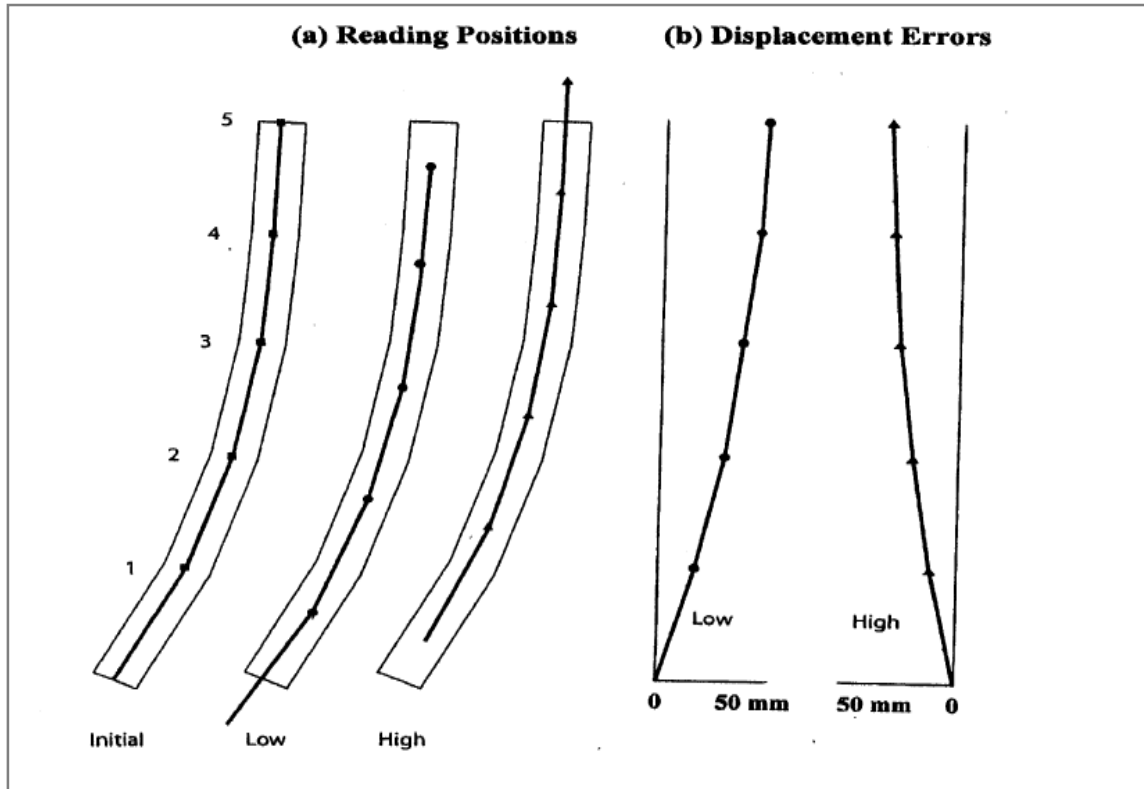
$$DPE = CURVATURE * \left(\frac{DPS}{interval} \right) \quad (2.6)$$

όπου,

DPE , το σφάλμα τοποθέτησης ανά το βάθος (depth positioning error)

DPS , η διαφορά από την αρχική θέση τοποθέτησης (+/-), (depth positioning shift)

$Interval$, το βήμα λήψης μετρήσεων, 0,5m ή 2 feet.



Σχήμα 2.7: Απεικόνιση τριών περιπτώσεων τοποθέτησης της τορπίλης σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα στην οριζόντια μετακίνηση.

2.3 Διεξαγωγή και επεξεργασία μετρήσεων: Δεδομένα αποκλισημέτρου

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο καταγραφέας μας δίνει την κλίση της τορπίλης ανά βήμα ανάγνωσης. Στη συνέχεια, με κατάλληλο λογισμικό υπολογίζεται η οριζόντια μετακίνηση ανά βήμα και εν συνεχεία η αθροιστική οριζόντια μετακίνηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το λογισμικό που επιλέχθηκε για την επεξεργασία των στοιχείων ήταν το Microsoft Excel. Ως πρώτο παράδειγμα, πραγματοποιήθηκαν εκτός τις αρχικής κατάστασης του πασσάλου «Μέτρηση 0», δύο διαφορετικές μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές περιόδους η κάθε μία «Μέτρηση 1» και «Μέτρηση 2», τα δεδομένα των οποίων επεξεργάστηκαν με στόχο την τελική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Πρόκειται για ένα βάθος γεώτρησης των 19m, τοποθετούμενη κατάντη της οικοδομής με εδαφικό υψόμετρο 638,87m. Επιπλέον, ο σωλήνας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου «ABS 60/70».

Αρχικά, παρατηρείται ότι για κάθε θέση της τορπίλης (βήμα 0,5m) ο καταγραφέας αποθηκεύει τέσσερις βηματικές κλίσεις. Οι πρώτες δύο αφορούν τις διευθύνσεις A0 και B0, ενώ οι επόμενες δύο τις διευθύνσεις A180 και B180.

Κάτω υπό ιδανικές συνθήκες, οι μετρήσεις των διευθύνσεων A0 και B0 θα πρέπει να ταυτίζονται με αυτές των διευθύνσεων A180 και B180 αντιστοίχως. Όπως προαναφέρθηκε, στην πραγματικότητα αυτό είναι ανέφικτο διότι υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες που αλλοιώνουν την αληθινή εικόνα, όπως τα σφάλματα που επηρεάζουν τη συνολική οριζόντια μετακίνηση. Έτσι, απαραίτητη είναι η επανάληψη και η περιστροφή της βολίδας. Για τη λήψη της μέτρησης που αντιστοιχεί όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα, λαμβάνεται ο μέσος όρος κατά απόλυτη τιμή των δύο τιμών κάθε άξονα. Εν συνεχεία, διαιρείται με τη σταθερά «k», ίση με 25,000 ,στην περίπτωση μετρικού συστήματος ή με

20,000 σε περίπτωση που το σύστημα είναι αγγλικού τύπου. Σαν πρόσημο λαμβάνεται αυτό των αρχικών μετρήσεων (A0,B0).

Για την περίπτωση της αρχικής μέτρησης κατά τον κύριο άξονα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα εξής:

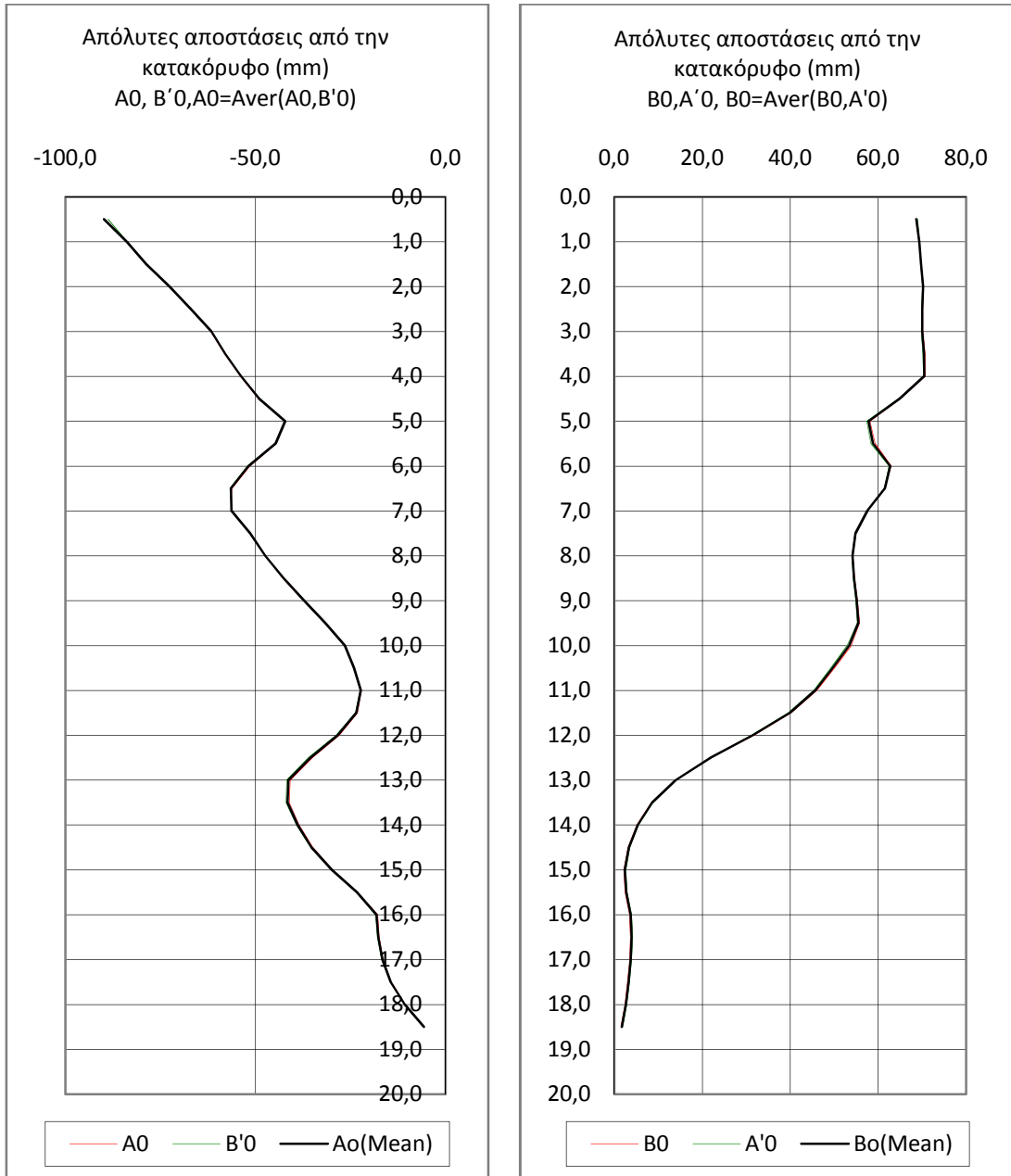
DATA				
Βάθος	A0	A180	B0	B180
(m)	(Div)	(Div)	(Div)	(Div)
1	133	-66	579	-567
2	-279	348	344	-317
3	-130	201	576	-547
4	-229	301	346	-305
5	-203	277	327	-323
6	-123	190	416	-381
7	-343	407	301	-255
8	141	-76	762	-721
9	0	64	720	-679
10	-62	133	589	-569
11	78	-10	850	-816
11,5	258	-222	65	-74
12	26	6	205	-187
12,5	-244	274	142	-125
13	-176	213	44	-29
13,5	-209	249	-23	19
14	-251	296	-28	39
14,5	-253	297	-26	22
15	-239	276	97	-95
15,5	-117	144	191	-188
16	-79	109	203	-197
16,5	72	-25	295	-290
17	261	-221	433	-418
17,5	366	-337	481	-474
18	311	-276	413	-416
18,5	33	8	276	-268
19	-111	146	165	-160
19,5	-164	196	108	-97
20	-245	281	51	-44
20,5	-307	341	-11	17
21	-322	212	-52	51
21,5	62	103	-9	12
22	-43	60	12	-8
22,5	-89	124	25	-23
23	-161	202	27	-29
23,5	-227	271	51	-44
24	-268	302	83	-68

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικός υπολογισμός του μέσου όρου των δεδομένων της αρχικής μέτρησης του κύριου άξονα A0-A180.

Η παραπάνω προκύπτουσα τιμή αποτελεί την κλίση του σωλήνα. Κατά τον ίδιο τρόπο προκύπτει η κλίση των υπόλοιπων δύο μετρήσεων. Πολλαπλασιάζοντάς το ανά βήμα μήκος της βολίδας, υπολογίζεται η τμηματική οριζόντια μετακίνηση του σωλήνα. Τελικά για τον υπολογισμό της συνολικής μετακίνησης και την παράλληλη απλοποίηση του προβλήματος, γίνεται η θεώρηση του ακίνητου πυθμένα του πασσάλου και έπειτα υπολογίζονται οι

αθροιστικές τιμές με βάση την άθροιση των οριζόντιων τμηματικών μετακινήσεων με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω. Ακριβώς η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για τις μετρήσεις του κάθετου άξονα Β0-Β180. Στη συγκεκριμένη έρευνα, για λόγους μεγαλύτερης ακριβείας και αποφυγής σημαντικών σφαλμάτων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και με τη βοήθεια μιας συζυγούς εγκατάστασης. Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων, οι αρχικοί άξονες στράφηκαν δεξιόστροφα του βορρά κατά 90 μοίρες και ύστερα υλοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία. Ουσιαστικά, υφίσταται ταύτιση του συζυγούς άξονα Β'0-Β'180 με αυτόν της κύριας εγκατάστασης Α0-Α180. Αντίστοιχα, ταυτίζονται και οι κάθετοι άξονες. Με την εύρεση του μέσου όρου των μετρήσεων των ταυτιζόμενων αξόνων, λαμβάνονται οι τιμές των μετακινήσεων, οι οποίες τελικά χρησιμοποιούνται στη μετέπειτα διαδικασία.

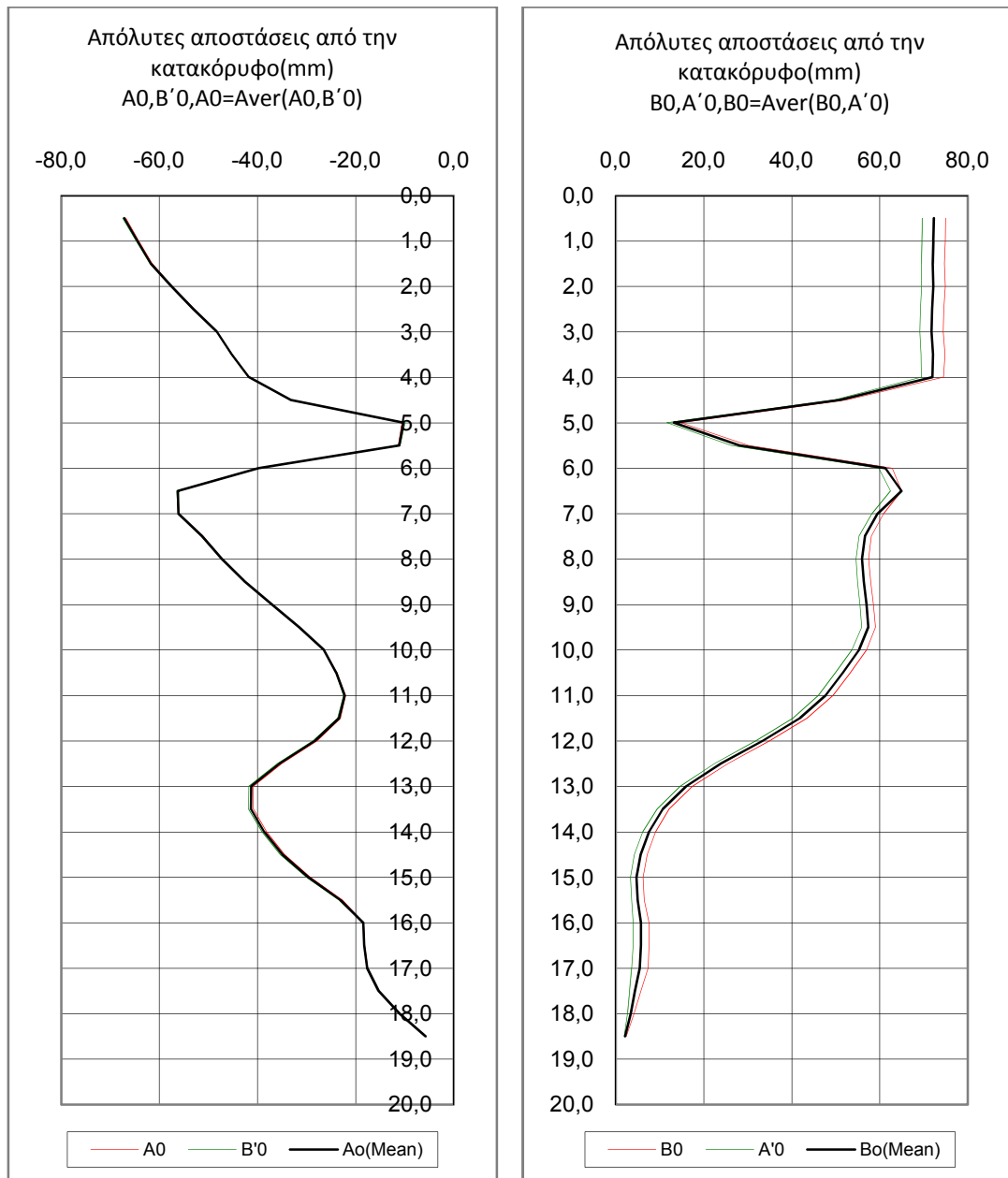
Στα παρακάτω επισυναπτόμενα διαγράμματα, σχήμα 2.8, 2.9 και 2.10, παρουσιάζονται οι απόλυτες αποστάσεις των αξόνων της κύριας και συζυγούς εγκατάστασης από την κατακόρυφο, ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων κάθε ζεύγους αξόνων και η σύγκριση αυτών. Τα αποτελέσματα αφορούν τη διεξαγωγή και των τριών μετρήσεων.



(α)

(β)

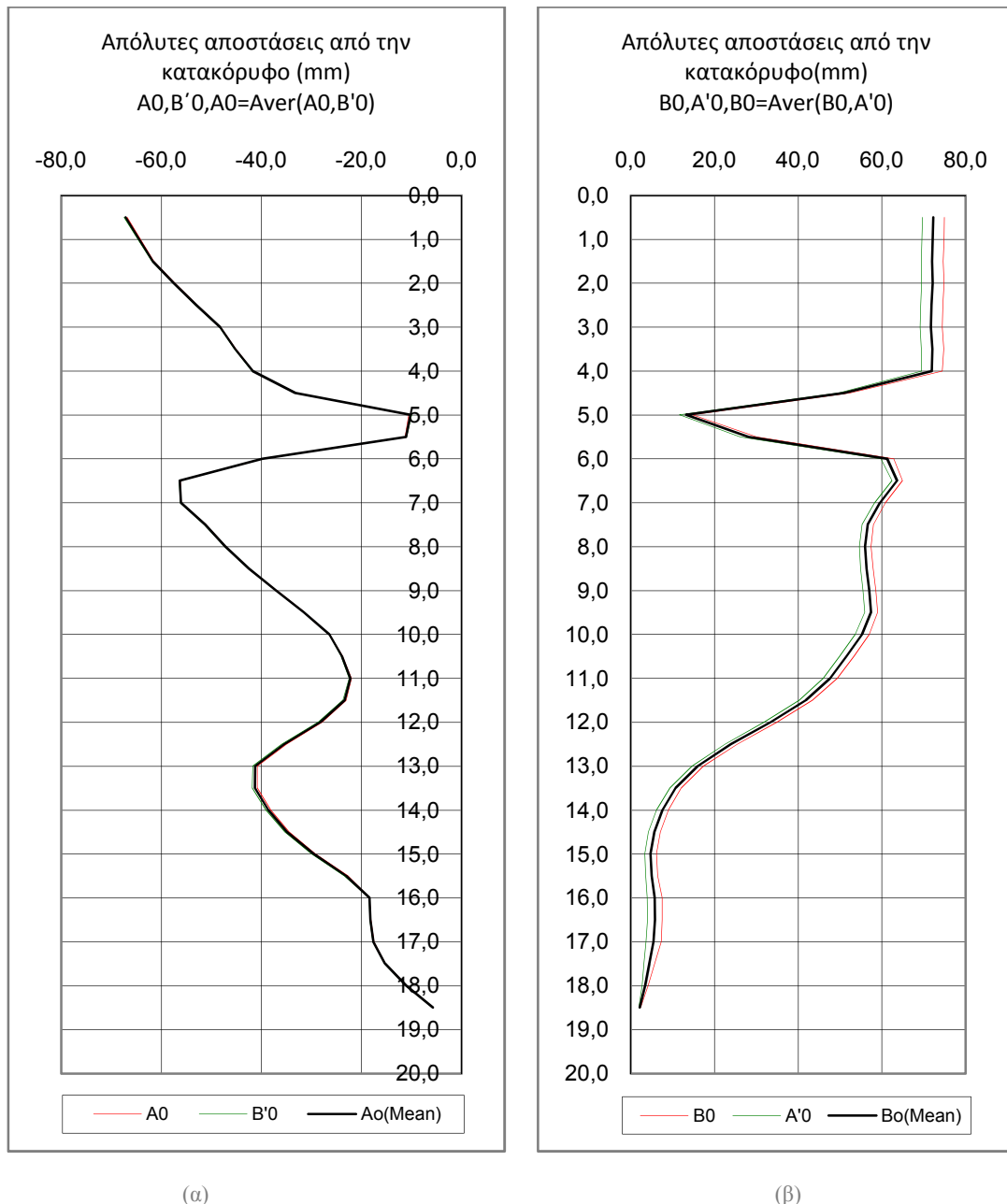
Σχήμα 2.8: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισιομέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για την αρχική κατάσταση του αποκλισιομετρικού σωλήνα Μέτρηση 0, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων $A_0-B'_0$ και (β) $B_0-A'_0$ σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.



(α)

(β)

Σχήμα 2.9: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισιομέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για τη Μέτρηση 1, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων A0-B'0 και (β) B0-A'0, σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.

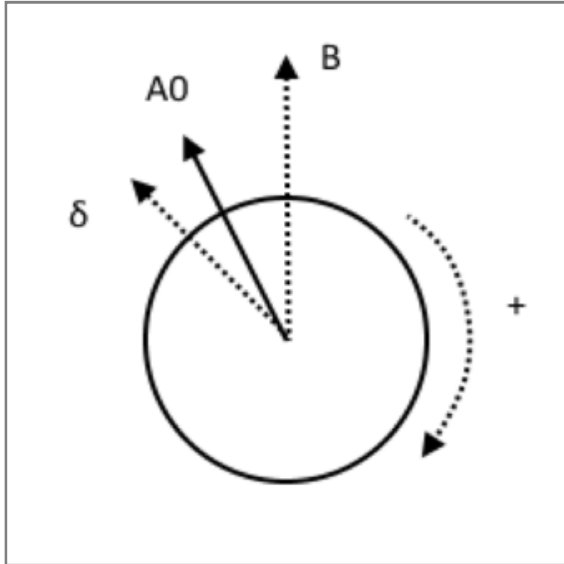


(α) (β)
Σχήμα 2.10: Διαγραμματική σύγκριση αξόνων κύριας και συζυγούς εγκατάστασης της μεθόδου του αποκλισιομέτρου συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Απεικόνιση των απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα για τη Μέτρηση 2, (α) των ταυτιζόμενων αξόνων A0-B'0 και (β) B0-A'0, σε συνδυασμό με το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών.

Αναφορικά της παράθεσης των παραπάνω διαγραμμάτων της αρχικής μέτρησης για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εγκαταστάσεων, παρατηρείται πως υφίσταται όντως ταύτιση των αξόνων $A0=B'0$ και $A180=B'180$. Επίσης, ο μέσος όρος των μετρήσεων ταυτίζεται αναλογικά και με ελάχιστες αποκλίσεις από τις κύριες μετρήσεις. Αυτή η μέθοδος συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που πλήττει την τεχνική του αποκλισιομέτρου.

Η παραπάνω διαδικασία για τη συνολική μετακίνηση ακολουθείται όταν η τοποθέτηση των αξόνων είναι ορθή. Διαφορετικά, τα αποτελέσματα επιφέρουν αλλαγές. Στην προκειμένη περίπτωση δεν κατέστη δυνατή η ορθή τοποθέτηση των αξόνων του αποκλισιομέτρου, πράγμα που απαιτεί μία διόρθωση στη συνολική μετακίνηση του πασσάλου. Για την ακρίβεια, ο κύριος άξονας A0-A180 δεν τοποθετήθηκε παράλληλα στο

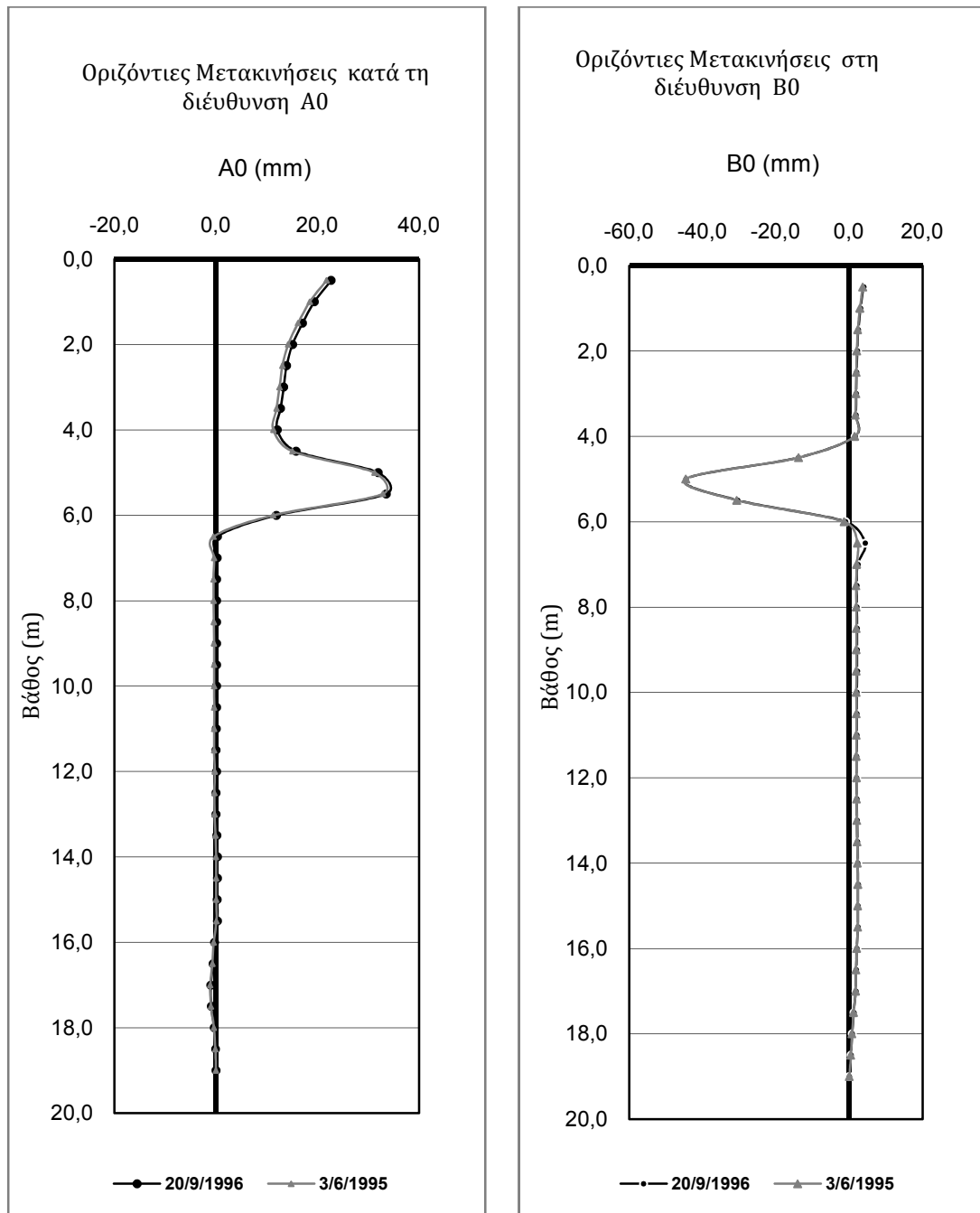
επίπεδο του σωλήνα, αλλά με στροφή 348 μοιρών δεξιόστροφα του Βορρά. Στο Σχήμα 2.11 αναπαριστάται η θέση του κύριου άξονα σε σχέση με τον άξονα της μέσης κύριας διεύθυνσης, δ και του Βορρά, ο οποίος θεωρείται παράλληλος στο επίπεδο του αποκλισιομετρικού σωλήνα.



Σχήμα 2.11: Τοποθέτηση του κύριου άξονα του αποκλισιομέτρου A0-A180 σε σχέση με το παράλληλο επίπεδο του αποκλισιομετρικού σωλήνα και τη μέση κύρια διεύθυνση μετακίνησής αυτού.

Σκοπός είναι ο συνδυασμός των μετρήσεων που διεξάχθηκαν για την εύρεση της μετατόπισης του σωλήνα κατά την κύρια και δευτερεύουσα διεύθυνση μετακίνησής του, δ , και $\delta+90$ αντιστοίχως, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 2.15.

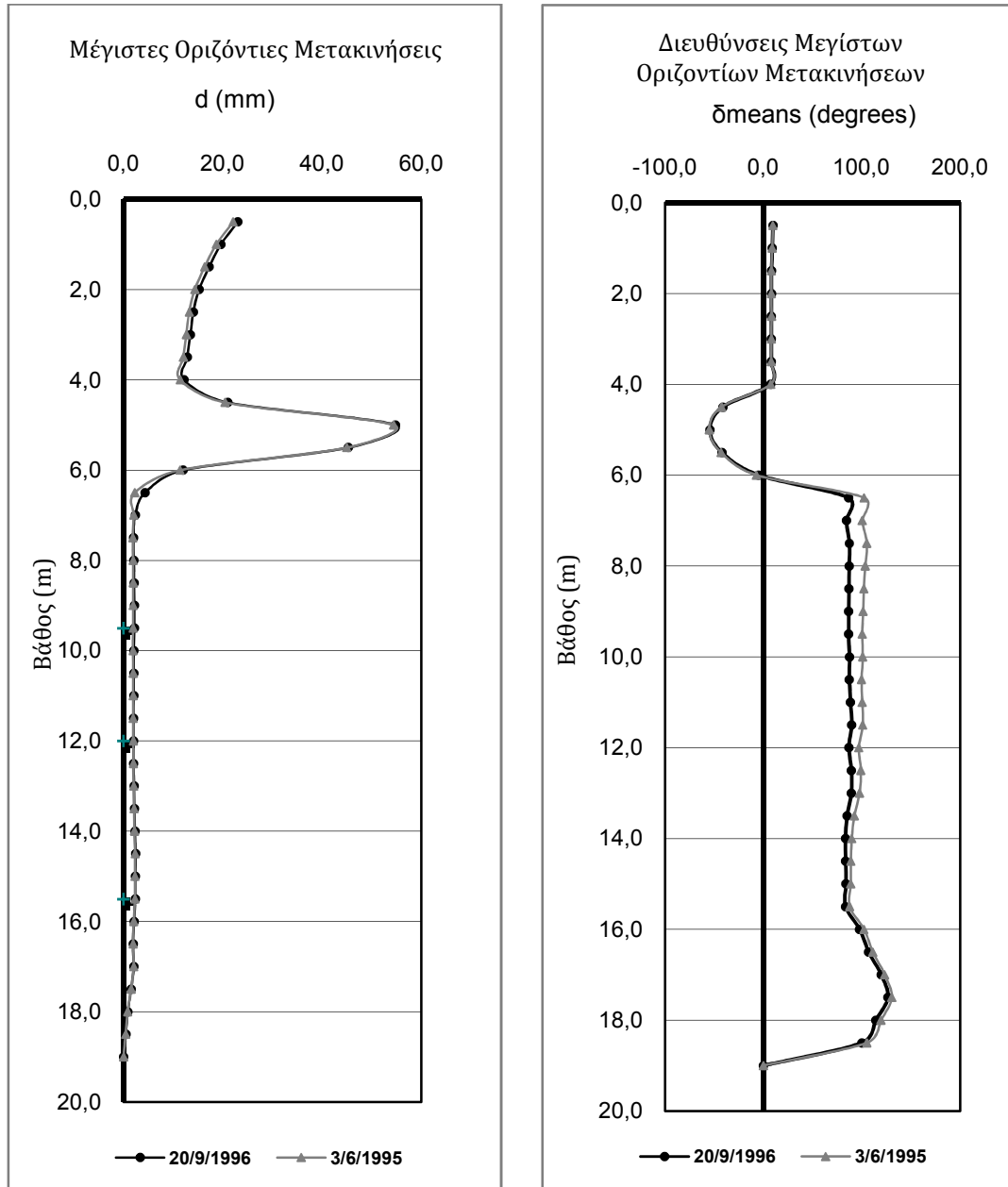
Με χρήση του Πυθαγορείου θεωρήματος και λαμβάνοντας υπόψη τις μετατοπίσεις του πασσάλου AO , BO από το κατακόρυφο επίπεδο των αξόνων της κύριας και συζυγούς εγκατάστασης του αποκλισιομέτρου, Σχήμα 2.12, υπολογίζεται η μέγιστη μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου ανά βήμα μέτρησης. Με βάση το τεταρτημόριο στο οποίο βρίσκονται κάθε φορά οι συντεταγμένες των κάθετων αξόνων που προϋπολογίστηκαν, γίνεται ο υπολογισμός της εκάστοτε γωνίας δ_{mean} , μέσω της οποίας εκφράζεται η διεύθυνση της εκάστοτε μέγιστης οριζόντιας μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου, Σχήμα 2.13. Βασικός παράγοντας καθίσταται και ο υπολογισμός της μέσης τιμής των παραπάνω γωνιών, δ_{aver} . Έτσι προσδιορίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις κατά τη μέση κύρια, αλλά και δευτερεύουσα, κάθετη στην κύρια, διεύθυνση, Σχήμα 2.14. Η επανάληψη της ίδιας διαδικασίας πραγματοποιείται και για τις δυο μετρήσεις.



(α)

(β)

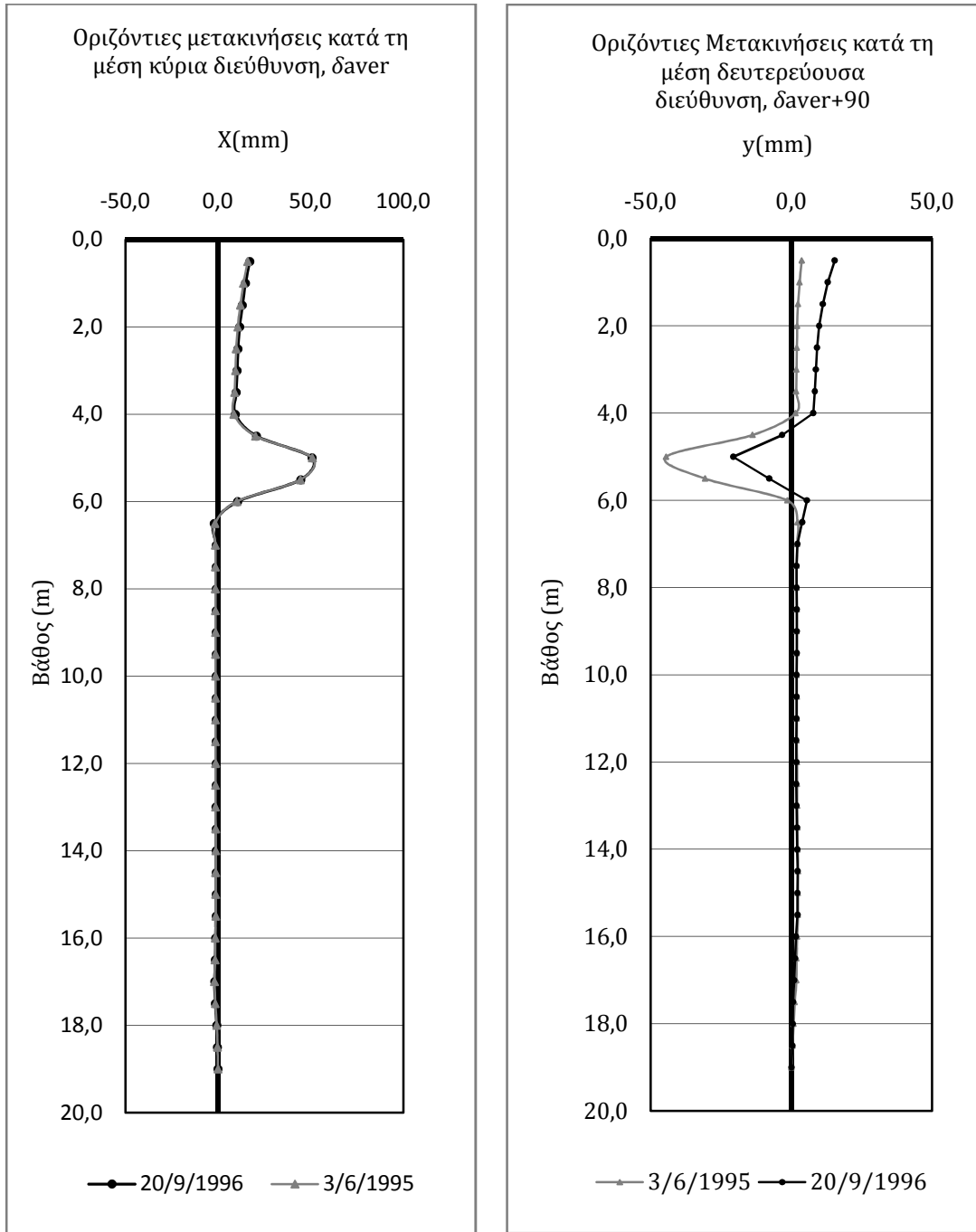
Σχήμα 2.12: Διαγραμματική απεικόνιση των κύριων αποστάσεων από το κατακόρυφο επίπεδο του (α) κύριου άξονα A0 και (β) του δευτερεύοντα B0, συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από την επεξεργασία και το συνδυασμό της κύριας και συζυγούς εγκατάστασης.



(α)

(β)

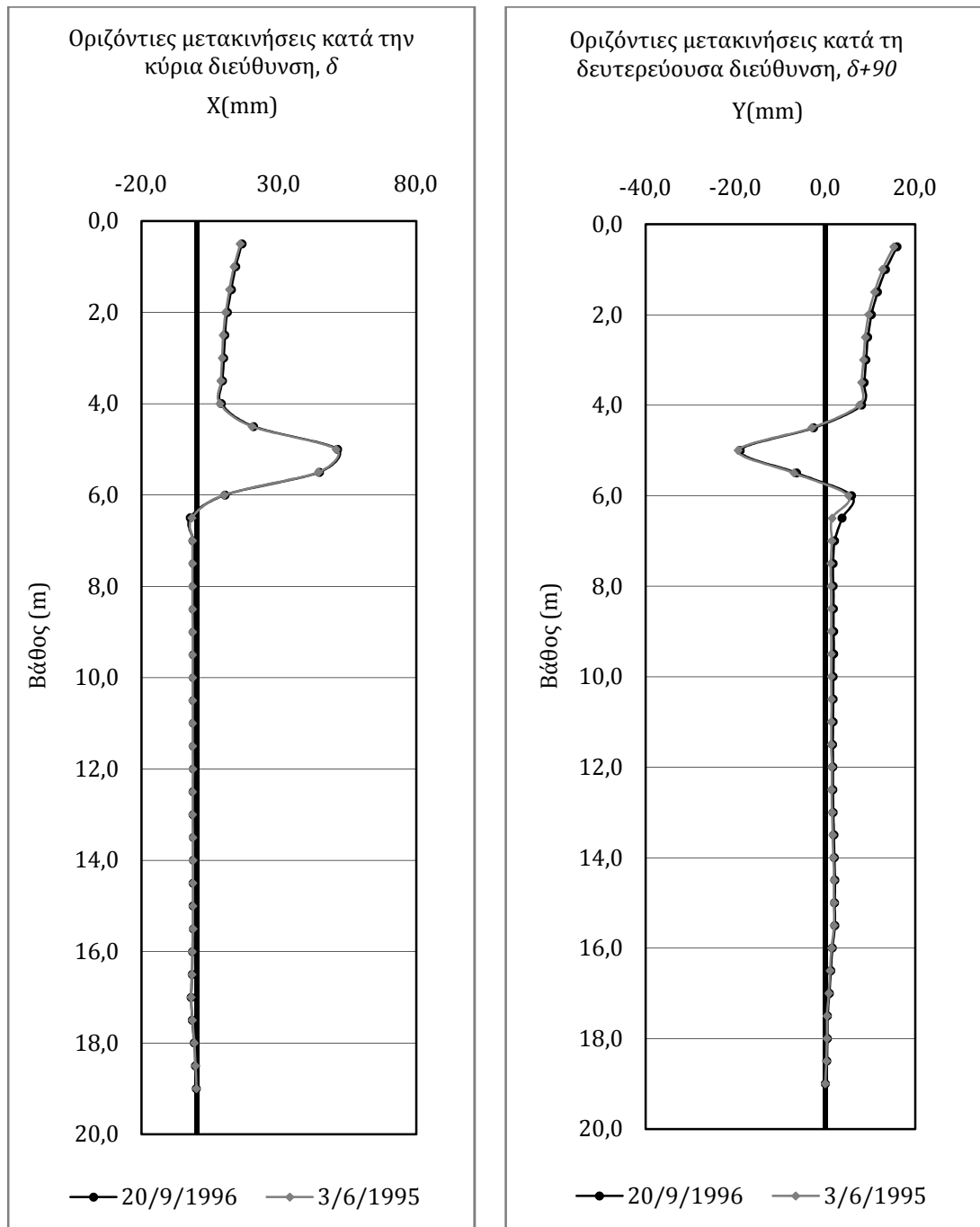
Σχήμα 2.13: Διαγραμματική απεικόνιση των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου (α), και (β) οι διευθύνσεις των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων ανά βήμα μέτρησης συναρτήσει του μήκους του πασσάλου.



(α)

(β)

Σχήμα 2.14: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων από το κατακόρυφο επίπεδο του πασσάλου συναρτήσει του μήκους του (α) κατά τη μέση κύρια διεύθυνση, δ_{aver} και (β) κατά τη μέση δευτερεύουσα διεύθυνση, κάθετη στην κύρια, $\delta_{aver+90}$.



(α)

(β)

Σχήμα 2.15: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου (α) κατά την κύρια διεύθυνση, δ και (β) κατά τη δευτερεύουσα, κάθετη στην κύρια διεύθυνση, $\delta+90$.

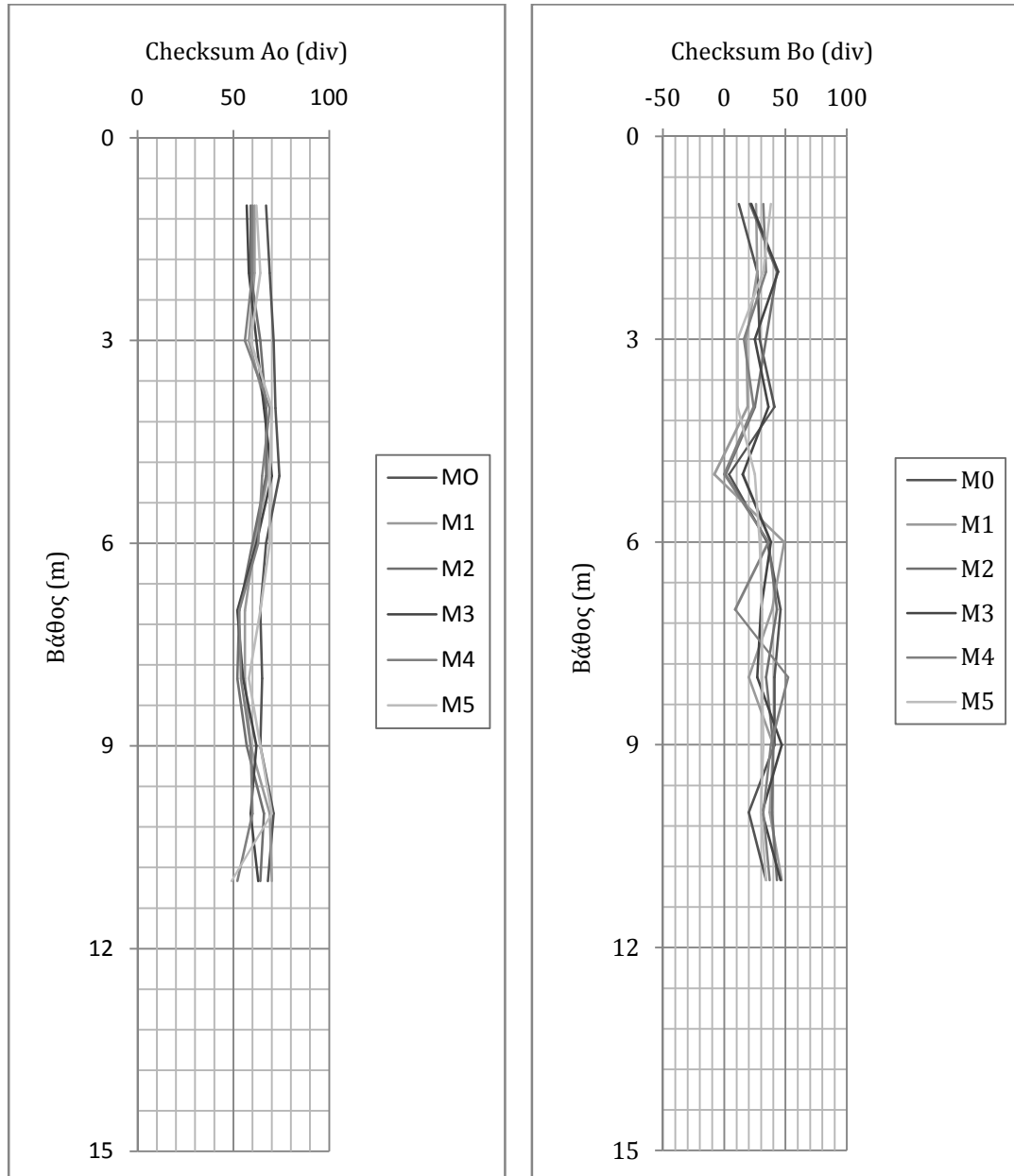
Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από τις διαφορετικές λήψεις των δεδομένων δεν είναι σημαντικές. Η όποια απόκλιση οφείλεται σε τυχαία σφάλματα ή εξαρτώνται από την παρέμβαση του χρόνου μεταξύ των μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση από τον κατακόρυφο άξονα του πασσάλου πλησιάζει τα 60mm σε βάθος 5m του πασσάλου, πράγμα που καθιστά την έρευνα των μετακινήσεων των στοιχείων θεμελίωσης σημαντική.

2.4 Επεξεργασία μετρήσεων: Δεδομένα απόκρισης πασσάλου

Συμπληρωματικά της προηγούμενης ανάλυσης του παραδείγματος γεώτρησης επισυνάπτεται το εξής δεύτερο παράδειγμα, του οποίου τα δεδομένα προκύπτουν από την απόκριση του πασσάλου έπειτα από τη δράση εγκάρσιας φόρτισης καθορισμένης τιμής. Η λήψη των στοιχείων πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια έξι μετρήσεων, η διεξαγωγή των οποίων επιτεύχθηκε σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Κάθε χρονική περίοδο ο πάσσαλος υπόκειται σε διαφορετική φόρτιση, ώστε να γίνει αντιληπτή η εξέλιξη της οριζόντιας μετακίνησής του.

Κατά την αρχική μέτρηση, η δύναμη που εφαρμόστηκε στην κεφαλή ήταν μηδενική. Συνεπώς, η αρχική μέτρηση εκφράζει την αρχική κατάσταση του πασσάλου. Έπειτα, στην πρώτη μέτρηση το μέτρο της δύναμης ισούταν με 100kN. Κατά τη διάρκεια των επόμενων μετρήσεων η δύναμη αυξανόταν και οι επόμενες τιμές που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής: 250kN, 300kN, 400kN και 470 kN.

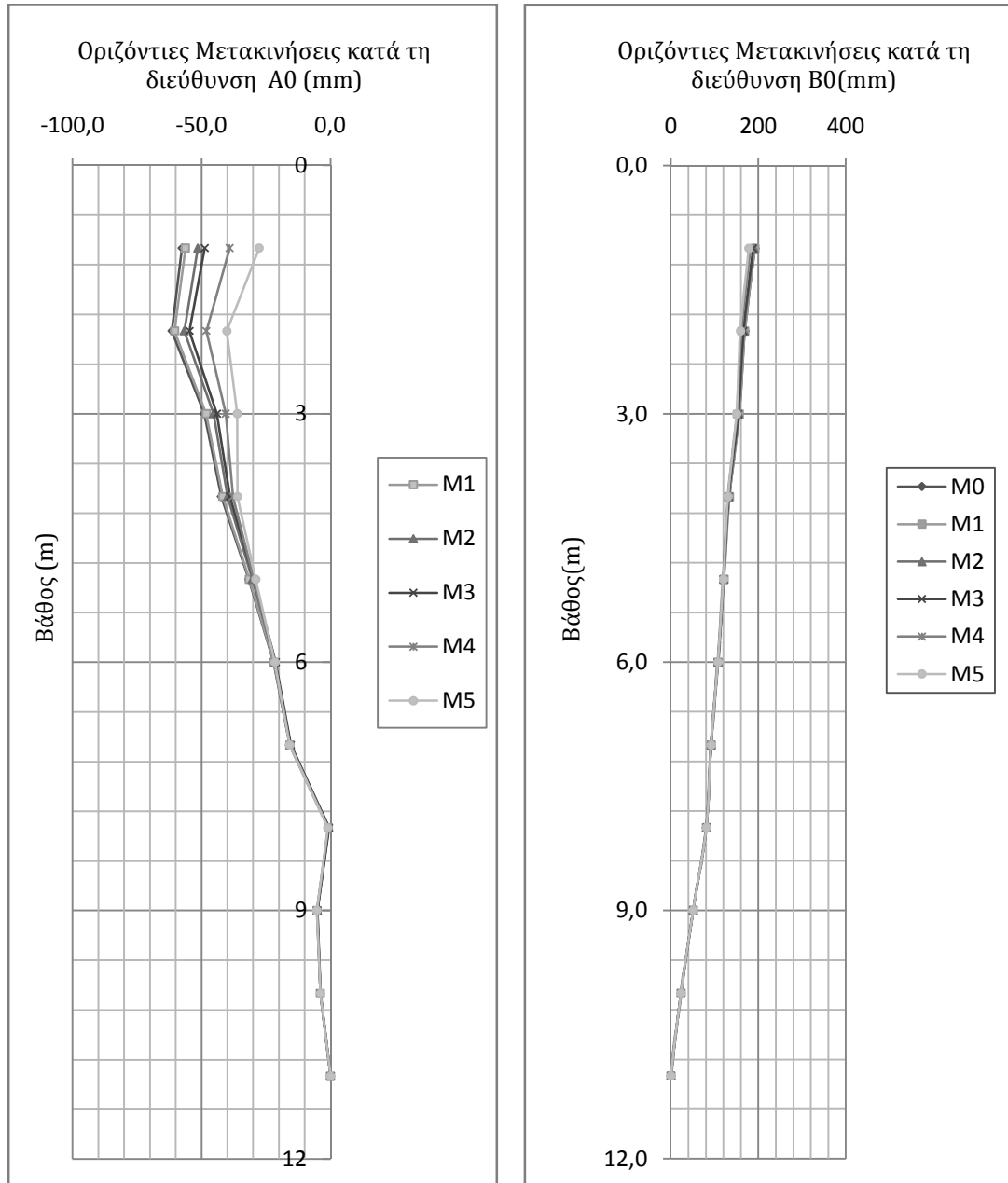
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την επεξεργασία των δεδομένων με στόχο την έκβαση διαγραμματικών αποτελεσμάτων ταυτίζεται με την προηγούμενη διαδικασία, κατά την οποία τα δεδομένα προήλθαν από τη χρήση αποκλισημετρικού σωλήνα. Στην προκειμένη περίπτωση δε χρησιμοποιείται συζυγής εγκατάσταση με σκοπό την απαλοιφή τυχόν σφαλμάτων. Παρόλα αυτά, λαμβάνεται υπόψη το αλγεβρικό άθροισμα των δεδομένων «Checksum performance», Σχήμα 2.16, σύμφωνα με το οποίο εξαλείφονται οι ενδείξεις των αισθητήρων με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό του σφάλματος. Εάν το σφάλμα μετά την αθροιστική διαδικασία παραμένει σταθερό τότε πρόκειται για κατασκευαστικό σφάλμα, το οποίο διορθώνεται με την επιπλέον αντίστροφη μέτρηση.



(α)

(β)

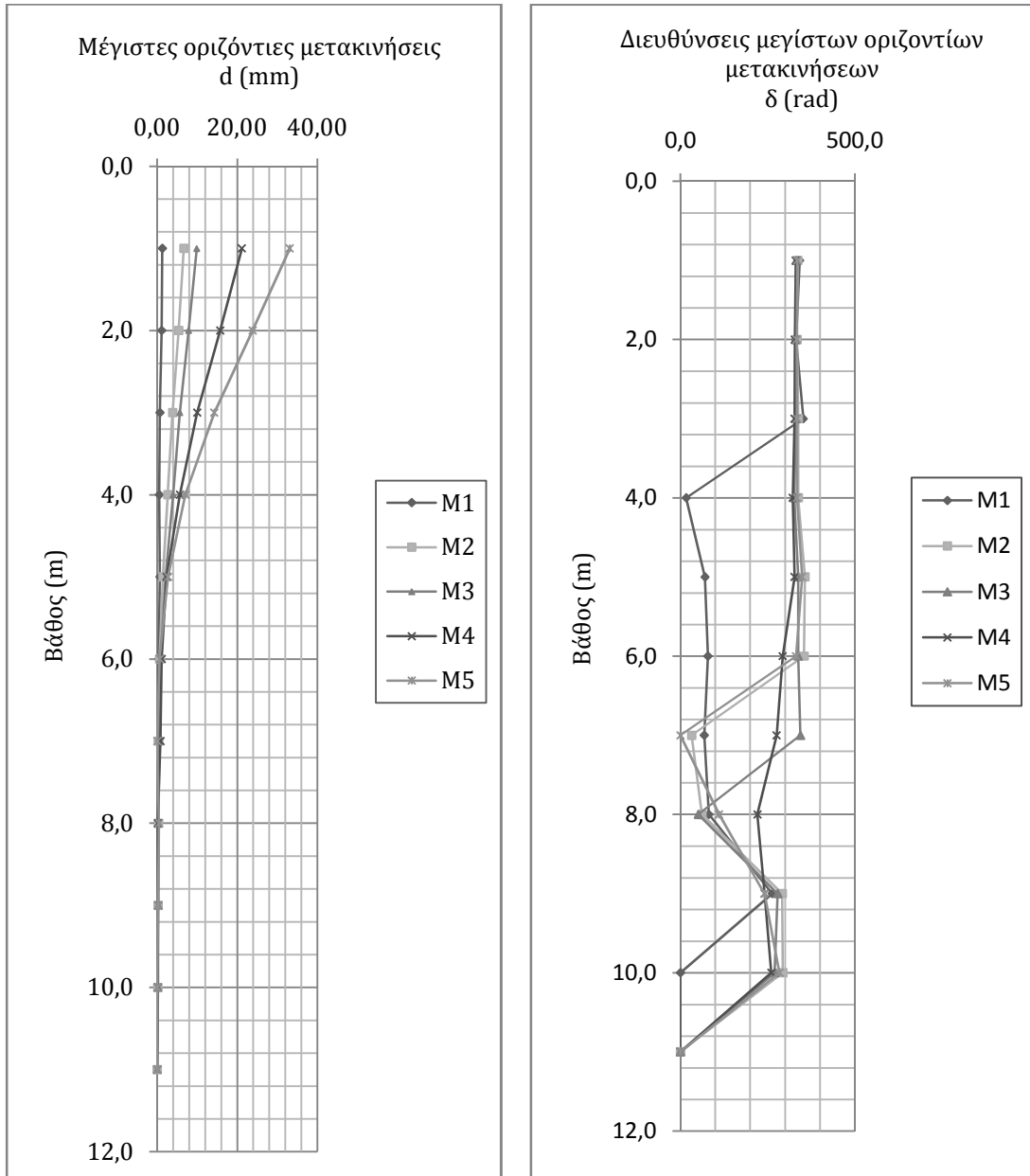
Σχήμα 2.16: Διαγραμματική απεικόνιση αθροιστικού ελέγχου (α) κατά τον κύριο άξονα του αποκλισιομέτρου A0-A180 και (β) κατά το δευτερεύοντα αυτού B0-B180.



(α)

(β)

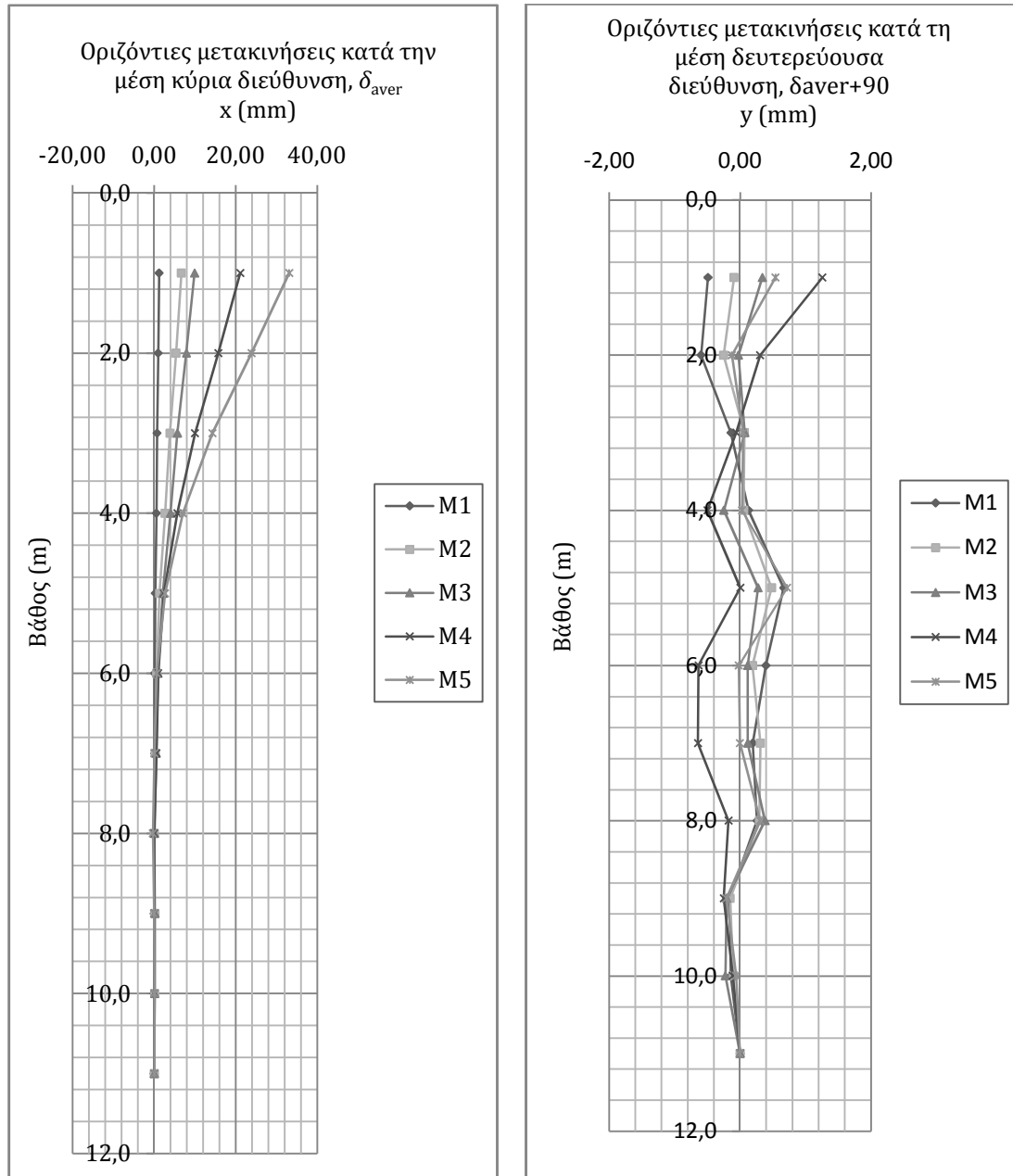
Σχήμα 2.17: Διαγραμματική απεικόνιση απόλυτων αποστάσεων από τον κατακόρυφο άξονα του πασσάλου και σύγκριση των μετρήσεων διεξαγωγής αποτελεσμάτων, (α) για τον κύριο άξονα Α0-Α180 και (β) και το δευτερεύοντα άξονα Β0-Β180.



(α)

(β)

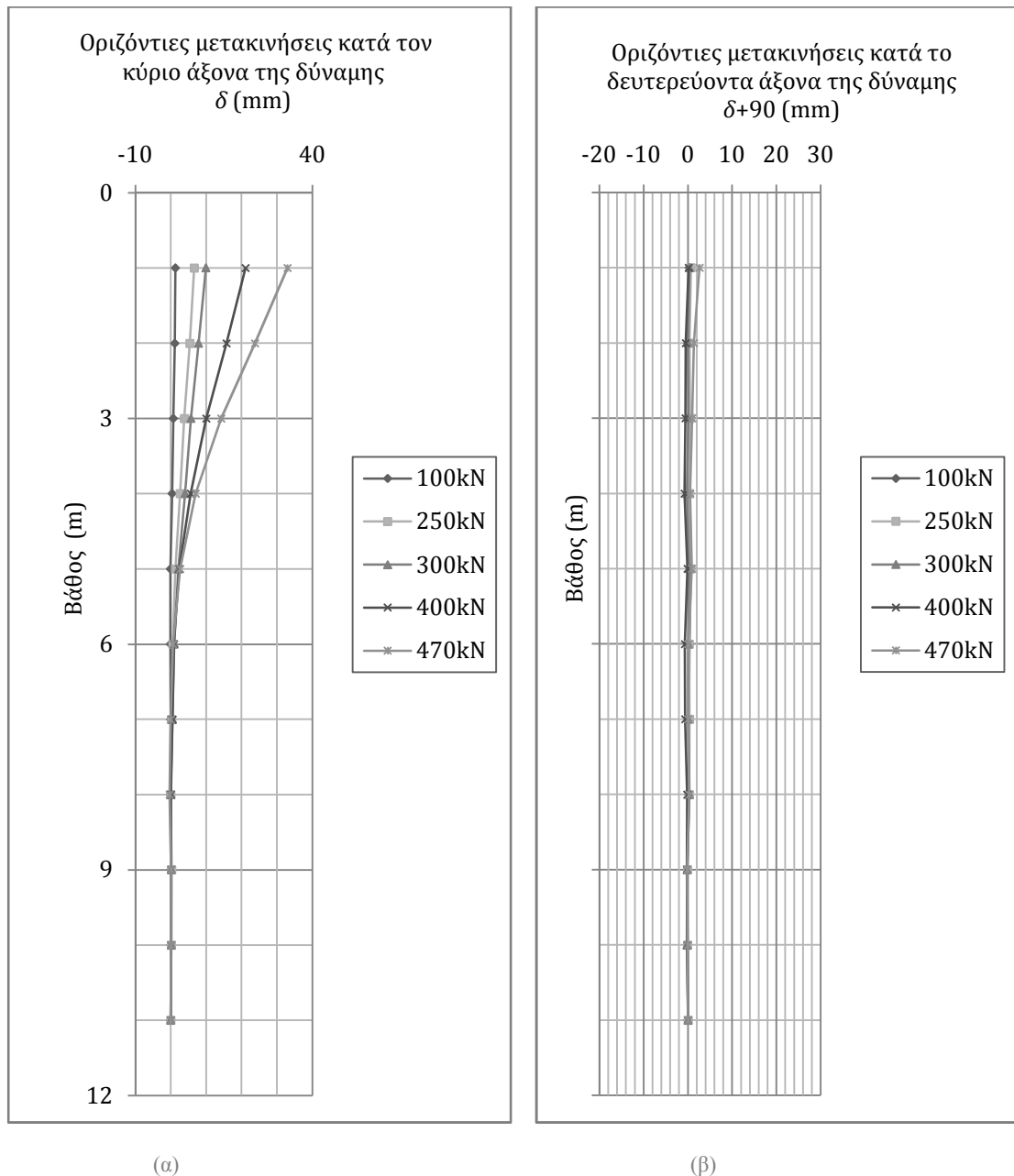
Σχήμα 2.18: Διαγραμματική απεικόνιση (α) των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου σε σύγκριση όλων των μετρήσεων και (β) των διευθύνσεων των μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων ανά βήμα φόρτισης.



(α)

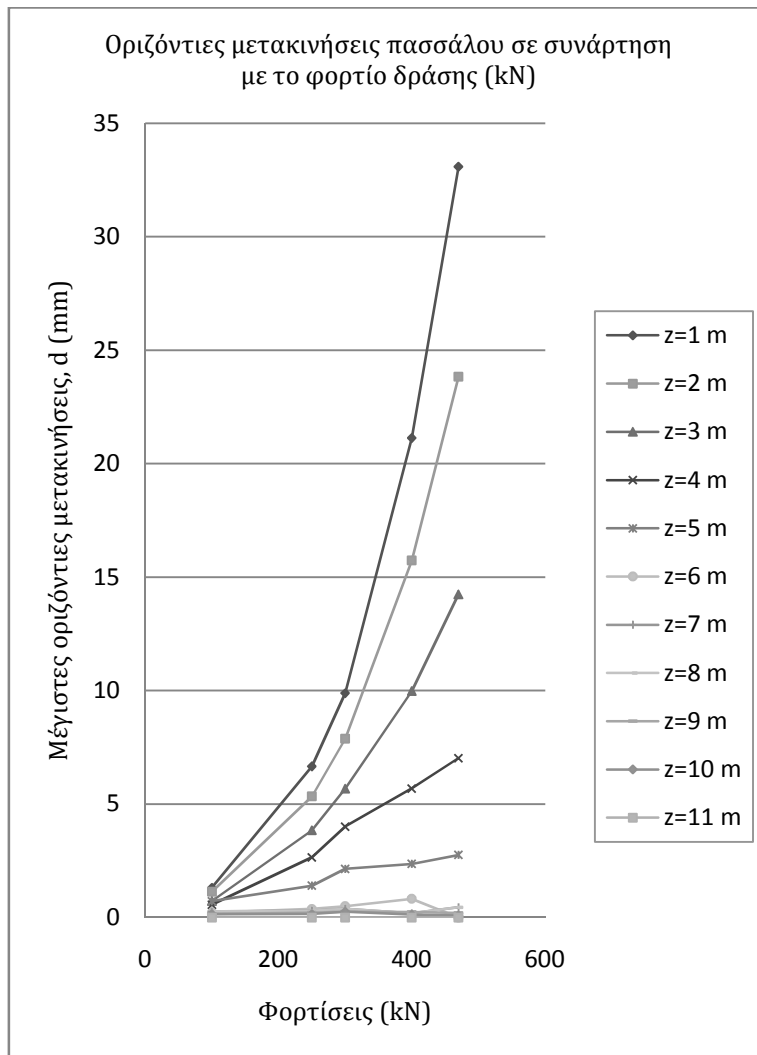
(β)

Σχήμα 2.19: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων (α) κατά τη μέση κύρια διεύθυνση δ_{aver} και (β) τη μέση δευτερεύουσα διεύθυνσης $\delta_{aver+90}$. Παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που διεξάχθηκαν.



Σχήμα 2.20: Διαγραμματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων (α) κατά την κύρια διεύθυνση εφαρμογής της εκάστοτε δύναμης, δ και (β) κατά τη δευτερεύουσα διεύθυνση, $\delta+90$.

Σημαντικό καθίσταται το διάγραμμα, Σχήμα 2.21, κατά το οποίο παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις σε σχέση με την τιμή της εγκάρσιας δοκιμαστικής φόρτισης, η οποία εφαρμόζεται στην κεφαλή του πασσάλου την εκάστοτε χρονική περίοδο. Σύμφωνα με αυτό, αναπαριστάται η εξέλιξη της οριζόντιας μετατόπισης με την πάροδο του χρόνου και την ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου αναλογικά του βάθους, στο οποίο πραγματοποιείται η δειγματοληψία. Δηλαδή, οι μετρηθείς μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες στην περιοχή κοντά στην κεφαλή του πασσάλου σε αντίθεση με την περιοχή της βάσης του πασσάλου.



Σχήμα 2.21: Διαγραμματική απεικόνιση οριζοντίων μετακινήσεων ανάλογα με την τιμή της εκάστοτε εγκάρσιας δοκιμαστικής φόρτισης σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας σε αντίθεση με την επόμενη κατηγορία αποκλισιομέτρου σταθερής θέσης είναι το γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής ακριβούς και λεπτομερούς σχεδιαγράμματος των μετακινήσεων, ώστε να μπορούν να εντοπίζονται σε οποιοδήποτε σημείο εμφανίζονται. Ο καθορισμός ενός μεγέθους, όπως η κατεύθυνση και ο ρυθμός της μετακίνησης είναι επιτρεπτός και προσδιορίζεται ανάλογα με το σύνολο των αναγνώσεων που λαμβάνονται για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ένα όργανο μπορεί να λάβει δεδομένα από οποιοδήποτε αριθμό γεωτρήσεων.

2.5 Αποκλισιόμετρο σταθερής θέσης

Ένα αποκλισιόμετρο σταθερής θέσης σε αντίθεση με το αποκλισιόμετρο βολίδας χρησιμοποιείται για συνεχείς, αυτόματες και εξ' αποστάσεως μετρήσεις μετακινήσεων κάθετων στη γεώτρηση. Όπως προαναφέρθηκε, ένα λεπτομερές διάγραμμα μετακινήσεων δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί εκτός και αν οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε πολύ κοντινά διαστήματα μεταξύ τους, πράγμα αντικοινωνικό και μη συμφέρον. Παρόλα αυτά αν απαιτείται ένα λεπτομερές διάγραμμα, τότε είναι δυνατόν να εγκατασταθεί ένας επιπλέον καθοδηγητικός σωλήνας ενός αποκλισιομέτρου βολίδας. Εκτός αυτού, δυνατή καθίσταται και η αφαίρεση των αισθητήρων του αποκλισιομέτρου σταθερής θέσης, ώστε να χρησιμοποιηθεί μόνο ο σωλήνας αποκλισιομέτρου βολίδας.

2.5.1 Τρόπος λειτουργίας

Το κάθε αποκλισίμετρο σταθερής θέσης αποτελείται από μία σειρά αισθητήρων με προσαρμοσμένες καθοδηγητικές ρόδες. Ο κάθε αισθητήρας περιλαμβάνει ένα μονοαξονικό ή διαξονικό αισθητήρα κλίσης, ο οποίος λειτουργεί με τη βαρύτητα και παράγει ηλεκτρικά σήματα. Μετρούν τις γωνιακές αποκλίσεις του άξονα της γεώτρησης, αφού ενωθούν με αρθρωμένες ράβδους και αναρτηθούν από έναν καθοδηγητικό σωλήνα πακτωμένο στη γεώτρηση. Κάθε αισθητήρας συνδέεται με την επιφάνεια του εδάφους μέσω ηλεκτρικών καλωδίων.

Η δειγματοληψία των αισθητήρων ελέγχεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα με μία εγκατεστημένη στο έδαφος ειδική κονσόλα. Αυτή μπορεί να συνδεθεί με σύστημα τηλεμετρίας για την εξ' αποστάσεως μετάδοση των μετρήσεων. Επιπλέον, ικανή είναι και η ενεργοποίηση συναγερμού σε περίπτωση που οι αποκλίσεις του σωλήνα ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο.

Αφού γίνει η δειγματοληψία και διορθωθούν οι μετρήσεις, μπορούν να υπολογιστούν οι αυξητικές μετακινήσεις του κεντρικού άξονα, όπως ακριβώς αναλύθηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Βέβαια, ένα διάγραμμα μετακίνησης ή μεταβολής της κλίσης, θ , συναρτήσει του βάθους του διατρήματος αποτελεί έναν ενδεικτικό οδηγό. Περισσότερο σημαντικό και κατάλληλο θεωρείται το διάγραμμα μεταβολής της κλίσης ή της μετακίνησης σε συνάρτηση με το χρόνο για κάθε αισθητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ενοργάνωση με οπτικές ίνες

Σκοπός των εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών στις υπόγειες κατασκευές και κατά επέκταση στο ευρύτερο σύνολο των κατασκευών είναι η παρακολούθηση τους για την εξασφάλιση της μεγαλύτερης δυνατής ασφάλειάς κατά το ελάχιστο δυνατό τρόπο. Τα συστήματα οπτικών ινών είναι ικανά να αποτιμούν την ακεραιότητα της κατασκευής κατά τη διάρκεια λειτουργίας της επιτρέποντας έτσι τις έγκαιρες ενέργειες συντήρησης για την αύξηση της ασφάλειας και ζωής της κατασκευής. Με την ανάπτυξή τους τα τελευταία χρόνια μπορούν να υπολογιστούν πολλά φυσικά μεγέθη. Βασικά τους χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδανικές είναι η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η ανθεκτικότητα και η ικανότητα κατανομής πολλών αισθητήρων σε μία οπτική ίνα.

Σημαντικές εφαρμογές συστημάτων οπτικών ινών έγιναν κατά τη διάρκεια κατασκευής υπογείων σηράγγων με στόχο την παρακολούθηση παραμορφώσεων, εδαφικών μετακινήσεων ή και ακόμα μετακινήσεων κτιρίων που εδράζονται στην περιοχή διάνοιξης των σηράγγων. Αξιοσημείωτες εφαρμογές επιτυγχάνονται ακόμα και σε συστήματα παρακολούθησης σημαντικών γεφυρών, όπως η κρεμαστή γέφυρα του Μανχάταν στη Νέα Υόρκη, η καλωδιωτή γέφυρα στο λιμάνι της Βενετίας και η γέφυρα Versoix κοντά στη Γενεύη.

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται η χρήση της εγκατάστασης οπτικών ινών για την ανίχνευση παραμορφώσεων του τοιχώματος πασσάλων κατά την υλοποίηση μίας υπόγειας κατασκευής. Σε επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια η διαδικασία εγκατάστασής των οπτικών ινών, καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων τους. Τα κατανεμημένα προφίλ των τάσεων, τα οποία προκύπτουν με την εγκατάσταση των οπτικών ινών στις δύο απέναντι πλευρές ενός πασσάλου, είναι δυνατό να παρουσιάσουν τις οριζόντιες και πλευρικές μετακινήσεις αυτού. Η δειγματοληψία μέσω οπτικών ινών υπερέχει σε ακρίβεια συγκριτικά με αυτή των αποκλισιομέτρων σε παρακείμενους πασσάλους, καθώς το βήμα λήψης των δεδομένων με τη χρήση των οπτικών ινών μπορεί να είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τη μέθοδο του αποκλισιομέτρου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός κατά το οποίο τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνικών είναι ακόμα υπό συζήτηση.

3.1 Λειτουργία οπτικών ινών

Η τεχνική αυτή καθιστά δυνατή τη μέτρηση της καταπόνησης δύο οπτικών ινών τοποθετημένες αντιδιαμετρικά ως προς τον άξονα του πασσάλου. Για το λόγο αυτό καθίσταται δυνατή και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς ενός διαφραγματικού τοίχου. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ακριβώς η δομή του προβλήματος. Υφίστανται δύο οπτικές ίνες a , b . Υποθέτοντας το γεγονός ότι το τοίχωμα παραμορφώνεται ελαστικά και λαμβάνοντας τις παραμορφώσεις των δυο οπτικών ινών ea και eb αντίστοιχα, είναι δυνατόν να υπολογιστούν σε κάθε θέση διεξαγωγής μιας δοκιμαστικής φόρτισης η καμπυλότητα, κ , η κλίση του πασσάλου, α και έπειτα η πλευρική του μετατόπιση, u . Επιπροσθέτως, μέσω της μέσης αξονικής παραμόρφωσης και την ολοκλήρωση αυτής υπολογίζεται και η κατακόρυφη μετατόπιση, w .

Οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών βασίζονται στην επίλυση των αόριστων ολοκληρωμάτων. Οι σταθερές A , B , C που προκύπτουν υπολογίζονται με τον συνυπολογισμό γνωστών συννοριακών συνθηκών.

$$\kappa = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{d} \quad (3.1)$$

$$a = \int \kappa dz + A \quad (3.2)$$

$$u = \int a dz + B \quad (3.3)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} \quad (3.4)$$

$$w = \int \bar{\varepsilon} dz + C \quad (3.5)$$

όπου,

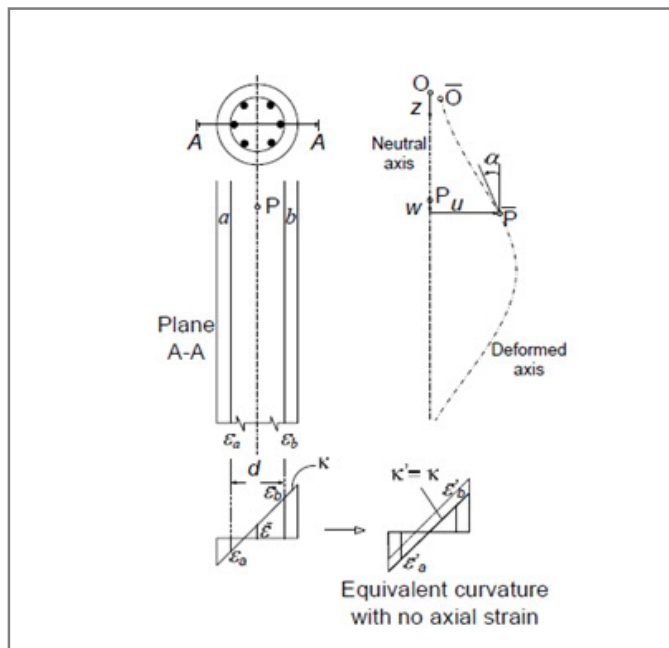
κ , η καμπυλότητα του πασσάλου

ε_a , ε_b , οι παραμορφώσεις των δύο απέναντι τοιχωμάτων, όπου τοποθετήθηκαν οι οπτικές ίνες a και b αντιστοίχως,

α , η κλίση του πασσάλου,

u , η οριζόντια μετακίνησή του, και

w , η κατακόρυφη μετακίνησή του.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση τομής A-A πασσάλου, η οποία αναπαριστά την παραμόρφωση του ουδέτερου άξονα του βασισμένη στην εντοργάνωση με οπτικές ίνες (Hisham Mohamad, Peter J.Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).

Σε μία τυχαία δοκιμαστική φόρτιση, η μέγιστη τιμή καμπυλότητας μπορεί επίσης να αντιστοιχηθεί με τη μέγιστη διαφορά των μηκών κύματος των δύο αντί διαμέτρου τοποθετούμενων αισθητήρων στο μικρότερο δυνατό βάθος, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.6.

$$\max\kappa = \frac{\max(\varepsilon b - \varepsilon \alpha)}{h} \rightarrow$$

$$\max\kappa = \frac{\max(\Delta l b - \Delta l \alpha)}{k \varepsilon * h} \quad (3.6)$$

όπου,

h , η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων οπτικών ινών a , b ,

Δl , η μεταβολή του μήκους κύματος των δύο αισθητήρων και,

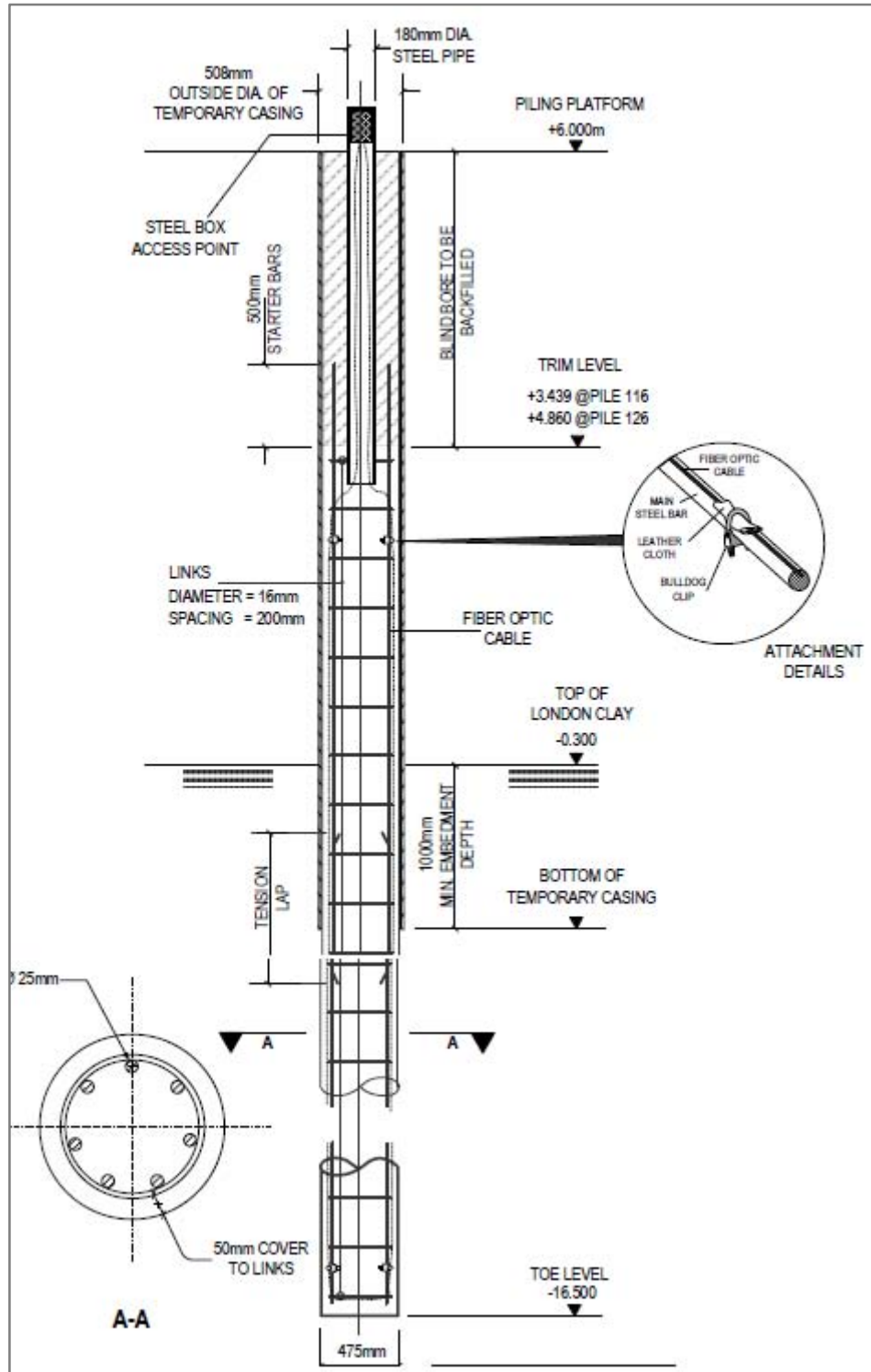
$k\varepsilon$, σταθερά που δίδεται από τον κατασκευαστή (ενδεικτική τιμή 1.2pm).

Η καταγραφή των παραμορφώσεων ενός πασσάλου γίνεται με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια (1/1.2 μ strain) μέσω της εγκατάστασης των αισθητήρων οπτικών ινών. Κατ' επέκταση, με την επιτυχή καταγραφή των παραμορφώσεων, εκτός από τον υπολογισμό των παραπάνω, δίνεται η ικανότητα υπολογισμού της αξονικής δύναμης και της εδαφικής πλευρικής αντίστασης σε κάθε βήμα φόρτισης που υλοποιείται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του πασσάλου. Επιπροσθέτως, με βάση την κατανομή της αξονικής δύναμης κατά μήκος του υπό δοκιμή πασσάλου είναι δυνατό να συντελέσει στον προσδιορισμό όχι μόνο της εντατικής και κινηματικής κατάστασης του πασσάλου, αλλά και των εδαφικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας.

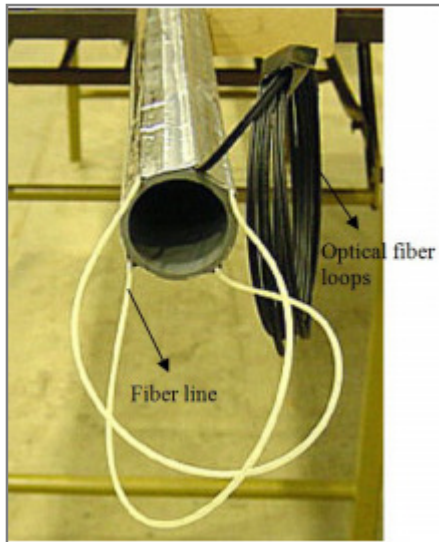
3.2 Εγκατάσταση

Για την εγκατάσταση των οπτικών ινών, χρησιμοποιείται ένας ανθεκτικός τύπος καλωδίου με υψηλή αντοχή υπό τις συνθήκες εγκατάστασης. Αποτελείται από τέσσερις οπτικές ίνες, ενισχυμένες με ζεύγη χαλύβδινων συρμάτων. Παρόλα αυτά μόνο μία ίνα χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με τον αναλυτή τάσης. Στη συνέχεια, το καλώδιο προσαρτάται κατά μήκος των δύο αντίθετων πλευρών του πασσάλου, Σχήμα 3.2, αφού πρώτα τοποθετηθεί και στηριχτεί στο κάτω μέρος του. Έπειτα, με τη σταδιακή προσαρμογή του σωλήνα στη γεώτρηση, το καλώδιο καλύπτει το μήκος των αντίθετων πλευρών. Όταν το πάνω μέρος του πασσάλου φτάσει το εδαφικό επίπεδο, τότε τα δύο τμήματα του καλωδίου υπόκεινται σε προένταση των 200με, ώστε να γίνει σύσφιξη αυτών στις γειτονικές ράβδους οπλισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση ανίχνευση των θέσεων τους κατά τη λήψη των δεδομένων.

Για την εξασφάλιση της επιβίωσης των οπτικών ινών κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, γίνεται χρήση ενός προστατευτικού σωλήνα από χάλυβα, ο οποίος δρα ενάντια στην καταστροφή του σκυροδέματος στην κορυφή του πασσάλου. Τα ελεύθερα άκρα του καλωδίου φυλάσσονται, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η πρόσβαση και η σύνδεση αυτών με τον αναλυτή τάσεων.



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση εγκατάστασης οπτικών ινών σε πάσσαλο. Παρουσίαση τομής A-A του πασσάλου που υπόκειται σε δοκιμαστική φόρτιση.

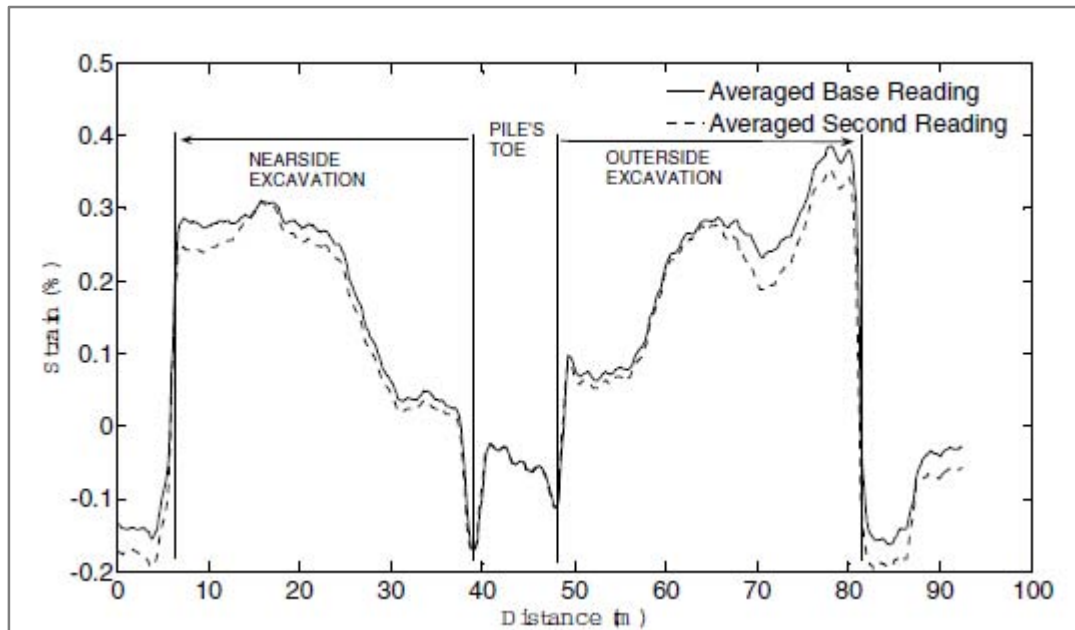


Σχήμα 3.3: Εργαστηριακή προσομοίωση προστατευτικού σωλήνα από χάλυβα.

3.3 Θερμοκρασιακή μεταβολή

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τον αναλυτή τάσεων επηρεάζονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, πράγμα που καθιστά την αντιστάθμιση-διόρθωση αυτής, σημαντική. Για αυτό το λόγο, ένα μικρό τμήμα του καλωδίου που βρίσκεται τοποθετημένο κατά μήκος του κάτω μέρους του πασσάλου χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τις μετρήσεις που οφείλονται σε θερμοκρασιακή μεταβολή. Έτσι, με τη λήψη των τιμών ανάγνωσης αυτού του τμήματος και με τη μετέπειτα σύγκριση τους με το μέσο όρο των επόμενων αναγνώσεων του ίδιου τμήματος, υπολογίζεται το θερμοκρασιακό ποσό που απαιτείται να διορθωθεί.

Οι μετρήσεις μετά την αντιστάθμιση-διόρθωση της θερμοκρασιακής μεταβολής φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.4, στο οποίο παρουσιάζεται ο μέσος όρος μίας μέτρησης πριν την εκσκαφή, καθώς και μίας μεταγενέστερης, δηλαδή μετά την εκσκαφή. Η κάθε μέτρηση επιτεύχθηκε τρεις φορές και ο μέσος όρος αυτών έχει ως σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας. Παρατηρείται ότι τα δείγματα που καταγράφηκαν και από τις δύο μετρήσεις στη βάση του πασσάλου είναι όμοια, ενώ αντιθέτως κατά μήκος των δύο αντίθετων πλευρών στη διάρκεια και των δύο εκσκαφών διαφοροποιούνται, καθώς ο πάσσαλος υφίσταται παραμόρφωση.

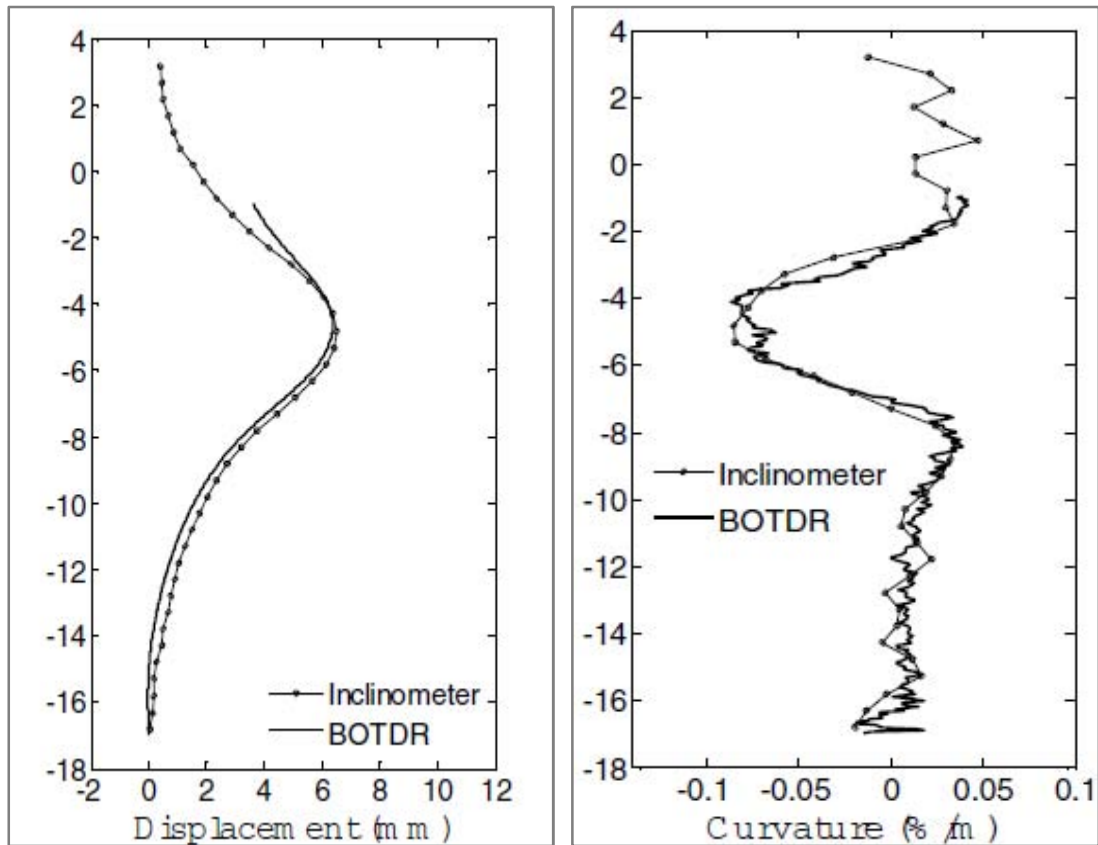


Σχήμα 3.4: Διαγραμματική αναπαράσταση του μέσου όρου μετρήσεων μετά τη διόρθωση της θερμοκρασιακής μεταβολής. Με τη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται ο μέσος όρος μετρήσεων κατά την πρώτη ανάγνωση πριν την εκσκαφή και με τη διακεκομμένη οι μετρήσεις της δεύτερης ανάγνωσης μετά την εκσκαφή (Hisham Mohamad, Peter J. Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).

3.4 Σύγκριση με τη μέθοδο των αποκλισιομέτρων

Μία βασική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στον τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνονται. Αναφορικά των οπτικών ινών, σύμφωνα με τους παραπάνω μαθηματικούς τύπους, η διαφορά των μετρήσεων της παραμόρφωσης των δύο απέναντι οπτικών ινών στις δύο πλευρές του πασσάλου, μετατρέπεται σε καμπυλότητα. Στη συνέχεια, με την ολοκλήρωση της καμπυλότητας λαμβάνεται το μέγεθος της κλίσης του πασσάλου, και έπειτα με τη διπλή ολοκλήρωση της η πλευρική του μετατόπιση αυτού. Σε περίπτωση που χρειάζεται να απλοποιηθεί το πρόβλημα, γίνεται η υπόθεση του σταθερού πασσάλου με αποτέλεσμα να μηδενίζονται οι σταθερές που προκύπτουν από τις προαναφερθείσες ολοκληρώσεις. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα που προκύπτουν από τη μέθοδο των αποκλισιομέτρων είναι δυνατό με τη διαφοροποίησή τους να δώσουν ως αποτέλεσμα το μέγεθος της καμπυλότητας του πασσάλου, ενώ ολοκληρώνοντάς τα έχουν ως αποτέλεσμα την πλευρική μετατόπιση αυτού.

Ως παράδειγμα σύγκρισης των δύο τεχνικών παρουσιάζεται η παρακολούθηση πασσάλων σε υπόγεια κατασκευή στο Λονδίνο. Συγκεκριμένα, πάσσαλοι μήκους 20m επεξεργάζονται με τη βοήθεια εγκατάστασης οπτικών ινών και χρήσης αποκλισιομέτρων. Για την υλοποίηση της σωστής, ρεαλιστικής σύγκρισης των δύο μεθόδων, Σχήμα 3.5 και Σχήμα 3.6, πρέπει οι ημερομηνίες των μετρήσεων τους να πλησιάζουν η μία την άλλη, όσο το δυνατόν περισσότερο. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής στα δεδομένα ή λαμβάνεται ο μέσος όρος μετρήσεων μεταξύ δύο ημερομηνιών. Στην προκειμένη περίπτωση οι μοναδικές ημερομηνίες λήψης μετρήσεων, οι οποίες καθιστούν μία τέτοια σύγκριση εφικτή ήταν στις 11/10/2005 και στις 8/11/2005. Σημειώνεται ότι οι πρώτες μετρήσεις αρχικής κατάστασης των πασσάλων επιτεύχθηκαν στις 12/09/2005. Δεν υφίσταται σωστή σύγκριση παρακείμενων πασσάλων αν τα δεδομένα δεν προέρχονται από την ίδια χρονική περίοδο.



(α)

(β)

Σχήμα 3.5: Διαγραμματική απεικόνιση σύγκρισης της τεχνικής των οπτικών ινών (BOTDR) με τη μέθοδο του αποκλισιομέτρου. Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου και στο (β) η καμπυλότητα του σε συνάρτηση με το μήκος (Hisham Mohamad, Peter J.Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar, Adam Pellow).

Τελικά, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων στα πλαίσια της πλευρικής μετακίνησης, της κλίσης και της καμπυλότητας του πασσάλου φαίνεται να είναι παρόμοια. Η διαφοροποίηση έγκειται στα διαγράμματα της διατμητικής δύναμης και κατά συνέπεια της ροπής κάμψης. Σχηματικά, τα διαγράμματα φαίνεται να είναι όμοια, καθώς διατηρούν τη μορφή «ζιγκ-ζαγκ» από τα επικείμενα φορτία. Όμως, οι δύο τεχνικές προσδίδουν διαφορετικές τιμές διατμητικών δυνάμεων μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της τεχνικής του αποκλισιομέτρου, σε αντίθεση με αυτά των οπτικών ινών, δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα. Ο λόγος για τον οποίο δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν αιχμηρές μεταβολές φορτίων οφείλεται στο βήμα λήψης των μετρήσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του αποκλισιομέτρου, η ανάγνωση των δεδομένων γίνεται ανά διάστημα μισού μέτρου. Αντιθέτως, αναφορικά των οπτικών ινών και ανάλογα με τον αναλυτή και την εγκατάσταση που χρησιμοποιείται, το βήμα λήψης των μετρήσεων ποικίλει και κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως και 0,25m. Για μία καλή μέτρηση απαιτούνται λήψεις ανά σημαντικά μικρότερα διαστήματα συγκριτικά με αυτά που χρησιμοποιούνται στα αποκλισιομέτρα, έτσι ώστε να γίνονται αντιληπτά αιχμηρά τοπικά φαινόμενα και να υπάρχει αισθητή βελτίωση της ακρίβειας.

3.4.1 Πλεονεκτήματα -Μειονεκτήματα οπτικών ινών

Αν και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται και από τις δύο τεχνικές κατά γενική ομολογία είναι παρόμοια, υπάρχει η δυνατότητα σημείωσης μερικών διαφορών στη χρήση

των οπτικών ινών που επισημαίνονται έναντι της συμβατικής τεχνικής των αποκλισιομέτρων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η άμεση μέτρηση της κατανομής της καμπυλότητας και κατά επέκταση της ροπής κάμψεως. Παρουσιάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια σε αντίθεση με τη διαφοροποίηση της κλίσης του πασσάλου από τα δεδομένα του αποκλισιομέτρου. Το ίδιο ισχύει και για την εξαγωγή του διαγράμματος της διατμητικής δύναμης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης των οπτικών ινών κατά τη μέτρηση της παραμόρφωσης ενός πασσάλου ή στην περίπτωση ενός διαφραγματικού τοίχου, είναι ότι το υπόγειο έργο είναι δυνατόν να παρακολουθείται πολύ καιρό μετά την κατασκευή του, δεδομένου ότι τα καλώδια οπτικών ινών μπορούν να ταφούν ή να μεταφερθούν σε αγωγό. Ως αποτέλεσμα διεξάγεται η διευκόλυνση της πρόσβασης σε αυτά από διάφορες τοποθεσίες. Επιπροσθέτως, η συμπεριφορά του έργου μπορεί να παρακολουθηθεί και σε μεταγενέστερη χρονική περίοδο, κάτι μη εφικτό στην περίπτωση των αποκλισιομέτρων.

Από την άλλη πλευρά, ως μειονέκτημα των οπτικών ινών είναι ο υπολογισμός της πλευρικής μετατόπισης, ο οποίος συνεπάγεται την ύπαρξη δύο συνοριακών συνθηκών, δηλαδή δύο σταθερών. Κατά την περίπτωση του αποκλισιομέτρου, απαιτείται η γνώση μόνο μίας σταθεράς. Επιπλέον, ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι για την πλήρη μελέτη απαιτείται η παρουσίαση του προφίλ παραμόρφωσης και των δύο απέναντι οπτικών ινών, δηλαδή των δύο απέναντι τοιχωμάτων.

Παρόλα τα παραπάνω, λόγω της απλής και γρήγορης τεχνικής εγκατάστασης, η ανίχνευση των δεδομένων στην τεχνική των οπτικών ινών σε πασσάλους καθίσταται το ίδιο πρακτική με τις μετρήσεις που λαμβάνονται από ένα αποκλισιόμετρο. Βέβαια, με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας, η τεχνική των οπτικών ινών είναι δυνατόν να γίνει ακόμα πιο ακριβής και οικονομικότερη στο εγγύς μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προσδιορισμός εξίσωσης από δεδομένα αποκλισιομέτρου

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα με χρήση του λογισμικού Microsoft Excel και της προγραμματιστικής γλώσσας αυτού Visual Basic. Στόχος ήταν η μελέτη του προφίλ παραμόρφωσης ενός πασσάλου όταν αυτός υπόκειται σε κάποια καταπόνηση, οριζόντια ή και κατακόρυφη. Επιπλέον, υπολογίστηκαν η καμπυλότητα, η κλίση, καθώς και οι μετακινήσεις του κεντρικού του άξονα ανά βήμα λήψης των δεδομένων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε και η αντίστροφη ανάλυση για την εξασφάλιση της ορθότητας

4.1 Προσδιορισμός προφίλ παραμόρφωσης

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, η λήψη των δεδομένων που χρησιμοποιούνται έγινε από παλαιότερη έρευνα, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η συνεργασία της χρήσης της μεθόδου των αποκλισιομετρικών σωλήνων και της τοποθέτησης οπτικών ινών κατά μήκος του πασσάλου. Στόχος είναι η εύρεση της τιμής της παραμόρφωσης οποιουδήποτε σημείου στο τοίχωμα του πασσάλου σε δεδομένο υψομετρικό επίπεδο. Ουσιαστικά, με την εισαγωγή των συντεταγμένων οποιουδήποτε σημείου πάνω στην περιφέρεια του πασσάλου επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της παραμόρφωσής του.

Η μαθηματική σχέση, Εξίσωση (4.1), σύμφωνα με την οποία περιγράφεται η παραμόρφωση του κατακόρυφου στοιχείου θεμελίωσης παρουσιάζεται με τη μορφή μιας πεπλεγμένης συνάρτησης δύο μεταβλητών.

$$\varepsilon_{a_i}^{z_i}(x, y) = a * x + b * y + c \quad (4.1)$$

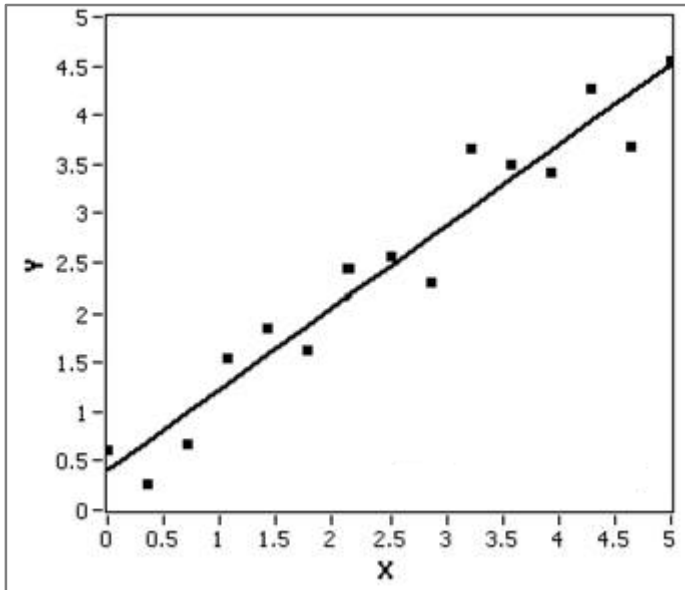
όπου,

ε_{a_i} , η αξονική παραμόρφωση,

x, y , οι μεταβλητές του εκάστοτε σημείου στο χώρο για δεδομένο υψομετρικό επίπεδο, z_i

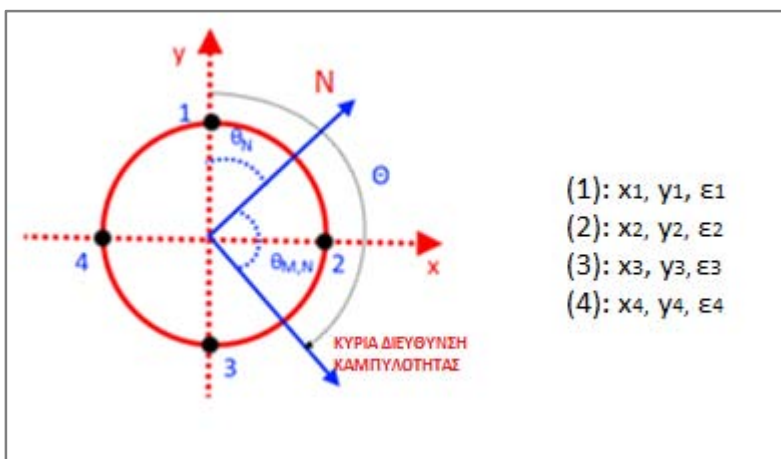
a, b, c , οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον πάσσαλο σε δεδομένο ύψος, z_i .

Η επίλυση της Εξίσωσης (4.1) βασίζεται στη θεωρία των ελάχιστων τετραγώνων. Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για την εύρεση της γραφικής παράστασης ενός φαινομένου έχοντας ως γνώση τις πειραματικές τιμές των μεταβλητών που το περιγράφουν και όχι την ακριβή μαθηματική τους σχέση. Ουσιαστικά, προσδιορίζεται η μορφή της άγνωστης μαθηματικής σχέσης, η οποία φαίνεται να ταιριάζει περισσότερο στα πειραματικά δεδομένα, Σχήμα 4.1. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, τα πειραματικά δεδομένα πρέπει τουλάχιστον να είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες και η σημειακή παραμόρφωση τριών σημείων στην περιφέρεια του πασσάλου. Βέβαια, όσο περισσότερα είναι τα σημεία, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια του αποτελέσματος. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων a, b, c που περιγράφουν τη γραμμική σχέση του φαινομένου της παραμόρφωσης ανά υψομετρικό επίπεδο.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα προσαρμογής ευθείας ελαχίστων τετραγώνων με πειραματικά δεδομένα δύο διαστάσεων.

Η επίλυση της εξίσωσης και ο υπολογισμός των παραμέτρων προϋποθέτει τη χρήση μερικών παραγώγων και της θεωρίας πινάκων. Αρχικά, γίνεται η τοποθέτηση των πειραματικών δεδομένων στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε σημείο στα τοιχώματα του πασσάλου διαθέτει τις δικές του συντεταγμένες και τιμή σημειακής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, στην εργασία που μελετάται, εξετάζονται ως δεδομένα δύο ζεύγη αντιδιαμετρικών σημείων ανά συγκεκριμένο βήμα μέτρησης, δηλαδή ύψους πασσάλου, z_i . Συγκεκριμένα, τα σημειακά αντί διαμέτρου ζεύγη είναι τα σημεία 1,3 και 2,4, Σχήμα 4.2. Η διατομή του πασσάλου σε κάτοψη αποτελείται από δύο κάθετους άξονες. Ο κύριος άξονας εκφράζει τη απόκλιση του πασσάλου, θ_N σε σχέση με τη διεύθυνση του Βορρά και ο δευτερεύοντας την κύρια διεύθυνση καμπυλότητας, θ_{MN} .



Σχήμα 4.2: Διατομή του πασσάλου σε κάτοψη, όπου 1,2,3,4 τα σημεία που λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, θ_N η απόκλιση από το Βορρά και θ_{MN} η διεύθυνση καμπυλότητας.

Μετά την τοποθέτηση των σημείων στο γράφημα και τον προσδιορισμό της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίζεται το άθροισμα των αποστάσεων, D , κάθε πειραματικού συνόλου από την ευθεία ϵ_a , Εξίσωση (4.2). Η Εξίσωσης (4.1) αντικαθιστά στη συνέχεια τον

παράγοντα $\varepsilon_a(x,y)$ στην (4.2), η οποία έπειτα ελαχιστοποιείται με τη χρήση των μερικών παραγώγων.

$$D = [\varepsilon_1 - (\varepsilon_a(x_1, y_1))]^2 + [\varepsilon_2 - (\varepsilon_a(x_2, y_2))]^2 + [\varepsilon_3 - (\varepsilon_a(x_3, y_3))]^2 + [\varepsilon_4 - (\varepsilon_a(x_4, y_4))]^2 \quad (4.2)$$

$$D = (\varepsilon_1 - ax_1 - by_1 - c)^2 + (\varepsilon_2 - ax_2 - by_2 - c)^2 + (\varepsilon_3 - ax_3 - by_3 - c)^2 + (\varepsilon_4 - ax_4 - by_4 - c)^2 \quad (4.3)$$

Η λύση της Εξίσωσης (4.3) προσδιορίζεται για την ελάχιστη τιμή της απόστασης των πειραματικών σημείων από την ευθεία. Συνεπώς, ελαχιστοποιείται μέσω της μερικής παραγωγισής της ως προς τους συντελεστές, a , b , c .

$$\frac{\partial D}{\partial a} = 0 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} & 2x_1^2 a + 2x_1 y_1 b + 2x_1 c - 2x_1 \varepsilon_1 + \\ & 2x_2^2 a + 2x_2 y_2 b + 2x_2 c - 2x_2 \varepsilon_2 + \\ & 2x_3^2 a + 2x_3 y_3 b + 2x_3 c - 2x_3 \varepsilon_3 + \\ & 2x_4^2 a + 2x_4 y_4 b + 2x_4 c - 2x_4 \varepsilon_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial b} = 0 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} & 2x_1 y_1 a + 2y_1^2 b + 2y_1 c - 2y_1 \varepsilon_1 + \\ & 2x_2 y_2 a + 2y_2^2 b + 2y_2 c - 2y_2 \varepsilon_2 + \\ & 2x_3 y_3 a + 2y_3^2 b + 2y_3 c - 2y_3 \varepsilon_3 + \\ & 2x_4 y_4 a + 2y_4^2 b + 2y_4 c - 2y_4 \varepsilon_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial D}{\partial c} = 0 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} & 2x_1 a + 2y_1 b + 2c - 2\varepsilon_1 + \\ & 2x_2 a + 2y_2 b + 2c - 2\varepsilon_2 + \\ & 2x_3 a + 2y_3 b + 2c - 2\varepsilon_3 + \\ & 2x_4 a + 2y_4 b + 2c - 2\varepsilon_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Μετά τη μόρφωση των εξισώσεων, για την επίλυση του συστήματος που σχηματίζουν χρησιμοποιείται η θεωρία πινάκων ώστε να προσδιοριστούν οι άγνωστοι a , b , c . Πρόκειται για τετραγωνικό πίνακα διάστασης 3×3 , Εξίσωση (4.7), για του οποίου η επίλυση επιτεύχθηκε μέσα στα πλαίσια της γλώσσας Visual Basic του λογισμικού Microsoft

Excel. Ο κώδικας επισυνάπτεται στο παράρτημα Α στο τέλος της μελέτης. Τα στοιχεία του πίνακα παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\begin{pmatrix} A(1,1) & A(1,2) & A(1,3) \\ A(2,1) & A(2,2) & A(2,3) \\ A(3,1) & A(3,2) & A(3,3) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B(1,1) \\ B(1,2) \\ B(1,3) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

όπου,

$$A(1,1) = 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2 + 2x_4^2$$

$$A(1,2) = 2x_1y_1 + 2x_2y_2 + 2x_3y_3 + 2x_4y_4$$

$$A(1,3) = 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4$$

$$A(2,1) = 2x_1y_1 + 2x_2y_2 + 2x_3y_3 + 2x_4y_4$$

$$A(2,2) = 2y_1^2 + 2y_2^2 + 2y_3^2 + 2y_4^2$$

$$A(2,3) = 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + 2y_4$$

$$A(3,1) = 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2x_4$$

$$A(3,2) = 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + 2y_4$$

$$A(3,3) = 8$$

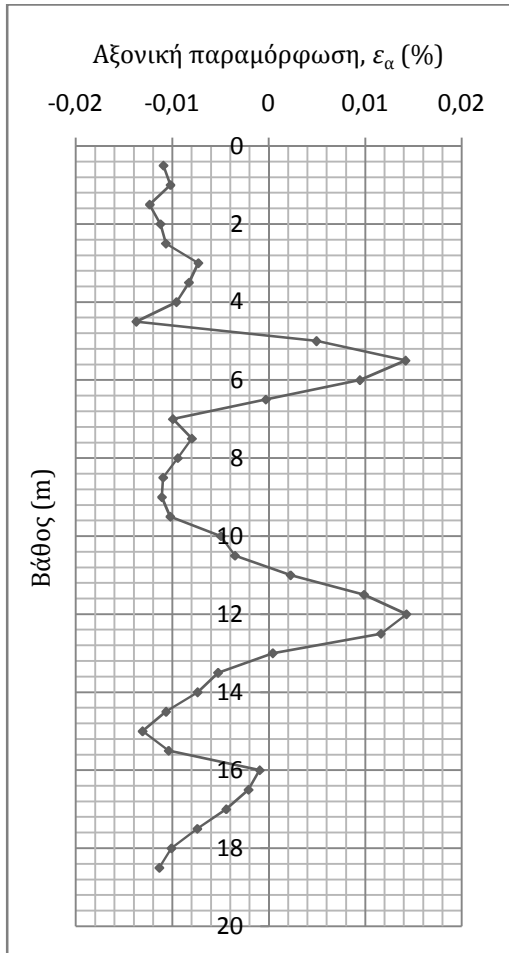
$$B(1,1) = 2x_1\varepsilon_1 + 2x_2\varepsilon_2 + 2x_3\varepsilon_3 + 2x_4\varepsilon_4$$

$$B(2,2) = 2y_1\varepsilon_1 + 2y_2\varepsilon_2 + 2y_3\varepsilon_3 + 2y_4\varepsilon_4$$

$$B(3,1) = 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3 + 2\varepsilon_4$$

Η επίλυση επαναλαμβάνεται για οποιοδήποτε αριθμό δεδομένων και μήκος πασσάλου. Το αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός των άγνωστων συντελεστών ανά τμήμα μήκους εισαγωγής συντεταγμένων και σημειακής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του κεντρικού άξονα του πασσάλου που, γνωρίζοντας ήδη τις συντεταγμένες δύο σημειακών ζευγών τοποθετούμενων αντιδιαμετρικά στην περιφέρειά του. Με βάση αυτές τις συντεταγμένες, χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.1) με σκοπό τον υπολογισμό και τη διαγραμματική απεικόνιση, Σχήμα 4.3, της αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει του μήκους του πασσάλου.

Στην προκείμενο παράδειγμα, τα δεδομένα λήφθηκαν από τον συνδυασμό ενοργάνωσης με αποκλισημετρικούς σωλήνες και οπτικές ίνες σε παρακολούθηση πασσάλου μήκους 18,5m.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απεικόνισης της αξονικής παραμόρφωσης, ε_a , του κέντρου πασσάλου μήκους 18,5m με δεδομένα από αποκλισημετρικούς σωλήνες και εγκατάσταση οπτικών ινών.

4.2 Προσδιορισμός δευτερευόντων χαρακτηριστικών μεγεθών

Η προσέγγιση αυτή είναι σε θέση να δώσει ακριβή αποτελέσματα αναφορικά των μικρών μετακινήσεων και των επικείμενων καμπυλοτήτων ενός πασσάλου. Ο κύριος και τελικός στόχος είναι η εύρεση των μετακινήσεων, οι οποίες σε περίπτωση αύξησής τους παρουσιάζεται ο κίνδυνος ρηγμάτωσης της υπό μελέτη διατομής. Ως αποτέλεσμα προκαλείται μείωση της δυσκαμψίας. Η απόρροια της αγνόησης του φαινομένου οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα, καθώς η διατομή αναλαμβάνει στην ανάλυση διαφορετικά εντατικά μεγέθη συγκριτικά με αυτά που της αναλογούν.

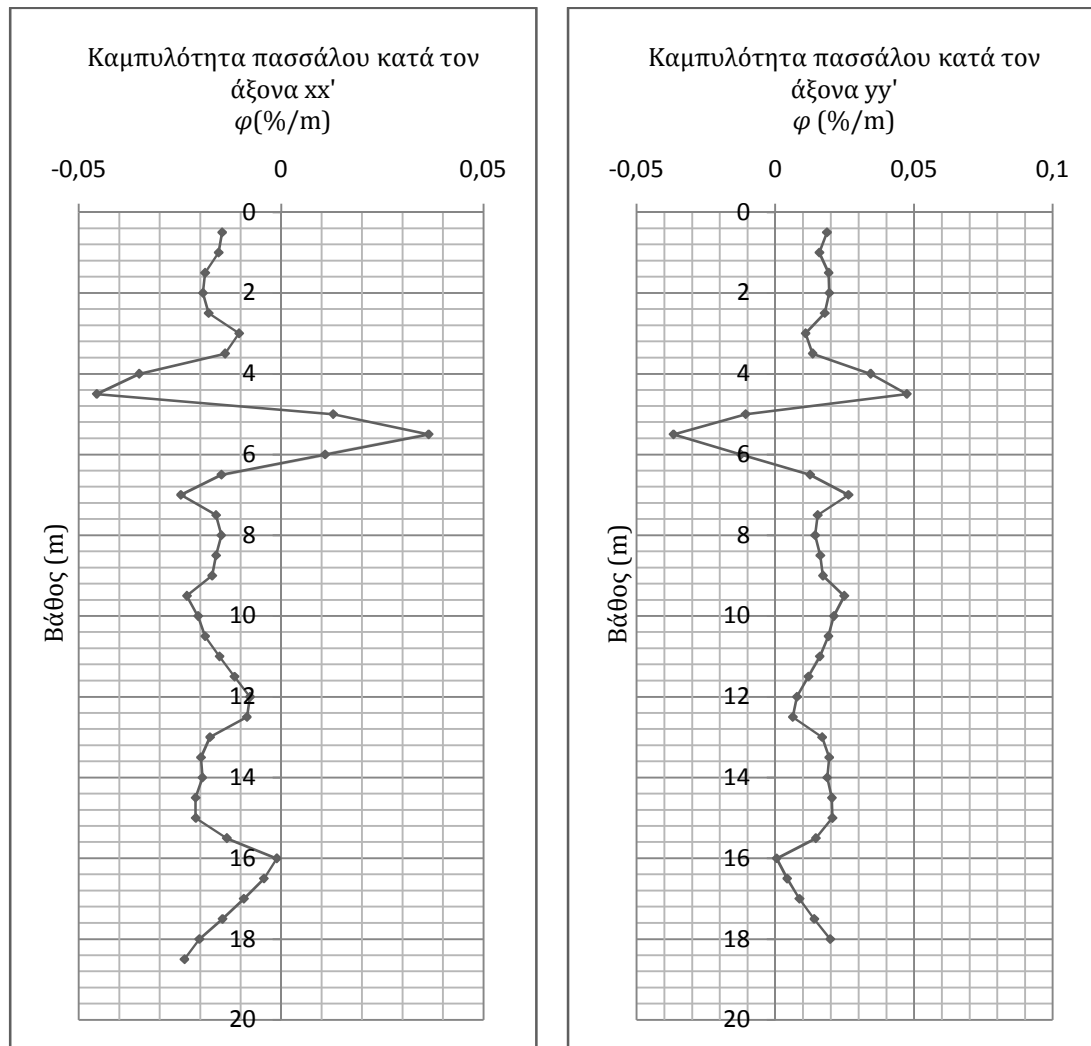
4.2.1 Εξέλιξη καμπυλότητας- Κλίση πασσάλου

Μετά τον αναλυτικό υπολογισμό του προφίλ παραμόρφωσης είναι δυνατό να υπολογιστεί η καμπυλότητα του πασσάλου, η κλίση αυτού και στη συνέχεια οποιαδήποτε οριζόντια μετακίνηση. Η δεδομένη διάμετρος, D , που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ισούται με 0,6m.

Μέσω των πειραματικών δεδομένων και συγκεκριμένα της χρήσης των αξονικών τιμών παραμόρφωσης δύο αντιδιαμετρικών σημείων του πασσάλου, υπολογίζεται η καμπυλότητα, φ . Στη συνέχεια, ολοκληρώνοντας την τιμή της καμπυλότητας σε κάθε βήμα εισαγωγής νέων δεδομένων προκύπτει η κλίση, α . Με τον υπολογισμό της καμπυλότητας στο υψομετρικό επίπεδο κάθε ζεύγους σημείων προκύπτει σε μεταγενέστερο στάδιο η επικρατούσα καμπτική ροπή. Στην περίπτωση που η διατομή υφίσταται ρηγμάτωση, τότε η

αναλυτική διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη. Σε αυτή την εργασία το πρόβλημα απλοποιείται, καθώς αναιρείται ο κίνδυνος της ρηγματώσης. Επιπλέον, η ολοκλήρωση των πραγματικών τιμών έγινε χρησιμοποιώντας τον τραπεζοειδή κανόνα, ενώ η διαφορική μέθοδος βασίζεται στις κεντρικές διαφορές. Οι υπολογισμοί και η διαγραμματική αναπαράσταση της καμπυλότητας, Σχήμα 4.4, και της κλίσης, Σχήμα 4.5, πραγματοποιήθηκαν και για τους δύο κάθετους άξονες της διατομής του πασσάλου.

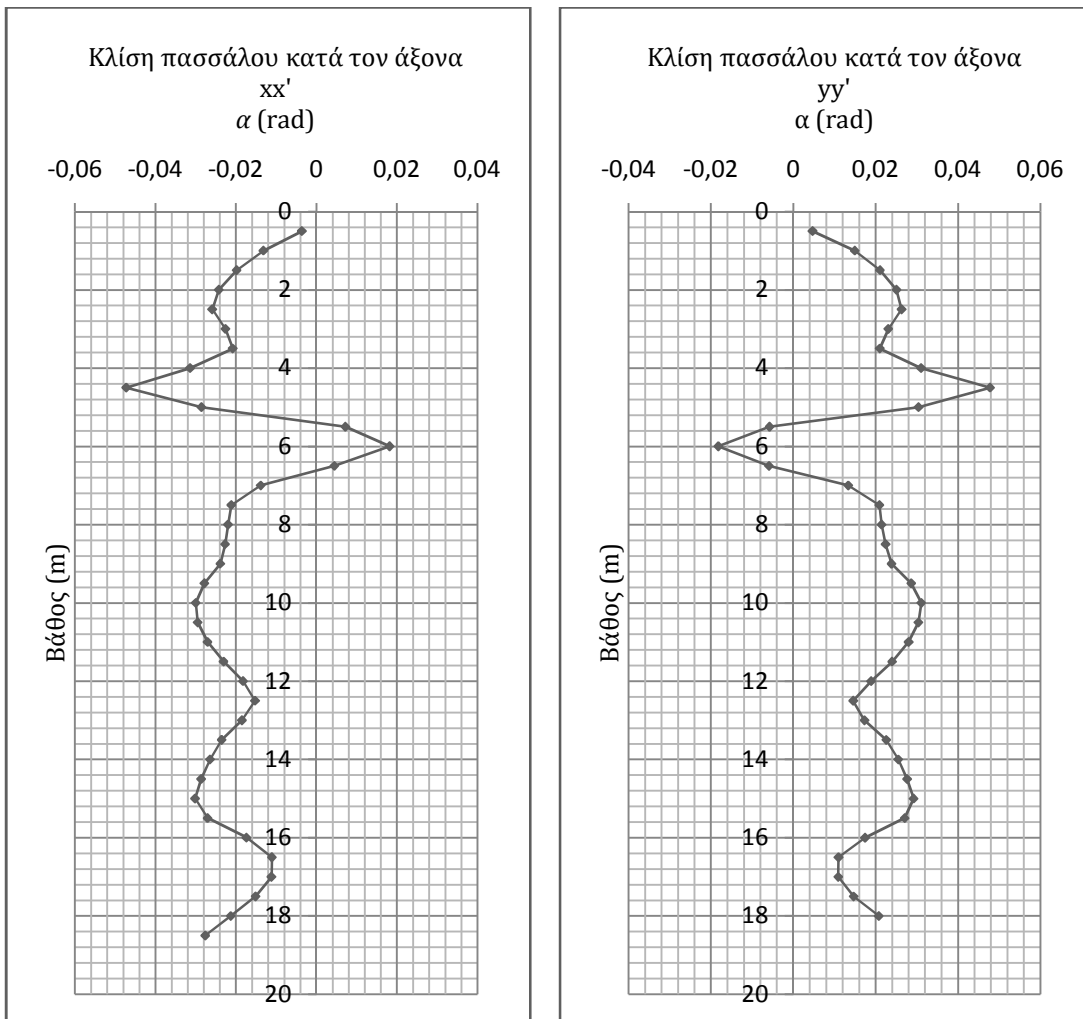
Στην περίπτωση που η οριζόντια μετακίνηση ήταν εξ' αρχής γνωστή, τότε για τον υπολογισμό της καμπυλότητας απαιτείται η διπλή διαφοροποίηση της.



(α)

(β)

Σχήμα 4.4: Διαγραμματική απεικόνιση καμπυλότητας πασσάλου μήκους 18,5m κατά τον (α) άξονα xx' και (β) κάθετο σε αυτόν άξονα yy' .

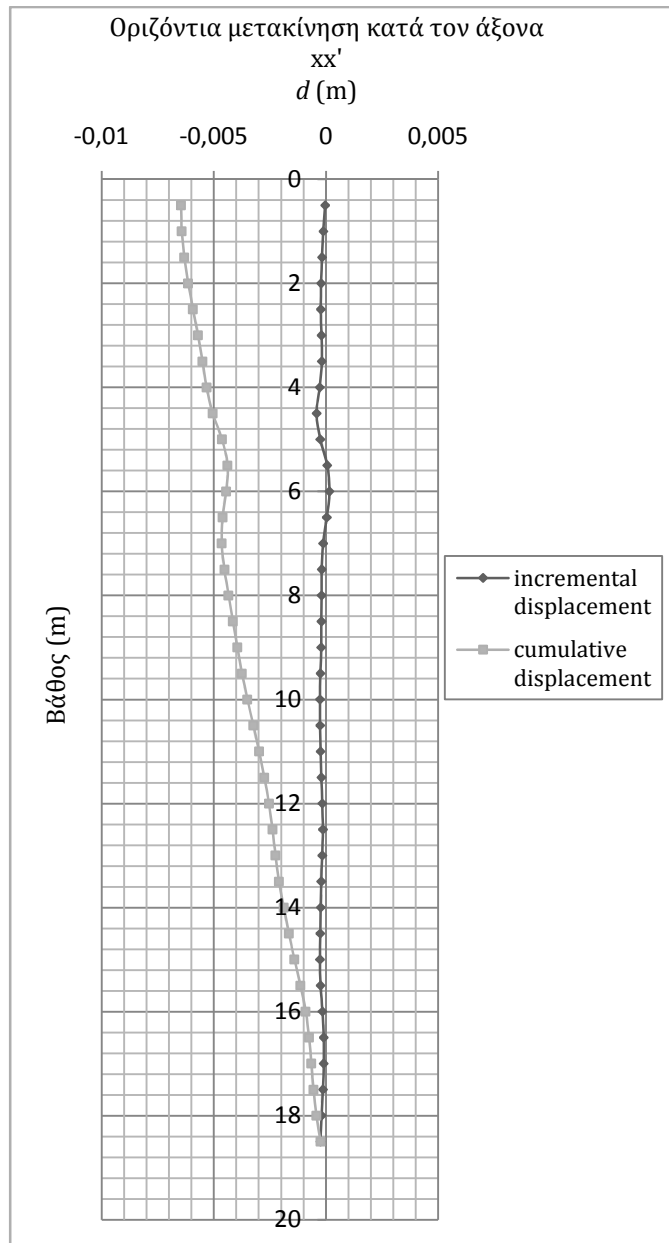


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα κλίσεων, α , του πασσάλου μήκους 18,5m κατά τον (α) άξονα xx' και (β) κατά τον κάθετο σε αυτόν άξονα yy' .

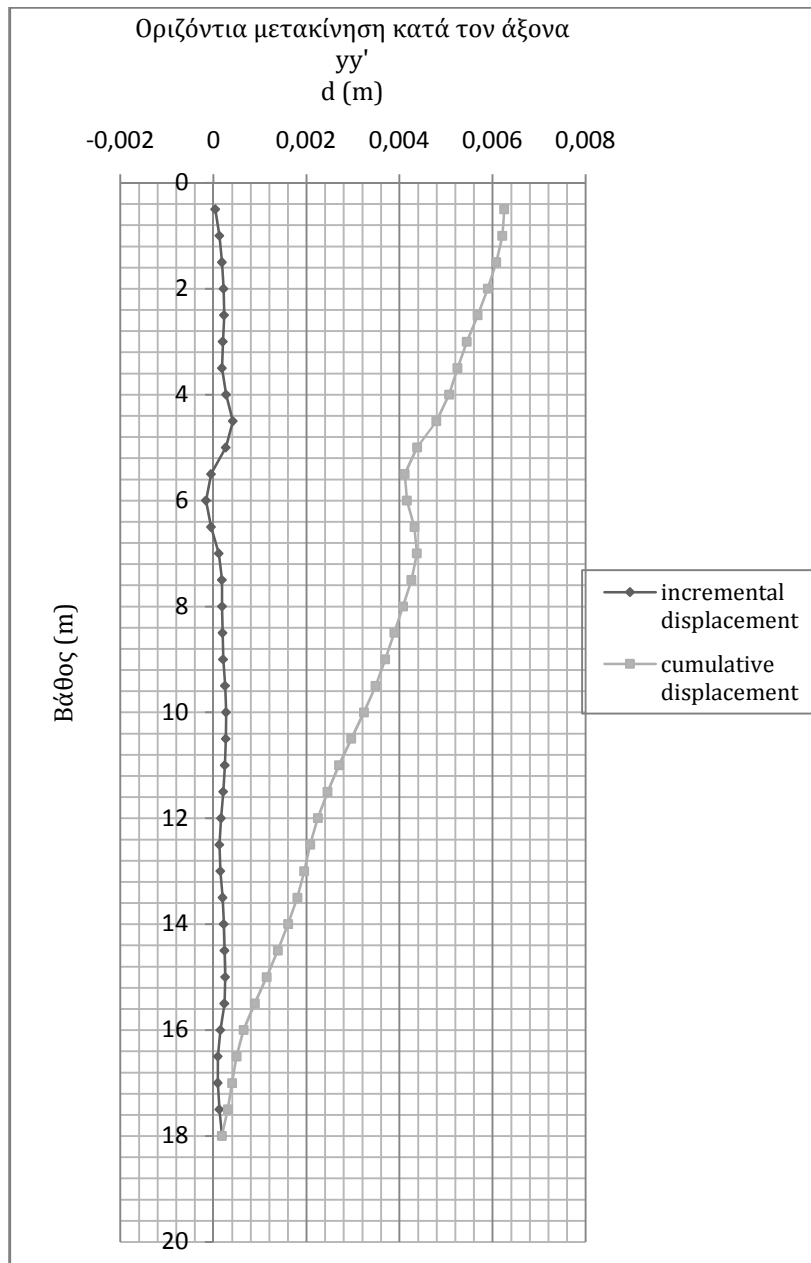
4.2.2Υπολογισμός οριζόντιας μετακίνησης

Ο τελικός στόχος της όλης διαδικασίας είναι η μετακίνηση του πασσάλου, η οποία αποτελεί τον βασικό παράγοντα που επηρεάζει το συνολικό έργο. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η τμηματική ανάλυση, δηλαδή η ανάλυση με λήψη δεδομένων ανά βήμα μέτρησης, της βηματικής οριζόντιας μετακίνησης (incremental displacement). Στη συνέχεια υπολογίστηκε αθροιστικά η μετακίνηση του πασσάλου στο σύνολό της (cumulative displacement). Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η ταυτόχρονη απεικόνιση της τμηματικής και αθροιστικής οριζόντιας μετακίνησης σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου. Αφού υπολογιστεί η κλίση του πασσάλου, εύκολα προκύπτει και η απόκλιση του από τον κεντρικό του άξονα. Η διαδικασία είναι όμοια με αυτή της επεξεργασίας των δεδομένων από τους αποκλισιομετρικούς σωλήνες, Εξίσωση (2.1). Λαμβάνοντας υπόψη μας το βήμα ανάγνωσης των δεδομένων, L , το οποίο στην προκειμένη περίπτωση ισούται με 0,5m και πολλαπλασιάζοντάς το έπειτα με το ημίτονο της γωνίας κλίσεως, α , λαμβάνουμε την οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου από το αρχικό κάθετο επίπεδό του. Για τη συνολική οριζόντια μετατόπιση, Εξίσωση (2.2), η άθροιση πραγματοποιείται με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω και το πρόσημο κάθε βηματικής απόκλισης διατηρείται. Μετά τον υπολογισμό, με τη διαφοροποίηση τις οριζόντιας μετακίνησης είναι δυνατό να υπολογιστεί και η στροφή του άξονα του πασσάλου. Εκτός από την ανάπτυξη των οριζόντιων

μετακινήσεων, αναπτύσσονται στον πάσσαλο και κατακόρυφες μετακινήσεις, w , μικρής τάξεως και ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις, Εξίσωση (3.5), προκύπτουν από την ολοκλήρωση του μέσου όρου παραμόρφωσης δύο αντιδιαμετρικά τοποθετούμενων σημείων, $\bar{\epsilon}$.



(α)



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα οριζοντίων μετακινήσεων του κεντρικού άξονα του πασσάλου και σύγκριση της τμηματικής (incremental displacement) και αθροιστικής μετατόπισης (cumulative displacement) ως προς τον (α) άξονα xx' και (β) yy' .

4.2.3 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών

Όταν το κατακόρυφο στοιχείο θεμελίωσης αποτελεί τμήμα τοίχου αντιστήριξης, τότε ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών καθίσταται σημαντικός. Η κατανομή των καμπτικών ροπών, M , και κατά επέκταση των διατμητικών δυνάμεων, Q , κατά μήκος του πασσάλου προσδιορίζεται από την ήδη υπολογισμένη τιμή καμπυλότητας, φ , στους δύο κάθετους άξονες της διατομής με βάση τις εξισώσεις (4.8) και (4.9). Η γεωμετρία του πασσάλου είναι σημαντική, καθώς επηρεάζει τη ροπή αδρανείας του, I , Εξίσωση (4.10). Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας, E , διαφοροποιείται ανάλογα με το υλικό κατασκευής.

Στην ανάλυση, δημιουργήθηκε μία επιπλέον υπορουτίνα, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών για διαφορετικές τιμές της δυσκαμψίας του πασσάλου,

ΕΙ. Συνεπάγεται, η αλλαγή της διαμέτρου του πασσάλου, D , και του κατασκευαστικού υλικού του.

$$M = -\varphi EI \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{dM}{dz} \quad (4.9)$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (4.10)$$

όπου,

M , η καμπτική ροπή, KNm

φ , η καμπλότητα του πασσάλου στον εκάστοτε άξονα, %

E , το μέτρο ελαστικότητας Young, GPa

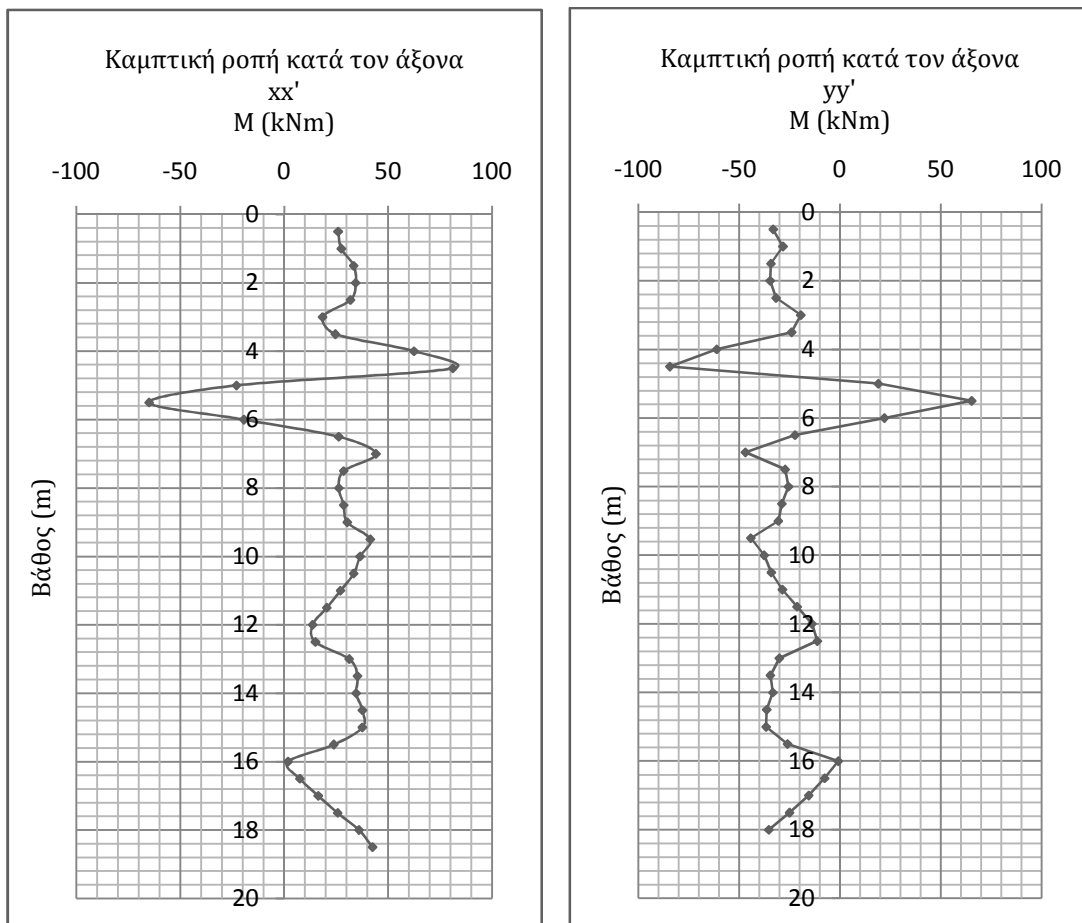
I , η ροπή αδρανείας πασσάλου κυκλικής διατομής, m^4

D , η διάμετρος του πασσάλου, m

Q , η διατμητική δύναμη, KN

z , το μήκος του πασσάλου, m

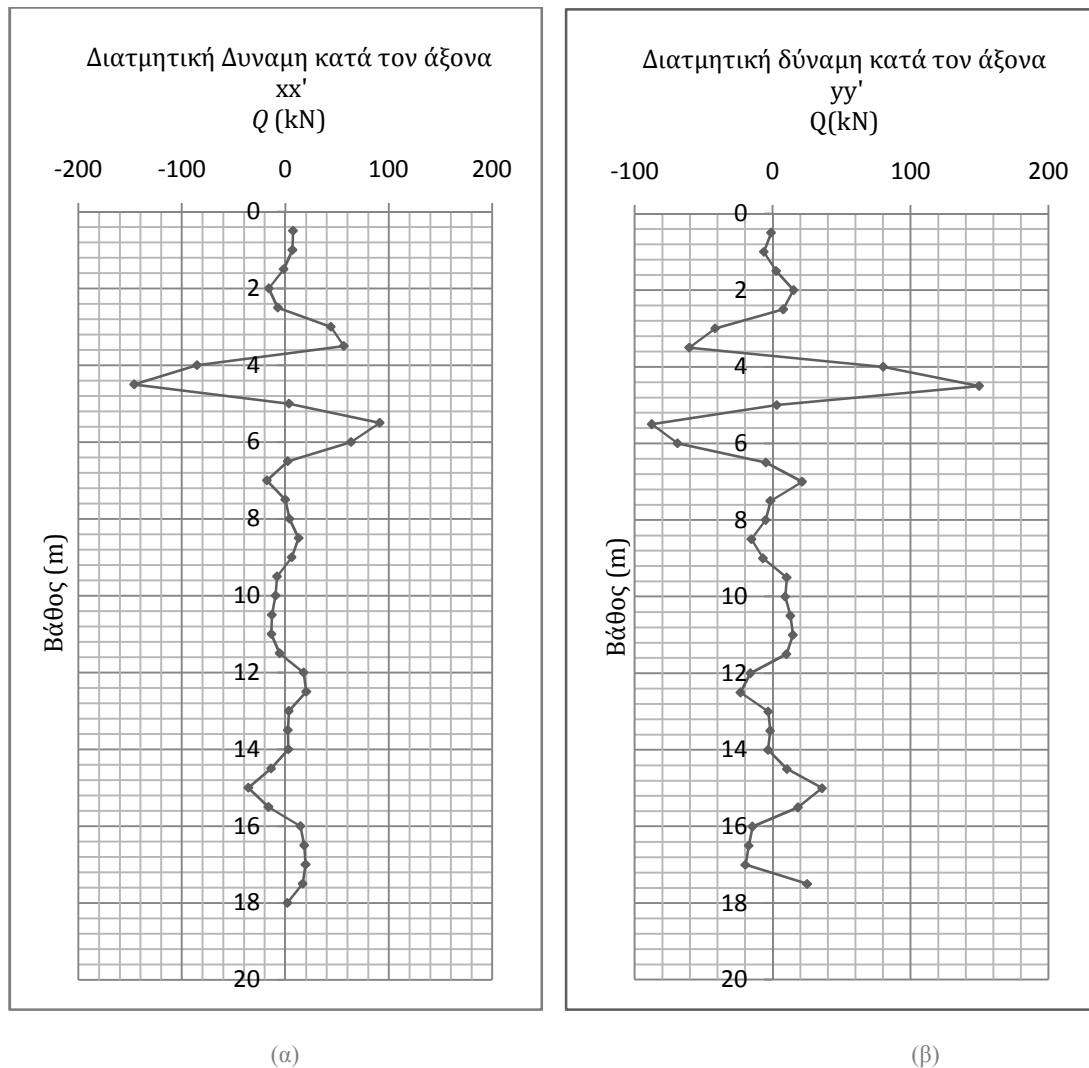
Στην προκειμένη περίπτωση, για την παρουσίαση της διαγραμματικής μορφής των μεγεθών, Σχήμα 4.7 και 4.8, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας Young λήφθηκε ενδεικτικά ως $E = 28$ GPa. Η ροπή αδρανείας υπολογίστηκε με βάση τη διάμετρο, D , του πασσάλου, η οποία όπως προαναφέρθηκε, ισούται με 0,6m.



(α)

(β)

Σχήμα 4.7: Διάγραμμα καμπτικών ροπών, M , κατά μήκος του πασσάλου (α) ως προς τον άξονα xx' και (β) yy'



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα τιμών διατμητικής δύναμης, Q , σε συνάρτηση με το μήκος του πασσάλου, (α) ως προς τον άξονα xx' και (β) yy' .

4.3 Αντίστροφη ανάλυση

Για την εξασφάλιση της ορθότητας των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε η αντίστροφη ανάλυση ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία με τη διαφορά πως τώρα τα δεδομένα είναι τα μέχρι τώρα αποτελέσματα. Η κλίση του πασσάλου ως προς τους δύο άξονες, α , η οποία μέσω της διαφοροποίησής της έχει ως αποτέλεσμα την καμπυλότητα, φ και η κατακόρυφη μετατόπιση, w , η οποία με τη διαφοροποίησή της έχει ως αποτέλεσμα τον μέσο όρο παραμόρφωσης των ανά δύο αντιδιαμετρικά τοποθετούμενων σημείων αποτελούν τα πλέον δεδομένα. Ως ζητούμενο της αντίστροφης ανάλυσης είναι οι τιμές παραμόρφωσης των αρχικών σημείων 1, 2, 3 και 4, των οποίων οι συντεταγμένες θεωρούνται επίσης δεδομένες.

Στη συνέχεια, κατασκευάζοντας ένα σύστημα εξισώσεων προσδιορίζονται οι πρωταρχικοί άγνωστοι συντελεστές α , b , c , οι οποίοι για τον έλεγχο της ορθότητας θα πρέπει να ισούνται με τις αρχικές τιμές της ορθής ανάλυσης. Παρατηρείται, πως μετά την επίλυση του συστήματος οι τιμές των μεταβλητών είναι ίδιες με μία απόκλιση του 0,001. Το σφάλμα δικαιολογείται, καθώς η διαφοροποίηση των μεγεθών βασίζεται στον κανόνα των κεντρικών διαφορών. Επιπλέον, σημειώνεται πως οι συντελεστές α , b , παραμένουν σταθεροί για συγκεκριμένο τμήμα μήκους πασσάλου, ενώ αντιθέτως ο συντελεστής, c , διαφοροποιείται ανάλογα με τον άξονα τον οποίο εξετάζουμε. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται δύο τιμές του

συντελεστού, c , μία για τα σημεία 1 και 3, τιμή c_1 , που διαπερνώνται από τον άξονα yy' και άλλη μία, τιμή c_2 , για τα σημεία 2 και 4. Ο μέσος όρος τους έχει ως αποτέλεσμα την τιμή c της ορθής ανάλυσης.

Τέλος, χρησιμοποιείται η Εξίσωση (4.1) για τον υπολογισμό των τιμών παραμόρφωσης των τεσσάρων σημείων.

$$\varepsilon_1 = ax_1 + by_1 + c_1 \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_2 = ax_2 + by_2 + c_2 \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_3 = ax_3 + by_3 + c_1 \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_4 = ax_4 + by_4 + c_2 \quad (4.14)$$

Τα αποτελέσματα αυτής της αντίστροφης διαδικασίας ταυτίζονται με τα δεδομένα της αρχικής ανάλυσης, πράγμα που συνεπάγει την ορθότητα των υπολογισμών.

4.4 Χρήση αποτελεσμάτων απόκρισης πασσάλου

Εκτός από τα δεδομένα που λήφθηκαν από τη χρήση αποκλισημετρικών σωλήνων, πραγματοποιήθηκε επιπλέον ανάλυση απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου με τη βοήθεια του γεωτεχνικού προγράμματος Sofistik. Λαμβάνοντας ως αποτελέσματα τις οριζόντιες μετακινήσεις κατά τους δύο κάθετους άξονες xx' και yy' , καθώς και τις επικρατούσες ως προς τους άξονες κλίσεις του πασσάλου, υπολογίζονται οι συντεταγμένες της κεφαλής του ανά υψομετρικό επίπεδο, Πίνακας 4.2. Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει τις συντεταγμένες του κεντρικού άξονα και γνωρίζοντας ότι η διάμετρος της διατομής του πασσάλου, D , ισούται με 0,6m, είναι δυνατό να προκύψουν οι συντεταγμένες των τεσσάρων αντιδιαμετρικά τοποθετούμενων σημείων.

Με στόχο την εύρεση της παραμόρφωση του κέντρου του πασσάλου ανά βήμα μήκους εισαγωγής δεδομένων μέσω της χρήσης της προηγούμενης Εξίσωσης (4.1), χρειάζεται εκτός των σημειακών συντεταγμένων και ο επιπλέον υπολογισμός τιμών παραμορφώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ως βάση την αρχή του Euler-Bernoulli, κατά τη οποία η διατομή του πασσάλου δε ρηγματώνεται με αποτέλεσμα ο ουδέτερος άξονας να παραμένει αμετακίνητος, η εφελκυστική και η θλιπτική παραμόρφωση των εξωτερικών τοιχωμάτων ταυτίζονται. Για το λόγο αυτό, οι τιμές παραμορφώσεων των απέναντι σημείων ταυτίζονται. Με βάση τη διαφοροποίηση των δεδομένων τιμών της κλίσης, Εξίσωση (4.15) και την εξίσωση της καμπυλότητας, φ , μίας μη ρηγματωμένης διατομής, Εξίσωση (4.16) προσδιορίζονται οι σημειακές τιμές των παραμορφώσεων.

$$\varphi = \frac{da}{dz} \quad (4.15)$$

$$\varphi = \frac{2\varepsilon}{d} \quad (4.16)$$

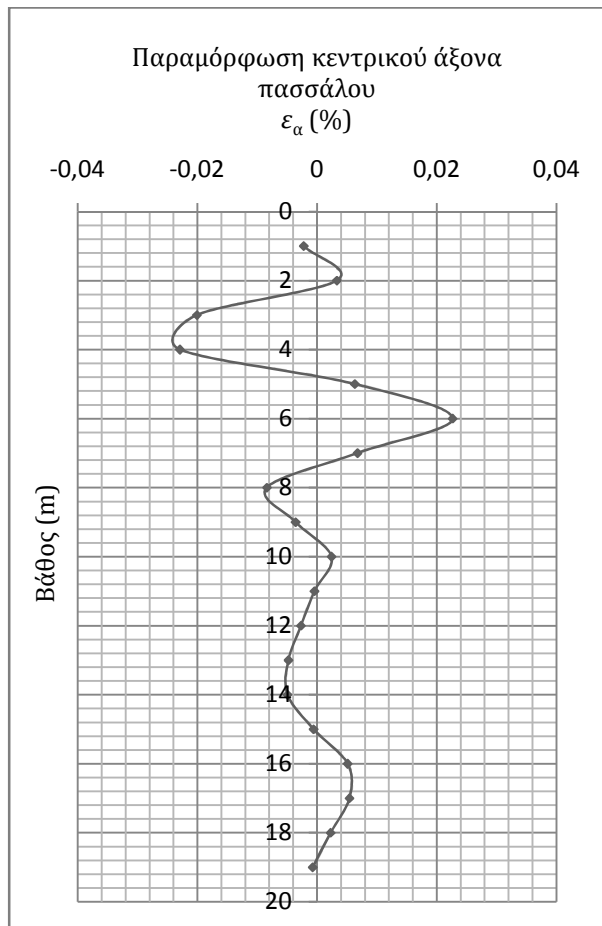
Παρακάτω, Πίνακας 4.1, γίνεται η επισύναψη των αποτελεσμάτων από την ανάλυση της απόκρισης του πασσάλου. Τυγχάνει η οριζόντια μετακίνησή του, $u-X$, $u-Y$, καθώς και η κλίση αυτού, $\Phi-X$, $\Phi-Y$ κατά τους δύο άξονες να ταυτίζονται.

Αποτελέσματα Απόκρισης Πασσάλου			
u-X	u-Y	phi-X	phi-Y
[mm]	[mm]	[rad]	[rad]
10,911	10,911	-0,00013	-0,00013
10,901	10,901	-0,00019	-0,00019
10,921	10,921	-0,00014	-0,00014
10,909	10,909	-0,00017	-0,00017
10,86	10,86	-0,00028	-0,00028
10,838	10,838	-0,00032	-0,00032
10,876	10,876	-0,00023	-0,00023
10,908	10,908	-0,00017	-0,00017
10,901	10,901	-0,00019	-0,00019
10,881	10,881	-0,00022	-0,00022
10,891	10,891	-0,00021	-0,00021
10,899	10,899	-0,00021	-0,00021
10,895	10,895	-0,00022	-0,00022
10,886	10,886	-0,00023	-0,00023
10,866	10,866	-0,00025	-0,00025
10,857	10,857	-0,00026	-0,00026
10,862	10,862	-0,00025	-0,00025
10,884	10,884	-0,00023	-0,00023
10,891	10,891	-0,00022	-0,00022
10,894	10,894	-0,00021	-0,00021
10,884	10,884	-0,00022	-0,00022

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα από την ανάλυση απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου υπό την επίδραση δοκιμαστικής φόρτισης.

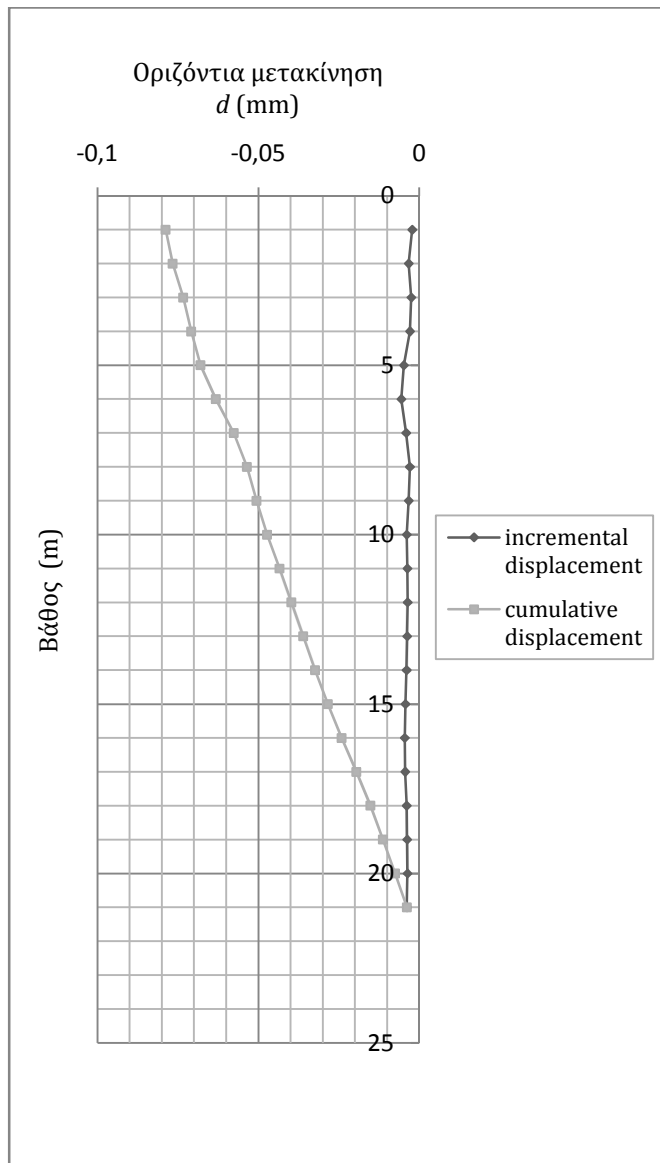
Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, προκύπτει το προφίλ της παραμόρφωσης του κέντρου του πασσάλου, Σχήμα 4.9, ανά σταθερό επίπεδο ύψους, z_i .

Με τη χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD και σε συνδυασμό με τα υπολογιστικά φύλλα του λογιστικού Microsoft Excel προσομοιάνεται η οριζόντια μετακίνηση του κεντρικού άξονα του πασσάλου τμηματική και αθροιστική, Σχήμα 4.10, καθώς και η μορφή του στο χώρο αφού υποστεί την εγκάρσια φόρτιση, Σχήμα 4.11.

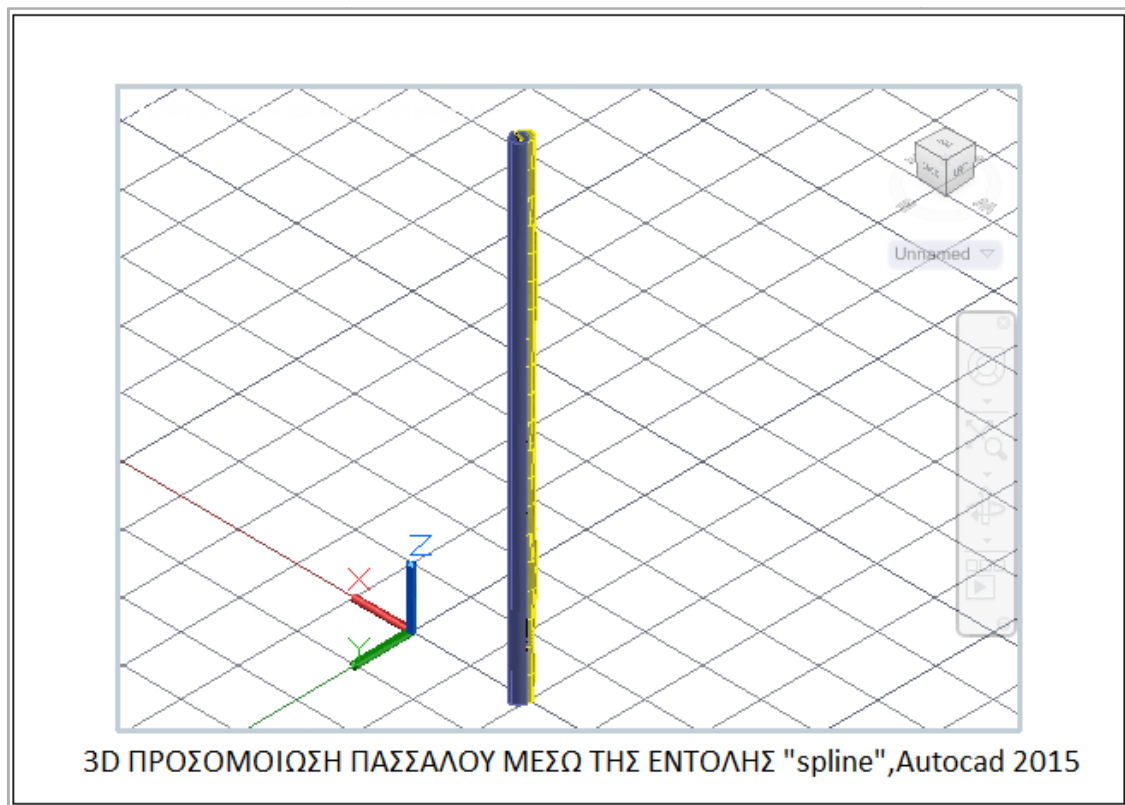
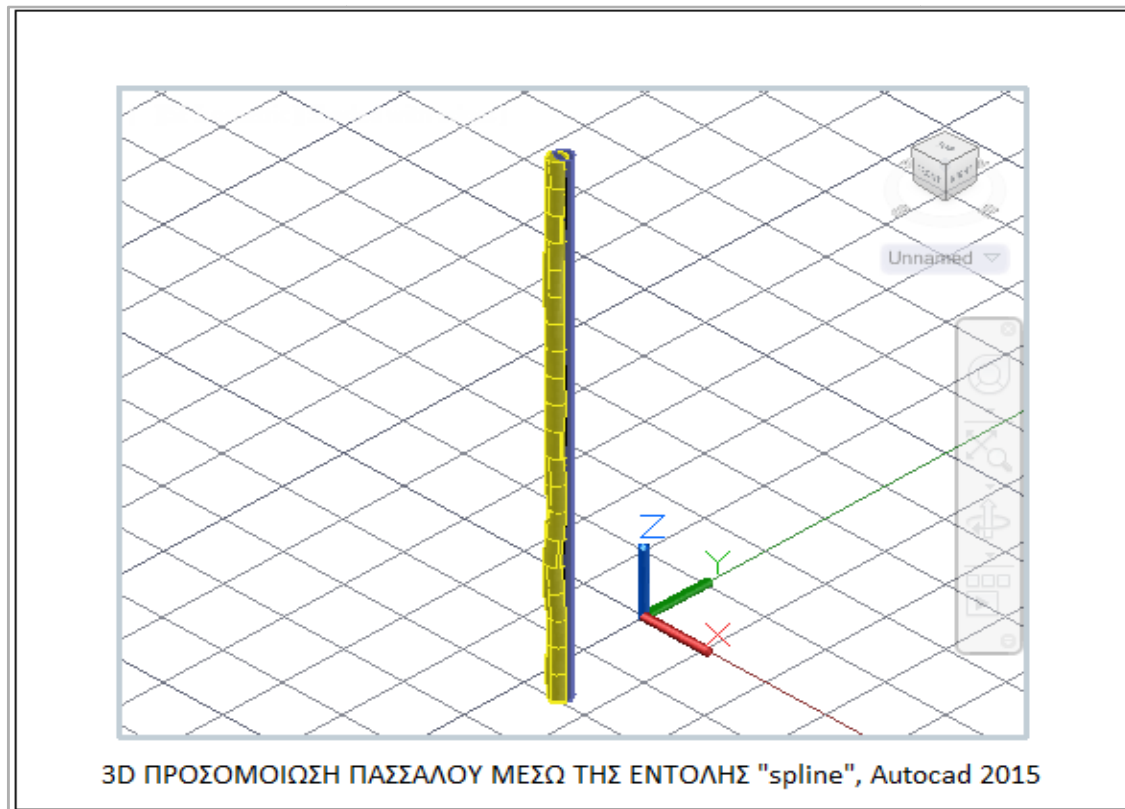


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση του μήκους πασσάλου ύστερα από επεξεργασία αποτελεσμάτων απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου.

Στο επισυναπτόμενο διάγραμμα, Σχήμα 4.9, παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμορφώσεων είναι πολύ μικρές, και επιπλέον αυξάνονται προς την κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου, τμηματικής (incremental displacement) και αθροιστικής (cumulative displacement), συναρτήσει του μήκους του πασσάλου. Τα αποτελέσματα των δύο κάθετων αξόνων τυχαίνει να ταυτίζονται.



Σχήμα 4.11: Προσομοίωση πασσάλου στο χώρο κατά την αρχική κατάσταση (μπλε πάσσαλος) και έπειτα από τη δράση της εγκάρσιας φόρτισης (κίτρινος πάσσαλος) υπό δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες, Σχήμα (α) και (β).

Συντεταγμένες Κέντρου Πασσάλου		
z	x'	y'
(mm)	(mm)	(mm)
1	8,1059727	13,129853
2	8,0985435	13,11782
3	8,1134018	13,141887
4	8,1044868	13,127447
5	8,0680839	13,068482
6	8,0517397	13,042008
7	8,0799706	13,087736
8	8,1037439	13,126243
9	8,0985435	13,11782
10	8,0836852	13,093753
11	8,0911143	13,105786
12	8,0970577	13,115413
13	8,094086	13,1106
14	8,0873998	13,099769
15	8,0725414	13,075702
16	8,0658552	13,064872
17	8,0695697	13,070889
18	8,0859139	13,097363
19	8,0911143	13,105786
20	8,0933431	13,109396
32	8,0859139	13,097363

Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες του κέντρου του πασσάλου, x και y, σε συνάρτηση του μήκους του, z_i.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με σκοπό τον προσδιορισμό του βαθμού της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου υπό καθεστώς οριζόντιας φόρτισης. Επιπρόσθετο στόχο αποτέλεσε ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης του κεντρικού άξονα του πασσάλου, καθώς και των μεγεθών που απορρέουν από αυτή. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της καμπυλότητας, της κλίσης και το σύνολο των μετακινήσεων κατέχουν βασικό ρόλο στη μελέτη, στην εξέλιξη, καθώς και στην πρόβλεψη των αστοχιών ενός μεμονωμένου πασσάλου και κατά επέκταση ομάδας πασσάλων και ανωδομής.

Αρχικά, εφαρμόστηκε η μέθοδος των αποκλισιομέτρων με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των μέγιστων τιμών οριζοντίων μετακινήσεων του πασσάλου μέσω της λήψης των αποκλίσεων των δύο κάθετων αξόνων από το κατακόρυφο επίπεδο. Παρατίθενται δύο παραδείγματα επεξεργασίας δεδομένων, με βασικότερο το δεύτερο, καθώς υπόκειται σε πολλαπλές δοκιμαστικές φορτίσεις διαφορετικού μεγέθους με αποτέλεσμα η διαφοροποίηση των μετακινήσεων να γίνεται πιο εμφανή. Έχοντας καθορίσει τη μέθοδο του αποκλισιομέτρου, παρουσιάζεται η χρήση της τεχνικής των οπτικών ινών και στη συνέχεια τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της μέσω της σύγκρισης των δύο εφαρμογών. Τέλος, προσδιορίστηκε το προφίλ της παραμόρφωσης ιδιαίτερα του κεντρικού άξονα του πασσάλου ή και οποιουδήποτε σημείου στην περιφέρεια του πασσάλου, γνωρίζοντας τις συντεταγμένες, τις σημειακές παραμορφώσεις τεσσάρων αντιδιαμετρικά τοποθετημένων σημείων και το υψομετρικό επίπεδο αυτών. Τα συγκεκριμένα δεδομένα προέρχονται από το συνδυασμό της χρήσης αποκλισιομετρικών σωλήνων και εγκατάστασης οπτικών ινών διαμήκους του πασσάλου, καθώς και από τα αποτελέσματα απόκρισης πασσάλου μετά τη δράση δοκιμαστικής φόρτισης.

5.2 Συμπεράσματα

Η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με την εφαρμογή της μεθόδου του αποκλισιομετρικού σωλήνα για έναν μεμονωμένο πάσσαλο, οδήγησε στη διατύπωση των ακόλουθων συμπερασμάτων:

- Τα αποκλισιόμετρα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν σφάλματα μέτρησης, τα οποία απορρέουν από την απόκλιση της τορπίλης από το κατακόρυφο επίπεδο του σωλήνα, τη στρέψη του αποκλισιομέτρου, την ελλιπή πλήρωση της σωλήνωσής του, τις προβληματικές συνδέσεις ή και την ανεπαρκή πάκτωση του πυθμένα. Η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων αυτών, είτε συστηματικών, είτε τυχαίων προϋποθέτει εξειδικευμένο προσωπικό και παράλληλη τήρηση των προδιαγραφών μέτρησης ASTM ή ISRM. Σύμφωνα με τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν, ένας τρόπος εξάλειψης των χονδροειδών σφαλμάτων είναι η εφαρμογή της συζυγούς εγκατάστασης, με την οποία γίνεται η λήψη των αντίστροφων μετρήσεων. Επιπλέον, για την αναγνώρισή τους χρησιμοποιείται ο αθροιστικός έλεγχος (Checksum performance). Παρόλα αυτά, σε κάθε περίπτωση που τα σφάλματα υπερβαίνουν τα

ανεκτά όρια υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και διόρθωσης με μαθηματικές μεθόδους (Mikkelsen, 2004).

- Οι μετακινήσεις του πασσάλου φαίνεται να αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου σύμφωνα με το πρώτο παράδειγμα, καθώς και με την αύξηση του φορτίου της εγκάρσιας δύναμης, σύμφωνα με το δεύτερο παράδειγμα. Κατά την πρώτη εφαρμογή που αναλύθηκε, η μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετακίνησης αυξήθηκε από τα 54,43mm στα 54,76mm. Η δεύτερη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε μεταγενέστερο χρόνο. Παρατηρείται, ότι για το συγκεκριμένο παράδειγμα τα αποτελέσματα είναι όμοια και οι αυξήσεις των μετακινήσεων είναι μικρής τάξεως. Αυτό οφείλεται τμηματικά στο γεγονός ότι πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον μετρήσεις πέραν της αρχικής. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επεξεργασίας του δεύτερου παραδείγματος παρατηρείται μια συνεχής αύξηση των οριζοντίων μετακινήσεων εξαιτίας της ταυτόχρονης αύξησης του επιβαλλόμενου δοκιμαστικού φορτίου σε συνεργασία με την πάροδο του χρόνου. Η εξέλιξη των μετακινήσεων συναρτήσει της τιμής της εγκάρσιας φόρτισης παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα, Πίνακας 5.1. Προκύπτει ότι, για μικρότερο εφαρμοζόμενο φορτίο τόσο οι μετακινήσεις, όσο και η κινητοποιούμενη περιοχή μειώνονται αναλόγως. Οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στην περιοχή κοντά στην κεφαλή του πασσάλου, πράγμα που σημαίνει πως πρόκειται για πάσσαλο ελεύθερης κεφαλής.

	Βάθος										
	z (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φόρτιση	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ, d (mm)										
Q (kN)	100	1,31	1,136	0,727	0,563	0,721	0,4079	0,215	0,2631	0,1612	0,14
	250	6,66	5,34	3,848	2,655	1,402	0,6229	0,377	0,2953	0,2154	0,15232
	300	9,89	7,876	5,676	3,999	2,143	0,9323	0,5	0,3842	0,2631	0,26
	400	21,1	15,73	9,979	5,685	2,358	1,1292	0,824	0,1844	0,2506	0,12166
	470	33,1	23,83	14,25	7,021	2,753	0,5906	0	0,4494	0,2059	0,08246

Πίνακας 5.1: Παρουσίαση μέγιστων οριζοντίων μετακινήσεων σε σχέση με την αύξηση της τιμής της οριζόντιας δοκιμαστικής φόρτισης.

Η διαδικασία σύγκρισης της μεθόδου του αποκλισιομετρικού σωλήνα με την εγκατάσταση των οπτικών ινών, οδήγησε στη διατύπωση των ακόλουθων συμπερασμάτων:

- Και οι δύο τεχνικές παρουσιάζουν όμοια και ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις. Η εγκατάσταση των οπτικών ινών είναι απλή και εύκολη, όπως και η ανίχνευση των δεδομένων. Έτσι, η τεχνική αυτή θεωρείται το ίδιο πρακτική με τη συμβατικότητα ενός αποκλισιομέτρου. Παρόλα αυτά, με τη χρήση των οπτικών ινών είναι δυνατόν να υπολογιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια μεγέθη όπως η καμπυλότητα του πασσάλου και στη συνέχεια τα εντατικά μεγέθη, όπως η καμπτική ροπή και η διατμητική δύναμη. Συγκεκριμένα, η καμπυλότητα προσδιορίζεται άμεσα και με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς για τη χρήση της μεθόδου απαιτείται η εγκατάσταση τουλάχιστον ενός ζεύγους οπτικών ινών. Αντιθέτως, σύμφωνα με τη διαδικασία των αποκλισιομέτρων το άμεσο αποτέλεσμα που λαμβάνεται είναι η κλίση του πασσάλου, οπότε για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας απαιτείται η διαφοροποίηση αυτού, πράγμα που επιφέρει σφάλματα κατά τον υπολογισμό. Το γεγονός αυτό καθιστά τη χρήση οπτικών ινών περισσότερο αξιόπιστη.

- Μία άλλη διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι σε περιπτώσεις υπογείων έργων, όπως για παράδειγμα η κατασκευή ενός διαφραγματικού τοίχου, οι οπτικές ίνες είναι δυνατόν να διατηρηθούν με το πέρασμα του χρόνου, καθώς μπορούν να ταφούν υπό το έδαφος ή να προφυλαχθούν σε κάποιον αγωγό. Το αποτέλεσμα είναι η διευκόλυνση στην πρόσβαση τους μετά το πέρασμα χρονικών περιόδων ή και ακόμα από διάφορες τοποθεσίες. Έτσι η αξονική συμπεριφορά ενός μεμονωμένου πασσάλου είναι εφικτό να παρακολουθηθεί και σε μία μεταγενέστερη περίοδο, πράγμα ανέφικτο για την περίπτωση των αποκλισιομέτρων.
- Αναφορικά των μετακινήσεων και την καταγραφή του προφίλ παραμόρφωσης του κεντρικού άξονα του πασσάλου, η μέθοδος του αποκλισιομέτρου φαίνεται να είναι πιο εύκολη και γρήγορη. Αυτό συμβαίνει γιατί η τεχνική των οπτικών ινών απαιτεί τη γνώση συνοριακών συνθηκών και ταυτόχρονα την εξελικτική καταγραφή της παραμόρφωσης και των δύο απέναντι τοιχωμάτων ενός πασσάλου.

Η διαδικασία προσδιορισμού εξισώσεων με δεδομένα που λήφθηκαν συνδυαστικά από αποκλισιομετρικούς σωλήνες και τη διαμήκη εγκατάσταση οπτικών ινών στα τοιχώματα, καθώς και από την ανάλυση απόκρισης πασσάλου, οδήγησε στην έκβαση των παρακάτω συμπερασμάτων:

- Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες και τις τιμές των αξονικών παραμορφώσεων τουλάχιστον τριών σημείων στην περίμετρο του πασσάλου και σε συγκεκριμένο υψομετρικό επίπεδο, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου. Επιπλέον, μπορεί να καθοριστεί και η τιμή της παραμόρφωσης οποιουδήποτε σημείου, αρκεί αυτό να βρίσκεται σε συγκεκριμένο βάθος του πασσάλου. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται άμεσα ο τρόπος του παραμορφώνεται ένας άξονας και διαπιστώνουμε το μέγεθος της ευκαμψίας του πασσάλου. Η εκτίμηση της παραμόρφωσης κατέχει σημαντικό ρόλο, καθώς από αυτήν προσδιορίζεται η διεύθυνση κίνησης του σωλήνα ειδικότερα όταν αυτή εμφανίζεται σε μεγάλο βάθος. Η παραμόρφωση έχει ως αίτιο εκτός από τη δράση φορτίσεων, τις περιβαλλοντικές συνθήκες πριν την εγκατάσταση του πασσάλου. Επιπλέον αίτια είναι η κατασκευαστική ατέλεια των σωληνώσεων, καθώς και η ύπαρξη των διάκενων μεταξύ εδάφους και σωλήνωσης. Τα αίτια αυτά προκαλούν μεγάλες φαινόμενες μετακινήσεις με αποτέλεσμα τη λανθασμένη ερμηνεία και εντοπισμό των πραγματικών οριζοντίων μετακινήσεων.
- Μετά τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης προσδιορίστηκε η καμπυλότητα, η κλίση και στη συνέχεια οι τοπικές και οι αθροιστικές αποκλίσεις-οριζόντιες μετακινήσεις από την κατακόρυφο. Σημειώνεται πως τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από τις συνθήκες του πασσάλου, δηλαδή αν είναι πακτωμένης ή ελεύθερης κεφαλής, καθώς και από το γύρω εδαφικό του περιβάλλον. Σε περίπτωση που ο πάσσαλος που αναλύεται είναι ελεύθερης κεφαλής, τότε οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερου μεγέθους, πράγμα που προκαλεί κίνδυνο ρηγματώσης. Στη συνέχεια, υπήρχε δυνατότητα προσδιορισμού των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται δίνοντας κάθε φορά διαφορετικές τιμές στη διάμετρο και στο μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου. Σε περίπτωση που απαιτείται η καταγραφή αιχμηρών μεταβολών των εντατικών μεγεθών και όχι μόνο, πρέπει η λήψη των δεδομένων να γίνεται ανά μικρά διαστήματα μήκους πασσάλου, μικρότερα του μισού μέτρου, το οποίο είναι το βήμα δειγματοληψίας ενός αποκλισιομέτρου.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία προσδιορισμού της παραμόρφωσης, των οριζοντίων μετακινήσεων και στη συνέχεια της συμπεριφοράς ενός πασσάλου είναι σημαντική, καθώς προλαμβάνει την αστοχία της θεμελίωσης και αργότερα της ανωδομής. Επιπλέον, είναι βασική για τη βελτιστοποίηση του έργου μιας κατασκευής, καθώς και τη μελέτη μέτρων αποκατάστασης των συνθηκών ευστάθειας.

5.2 Προτάσεις

Πέρα της ανάπτυξης και σύγκρισης των αριθμητικών μεθόδων με στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου πασσάλου, θα μπορούσε στο μέλλον να διερευνηθούν επιπλέον θέματα που αποτελούν επέκταση αυτού. Μερικές προτάσεις είναι οι παρακάτω:

- Έλεγχος ανεκτών ορίων οριζοντίων μετακινήσεων ενός μεμονωμένου πασσάλου και ανάλυση του κίνδυνου ρηγμάτωσης αυτού.
- Επιλύσεις με πολλαπλά φορτία, πολλαπλούς τύπου στρωματογραφικών διαμορφώσεων και υλικών κατασκευής πασσάλων.
- Διερεύνηση πεδίου καταπονήσεων πασσάλων λόγω οριζοντίων φορτίσεων με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους.
- Επιλύσεις συμπεριφοράς πασσαλομάδων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ποικίλων διαστάσεων και παραμέτρων υλικών.
- Προσδιορισμός αλληλεπίδρασης υπόγειας κατασκευής- θεμελίωσης και ανωδομής λόγω των οριζόντιων μετακινήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Κωμοδρόμος Α. Μ.**(2012). *Θεμελιώσεις Αντιστηρίξεις, οριακή ισοροπία-αριθμητικές μέθοδοι*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
2. **Comodromos E.M.** (2004). *Response evaluation of axially loaded fixed-head pile group using 3D nonlinear analysis*. Soils and Foundations 44, Αρ.2, 31-39
3. **Κωμοδρόμος Α.Μ., Ρετζεπέρης Ι.Κ, Παπαδοπούλου Μ.Κ.** (2009b). *Απόκριση πασσάλου μετά τη ρηγμάτωση: Οριζόντια δοκιμαστική φόρτιση με χρήση οπτικών ινών - 3D μη γραμμική ανάλυση*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 135, Αρ. 9, 1275-1284
4. **E. Comodromos, M.Papadopoulou** (2010). *Evaluation of pile response under vertical loading: Pile load test using fiber optics- 3D nonlinear analysis*. Volos
5. **Emilios M. Comodromos, Mello C. Papadopoulou, Georgios K. Konstantinidis** (2014). *Numerical Assesment of Subsidence and Adjacent Building Movements Induced by TBM- EPB Tunneling*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
6. **Αρβανιτίδης Χ.** (2014). *Διερεύνηση πεδίου καταπονήσεως πασσαλομάδος λόγω οριζοντίων φορτίων με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους*.
7. **Καββαδάς Μ.** (2008) . *Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων*. Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου
8. **P.Erik Mikkelsen** (2003). *Advances in Inclinometer Data Analysis*. Symposium on Field measurements in Geomechanics, Oslo, Norway
9. *Digitilt inclinometer probe manual*. Mukilteo, Washington, November, (2011)
10. **Hisham Mohamad, Peter J. Bennett, Kenichi Soga, Assaf Klar and Adam Pellow** (2007). *Distributed Optical Fiber Strain Sensing in a Secant Pile Wall*. Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics.
11. **Δημήτριος Ε. Ρόζος**. *Κατολισθητικά Φαινόμενα*. Ε.Μ Πολυτεχνείου
12. **Keramidas E., Ritsos A.**(2010). *Analysis of laterally loaded single piles in coarse-grained soils based on load tests*. Volos
13. **Χαραλαμπακης Μ.Ι, Παπατολιας Κ.Θ.** (2006). *Παρακολούθηση της ευστάθειας πρανών της Εγνατίας Οδού με αποκλισιόμετρα*. Ξάνθη.
14. **Καλτεζιώτης Ν., Τσιαμπάος Γ., Ζερβογιαννης Χ.** *Landslidemonitoring. An example from Attiica*. Τμήμα γεωτεχνικής Μηχανικής, ΚΕΔΕ, ΥΠΕΧΩΔΕ
15. **Καββαδάς Μ.** (2008) . *Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων*. Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου
16. **.P.Erik Mikkelsen** (2003). *Advances in Inclinometer Data Analysis*. Symposium on Field measurements in Geomechanics, Oslo, Norway.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας σε VBA

Προσδιορισμός εξίσωσης παραμόρφωσης- Υπολογισμός συντελεστών a, b, c

```
Sub matrix_solver()  
Dim A(1 To 3, 1 To 3) As Double  
Dim B(1 To 3, 1 To 1) As Double  
Dim x As Variant  
Dim d As Double  
Dim i As Integer  
Dim N As Integer  
N = Application.InputBox("Please, select number of data;", Title:="calculation of a,b,c",  
Type:=1)  
For i = 7 To N Step 1  
Sheets("DATA").Select  
ActiveSheet.Cells(i, 3).Select  
colnum = ActiveCell.Column  
rowNum = ActiveCell.Row  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
Z = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
x1 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
y1 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
e1 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
x2 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
y2 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
e2 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)  
x3 = currcell.Value  
colnum = colnum + 1  
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
```



```

y3 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
e3 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
x4 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
y4 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
e4 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
thet = currcell.Value
A(1, 1) = (2 * (x1 ^ (2) + x2 ^ (2) + x3 ^ (2) + x4 ^ (2)))
A(1, 2) = (2 * (x1 * y1 + x2 * y2 + x3 * y3 + x4 * y4))
A(1, 3) = 2 * (x1 + x2 + x3 + x4)
A(2, 1) = 2 * (x1 * y1 + x2 * y2 + x3 * y3 + x4 * y4)
A(2, 2) = 2 * (y1 ^ (2) + y2 ^ (2) + y3 ^ (2) + y4 ^ (2))
A(2, 3) = 2 * (y1 + y2 + y3 + y4)
A(3, 1) = 2 * (x1 + x2 + x3 + x4)
A(3, 2) = 2 * (y1 + y2 + y3 + y4)
A(3, 3) = 8
B(1, 1) = 2 * (x1 * e1 + x2 * e2 + x3 * e3 + x4 * e4)
B(2, 1) = 2 * (y1 * e1 + y2 * e2 + y3 * e3 + y4 * e4)
B(3, 1) = 2 * (e1 + e2 + e3 + e4)
d = WorksheetFunction.MDeterm(a)
ActiveSheet.Cells(i, 17) = d
If d = 0 Then
MsgBox " x-calculation is not possible "
ActiveSheet.Cells(i, 18) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 19) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 20) = "-"
Else
X=Application.WorksheetFunction.MMult(Application.WorksheetFunction.MInverse(A), B)
ActiveSheet.Cells(i, 18) = x(1, 1)
ActiveSheet.Cells(i, 19) = x(2, 1)
ActiveSheet.Cells(i, 20) = x(3, 1)
MsgBox "a=" & x(1, 1) & vbNewLine & "b=" & x(2, 1) & vbNewLine & "c=" & x(3, 1), vbCritical
End If
Next i
End Sub

```

Κώδικας σε VBA**Αντίστροφη ανάλυση- Έλεγχος ορθότητας**

```

Sub Ckeck2_solutions()
Dim i As Integer
Dim N As Integer
Dim A(1 To 2, 1 To 2) As Double
Dim B(1 To 2, 1 To 1) As Double
Dim x As Variant
Dim d As Double
N = Application.InputBox("Please, select the number of Data-Row" Title:=calculation of
c,e1,e2,e3,e4", Type:=1)
For i = 8 To N Step 1
Sheets("CHECK2").Select
ActiveSheet.Cells(i, 1).Select
colnum = ActiveCell.Column
rowNum = ActiveCell.Row
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
x2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
y2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
x4 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
y4 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
e1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
k1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
kd1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
d = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
a1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)

```

```
b1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
c1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
ActiveSheet.Cells(i, 15).Select
colnum = ActiveCell.Column
rowNum = ActiveCell.Row
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
x1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
y1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
x3 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
y3 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
e2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
k2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
kd2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
d = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
a1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
b1 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
c2 = currcell.Value
colnum = colnum + 1
Set currcell = ActiveSheet.Cells(rowNum, colnum)
A(1, 1) = (x4 - x2)
A(1, 2) = (y4 - y2)
```

```

A(2, 1) = (x3 - x1)
A(2, 2) = (y3 - y1)
B(1, 1) = kd1
B(2, 1) = kd2
d = WorksheetFunction.MDeterm(a)
ActiveSheet.Cells(i, 8) = d
ActiveSheet.Cells(i, 22) = d
If d = 0 Then
MsgBox " x-calculation is not possible "
ActiveSheet.Cells(i, 9) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 23) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 10) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 24) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 11) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 25) = "-"
ActiveSheet.Cells(i, 12) = 2
ActiveSheet.Cells(i, 13) = 4
ActiveSheet.Cells(i, 26) = 1
ActiveSheet.Cells(i, 27) = 3
Else
x = Application.WorksheetFunction.MMult(Application.WorksheetFunction.MInverse(a), B)
ActiveSheet.Cells(i, 9) = x(1, 1)
ActiveSheet.Cells(i, 23) = x(1, 1)
ActiveSheet.Cells(i, 10) = x(2, 1)
ActiveSheet.Cells(i, 24) = x(2, 1)
End if
c1 = ((e1 * 2) - (a1 * (x4 + x2)) - (b1 * (y4 + y2))) / 2
ActiveSheet.Cells(i, 11) = c1
c2 = ((e2 * 2) - (a1 * (x3 + x1)) - (b1 * (y3 + y1))) / 2
ActiveSheet.Cells(i, 25) = c2
e2 = a1 * x2 + b1 * y2 + c1
ActiveSheet.Cells(i, 12) = a2
e4 = a1 * x4 + b1 * y4 + c1
ActiveSheet.Cells(i, 13) = a4
e1 = a1 * x1 + b1 * y1 + c2
ActiveSheet.Cells(i, 26) = a1
e3 = a1 * x3 + b1 * y3 + c2
ActiveSheet.Cells(i, 27) = a3
Next i
End Sub

```

Κώδικας σε VBA

Δημιουργία διαγραμμάτων

```

Sub Diagram_solution()
Dim ValueNum As Integer
Dim co As ChartObject
Dim ct As Chart
Dim sc1 As SeriesCollection
Dim ser1 As Series
Dim regionNum As Integer
ValueNum = InputBox("Πληκτρολογήστε τον αριθμό της στήλης από το 1 μέχρι το 51 με το μέγεθος του οποίου το διάγραμμα που επιθυμείτε.")
regionNum = ValueNum - 4
If ValueNum > 2 And ValueNum < 52 Then
Set co = ActiveSheet.ChartObjects.Add_(Left:=3500, Width:=230, Top:=75, Height:=500)
co.Name = "Value-Diagram" & regionNum
Set ct = co.Chart
With ct
.HasLegend = True
.HasTitle = True
.ChartTitle.Text = "Διάγραμμα"
If regionNum < 39 Then
.ChartTitle.Text = "Διάγραμμα,xx"
Else
.ChartTitle.Text = "Διάγραμμα,yy"
End If
.Axes(xlValue).ReversePlotOrder = True
'x-axis name
.Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = Range("c6").Offset(0, regionNum)&""
'y-axis name
.Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "Βάθος(m)"
Set sc1 = .SeriesCollection
Set ser1 = sc1.NewSeries
With ser1
.Name = Range("c6").Offset(0, regionNum).Value
.XValues = Range(Range("c7").Offset(1, (regionNum)), Range("c7").Offset(1, (regionNum))).End(xlDown)
.Values = Range(Range("c7").Offset(1, 0), Range("c7").End(xlDown))
.ChartType = xlXYScatterLines
ct.ChartArea.Format.TextFrame2.TextRange.Font.Size = 10
ct.ChartArea.Format.TextFrame2.TextRange.Font.Name = "Arial"
ct.Axes(xlValue).MajorGridlines.Format.Line.ForeColor.RGB = RGB(91, 155, 213)
End With

```

End With

Else: MsgBox ("Επιλέξτε παρακαλώ μία στήλη μεταξύ του αριθμού 1 και 51.")

End If

End Sub