

# Προσδιορισμός απόκρισης πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση: Δοκιμαστική φόρτιση με χρήση οπτικών ινών – 3D μη γραμμική ανάλυση

Evaluation of pile response under vertical loading: Pile load test using fiber optics – 3D nonlinear analysis

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ, Μ.Κ. Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ Α.Π.Θ., ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε.  
ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, Α.Μ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμαστικής φόρτισης στην οποία επιβλήθηκε φορτίο μέχρι την πλήρη κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής και τριβής του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Η ενοργάνωση του πασσάλου με οπτικές ίνες και η συνεχής λήψη μετρήσεων επέτρεψε την καταγραφή της κατά μήκος κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου. Η καμπύλη απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης σε συνδυασμό με την κατανομή του φορτίου επέτρεψαν τη διόρθωση και προσαρμογή των παραμέτρων του εδάφους μέσω τριδιάστατης μη γραμμικής ανάλυσης. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν εν συνεχεία για τον προσδιορισμό της απόκρισης πασσάλων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, καθώς και ομάδας πασσάλων.

**ABSTRACT :** With the aim to investigate the response of vertically loaded piles, a static pile load test has been carried out, which included fiber optics instrumentation along the pile. The experimental results provided the pile response curve, along with the data required to adjust soil parameters by means of back analysis. Therefore, a three dimensional nonlinear multi-stage analysis of the pile test had been conducted, fitting values for soil shear strength, deformation modulus, and shear strength mobilization at the soil–pile interface. Subsequently, the response of 2 x 2 and 3 x 3 pile group configurations is numerically established.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την κατασκευή σημαντικών έργων με έδραση σε πασσάλους προβλέπεται η διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων με διπλό στόχο: την επιβεβαίωση της ικανότητας ανάληψης του προβλεπόμενου φορτίου και τη διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης για τον προσδιορισμό και επαλήθευση των εδαφικών παραμέτρων των στρώσεων του υπεδάφους. Αποτελεί συνήθη τακτική οι δοκιμαστικές φορτίσεις να περιορίζονται στον πρώτο στόχο για διευκόλυνση του όλου έργου δεδομένου ότι, λαμβάνοντας υπόψη σειρά συντηρητικών παραδοχών ο έλεγχος επάρκειας ως προς το φορτίο επιτυγχάνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα και για καθιζήσεις μερικών χιλιοστών του μέτρου. Αντίθετα, για την επίτευξη του δεύτερου στόχου απαιτείται η επιβολή πολύ μεγαλύτερου φορτί-

ου ώστε να προκαλέσει καθίζηση της τάξης του 10%D. Παρά την ομολογουμένως πρόσθετη και αισθητά μεγαλύτερη δυσκολία του δεύτερου αυτού στόχου είναι ιδιαίτερο το ενδιαφέρον για τα αποτελέσματα στα οποία οδηγεί και τα οποία επιτρέπουν αρτιότερο, τεχνικά και οικονομικά, σχεδιασμό των θεμελιώσεων και των ανωδομών.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμαστικής φόρτισης στην οποία επιβλήθηκε φορτίο μέχρι την πλήρη κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής και τριβής του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Η ενοργάνωση του πασσάλου με οπτικές ίνες και η συνεχής ανά ένα λεπτό λήψη μετρήσεων επέτρεψε την καταγραφή της κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου κατά μήκος του πασσάλου. Η καμπύλη απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης σε συνδυασμό με την κατανομή του φορτίου κατά

μήκος του πασσάλου επέτρεψαν τη διόρθωση και προσαρμογή των παραμέτρων του εδάφους μέσω τριδιάστατης μη γραμμικής πολυσταδιακής ανάλυσης, ενώ στη συνέχεια αποτιμήθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά οι επιπτώσεις της δράσης των εφελκυσμένων πασσάλων στην απόκριση του φορτιζόμενου πασσάλου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή συμβατικών μεθοδολογιών και κανονισμών οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα ως προς το βαθμό συντηρητικού προσδιορισμού που συνοδεύουν τις προσεγγίσεις αυτές.

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε παραμετρική αριθμητική ανάλυση για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων πασσάλων, της συνεισφοράς της πλάκας του κεφαλοδέσμου, καθώς και της απόκρισης των επιμέρους χαρακτηριστικών πασσάλων. Τα αποτελέσματα της ανωτέρω ανάλυσης αποτελούν αντικείμενο της δημοσίευσης των Μπαρέκα κ.ά. (2010).

## 2. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

### 2.1 Εδαφικές Συνθήκες

Η δοκιμαστική φόρτιση διεξήχθη στην περιοχή του 6<sup>ου</sup> Προβλήτα Θεσσαλονίκης, από την εταιρία ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε. Το υπέδαφος στην ευρύτερη περιοχή του έργου χαρακτηρίζεται από μεγάλη συμπίεστικότητα και μικρή διατμητική αντοχή μέχρι το βάθος των 25.0 m (Κωμοδρόμος κ.ά., 2006).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα γεωτεχνικής έρευνας η οποία είχε διεξαχθεί κατά το παρελθόν στη θέση του έργου και περιελάμβανε 4 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις με βάθος τουλάχιστον 50 μέτρων, η στρωματογραφία συνίσταται από 4 κύριες στρώσεις. Η επιφανειακή στρώση Α, πάχους 12 m, συνίσταται από καστανόχρωμη χαλαρή ιλυώδη άμμο. Η διατμητική της αντοχή και το μέτρο παραμορφωσιμότητάς της βελτιώνονται ελαφρά με το βάθος και για το λόγο αυτό η στρώση υποδιαιρείται στις υποστρώσεις Α1 και Α2. Η δεύτερη κύρια στρώση, στρώση Β, συνίσταται από σκούρου πράσινου χρώματος μαλακή άργιλο με μικρό ποσοστό άμμου και οργανικών. Η στρώση εκτείνεται μέχρι το βάθος των 25 μέτρων όπου εμφανίζεται στρώση πολύ στιφρής αμμώδης αργίλου καστανοπράσινου χρώματος (στρώση C), η οποία εκτείνεται μέχρι το βάθος των 35 μέτρων. Από το βάθος αυτό και μέχρι το πέρασ των γεωτρήσεων καταγράφεται η στρώση D, της οποίας η σύσταση είναι παρόμοια με την

υπερκείμενη στρώση C, ενώ τιμές της διατμητικής αντοχής και του μέτρου παραμορφωσιμότητας είναι υψηλότερες.

Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται σε βάθος 0.5 m έως 1.0 m, ανάλογα με την εποχή του χρόνου.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές σχεδιασμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας των εδαφικών στρώσεων, οι οποίες προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της αντίστροφης ανάλυσης σε επόμενη παράγραφο. Λεπτομερής αναφορά δίνεται στο τεύχος τεχνικής έκθεσης από τους Κωμοδρόμος κ.ά. (2007b).

Πίνακας 1. Παράμετροι εδαφικών στρώσεων  
Table 1. Soil parameters used in analysis

Στρώση	A1	A2	B	C	D
Βάθος (m)	-6.0	-12.0	-25.0	-35.0	-70.0
Μέτρο διόγκωσης K (MPa)	20.8	38.9	33.3	266.7	300.0
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	9.6	12.9	11.1	27.6	31.0
Γωνία τριβής φ (°)	30.0	33.0	5.0	--	--
Γωνία διαστολής ψ (°)	0.0	0.0	0.0	--	--
Συνοχή c (kPa)	3.0	5.0	25.0	--	--
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή S <sub>u</sub> (kPa)	--	--	--	110.0	140.0
Φαινόμενο βάρος γ (kN/m <sup>3</sup> )	20.0	20.0	17.0	21.0	21.0
Γωνία τριβής διεπιφάνειας φ <sub>i</sub> (°)	30.0	33.0	3.0	--	--
Συνοχή διεπιφάνειας c <sub>a</sub> (kPa)	3.0	5.0	15.0	45.0	65.0

### 2.2 Διάταξη Δοκιμαστικής Φόρτισης

Η διάταξη της δοκιμαστικής φόρτισης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, περιελάμβανε το δοκιμαζόμενο πάσσαλο (P<sub>5</sub>) και δύο πασσάλους αντίδρασης (P<sub>8</sub> και P<sub>2</sub>) εκατέρωθεν του δοκιμαζόμενου πασσάλου (Κωμοδρόμος κ.ά., 2007a). Ο δοκιμαζόμενος πάσσαλος είχε διάμετρο D = 0.80 m και μήκος 38.0 m, οι δε πάσσαλοι αντίδρασης έχουν ίδια διάμετρο και μήκος 34.0 m.

Η διάταξη της δοκιμαστικής φόρτισης οδηγεί συχνά σε υπερεκτίμηση της δυσκαμψίας του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων, προτείνεται από τους Fleming et al (1992) η σχετική απόσταση μεταξύ του δοκιμαζόμενου πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη για τη μείωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους, προτείνεται δε σχετική απόσταση μεγαλύτερη του 5.0D. Αντίστοιχα, οι αμερικάνικοι κανονισμοί προτείνουν απόσταση

μεγαλύτερη των 6.0D. Για πρακτικούς, ωστόσο, λόγους είναι σχεδόν αναπόφευκτο οι πάσσαλοι να τοποθετούνται σε σχετικά μικρή απόσταση. Συνήθως η σχετική απόσταση μεταξύ του υπό δοκιμή πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης είναι της τάξης του 3 έως 4 φορές τη διάμετρο του πασσάλου. Μια τέτοια απόσταση προκαλεί σημαντική αλληλεπίδραση με επιπτώσεις στην καμπύλη απόκρισης του πασσάλου και στον υπολογισμό της δυσκαμψίας. Σε σχετική διερεύνηση του θέματος από τους Comodromos et al. (2003) υπολογίσθηκαν οι επιπτώσεις των πασσάλων αντίδρασης στη φέρουσα ικανότητα και τη δυσκαμψία του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Από τα εν λόγω αποτελέσματα προκύπτει μικρή επίπτωση στη φέρουσα ικανότητα, ενώ αντίστοιχα πολύ υψηλή είναι η επίπτωση στην δυσκαμψία του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Η αξονική απόσταση των πασσάλων της παρούσας δοκιμαστικής φόρτισης ήταν 3.00 m, ήτοι 3.75D, οι δε επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης διερευνώνται στη συνέχεια με τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση.

Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιήθηκε με χρήση συστήματος υδραυλικών γρύλλων ικανότητας 2.5 MN ο καθένας, οι οποίοι τοποθετήθηκαν μεταξύ της κεφαλής του δοκιμαζόμενου πασσάλου και της δοκού αντίδρασης, όπως φαίνεται στη Φωτογραφία 1. Η πίεση της πρέσας καταγραφόταν με μανόμετρο υψηλής ακρίβειας, ενώ η βύθιση της κεφαλής μετρούταν με χρήση ηλεκτρονικών μηκυσιομέτρων ακρίβειας, η έδραση των οποίων έγινε αρκετά μακριά από τους πασσάλους και φαίνεται επίσης στη Φωτογραφία 1. Στο σώμα των πασσάλων τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών (FOS), οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα καταγραφής παραμορφώσεων με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια (1/1.2  $\mu$ strain). Η εγκατάσταση των οπτικών ινών παρουσιάζεται στη Φωτογραφία 2. Οι καταγραφές των παραμορφώσεων δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της αξονικής δύναμης και κατά συνέπεια της πλευρικής αντίστασης του εδάφους κατά τα διάφορα βήματα φόρτισης. Απετέλεσαν επίσης διακριτά σημεία επαλήθευσης της αντίστροφης ανάλυσης που διεξήχθη στη συνέχεια. Ας σημειωθεί ότι μερικά και μόνο σημεία είναι δυνατόν να επιτρέψουν αποτελεσματική διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης από την οποία προσδιορίζεται η εντατική και κινηματική κατάσταση του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους, καθώς επίσης και οι εδαφικές παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Στη συνέχεια με χρήση των παραμέτρων αυτών μπορεί να επιλυθεί κάθε πρόβλημα ομάδας και να προσδιορισθεί

η απόκρισή της υπό κατακόρυφο φορτίο. Η διάταξη της δοκιμαστικής φόρτισης δίνεται στο Σχήμα 1.

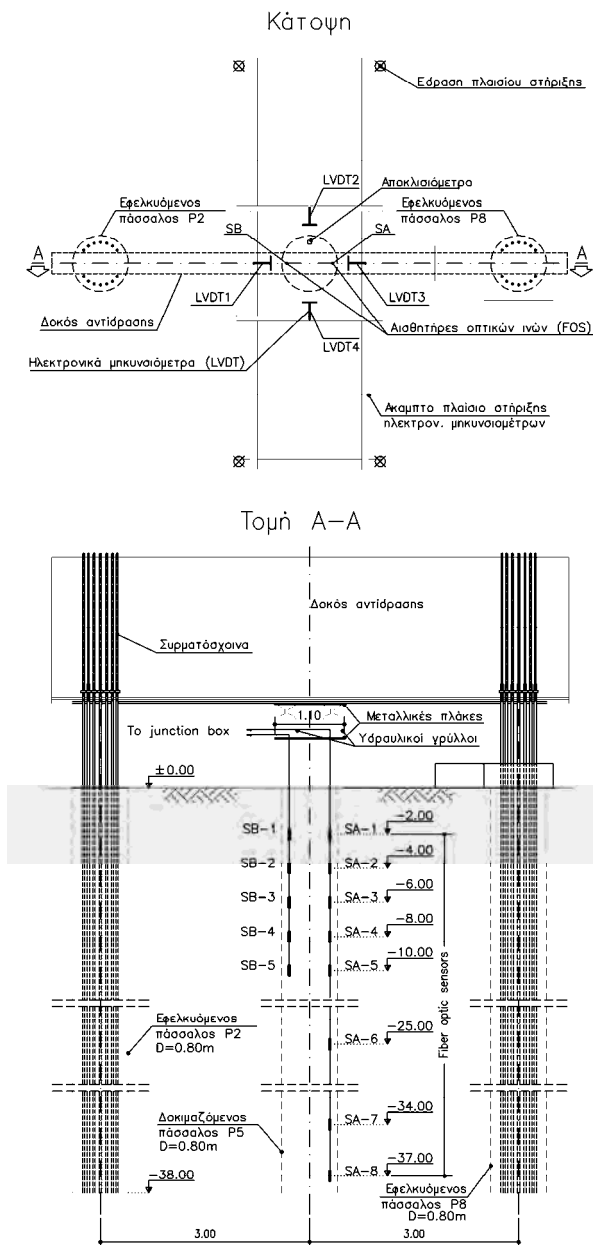
Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι φόρτισης, ο κύκλος A1, με βήματα 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 2.0, 0 MN, και ο κύκλος A2, με βήματα 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 5.6, 3.0, 1.0, 0 MN. Το μέγιστο φορτίο του δεύτερου κύκλου αντιστοιχεί σε οριακό φορτίο με συνεχή καθίζηση με μη σταθεροποιούμενο ρυθμό.



Φωτογραφία 1. Απεικόνιση δοκιμαστικής φόρτισης  
Photograph 1. Illustration of pile test setup



Φωτογραφία 2. Εγκατάσταση αισθητήρων οπτικών ινών  
Photograph 2. Installation of fiber optic sensors during the disposition of reinforcing cage



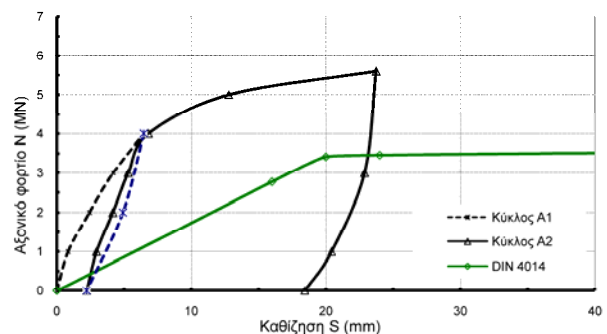
Σχήμα 1. Διάταξη δοκιμαστικής φόρτισης  
Figure 1. Pile test arrangement

### 2.3 Αποτελέσματα Δοκιμαστικής Φόρτισης

Η καμπύλη απόκρισης αξονικού φορτίου – καθίζησης της δοκιμαστικής φόρτισης δίνεται στο Σχήμα 2, μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή του γερμανικού κανονισμού DIN 4014 (1990). Από τη σύγκριση των καμπυλών προκύπτει ότι η απόκριση του δοκιμασθέντος πασσάλου χαρακτηρίζεται από σημαντικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία σε σχέση με το DIN 4014.

Η παρουσία των πασσάλων αντίδρασης επηρεάζει την απόκριση του δοκιμαζόμενου πασσάλου, καθιστώντας τη πιο δύσκαμπτη, ενώ σε αντίθεση με τη δυσκαμψία, το οριακό

φορτίο του δοκιμαζόμενου πασσάλου επηρεάζεται ελάχιστα από την αλληλεπίδραση. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η αξονική απόσταση των πασσάλων είναι σχετικά μικρή, η υπερεκτίμηση της δυσκαμψίας του δοκιμαζόμενου πασσάλου είναι σημαντική (Fleming et al. (1992), Poulos and Davis (1980), Kitiyodom and Matsumoto (2002)). Όπως επισημαίνεται από τους Comodromos et al. (2003), το φαινόμενο αποδίδεται στη γρηγορότερη κινητοποίηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους μεταξύ των πασσάλων. Η ταυτόχρονη ανύψωση των πασσάλων αντίδρασης και βύθιση του δοκιμαζόμενου πασσάλου οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων στο έδαφος, με αποτέλεσμα την ταχύτερη ενεργοποίηση της διατμητικής αντοχής σε σχέση με τον μεμονωμένο πάσσαλο. Στην προκειμένη περίπτωση, η παρουσία δύο πασσάλων αντίδρασης σε αξονική απόσταση 3.75D από το δοκιμαζόμενο πάσσαλο έχει πολύ μικρή επίπτωση στην απόκριση του δοκιμαζόμενου πασσάλου, όπως προέκυψε και από την τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 2. Απόκριση πασσάλου δοκιμαστικής φόρτισης και απόκριση κατά DIN 4014  
Figure 2. Pile test response curve and response curve predicted by DIN 4014

Η επαύξηση του αξονικού φορτίου,  $\delta N_t$ , του δοκιμαζόμενου πασσάλου δίνεται από την Εξίσωση 1:

$$\delta N_t = \frac{\pi D^2}{4} E_p \delta \varepsilon \quad (1)$$

όπου  $E_p$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου και  $\delta \varepsilon$  η επαύξηση της παραμόρφωσης, που υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις των αισθητήρων οπτικών ινών, σύμφωνα με την Εξίσωση 2:

$$\Delta \lambda = K_e \delta \varepsilon \quad (2)$$

όπου  $\Delta l$  η μεταβολή του μήκους κύματος των αισθητήρων οπτικών ινών και  $K_\varepsilon$  σταθερά ίση με 1.2 rpm/δίνεται από τον κατασκευαστή).

Η κατανομή του αξονικού φορτίου κατά μήκος του δοκιμαζόμενου πασσάλου, όπως αυτή προκύπτει από τις μετρήσεις των οπτικών ινών, χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια εδάφους – πασσάλου κατά την αντίστροφη ανάλυση. Από τις μετρήσεις των οπτικών ινών στα πρώτα μέτρα του πασσάλου, όπου τοποθετήθηκαν ζεύγη αισθητήρων αντιδιαμετρικά, (βλ. Σχήμα 1) προκύπτει η καμπυλότητα,  $\phi$ , του πασσάλου σε κάθε θέση κατά τη διεξαγωγή της δοκιμαστικής φόρτισης. Η μέγιστη καμπυλότητα στο μικρότερο βάθος τοποθέτησης των αισθητήρων (αισθητήρες SB-1 and SA-1), αντιστοιχεί στη μέγιστη διαφορά μήκους κύματος των δύο αισθητήρων, ήτοι:

$$\begin{aligned} \max \phi &= \frac{\max(\varepsilon_{SB-1} - \varepsilon_{SA-1})}{h} = \\ &= \frac{\max(\Delta l_{SB-1} - \Delta l_{SA-1})}{K_\varepsilon h} \end{aligned} \quad (3)$$

όπου  $h$  η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων SB-1 και SA-1. Δεδομένου ότι η μέγιστη μετρηθείσα διαφορά μήκους κύματος του πρώτου ζεύγους αισθητήρων οπτικών ινών ήταν 0,011 nm, κατά την επιβολή του φορτίου των 5.0 MN, και η απόσταση τοποθέτησής τους ήταν ίση με 0.66 m, η μέγιστη καμπυλότητα προκύπτει ίση με  $13.9 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ . Η καμπτική ροπή, κατ' επέκταση, που επιβλήθηκε στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο λόγω εκκεντρότητας του αξονικού φορτίου είναι πρακτικά αμελητέα και ίση με 9.5 kN·m, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της Εξίσωσης 4.

$$M = E_p I_p \phi \quad (4)$$

όπου  $I_p$  η ροπή αδράνειας της διατομής του πασσάλου ( $2.0 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ ).

Ακριβής περιγραφή της δοκιμαστικής φόρτισης δίνεται από τους Κωμοδρόμος κ.ά. (2007b) και Comodromos et al. (2009).

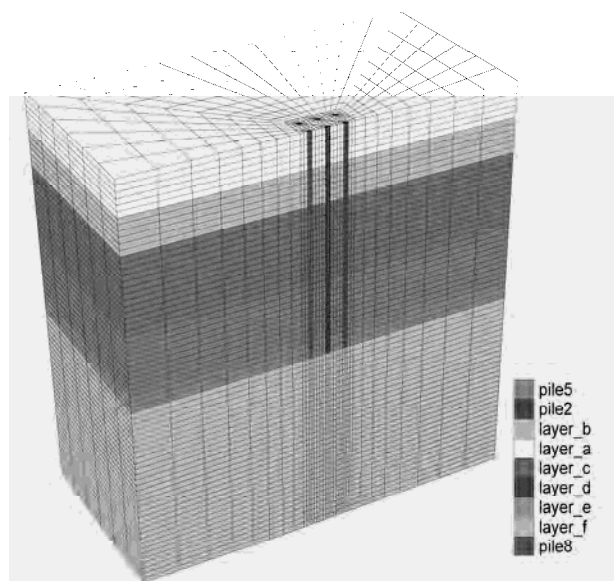
### 3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 3.1 Πλαίσιο Προσομοίωσης

Για την ακριβή αποτίμηση της απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης ακολούθησε αντίστρο-

φη ανάλυση, από την οποία αφενός προέκυψαν ποιοτικά και ποσοτικά οι επιπτώσεις της παρουσίας των πασσάλων αντίδρασης στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο και αφετέρου προσδιορίστηκαν και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υπεδάφους.

Πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση με χρήση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup>, η οποία περιελάμβανε τόσο τον δοκιμαζόμενο πάσσαλο όσο και τους πασσάλους αντίδρασης. Το φορτίο επιβάλλεται στον πάσσαλο για τα ίδια βήματα φόρτισης με την δοκιμαστική φόρτιση, ενώ παράλληλα φορτίζονται με την αντίστοιχη δύναμη ελκυσμού και οι πάσσαλοι αντίδρασης. Τα γεωτεχνικά δεδομένα προσδιορίζονται αρχικά από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που διεξήχθησαν στο παρελθόν, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης και κατάταξης που διεξήχθησαν σε διαταραγμένα δείγματα που ελήφθησαν κατά την ανόρυξη των διατρημάτων των πασσάλων.



Σχήμα 3. Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών  
Figure 3. Finite difference mesh

Στο Σχήμα 3 δίνεται το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών προσομοίωσης της κατακόρυφης δοκιμαστικής φόρτισης, το οποίο περιλαμβάνει 21458 κόμβους και 21840 στοιχεία. Για την εκμηδένιση αριθμητικού σφάλματος από τα όρια και τις οριακές συνθήκες, το πλέγμα εκτείνεται σε βάθος 70 m, ενώ το πλάτος είναι της τάξης των 60 m. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των αμμωδών στρώσεων χρησιμοποιήθηκε ο καταστατικός νόμος Mohr-Coulomb. Για τις αργιλικές στρώσεις, θεωρή-

θηκε πιο κατάλληλη η χρήση του καταστατικού νόμου Tresca, δεδομένου ότι το επιβαλλόμενο φορτίο δεν οδηγεί σε καθολική μεταβολή των τάσεων του περιβάλλοντος εδάφους και συνεπώς η ασκούμενη επί της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου τάση δεν διαφοροποιείται αισθητά από την προϋπάρχουσα τιμή.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους – πασσάλων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας με γραμμική ελαστική συμπεριφορά και οριακή διατμητική αντίσταση καθοριζόμενη από το κριτήριο Coulomb, το οποίο δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_{s\max} = c_a A + \tan \phi_a F_n \quad (5)$$

όπου  $F_{s\max}$  η οριακή τιμή της διατμητικής αντίστασης στη διεπιφάνεια,  $c_a$  η οριακή τιμή συνάφειας εδάφους – πασσάλου,  $A$  η επιφάνεια που αντιπροσωπεύει το στοιχείο διεπιφάνειας, και  $F_n$  η ορθή δύναμη στη διεπιφάνεια. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της συνάφειας  $c_a$  και της γωνίας τριβής  $\phi_a$  που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση. Οι αναπυσσόμενες ορθές και διατμητικές δυνάμεις στα στοιχεία διεπιφάνειας δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (6)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+0.5\Delta t)} A + \sigma_{si} A \quad (7)$$

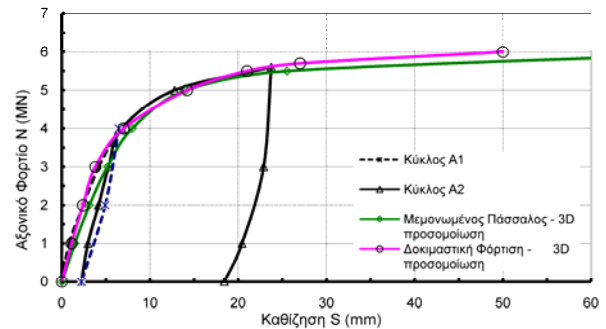
όπου  $F_n$ ,  $F_{si}$  η ορθή και διατμητική αντίσταση αντίστοιχα,  $k_n$ ,  $k_s$  η ορθή και διατμητική δυσκαμψία αντίστοιχα,  $\Delta u_{si}$  η σχετική επαύξηση του διανύσματος διατμητικής μετακίνησης,  $u_n$  η απόλυτη ορθή διείδυση του κόμβου διεπιφάνειας στην επιφάνεια,  $\sigma_n$ ,  $\sigma_{si}$  η πρόσθετη ορθή και διατμητική αντίστοιχα τάση από την προϋπάρχουσα στη διεπιφάνεια.

Σε αρκετές περιπτώσεις και ειδικότερα κατά τη θεώρηση γραμμικής ελαστικής ανάλυσης, οι τιμές που αποδίδονται στη δυσκαμψία της διεπιφάνειας αποσκοπούν στην προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του φυσικού προβλήματος. Στην πραγματοποιηθείσα ανάλυση, όπου η προσομοίωση είναι μη γραμμική, οι τιμές της δυσκαμψίας της διεπιφάνειας θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλές, σε σύγκριση με αυτήν του περιβάλλοντος εδάφους, ώστε να μειωθεί σε αμελητέα τιμή η συνεισφορά τους στις ολικές μετακινήσεις. Για την ικανοποίηση του ανωτέρω κριτηρίου χρησιμοποιήθηκαν τιμές ορθής και διατμητικής δυσκαμψίας κατά

μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις ισοδύναμες τιμές δυσκαμψίας του πλέον δύσκαμπτου γεινιάζοντος εδαφικού στοιχείου. Λεπτομερής περιγραφή της προσομοίωσης δίνεται στην αναφορά Comodromos et al. (2009).

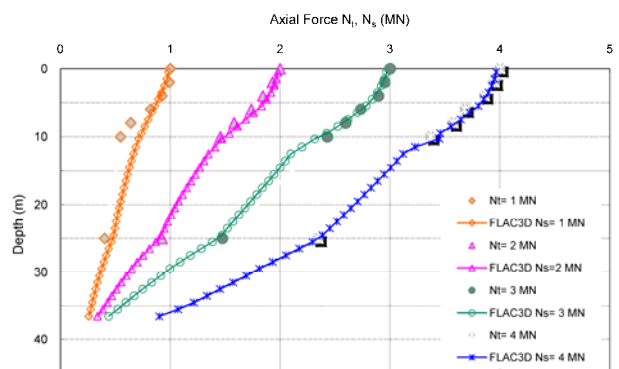
### 3.2 Αποτελέσματα Αντίστροφης Ανάλυσης

Μετά από διαδοχικές προσεγγίσεις προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές προσομοίωσης των εδαφικών στρώσεων και των στοιχείων διεπιφάνειας, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στο Σχήμα 4 δίνεται η απόκριση φορτίου καθίζησης στην κεφαλή του δοκιμαζόμενου πασσάλου, η οποία ταυτίζεται με αυτήν της δοκιμαστικής φόρτισης, σε αντίθεση με τη συντηρητική πρόβλεψη του DIN 4014 (βλ. Σχήμα 2), όπου υποεκτιμάται τόσο η φέρουσα ικανότητα όσο και η δυσκαμψία του πασσάλου.



Σχήμα 4. Καμπύλες απόκρισης φορτίου – καθίζησης δοκιμαστικής φόρτισης και αντίστροφης ανάλυσης

Figure 4. Measured and numerically established load – settlement curves for the pile test and single pile



Σχήμα 5. Μεταβολή της αξονικής δύναμης με το βάθος του δοκιμασθέντος πασσάλου από τη δοκιμαστική φόρτιση και την προσομοίωσή της (Comodromos et al., 2009)

Figure 5. Measured and numerically established axial force distribution for the tested pile (Comodromos et al., 2009)

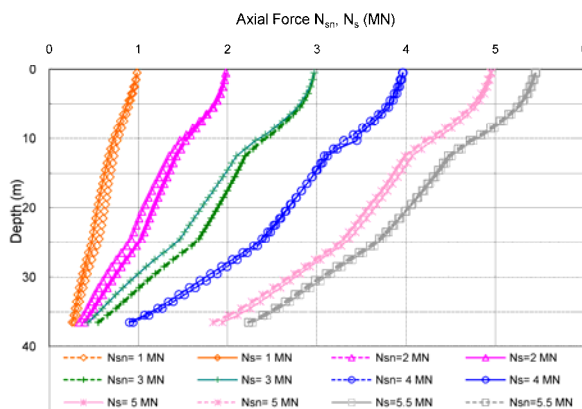
Στο Σχήμα 5 δίνεται η μεταβολή του αξονικού φορτίου κατά μήκος του δοκιμαζόμενου πασσάλου για επιβαλλόμενα φορτία 1.0, 2.0, 3.0 και 4.0 MN. Οι τιμές με το χαρακτηριστικό  $N_i$  αντιστοιχούν στις μετρήσεις των αισθητήρων οπτικών ινών, ενώ οι τιμές με ένδειξη  $N_s$  αντιστοιχούν στην προσομοίωση της δοκιμαστικής φόρτισης. Παρατηρείται πρακτικά ταύτιση των καμπυλών, γεγονός που επιβεβαιώνει την τελική επιλογή των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας των εδαφικών στρώσεων.

### 3.3 Απόκριση Μεμονωμένου Πασσάλου

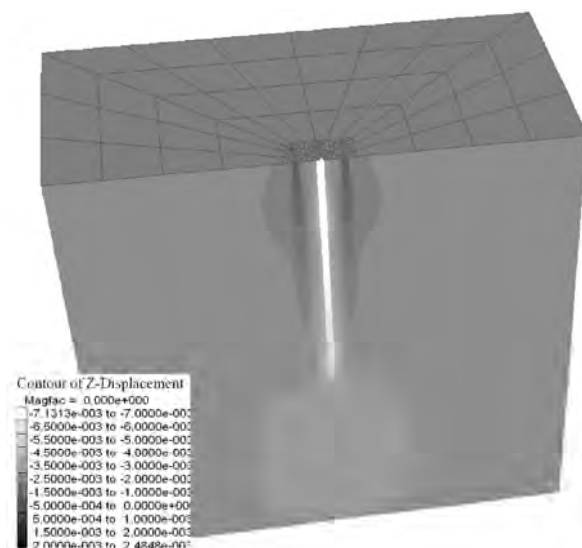
Για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των εφελκόμενων πασσάλων στην απόκριση του δοκιμαζόμενου πασσάλου πραγματοποιήθηκε πρόσθετη ανάλυση με το ίδιο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών, χωρίς την ενεργοποίηση των πασσάλων αντίδρασης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αντιστοιχούν στην απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου και δίνονται επίσης στο Σχήμα 4 (καμπύλη με ρομβοειδή σύμβολα). Από τη σύγκριση των αριθμητικά προσδιορισθεισών καμπυλών της δοκιμαστικής φόρτισης και του μεμονωμένου πασσάλου προκύπτει πρακτικά πολύ μικρή διαφορά, με την καμπύλη της δοκιμαστικής φόρτισης να είναι ελαφρά πιο δύσκαμπτη, ενώ και οι δύο αναλύσεις οδηγούν σε ίδια φέρουσα ικανότητα. Η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στο φορτίο των 3.0 MN όπου η δοκιμαστική φόρτιση εμφανίζει καθίζηση 4.18 mm και ο μεμονωμένος 5.17 mm, καθιστώντας τον πάσσαλο της δοκιμαστικής φόρτισης κατά 19% πιο δύσκαμπτο από το μεμονωμένο πάσσαλο. Η επίπτωση αυτή των πασσάλων αντίδρασης θεωρείται περιορισμένη, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί στη διάταξη των πασσάλων, δεδομένου ότι σε αντίστοιχη δοκιμαστική φόρτιση με ίδια αξονική απόσταση αλλά σταυροειδή διάταξη παρατηρήθηκε επαύξηση της δυσκαμψίας κατά 200%.

Οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ του δοκιμαζόμενου πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους πριν από την πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους. Με την έναρξη της διαρροής του εδάφους επέρχεται σταδιακή μείωση των επιπτώσεων δεδομένου ότι το περιβάλλον έδαφος δεν είναι πλέον σε θέση να μεταφέρει τις διατμητικές τάσεις που προκαλούνται από την κίνηση των εφελκόμενων πασσάλων. Η δράση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο και τους εφελκόμενους πασσάλους διαφάνεται στο Σχήμα 6 όπου δι-

νεται η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων  $N_s$  και  $N_{sn}$  οι οποίες αντιστοιχούν στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο και στο μεμονωμένο πάσσαλο (καμπύλες προερχόμενες από αριθμητική ανάλυση). Λόγω της ανύψωσης των πασσάλων αντίδρασης η συμβολή της αντίστασης αιχμής είναι πάντα μεγαλύτερη στην περίπτωση του δοκιμαζόμενου πασσάλου, μέχρι να αρχίσει η πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους οπότε τελικά οι δύο πάσσαλοι επιδεικνύουν την ίδια πλευρική αντίσταση και αντίσταση αιχμής.



Σχήμα 6. Μεταβολή της αξονικής δύναμης με το βάθος στον πάσσαλο της δοκιμαστικής φόρτισης και στον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο (Comodromos et al., 2009)  
Figure 6. Numerically established axial force vs. depth relationship for the tested and the single pile (Comodromos et al., 2009)



Σχήμα 7. Ισοτιμές κατακόρυφων μετακινήσεων της δοκιμαστικής φόρτισης (επίπεδο  $y = 0$ ) για φορτίο 4.0 MN (Comodromos et al., 2009)  
Figure 7. Vertical displacement field around tested pile for  $N = 4.0$  MN (Comodromos et al., 2009)

Στο Σχήμα 7 δίνονται οι ισοτιμές κατακόρυφων μετακινήσεων της προσομοίωσης της δοκιμαστικής φόρτισης στο επίπεδο  $y = 0$  για επιβαλλόμενο φορτίο 4.0 MN. Οι δυνάμεις αντίδρασης που ασκούνται στους εφελκόμενους πασσάλους προκαλούν την ανύψωσή τους, ενώ αντίστοιχα μεταφέρονται μέσω του εδάφους διατμητικής τάσεις στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για τη διερεύνηση της απόκρισης πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου. Κατά μήκος του δοκιμαζόμενου πασσάλου τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα καταγραφής παραμορφώσεων με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια.

Τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης, κατά την οποία προσδιορίστηκαν με ακρίβεια οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υπεδάφους. Δεδομένου ότι η απόκριση του δοκιμαζόμενου πασσάλου επηρεάζεται από τους πασσάλους αντίδρασης πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση χωρίς την παρουσία των πασσάλων αντίδρασης. Αποτιμήθηκε έτσι ποιοτικά και ποσοτικά η επίπτωση των εφελκόμενων πασσάλων στη φέρουσα ικανότητα και τη δυσκαμψία του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με και χωρίς την παρουσία των πασσάλων αντίδρασης, προέκυψε ότι η καμπύλη απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης είναι ελαφρά πιο δύσκαμπτη, ενώ και οι δύο αναλύσεις οδηγούν σε ίδια φέρουσα ικανότητα. Η επίπτωση αυτή των πασσάλων αντίδρασης θεωρείται περιορισμένη, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί στη διάταξη των πασσάλων (αριθμός εφελκόμενων πασσάλων και αξονική απόσταση).

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Comodromos, E.M., Anagnostopoulos, C.T. and Georgiadis, M.K. (2003), "Numerical assessment of axial pile group response based on load test". *Comput. Geotech.*, Vol. 30(6), pp. 505–15.

Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C. and Rentzeperis, I.K. (2009), "Pile foundation analysis and design using experimental da-

ta and 3-D numerical analysis". *Comput. Geotech.*, Vol. 36(5), pp. 819-36.

DIN 4014. (1990), Bored piles; construction procedure, design and bearing behaviour. Berlin: German code.

Fleming, W.G., Weltman, A.J., Randolph, M.F. and Elso, W.K. (1992), "Piling engineering". New York, E & FN Spon.

Itasca Consulting Group (2005), *FLAC<sup>3D</sup>, Fast Lagrangian analysis of continua user's and theory manuals*, Minneapolis.

Kitiyodom, P. and Matsumoto, T. (2002), "A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations with batter piles". *Int. J. Numer. Anal. Methods. Geomech.* Vol. 26, pp. 1349–69.

Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980), "Pile foundation analysis and design". New York, John Wiley & Sons Ltd.

Κωμοδρόμος, Α.Μ., Παπαδοπούλου, Μ.Κ. και Μπουσγολίτου Ξ.Α. (2006), "Σύνδεση 6<sup>ου</sup> Προβλήτα Λιμένα Θεσ/νίκης με τον οδικό άξονα ΠΑΘΕ", Τεύχος γεωτεχνικής αξιολόγησης και απόκρισης θεμελίωσης, ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε., Θεσ/νίκη.

Κωμοδρόμος, Α.Μ., Παπαδοπούλου, Μ.Κ. και Μπουσγολίτου Ξ.Α. (2007a), "Δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου για τη σύνδεση του 6<sup>ου</sup> Προβλήτα με τον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ και την Εγνατία Οδό", Τεύχος σχεδιασμού-ενοργάνωσης-προγράμματος δοκιμαστικής φόρτισης, ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε., Θεσ/νίκη.

Κωμοδρόμος, Α.Μ., Παπαδοπούλου, Μ.Κ. και Μπουσγολίτου Ξ.Α. (2007b), "Δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου για τη σύνδεση του 6<sup>ου</sup> Προβλήτα με τον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ και την Εγνατία Οδό", Τεύχος αποτελεσμάτων κατακόρυφης δοκιμαστικής φόρτισης, ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε., Θεσ/νίκη.

Μπαρέκα, Σ.Β., Παπαδοπούλου, Μ.Κ. και Κωμοδρόμος, Α.Μ. (2010), "Επιπτώσεις αλληλεπίδρασης και κατανομή φορτίου στους πασσάλους και την πλάκα πασσαλοθελαιμιώσεων", 6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος