

Οριζόντιες Δοκιμαστικές Φορτίσεις Πασσάλων στη Θάλασσα - Η Περίπτωση των Ναυδέτων του Λιμένα Λαυρίου

Off-Shore Lateral Pile Load Tests – The Case of Lavrio Port Finger Piers

ΠΛΑΤΗΣ Α.Δ. Πολιτικός Μηχανικός, MEng, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.
ΣΟΛΟΜΩΝΙΔΗΣ Χ. Πολιτικός Μηχανικός, PhD, ΡΟΓΚΑΝ & ΣΥΝ/ΤΕΣ Α.Ε.
ΠΑΠΑΝΤΩΝΙΟΥ Α.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, ΧΡ.Δ.ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται η καλά τεκμηριωμένη από πλευράς ενόργανων μετρήσεων οριζόντια δοκιμαστική φόρτιση 4 μη λειτουργικών πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα, διαμέτρου 1,00 m περίπου, με μεταλλικό μανδύα μεταβλητού μήκους, στο θαλάσσιο χώρο του λιμένα Λαυρίου. Οι ενόργανες μετρήσεις περιέλαβαν μετρήσεις οριζοντίου φορτίου, οριζόντιας μετακίνησης καθ' ύψος των πασσάλων και στροφής της κεφαλής με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μανόμετρου, αποκλισημετρήσεων, μηκυσιομέτρου και χωροστάθμησης ακριβείας. Τα αποτελέσματα των ενόργανων μετρήσεων σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα αναμενόμενα βάσει των στοιχείων της μελέτης και γίνονται προτάσεις για άλλα αντίστοιχα έργα.

ABSTRACT: The well documented, in terms of instrumentation, case of off-shore lateral pile load tests on 4 trial reinforced concrete piles, approximately 1.00 m in diameter, with a variable length steel sleeve, in Lavrio Port, is presented. The instrumentation included lateral load, lateral movements along the entire pile length and pile head rotation measurements with the use of an electronic manometer, inclinometers, dial gauge and precision surveying. The test results are discussed and compared with the expected ones and finally proposals are made concerning the type and methodology of instrumentation that should be adopted in other similar projects.

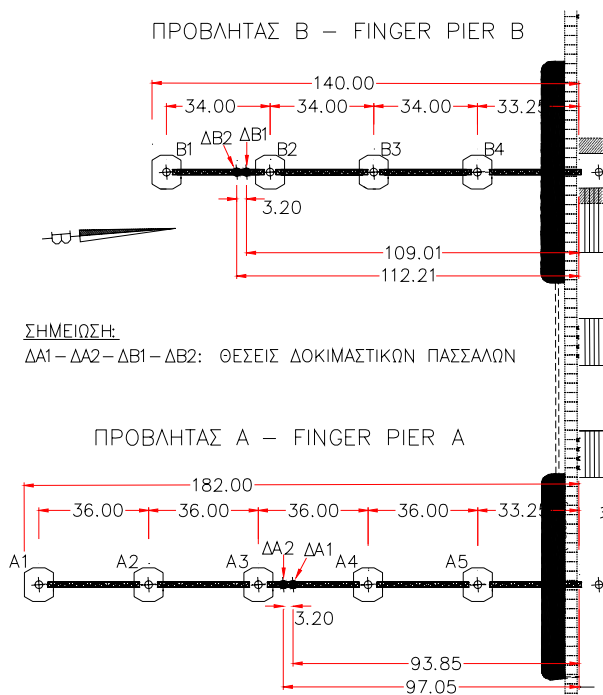
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα ανακοίνωση αναφέρεται στην καλά τεκμηριωμένη από πλευράς ενόργανων μετρήσεων οριζόντια δοκιμαστική φόρτιση 4 μη λειτουργικών μεταλλικών πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα, $\varnothing 1,00$ m περίπου, με μεταλλικό μανδύα μεταβλητού μήκους, στο θαλάσσιο χώρο του λιμένα Λαυρίου. Το έργο περιελάμβανε την κατασκευή δύο προβλητών πλαγιοδέτησης σκαφών Ε/Γ – Ο/Γ ακτοπλοΐας (Finger Piers), αποτελούμενων από 5 σταθερά ναύδετα (προβλήτας Α) και 4 σταθερά ναύδετα (προβλήτας Β) αντίστοιχα (Σχήμα 1). Κάθε ναύδετο φέρεται επί 9 πασσάλων $\varnothing 1,00$ m περίπου από έγχυτο οπλισμένο σκυρόδεμα, ενισχυμένων στο μεγαλύτερο τμήμα τους με παραμένοντα μεταλλικό σωλήνα.

Κατά την παραβολή και πρόσδεση των

σκαφών ασκούνται μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις στα ναύδετα και καθ' επέκταση στους πασσάλους που τα φέρουν (≈ 500 kN ανά πάσσαλο), με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός των πασσάλων αυτών να εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη φόρτιση αυτή. Η συμπεριφορά του εδάφους αλλά και του οπλισμένου σκυροδέματος σε αυτού του μεγέθους τις φορτίσεις και στις αντίστοιχα μεγάλες παραμορφώσεις καθορίζουν εν πολλοίς τη μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος πάσσαλος-έδαφος και το τελικά απαιτούμενο μήκος πάκτωσης, διάμετρο και οπλισμό του πασσάλου.

Σκοπός των δοκιμαστικών φορτίσεων ήταν η επαλήθευση των παραδοχών της μελέτης ως προς τις εδαφικές παραμέτρους σχεδιασμού που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση, και, αν απαιτείται, την κατάλληλη αναθεώρησή τους.



Σχήμα 1. Διάταξη ναυδέτων και πασσάλων
Figure 1. Finger Piers' and piles' layout.

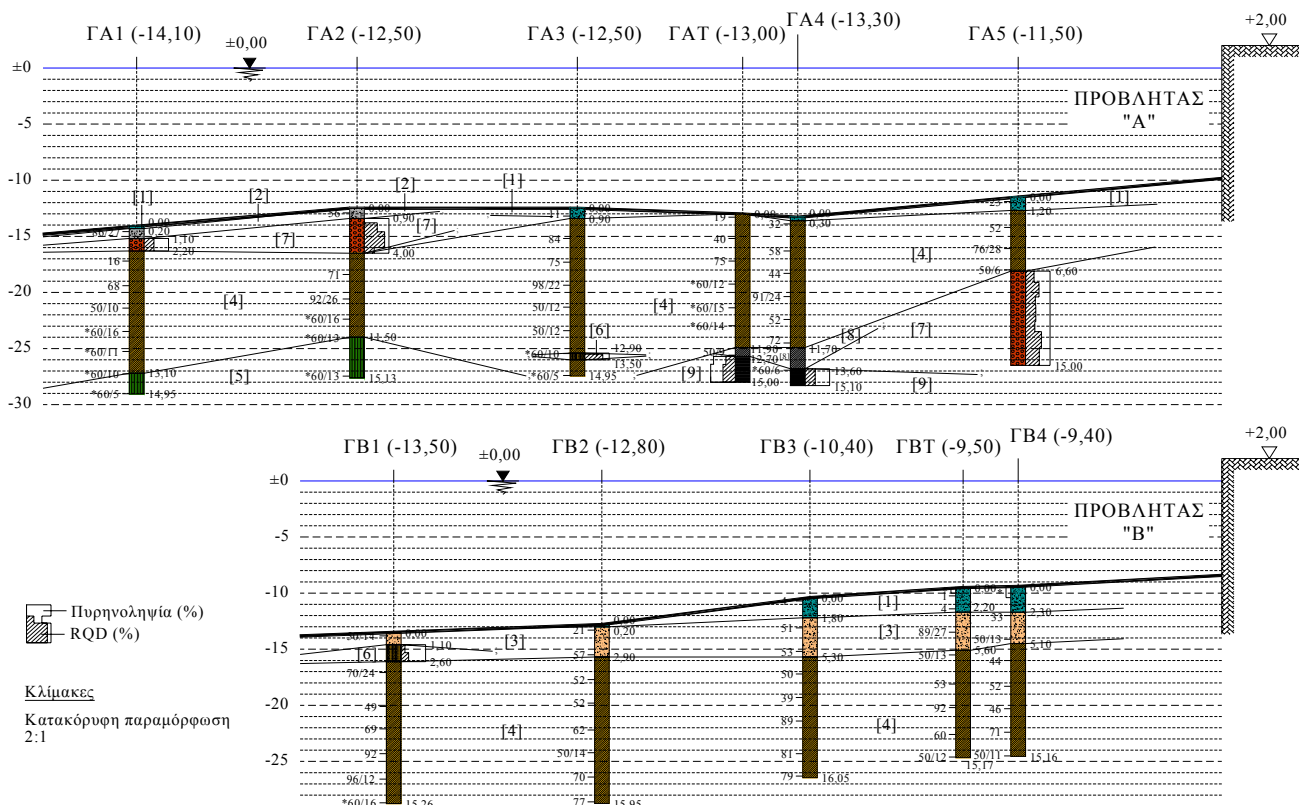
2. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο πυθμένας καλύπτεται από μικρού πάχους (0,20-2,30 m περίπου) χαλαρά ιζήματα πυθμένα αμμοίλυδους σύστασης, κάτω από τα οποία απαντάται το ψαμμιτομαργαϊκό υπόβαθρο, το οποίο εμφανίζεται υπό τη μορφή (α) πολύ σιφρών ως σκληρών αργίλων μέσης πλαστικότητας (CL), με φακούς, θύλακες και ενστρώσεις κατά θέσεις μαργών και ιλυολίθων και (β) κροκαλολατυποπαγών και ψηφιδωπαγών κερματισμένων γενικά και συμπαγών κατά θέσεις και τοπικά μόνο έντονα αποσαθρωμένων υπό τη μορφή πυκνών αργιολίλυδων αμμοχαλικών.

Πιο συγκεκριμένα, στο βάθος ενδιαφέροντος απαντώνται οι ακόλουθοι σχηματισμοί (βλ. και γεωτεχνικές τομές στο Σχήμα 2):

Στρώμα 1: Χαλαρά ιζήματα πυθμένα αποτελούμενα από τεφρές ΑΜΜΟΪΛΥΕΣ (SM), με χαλίκια και φύκια κατά θέσεις, πάχους έως 2,30 m. Η αντοχή του στρώματος αυτού είναι γενικά πολύ χαμηλή (βύθιση δειγματολήπτη δοκιμής SPT), αυξάνει δε ελαφρά με το βάθος.

Στρώμα 2: Τεφρό αργιολίλυδες ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ (SC-SM-GC-GM-GW), πυκνής απόθεσης, τεφρού χρώματος, πάχους $\approx 1,00$ m.



Σχήμα 2. Γεωτεχνικές τομές κατά μήκος των δύο προβλητών
Figure 2. Geotechnical profiles along the two finger piers.

Στρώμα 3: Καστανή/καστανέρυθρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), πολύ σιφρή ως σκληρή, με χαλίκια, πάχους 1,50-3,50 m, τρεπόμενη τοπικά σε πυκνό αργιλώδες ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ.

Στρώμα 4: Καστανοκίτρινη/καστανότεφρη ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), πολύ σιφρή ως σκληρή, πάχους 5,40 ως >14,05 m, με ενστρώσεις και φακούς ΜΑΡΓΑΣ/ΠΗΛΙΤΗ κατά θέσεις (εξαλλοιωμένη ΜΑΡΓΑ). Είναι ο επικρατών σχηματισμός στο χώρο του έργου.

Στρώμα 5: Εναλλαγές καστανότεφρης ΜΑΡΓΑΣ και τεφρού ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ.

Στρώμα 6: Ενστρώσεις ΨΑΜΜΙΤΩΝ και ασθενών ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΩΝ κερματισμένων γενικά, πάχους 0,60-1,50 m.

Στρώμα 7: Καστανοκίτρινο/καστανότεφρο ΚΡΟΚΑΛΟΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ και κατά θέσεις ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΕΣ, κερματισμένο γενικά και συμπαγές κατά θέσεις, με ίχνη καρστικοποίησης.

Στρώμα 8: Σκοτεινότεφρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, πολύ σιφρή, με λεπτά χαλίκια (εξαλλοιωμένη ΜΑΡΓΑ), πάχους 0,80-1,90 m.

Στρώμα 9: Σκοτεινότεφρος ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος γενικά, συμπαγής κατά θέσεις και εξαλλοιωμένος τοπικά.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνονται οι παράμετροι σχεδιασμού που προτάθηκαν για κάθε στρώμα ξεχωριστά.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΑΣ/ΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Κάθε δοκιμαστικός πάσσαλος κατάσκευάστηκε με την ίδια μέθοδο, υλικά και μηχανήματα όπως και οι λοιποί λειτουργικοί πάσσαλοι, πλην του πάχους του σωλήνα, το οποίο ήταν 16 mm αντί 20 mm και το οποίο λήφθηκε υπόψη στην αξιολόγηση των δοκιμών.

Η στάθμη εφαρμογής του φορτίου ανυψώθηκε στο +1,10 m (αντί +0,60 m των λειτουργικών πασσάλων) έτσι ώστε να μη γίνει κάποια ζημιά στους μετρητές και τις λοιπές συσκευές από το νερό της θάλασσας ή τον κυματισμό.

Η αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων κάθε ζεύγους ήταν η ίδια με αυτή των λειτουργικών πασσάλων 3,20 m.

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού
Table 1. Geotechnical Design Parameters.

ΠΑΡΑ- ΜΕΤΡΟΣ	ΣΤΡΩΜΑ						
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]-[8]	[6]-[9]	[7]
γ (kN/m ³)	18,0	22,0	21,3	21,0	21,5	23,0	25,0
φ'	26°	35°	-	-	-	30° ⁽¹⁾ 20° ⁽²⁾	45° ⁽¹⁾ 45° ⁽²⁾
c' (kPa)	0	0	-	-	-	10 ⁽¹⁾ 25 ⁽²⁾	25 ⁽¹⁾ 50 ⁽²⁾
Φ_u	-	-	0°	0°	0°	-	-
c_u (kPa)	-	-	150	200	200	-	-
E_s (MPa) ⁽⁴⁾	2	50	15	10+2,5z ⁽³⁾ 10+3,5z ⁽³⁾	10+2,5z ⁽³⁾ 10+3,5z ⁽³⁾	100 500	500 2.000
E_s (MPa) ⁽⁵⁾	-	-	-	60+15z ⁽³⁾ 60+21z ⁽³⁾	80+20z ⁽³⁾ 80+28z ⁽³⁾	500 1.000	2.000 4.000
ϵ_{50} ⁽⁶⁾	-	-	2%-3%	2%-3%	2%-3%	0,5%	0,1%
q_s (MPa) ⁽⁷⁾	0	20	-	-	-	-	-
q_u (MPa)	-	-	-	-	-	0,5	5,0
τ_{mf} (kPa) ⁽⁸⁾	0	120	50	60	60	80	500
σ_s (MPa) ⁽⁹⁾	-	-	-	1,5	1,5	1,5	5,0

⁽¹⁾ Επιφανειακά στρώματα

⁽²⁾ Βαθεία στρώματα

⁽³⁾ z = βάθος από τη στάθμη -12,00 m

⁽⁴⁾ Εύρος τιμών για αναλύσεις ευαισθησίας (αντιστοιχεί σε πεδίο τάσεων $q_{net}/q_{ult} \geq 0,4$)

⁽⁵⁾ Εύρος τιμών για αναλύσεις ευαισθησίας (αντιστοιχεί σε πεδίο τάσεων $q_{net}/q_{ult} \leq 0,02$)

⁽⁶⁾ Εύρος τιμών της παραμόρφωσης στο 50% του $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ για αναλύσεις ευαισθησίας

⁽⁷⁾ Αντίσταση αιχμής κώνου (q_s κατά DIN 4014)

⁽⁸⁾ Οριακή πλευρική τριβή κατά DIN 4014 για το σχεδιασμό πασσάλων

⁽⁹⁾ Οριακή τάση αιχμής κατά DIN 4014 για το σχεδιασμό πασσάλων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή του φορτίου των δοκιμαστικών φορτίσεων αποτελείται από ένα υδραυλικό έμβολο («γρύλλο») διπλής ενέργειας, εξωτερικής διαμέτρου 180 mm και μήκους 2,00 m περίπου και μία ηλεκτρική αντλία Enerpac. Η συνολική ικανότητα του «γρύλλου» ήταν 1.010 kN σε πίεση 700 bar (ήτοι 84% μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο δοκιμής) η δε μέγιστη διαδρομή του 1,60 m προκειμένου να καλύπτεται με ασφάλεια η μέγιστη αναμενόμενη μετατόπιση της κεφαλής των πασσάλων ($2 \times 0,65 = 1,30$ m για τη δοκιμαστική φόρτιση του προβλήτα Α και η οποία έφθασε τελικά τα $2 \times 0,75 = 1,50$ m – βλ. Σχήμα 6). Ο «γρύλλος» ήταν διατεταγμένος σε συνδυασμό με το σύστημα αντίδρασης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει αξονικά το φορτίο στους δοκιμαστικούς πασσάλους (Φωτογραφία 1).

Το φορτίο μετρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών με ένα καλιμπραρισμένο ηλεκτρονικό μανόμετρο ακρίβειας 0,20 bar.

Η μέτρηση της μετακίνησης της κεφαλής των δοκιμαστικών πασσάλων γινόταν με χωροστάθμηση ακριβείας (total station - ακρίβεια 1 mm) από σταθερά σημεία αναφοράς, που δεν επηρεάζοντο από τη δοκιμαστική φόρτιση ή από άλλες εργασίες εκτελούμενες στο χώρο του εργοταξίου.

Επιπλέον προβλέφθηκε η τοποθέτηση αποκλισιομετρικών σωλήνων εντός των δοκιμαστικών πασσάλων προκειμένου να ελέγχονται στο τέλος κάθε φάσης φόρτισης οι οριζόντιες μετακινήσεις καθ' ύψος των πασσάλων με τη βοήθεια αποκλισιομέτρου. Οι αποκλισιομετρικοί σωλήνες τοποθετήθηκαν μετά τη σκυροδέτηση των πασσάλων εντός μεταλλικού σωλήνα διαμέτρου 100 mm, ο οποίος στερεώθηκε πάνω στον κλωβό του οπλισμού και τοποθετήθηκε μαζί με αυτόν εντός του διατρήματος των πασσάλων. Ο μεταλλικός σωλήνας έφθανε μέχρι το κάτω άκρο των πασσάλων.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών φορτίσεων εκτελέστηκαν 4 αποκλισιομετρήσεις σε κάθε δοκιμαστικό πάσσαλο σε χαρακτηριστικές φάσεις των δοκιμαστικών φορτίσεων (στο τέλος κάθε κύκλου δοκιμαστικής φόρτισης και μετά την τελική αποφόρτιση). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα διαδοχικών αποκλισιομετρήσεων, που λαμβάνονταν σε διάφορες φάσεις της δοκιμαστικής φόρτισης, καταγράφονταν οι οριζόντιες μετακινήσεις του πασσάλου συναρτήσει του βάθους.

Τέλος έγινε χρήση ενός μηκυσιομέτρου ακρίβειας 0,01 mm, τοποθετημένου επί ολισθαίνουσας δοκού αναφοράς (Φωτογραφία 2)

για την ακριβή μέτρηση του ρυθμού μείωσης των ερπυστικών μετακινήσεων στο τέλος κάθε φάσης φόρτισης. Η δοκός αναφοράς εστηρίζετο ακλόνητα επί του ενός πασσάλου και ολισθαινε μέσω οδηγού επί του άλλου πασσάλου.



Φωτ. 1. Διάταξη δοκιμαστικής φόρτισης
Photo 1. Pile load test layout.



Φωτ. 2. Διάταξη μέτρησης μεταβολής οριζόντιας απόστασης μεταξύ πασσάλων
Photo 2. Lateral pile displacement measurement layout.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση των παραμέτρων σχεδιασμού του εδάφους για τις αναλύσεις των ναυδέτων με το πρόγραμμα GROUP-v7.0 (μη γραμμική ανάλυση ομάδας πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση), έγινε πρώτα ανάλυση των δοκιμαστικών φορτίσεων με το πρόγραμμα LPILE^{PLUS}-v5.0 (μη γραμμική ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση).

Για το σκοπό αυτό προσδιορίστηκε καθ' αρχή η σχέση καμπτικής ροπής (M) – καμπτικής δυσκαμψίας (EI) για κάθε ένα από τους 4 πασσάλους. Αυτό επετεύχθη αξιοποιώντας τις μετρήσεις στροφής καθ' ύψος των πασσάλων,

που έγιναν κατά τις αποκλισημετρήσεις στο τέλος κάθε μιας από τις 3 φάσεις φόρτισης των πασσάλων (βλ. σχήμα 3 για τον ΔΑ2).

Πιο συγκεκριμένα αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις στροφής των πασσάλων περί οριζόντιο άξονα κάθετο στο επίπεδο φόρτισης (στροφή θ - βλ. Σχήμα 3), στο τμήμα των πασσάλων πάνω από τον πυθμένα, όπου δεν ασκούνται άλλες δυνάμεις πλην του φορτίου δοκιμής, και όπου κατά συνέπεια είναι γνωστές οι καμπτικές ροπές καθ' ύψος του πασσάλου [$M = f_1(z)$]. Από την κατανομή της στροφής καθ' ύψος των πασσάλων $\theta = f_2(z)$, εκτιμάται με παραγωγή της κατανομής της καμπυλότητας

$$\frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} \left[\frac{1}{r} = f_3(z) \right],$$

οπότε μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση $M = f_4\left(\frac{1}{r}\right)$, που ισχύει για τους συγκεκριμένους

πασσάλους (Σχήμα 4) και η οποία ενσωματώνει τη συμβολή:

- μεταλλικού σωλήνα ($\varnothing 1066,8\text{mm}$, $t=16\text{mm}$),
- σκυροδέματος (μη γραμμική ως προς M) και
- σπλισμού πασσάλων (24 \varnothing 25, S500s).

Τέλος από τη θεμελιώδη σχέση:

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} \rightarrow EI = \frac{M}{1/r} \quad (1)$$

εκτιμήθηκε η μη γραμμική σχέση $EI = f_5(M)$, που ισχύει για τους συγκεκριμένους δοκιμαστικούς πασσάλους (βλ. σχήμα 5) και η οποία εισήχθη ως δεδομένη στο πρόγραμμα LPILE^{PLUS}-v5.0 για τις ανάστροφες αναλύσεις των δοκιμαστικών πασσάλων.

Άλλα στοιχεία τα οποία ελήφθησαν ως δεδομένα στις ανάστροφες αυτές αναλύσεις είναι:

- Η στρωματογραφία στις θέσεις των δοκιμαστικών φορτίσεων βάσει των στοιχείων των παρακείμενων γεωτρήσεων.
- Τα γεωμετρικά στοιχεία των δοκιμαστικών πασσάλων, όπως αυτοί κατασκευάστηκαν (βάθος πυθμένα, μήκος μεταλλικού σωλήνα, συνολικό μήκος πασσάλου, σπλισμός), καθώς και η στάθμη επιβολής του φορτίου δοκιμής (+1,10 m).
- Η καμπτική δυσκαμψία (EI) του κατώτερου, χωρίς μεταλλικό σωλήνα, τμήματος των δοκιμαστικών πασσάλων, η οποία εκτιμήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια του προγράμματος LPILE^{PLUS}-v5.0.
- Το υγρό φαινόμενο βάρος των στρωμάτων [3] και [4], που υπεισέρχονται στις ανάστροφες αναλύσεις (τιμές σχεδιασμού πίνακα 1).

Τα ζητούμενα από τις ανάστροφες αναλύσεις ήταν οι λοιπές παράμετροι σχεδιασμού

των στρωμάτων [3] και [4], που υπεισέρχονται στις αναλύσεις των πασσάλων με το πρόγραμμα GROUP-v7.0, ήτοι:

- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u).
- Παραμόρφωση στο 50% του φορτίου αστοχίας (ϵ_{50}).
- Ρυθμός αύξησης (K) μέτρου συμπίεσης με το βάθος ($E_s = K \cdot z$).

Πιο συγκεκριμένα αναζητήθηκαν εκείνες οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων, που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση της ελαστικής γραμμής των δοκιμαστικών πασσάλων στο τέλος κάθε μιας από τις 3 φάσεις φόρτισης, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τις αντίστοιχες αποκλισημετρήσεις (βλ. Σχήμα 6).

Δεδομένου ότι στην περιοχή της δοκιμαστικής φόρτισης του άξονα A (ΔΑ1-ΔΑ2) απαντάται μόνο το στρώμα [4], ενώ στην περιοχή της δοκιμαστικής φόρτισης του άξονα B (ΔΒ1-ΔΒ2) απαντώνται τόσο το στρώμα [4] (κάτω) όσο και το στρώμα [3] (άνω), έγινε ανάστροφη ανάλυση πρώτα στον άξονα A, προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι σχεδιασμού του στρώματος [4] και στη συνέχεια, θεωρώντας τις προσδιορισθείσες παραμέτρους του στρώματος [4] ως δεδομένες, προσδιορίστηκαν από την ανάστροφη ανάλυση της δοκιμαστικής φόρτισης του άξονα B οι παράμετροι σχεδιασμού τους στρώματος [3].

Σημειώνεται ότι η απόκριση των 2 δοκιμαστικών πασσάλων του άξονα A (ΔΑ1-ΔΑ2) ήταν σχεδόν ταυτόσημη, αλλά υπήρχε σημαντική διαφορά στην απόκριση των δοκιμαστικών πασσάλων του άξονα B (ΔΒ1-ΔΒ2). Στην τελευταία περίπτωση η ανάστροφη ανάλυση πραγματοποιήθηκε συντηρητικά για το δυσμενέστερο από τους δυο δοκιμαστικούς πασσάλους (ΔΒ1), προκειμένου να εκτιμηθούν οι συντηρητικότερες τιμές.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

5.1 Εκτίμηση καμπτικής δυσκαμψίας (EI) δοκιμαστικών πασσάλων

Ακολουθώντας την προηγουμένως περιγραφείσα μεθοδολογία έγινε εκτίμηση της καμπτικής δυσκαμψίας (EI) του ανώτερου σωληνωμένου τμήματος των δοκιμαστικών πασσάλων. Πιο συγκεκριμένα σχεδιάστηκε κατ' αρχήν η μεταβολή της στροφής θ του πασσάλου καθ' ύψος του και προσεγγίστηκε η κατανομή αυτή με πολύ καλή προσέγγιση ($R^2 = 0,9959-0,9999$) με πολυωνυμική εξίσωση 3^{ου} βαθμού (βλ. Σχήμα 3 για τον ΔΑ2) της μορφής:

$$\theta = f_2(z) = c_1 z^3 + c_2 z^2 + c_3 z + c_4 \quad (2)$$

Από την Εξίσωση (2) εκτιμήθηκε με παραγωγή της καμπυλότητας $\frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz}$ καθ' ύψος των

πασσάλων: $\frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} = f_3(z) = 3c_1 z^2 + 2c_2 z + c_3 \quad (3)$

Για το ελεύθερο τμήμα του πασσάλου πάνω από τον πυθμένα εκτιμήθηκε η καμπτική ροπή καθ' ύψος του πασσάλου από τη σχέση:

$$M = f_1(z) = P \cdot (1,10+z) \quad (4)$$

Οι υπολογιζόμενες τιμές από τις σχέσεις (3) και (4) για όλες τις περιπτώσεις φορτίσεων και για όλους τους δοκιμαστικούς πασσάλους παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 4, απ' όπου παρατηρείται πολύ καλή συσχέτιση των τιμών, ανεξάρτητα από το μέγεθος του φορτίου ή δοκιμαστικό πάσσαλο. Από το Σχήμα 4 παρατηρούμε ότι η σχέση καμπτικής ροπής - καμπυλότητας προσεγγίζεται με πολύ καλή προσέγγιση ($R^2 = 0,9959$) με την παρακάτω πολυωνυμική εξίσωση 3^{ου} βαθμού:

$$M = f_4\left(\frac{1}{r}\right) = 0,0191\left(\frac{1}{r}\right)^3 - 3,2443\left(\frac{1}{r}\right)^2 + 273,97\left(\frac{1}{r}\right) \quad (5)$$

Τέλος συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (5), προέκυψε η παρακάτω σχέση του ΕΙ συναρτήσει του $1/r$:

$$EI = 0,0191\left(\frac{1}{r}\right)^2 - 3,2443\left(\frac{1}{r}\right) + 273,97 \quad (6)$$

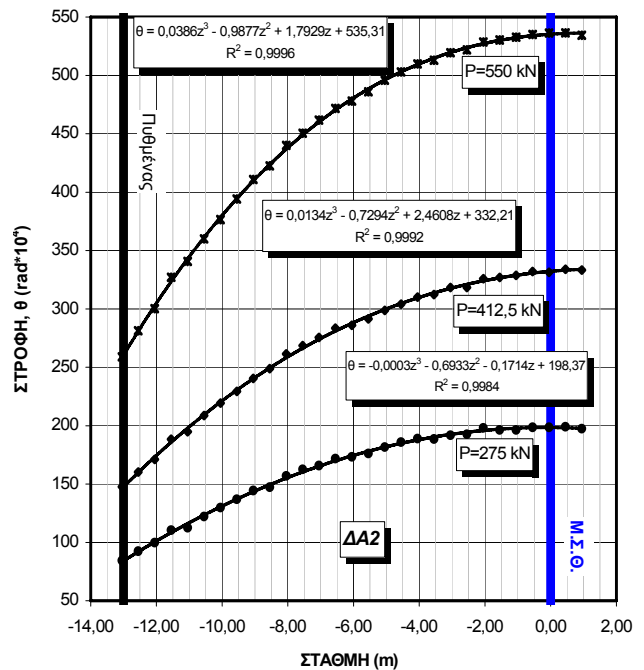
Με τη βοήθεια των σχέσεων (5) και (6) έχει σχεδιαστεί το διάγραμμα του Σχήματος 5, το οποίο δίνει τη σχέση $EI = f_5(M)$, που ισχύει για το σωληνωμένο τμήμα των συγκεκριμένων πασσάλων, και η οποία εισήχθη ως δεδομένη στο πρόγραμμα LPILE^{PLUS}-v5.0 για τις ανάστροφες αναλύσεις των δοκιμαστικών πασσάλων, που περιγράφονται στη συνέχεια.

Όσον αφορά την καμπτική δυσκαμψία (EI) του κατώτερου, χωρίς μεταλλικό σωλήνα, τμήματος των πασσάλων, αυτή εκτιμήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια του προγράμματος LPILE^{PLUS}-v5.0 λαμβάνοντας υπόψη:

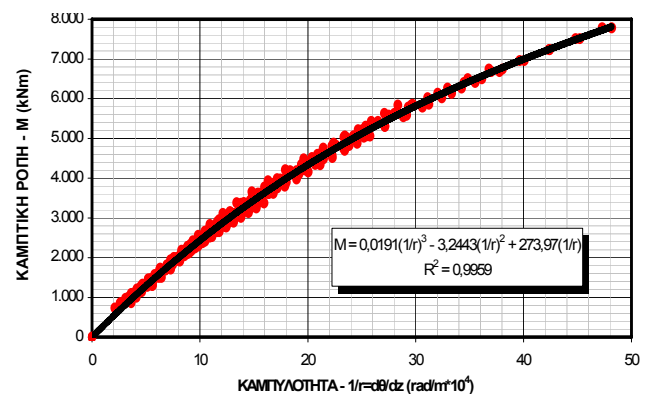
- τον οπλισμό στο κατώτερο τμήμα κάθε πασσάλου (24Ø32 στους πασσάλους ΔΑ1-ΔΑ2 και 24Ø25 στους ΔΒ1-ΔΒ2),
- $E_{\sigma\kappa\upsilon\rho\omicron\delta} = 28.000 \text{ MPa}$ και
- $E_{\chi\acute{\alpha}\lambda\upsilon\beta\alpha} = 200.000 \text{ MPa}$.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις αυτές, η τιμή του EI στο κατώτερο τμήμα κάθε πασσάλου λήφθηκε ίση προς:

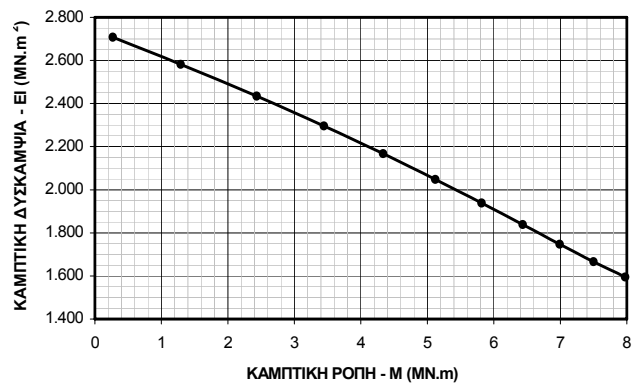
ΔΑ1-ΔΑ2: $EI = 580 \text{ MN.m}^2$
 ΔΒ1-ΔΒ2: $EI = 400 \text{ MN.m}^2$.



Σχήμα 3. Στροφή πασσάλου στο επίπεδο φόρτισης
 Figure 3. Pile rotation on the loading plane.



Σχήμα 4. Συσχέτιση στροφής-καμπυλότητας πασσάλου στο επίπεδο φόρτισης
 Figure 4. Correlation between pile rotation-curvature on the loading plane.



Σχήμα 5. Συσχέτιση καμπτικής ροπής-δυσκαμψίας πασσάλου στο επίπεδο φόρτισης
 Figure 5. Correlation between pile bending moment-stiffness on the loading plane.

5.2 Ανάστροφη ανάλυση

Η ανάστροφη ανάλυση των δοκιμαστικών πασσάλων έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο εδάφιο 4, λαμβάνοντας υπόψη τα EI που υπολογίστηκαν παραπάνω.

Δεδομένου ότι παρατηρήθηκε δυσκολία να βρεθεί συνδυασμός των c_u , ϵ_{50} και K του στρώματος [4] που να οδηγεί στην πλήρη σύμπτωση της υπολογιζόμενης από τις αναστροφές αναλύσεις ελαστικής γραμμής των δοκιμαστικών πασσάλων στο τέλος κάθε μιας από τις 3 φάσεις φόρτισης, με τις αντίστοιχες μετρηθείσες, τελικά επιλέχθηκε εκείνος ο συνδυασμός των c_u , ϵ_{50} και K , που οδηγεί σε πλήρη σύμπτωση θεωρητικής-μετρηθείσας ελαστικής γραμμής στην $3^{\text{η}}$ και κρίσιμότερη για το σχεδιασμό των πασσάλων φόρτιση και στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση στις άλλες δύο (μικρότερες) φορτίσεις (Σχήμα 6). Οι προσδιορισθείσες τιμές των παραμέτρων αυτών του στρώματος [4], που οδηγούν στις ελαστικές γραμμές που φαίνονται στο σχήμα 6 παρουσιάζονται στον πίνακα 2 (τελικές τιμές).

Στη συνέχεια, θεωρώντας τις προσδιορισθείσες παραμέτρους του στρώματος [4] ως δεδομένες, πραγματοποιήθηκε αναστροφή ανάλυση της δοκιμαστικής φόρτισης του άξονα Β, προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι σχεδιασμού τους στρώματος [3].

Από την αναστροφή αυτή ανάλυση κατέστη δυνατόν να βρεθεί συνδυασμός των c_u , ϵ_{50} και K του στρώματος [3], που, σε συνδυασμό με τις προσδιορισθείσες τιμές σχεδιασμού του στρώματος [4], να οδηγεί σε πλήρη σύμπτωση των υπολογιζόμενων από τις αναστροφές αναλύσεις ελαστικών γραμμών των δοκιμαστικών πασσάλων στο τέλος κάθε μιας από τις 3 φάσεις φόρτισης, με τις αντίστοιχες μετρηθείσες (Σχήμα 6). Οι προσδιορισθείσες τιμές των παραμέτρων αυτών του στρώματος [3], που οδηγούν στις ελαστικές γραμμές που φαίνονται στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 (τελικές τιμές).

5.3 Αναθεωρημένες παράμετροι σχεδιασμού

Μετά την ολοκλήρωση της αναστροφής ανάλυσης των δοκιμαστικών φορτίσεων, απ' όπου προσδιορίστηκαν οι κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού των στρωμάτων [3] και [4], που επικρατούν στην περιοχή του έργου, γίνεται στη συνέχεια στον Πίνακα 2 σύγκριση των τιμών αυτών με τις προταθείσες αρχικά τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 1. Από τη σύγκριση αυτή παρατηρείται πολύ καλή συσχέτιση των τι-

μών που προσδιορίστηκαν από τις αναστροφές αναλύσεις με τις αρχικά προταθείσες.

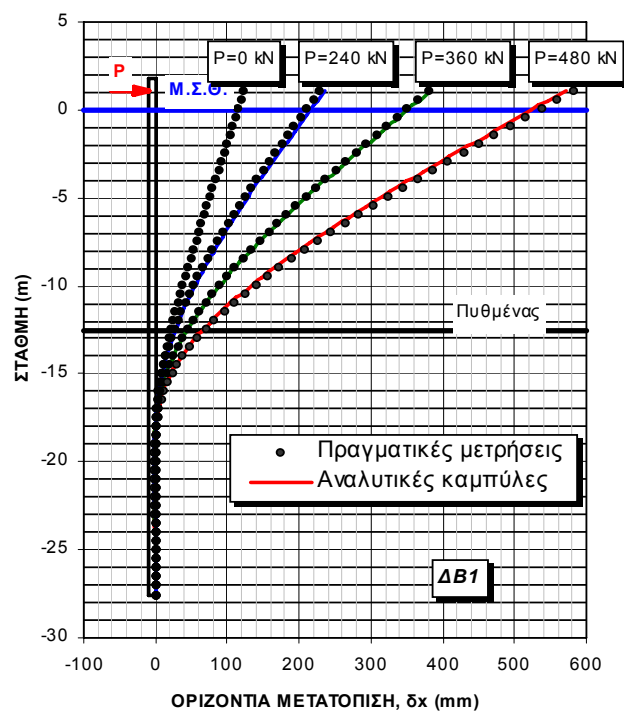
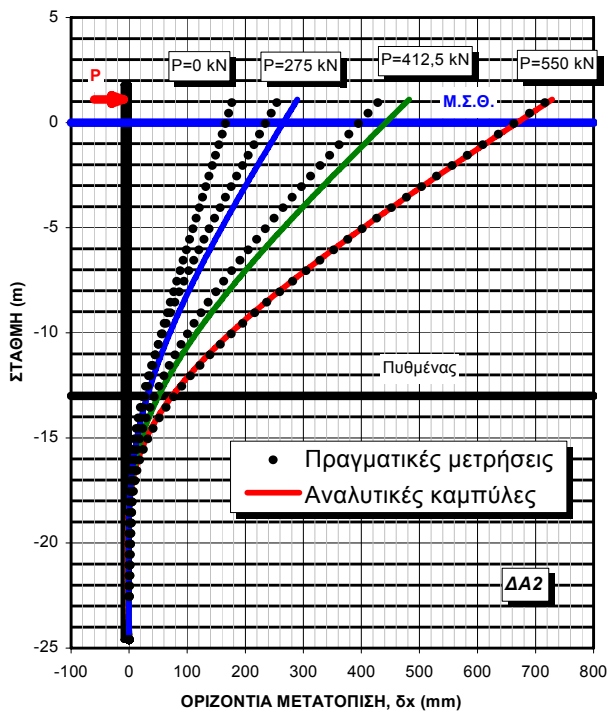
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σε οριζόντιες δοκιμαστικές φορτίσεις στη θάλασσα υπάρχουν ορισμένες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις αντίστοιχες στην ξηρά, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εκτέλεσή τους. Πιο συγκεκριμένα οι αναπτυσσόμενες ροπές, στροφές και μετακινήσεις είναι ιδιαίτερα μεγάλες, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά τόσο του εδάφους όσο και του σκυροδέματος να είναι μη γραμμικές. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της μη γραμμικής συμπεριφοράς του πασσάλου (σχέση M-EI) προκειμένου να μπορούν στη συνέχεια να προσδιοριστούν οι εδαφικές παράμετροι ενδιαφέροντος από τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών φορτίσεων.

Στην παρούσα ανακοίνωση αναπτύχθηκε η μεθοδολογία με την οποία μπορεί να γίνει αναστροφή ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οριζοντίων δοκιμαστικών φορτίσεων πασσάλων, ιδιαίτερα σε πασσάλους στη θάλασσα, αξιοποιώντας κυρίως ακριβείς μετρήσεις προσδιορισμού της ελαστικής γραμμής των πασσάλων κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής φόρτισης. Άλλου είδους μετρήσεις που μπορεί να αξιοποιηθούν σε αυτού του είδους δοκιμαστικές φορτίσεις είναι η μέτρηση της παραμόρφωσης σκυροδέματος και οπλισμού καθ' ύψος του πασσάλου με τη βοήθεια strain gauges, η μέτρηση της στροφής της κεφαλής με κλισίμετρα, καθώς και ο συνεχής προσδιορισμός της ελαστικής γραμμής των πασσάλων καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής με μόνιμα εγκατεστημένα αποκλισιόμετρα εντός αυτών. Επίσης λόγω του σημαντικού ερπυσμού που παρατηρείται, ιδιαίτερα στις μεγάλες βαθμίδες φόρτισης, είναι απαραίτητη η χρήση ενός καλού, γρήγορα ανταποκρινόμενου, αυτόμαστου ρυθμιστή πίεσης του συστήματος επιβολής του φορτίου, προκειμένου να διατηρείται αυτό σταθερό. Τέλος απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός του εμβόλου επιβολής του οριζοντίου φορτίου λόγω των μεγάλων μετακινήσεων που αναπτύσσονται (ακόμα και κατά την εγκάρσια διεύθυνση) στις οριζόντιες δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων στη θάλασσα.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Δρ W. Isenhowe συνέβαλε ουσιαστικά με τις παρατηρήσεις του στο σχεδιασμό και την αξιολόγηση των δοκιμαστικών φορτίσεων.



Σχήμα 6. Σύγκριση κατανομής προβλεπομένων και μετρηθεισών οριζοντίων μετακινήσεων
 Figure 6. Comparison of estimated and measured lateral movements.

Πίνακας 2. Σύγκριση Αρχικών και Τελικών Παραμέτρων Σχεδιασμού Στρωμάτων [3] και [4]
 Table 2. Comparison Between Initial and Final Design Parameters of Layers [3] and [4].

ΠΑΡΑ-ΜΕΤΡΟΣ	ΣΤΡΩΜΑ [3]		ΣΤΡΩΜΑ [4]		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	Αρχική	Τελική	Τελική	Αρχική	
c_u (kPa)	150	150	200	200	-
E_s (MPa)	15	$5z$ ⁽²⁾	$3,5z$ ⁽²⁾ $21z$ ⁽²⁾	$10+2,5z$ ⁽¹⁾ $10+3,5z$ ⁽¹⁾	Εύρος τιμών για αναλύσεις ευαισθησίας (αντιστοιχεί σε $q_{net}/q_{ult} \geq 0,4$)
E_s (MPa)	-	-	$21z$ ⁽²⁾	$60+15z$ ⁽¹⁾ $60+21z$ ⁽¹⁾	Εύρος τιμών για αναλύσεις ευαισθησίας (αντιστοιχεί σε $q_{net}/q_{ult} \leq 0,02$)
ε_{50}	2-3%	2,5%	2,5%	2-3%	Εύρος τιμών ε στο $50\%(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ για αναλύσεις ευαισθησίας

⁽¹⁾ z = βάθος από τη στάθμη -12,00 m

⁽²⁾ z = βάθος από τη στάθμη του πυθμένα

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2006), "Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα για την Κατασκευή Δύο Προβλητών (Finger Piers) στο Λιμένα Λαυρίου". Κ/Ξ «Finger Piers».

ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2007), "Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Οριζοντίων Δοκιμαστικών Φορτίσεων μη Λειτουργικών Πασσάλων - Λιμένας Λαυρίου: Κατασκευή Δύο Προβλητών (Finger Piers) για Εξυπηρέτηση Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίων". Κ/Ξ «Finger Piers».

ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2007), "Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Οριζοντίων Δοκιμαστικών Φορτίσεων μη Λειτουργικών Πασσάλων - Λιμένας Λαυρίου: Κατασκευή Δύο Προβλη-

τών (Finger Piers) για Εξυπηρέτηση Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίων". Κ/Ξ «Finger Piers».

ΡΟΓΚΑΝ & ΣΥΝ/ΤΕΣ Α.Ε. (2004), "Μελέτη Δύο Προβλητών (Finger Piers) στο Λιμένα Λαυρίου".

Reese, L.C., Wang, S.T., Isenhowe, W.M. and Arrellaga, J.A. (2004), "Computer Program LPILE Plus, Ver.5.0 – Technical Manual". Analysis of Piles and Drilled Shafts under Lateral Loads, ENSOFT INC., U.S.A.

Reese, L.C., Wang, S.T., Isenhowe, W.M. and Vasquez, L. (2006), "Computer Program GROUP, Ver.7.0 – Technical Manual". Analysis of Pile Groups under Axial and Lateral Loading, ENSOFT INC., U.S.A.