

# Απόκριση πασσάλου μετά τη ρηγμάτωση: Οριζόντια δοκιμαστική φόρτιση με χρήση οπτικών ινών – 3D μη γραμμική ανάλυση

Pile response after cracking: horizontal pile load test using fiber optics – 3D nonlinear analysis

ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, Α.Μ.  
RENTZEΠΕΡΗΣ, Ι.Κ.  
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ, Μ.Κ.

Δρ. Πολ. Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ  
Δρ. Πολ. Μηχανικός, Γενικός Διευθυντής, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.  
M.Sc. Πολ. Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμ. Πολ. Μηχανικών Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Κατά την οριζόντια φόρτιση πασσάλου, με την αύξηση των μετακινήσεων προκαλείται ρηγμάτωση της διατομής, με αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας. Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική φόρτιση με ενοργάνωση του πασσάλου με οπτικές ίνες και συνεχή λήψη μετρήσεων κατά μήκος του πασσάλου. Η καμπύλη απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης και η κατά μήκος μεταβολή των καμπυλοτήτων επέτρεψαν τη διόρθωση και προσαρμογή των παραμέτρων του εδάφους μέσω τριδιάστατης μη γραμμικής πολυσταδιακής ανάλυσης. Από την ανάλυση προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη μεταβολή της δυσκαμψίας και της αναλαμβανόμενης καμπτικής ροπής συναρτήσει της ρηγμάτωσης.

**ABSTRACT :** Horizontally loaded piles may undergo cracking as displacements increase, resulting in bending stiffness reduction. With the aim to investigate the problem, a pile load test has been carried out, which included fiber optics instrumentation along the pile. The pile test response curve along with the measured variation of curvature along the pile allowed the adjustment of soil parameters by means of three dimensional nonlinear multi-stage analysis. The numerical analysis led to interesting results concerning bending stiffness as well as moment variation with regard to cracking level.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την κατασκευή σημαντικών έργων με έδραση σε πασσάλους προβλέπεται η διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων με διττό 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. Η διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης διεξάγεται συνήθως με γραμμικά ελαστικά στοιχεία και προσομοίωση της αντίστασης του εδάφους με καμπύλες 'p-y'. Η προσέγγιση αυτή είναι σε θέση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρές σχετικά μετακινήσεις και αντίστοιχες καμπυλότητες του πασσάλου. Με την αύξηση των μετακινήσεων προκαλείται ρηγμάτωση της διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, με αποτέλεσμα τη μεί-

ωση της δυσκαμψίας. Η αγνόηση του φαινομένου αυτού οδηγεί σε ανάληψη μεγαλύτερων εντατικών μεγεθών κατά την ανάλυση και την εκδήλωση μικρότερων μετακινήσεων. Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική φόρτιση κατά την οποία επιβλήθηκε φορτίο μέχρι τη σε μεγάλο βαθμό ρηγμάτωση του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Η ενοργάνωση του πασσάλου με οπτικές ίνες επέτρεψε τη συνεχή καταγραφή της μεταβολής των καμπυλοτήτων κατά μήκος του πασσάλου. Η καμπύλη απόκρισης της δοκιμαστικής φόρτισης σε συνδυασμό με τη μεταβολή των καμπυλοτήτων κατά μήκος του πασσάλου επέτρεψαν την προσαρμογή των παραμέτρων του εδάφους μέσω τριδιάστατης μη γραμμικής ανάλυσης, από την οποία προέκυψαν ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη μεταβολή της δυσκαμψίας συναρτήσει της ρηγμάτωσης.

## 2. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

### 2.1 Εδαφικές Συνθήκες

Η οριζόντια 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. Για τη διερεύνηση των εδαφικών συνθηκών και τον προσδιορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού διεξήχθησαν 4 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις με βάθος τουλάχιστον 50 μέτρων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας, η στρωματογραφία περιλαμβάνει 4 κύριες στρώσεις. Η επιφανειακή στρώση Α 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 σφιχτής αμμόδης 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.

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

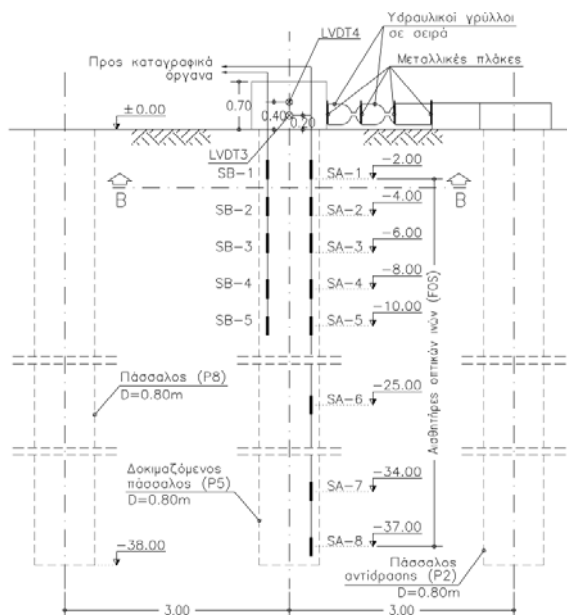
Στρώση	A1	A2	B	C	D
Βάθος (m)	-6.0	-12.0	-25.0	-35.0	-70.0
Μέτρο διόγκωσης K (MPa)	20.8	38.9	33.3	266.7	300.0
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	9.6	12.9	11.1	27.6	31.0
Γωνία τριβής $\varphi$ (°)	30.0	33.0	5.0	--	--
Γωνία διαστολής $\psi$ (°)	0.0	0.0	0.0	--	--
Συνοχή c (kPa)	3.0	5.0	25.0	--	--
Αστράγγιστη διατμητική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

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 Comodromos κ.ά. (2007b).

### 2.2 Διάταξη Δοκιμαστικής Φόρτισης

Η διάταξη της δοκιμαστικής φόρτισης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, περιελάμβανε το δοκιμαζόμενο πάσσαλο ( $P_5$ ) και δύο πασσάλους αντίδρασης ( $P_8$  και  $P_2$ , μπροστά και πίσω από το δοκιμαζόμενο πάσσαλο αντίστοιχα), για την ανάγκη διεξαγωγής οριζόντιας και κατακόρυφης φόρτισης (Comodromos κ.ά., 2007a). Όλοι οι πάσσαλοι είχαν διάμετρο  $D = 0.80$  m, το σκυρόδεμα ήταν κατηγορίας C20/25, και η ποιότητα χάλυβα των ράβδων οπλισμού S500. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιήθηκε με χρήση δοκού αντίδρασης στην κεφαλή του ενός εκ των δύο πασσάλων αντίδρασης. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις γρύλλοι σε σειρά με δυνατότητα καταγραφής μετακίνησης έως 0.25 m. Στην κεφαλή του δοκιμαζόμενου πασσάλου τοποθετήθηκαν τέσσερα ηλεκτρονικά μηκυσισόμετρα (LVDT-1 έως LVDT-4) ακρίβειας 0.001 mm, τα οποία στηρίχθηκαν σε πρακτικά άκαμπτο σύστημα δοκών με έδραση σε μεγάλη απόσταση από τη δοκιμαστική φόρτιση (βλ. Φωτογραφία1). Κατά μήκος του πασσάλου τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών (FOS). Η διάταξη τοποθέτησης για την οριζόντια φόρτιση εστιάσθηκε στο άνω μέρος του πασσάλου, δεδομένου ότι σε βάθος πέραν των 10 διαμέτρων (8 m στην προκειμένη περίπτωση) η καμπτική ροπή παίρνει πολύ μικρή έως και αμελητέα τιμή (σε κάθε περίπτωση πολύ μικρότερη από αυτήν που καθορίζει το σχεδιασμό του πασσάλου). Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά, ώστε να μπορεί να προσδιορισθεί η καμπυλότητα της διατομής στο επίπεδο που βρίσκεται το κάθε ζεύγος και εν συνεχεία η επικρατούσα τιμή της καμπτικής ροπής (στην περίπτωση της ρηγμάτωσης η διαδικασία υπολογισμού είναι εμφανώς πιο πολύπλοκη). Επιπρόσθετα, τοποθετήθηκε και αποκλισιομετρικός σωλήνας για τη μέτρηση της οριζόντιας μετακίνησης στον άξονα του δοκιμαζόμενου πασσάλου για την εναλλακτική δυνατότητα και εφεδρεία σε περίπτωση κοπής των καλωδίων οπτικών ινών.

Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι φόρτισης, κύκλος H1, με βήματα 0, 0.10, 0.25, 0.30, 0.40, 0.20, 0.10 MN, και κύκλος H2, με βήματα 0.10, 0.20, 0.40, 0.47, 0.60, 0.32, 0 MN. Το μέγιστο φορτίο του δεύτερου κύκλου (0.60 MN) αντιστοιχεί σε οριακό φορτίο με συνεχή μετακίνηση με μη σταθεροποιούμενο ρυθμό. Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις σταθεροποίησης ήταν 0.55 MN. Η προσπάθεια επιβολής μεγαλύτερου φορτίου οδήγησε σε συνεχή αύξηση των μετακινήσεων με αποτέλεσμα την αποκόλληση του πασσάλου.



Σχήμα 1. Σχηματική τομή  
Figure 1. Pile test cross section

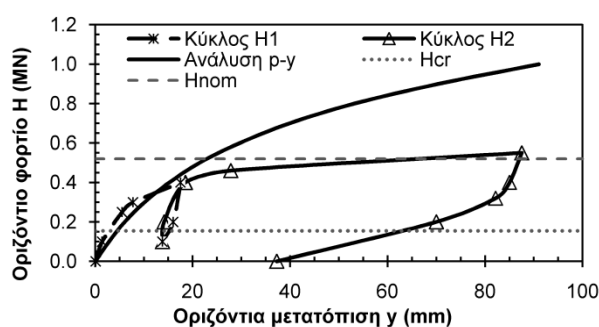


Φωτογραφία 1. Διάταξη δοκιμαστικής φόρτισης  
Photograph 1. Pile test arrangement

### 2.3 Αποτελέσματα Δοκιμαστικής Φόρτισης

Η καμπύλη οριζόντιου φορτίου – μετατόπισης της δοκιμαστικής φόρτισης δίνεται στο Σχήμα

2, μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου 'p-y'. Από την καμπύλη της δοκιμαστικής φόρτισης προκύπτει ότι το οριακό φορτίο, το οποίο αντιστοιχεί σε μετακίνηση ίση με 10%D είναι ίσο με 550 kN. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αδυναμία πρόβλεψης της απόκρισης του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση με εφαρμογή της απλουστευμένης μεθόδου 'p-y' για φορτία μεγαλύτερα των 350 kN. Από το επίπεδο αυτό φόρτισης και πέρα προκαλείται, όπως αναλυτικά περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο, ρηγμάτωση της διατομής του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μειώνεται η δυσκαμψία του και κατ' επέκταση η δυνατότητα ανάληψης της προκαλούμενης έντασης.



Σχήμα 2. Απόκριση πασσάλου δοκιμαστικής φόρτισης και προβλεψη καμπύλης απόκρισης με τη μέθοδο 'p-y' (Comodromos et al., 2009)  
Figure 2. Pile test response curve and predicted response curve by the 'p-y' method (Comodromos et al., 2009)

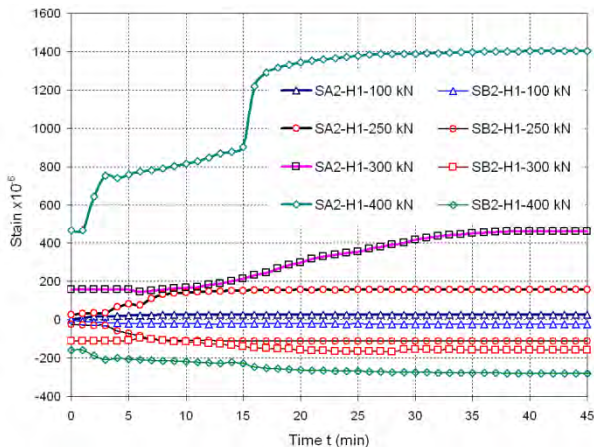
Στο ίδιο σχήμα δίνεται το φορτίο  $H_{cr}$  το οποίο αντιστοιχεί στη ροπή ρηγμάτωσης,  $M_{cr}$ , όπως αυτή προσδιορίζεται από την Εξίσωση 1, καθώς επίσης και το φορτίο  $H_{nom}$  το οποίο αντιστοιχεί στην ονομαστική καμπτική ροπή αντοχής  $M_{nom}$  του δοκιμαζόμενου πασσάλου.

$$M_{cr} = \frac{2f_{ct}I_p}{D} \quad (1)$$

όπου  $f_{ct}$  η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος,  $I_p$  η ροπή αδράνειας της διατομής του πασσάλου και  $D$  η διάμετρός του.

Από τα αποτελέσματα των καταγραφών των αισθητήρων οπτικών ινών στο βάθος των 4.00 m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, προκύπτει ότι η ρηγμάτωση της διατομής του πασσάλου είναι αισθητή κατά την επιβολή του φορτίου των 0.30 MN, ενώ οι επιπτώσεις της είναι σημαντικές μετά την επιβολή του φορτίου των 0.40 MN. Πριν την έναρξη της ρηγμάτωσης, ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ελαστικά και

οι μετρήσεις του ζεύγους αισθητήρων οπτικών ινών είναι ίδιου μεγέθους στη θλιβόμενη και στην εφελκυστική πλευρά. Αντίθετα, μετά την έναρξη της ρηγμάτωσης, η παραμόρφωση της πλευράς που βρίσκεται σε εφελκυσμό είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση της θλιβόμενης πλευράς και όσο η ρηγμάτωση επεκτείνεται στη διατομή, τόσο η διαφορά εφελκυστικής και θλιπτικής παραμόρφωσης αυξάνεται και η απόκριση του πασσάλου χαρακτηρίζεται από συνεχή μείωση της δυσκαμψίας του.



Σχήμα 3. Εξέλιξη παραμορφώσεων από αισθητήρες οπτικών ινών στο βάθος των 4.00 m  
Figure 3. Evolution of tensile and compressive strains for loading steps at 4.00 m depth

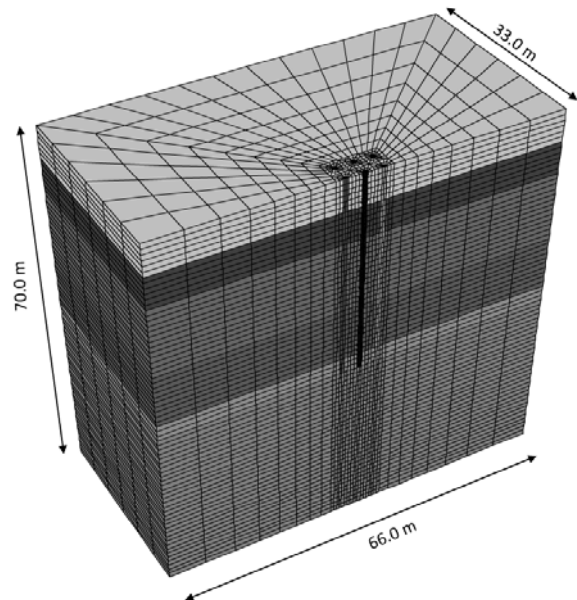
### 3. ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 3.1 Πλαίσιο Προσομοίωσης

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων της ρηγμάτωσης στην απόκριση πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση με χρήση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών  $FLAC^{3D}$ . Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την αντίστροφη ανάλυση και το οποίο περιλαμβάνει 87424 κόμβους, 87332 στοιχεία τριών διαστάσεων, 342 ραδβόμορφα στοιχεία και 351 κόμβους στοιχείων.

Οι τιμές των παραμέτρων των εδαφικών στρώσεων δίνονται στον Πίνακα 1. Για το σκυρόδεμα και το χάλυβα χρησιμοποιήθηκε μέτρο ελαστικότητας  $E_c = 29 \text{ GPa}$  και  $E_s = 200 \text{ GPa}$ , σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα (EN 1992-1-1). Η συμπεριφορά του σκυροδέματος θεωρήθηκε γραμμική ελαστική σε κατάσταση θλίψης και ελκυσμού για εφελκυστικές τάσεις μικρότερες της αντοχής του σε εφελκυσμό. Σημειώνεται ότι η τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυ-

ροδέματος προσδιορίστηκε κατά την αντίστροφη ανάλυση ίση με  $2.0 \text{ MPa}$ . Η ανάπτυξη εφελκυστικής τάσης σε κάποιο στοιχείο μεγαλύτερης της αντοχής σε εφελκυσμό οδηγεί στην ανάπτυξη ρωγμής, με συνέπεια στο στοιχείο αυτό να τίθεται μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση να ολοκληρώνεται και να ανακατανέμεται ως επικόμβιο φορτίο στα γεινιάζοντα στοιχεία. Επιπρόσθετα, το μέτρο ελαστικότητας κατά την κάθετη διεύθυνση στη ρωγμή μηδενίζεται επίσης (Cedolin et al., 1982). Ο ανωτέρω μηχανισμός ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα  $FLAC^{3D}$  με χρήση της εσωτερικής γλώσσας προγραμματισμού και οι εφελκυστικές τάσεις σε κάθε στοιχείο του πασσάλου τελούσαν υπό διαρκή έλεγχο κατά την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης.



Σχήμα 4. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων  
Figure 4. Finite difference mesh

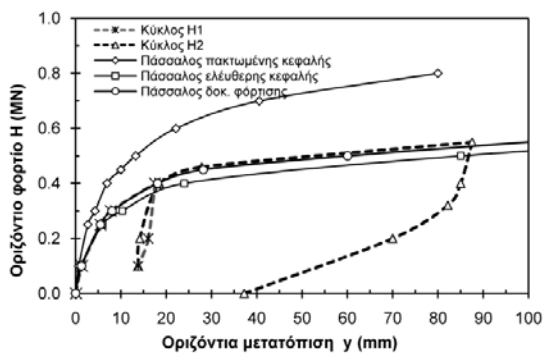
Για τις ράβδους οπλισμού θεωρήθηκε γραμμική ελαστικότητα. Η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος λήφθηκε ίση με την αντοχή του σκυροδέματος σε ελκυσμό σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2. Η συμμετρία του προβλήματος επέτρεψε τη χρήση του μισού πλέγματος και την αντίστοιχη επιτάχυνση των υπολογισμών. Για την αποφυγή αριθμητικών ασταθειών, η επιβολή του φορτίου έγινε σταδιακά σε κάθε βήμα φόρτισης (ramp loading).

Για την προσομοίωση της αποκόλλησης του πασσάλου από το έδαφος χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1. Η αξονική και διατμητική δυσκαμψία των στοιχείων αυτών ( $k_n$  και  $k_s$ , αντίστοιχα) λήφθηκε ίση με  $10 \text{ GPa/m}$ , ώστε να ελαχιστοποιεί-

ται η συνεισφορά τους στην τελική μετακίνηση των κόμβων (Comodromos & Pitilakis, 2005).

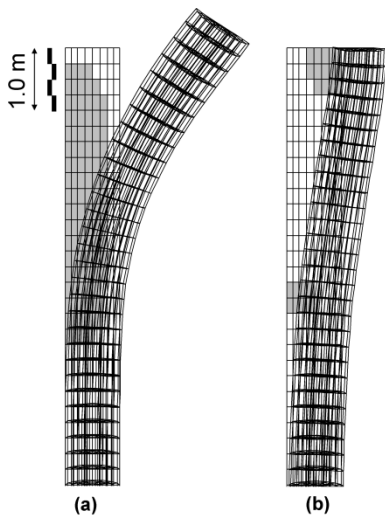
### 3.2 Αριθμητικές Επιλύσεις

Πρώτο στάδιο της τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης αποτέλεσε η διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης της οποίας τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 5. Τα αριθμητικά αποτελέσματα πρακτικά ταυτίζονται με τα πειραματικά, γεγονός που επιβεβαιώνει την επιλογή των τιμών αντοχής, των μέτρων παραμορφωσιμότητας και της προσομοίωσης των αναπτυσσόμενων μηχανισμών.



Σχήμα 5. Απόκριση πασσάλου δοκιμαστικής φόρτισης και αριθμητικής ανάλυσης (Comodromos et al., 2009)

Figure 5. Pile test response curve and numerically established response curves (Comodromos et al., 2009)



Σχήμα 6. Σύγκριση κινηματικής και περιοχών ρηγμάτωσης μεμονωμένου πασσάλου α) ελεύθερης και β) πακτωμένης κεφαλής για φορτίο 0.4 MN (Comodromos et al., 2009)

Figure 6. Comparison of cracked region and deformed mode of free-head (a) and fixed head (b) for lateral loading of 0.4 MN (Comodromos et al., 2009)

Σε αντίθεση με την κατακόρυφη φόρτιση, όπου οι οριακές συνθήκες μικρή επίπτωση έχουν στην απόκριση φορτίου – καθίζησης, η απόκριση φορτίου – μετακίνησης στην οριζόντια φόρτιση καθορίζεται σημαντικά από τις οριακές συνθήκες. Ειδικότερα, η δοκιμαστική φόρτιση αντιστοιχεί σε οριακές συνθήκες ελεύθερης κεφαλής, γεγονός που επιτρέπει ανάπτυξη μεγάλων καμπυλοτήτων στο άνω μέρος του πασσάλου, με συνέπεια τη ρηγμάτωση και την εκδήλωση μεγάλων μετακινήσεων. Στην περίπτωση ομάδας πασσάλων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο οι οριακές συνθήκες αντιστοιχούν πρακτικά σε πακτωμένη κεφαλή (εξαιρείται η περίπτωση σειράς πασσάλων με εγκάρσια φόρτιση), γεγονός που δρα ευεργετικά λόγω της ανάπτυξης μεγαλύτερων μετακινήσεων σε πιο μεγάλα βάθη (σε σχέση με τον αντίστοιχο πάσσαλο ελεύθερης κεφαλής), με συνέπεια την ανάπτυξη μεγαλύτερης αντίστασης από το έδαφος. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε επίλυση μεμονωμένου πασσάλου πακτωμένης κεφαλής, η καμπύλη φορτίου – μετακίνησης του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 5 με συνεχή γραμμή και σύμβολα ρόμβου. Η πιο δύσκαμπτη απόκριση του πασσάλου στην περίπτωση αυτή και η μεγαλύτερη πλευρική οριακή του αντίσταση αποδίδεται στην προαναφερόμενη μορφή παραμόρφωσης του πασσάλου, που στην περίπτωση της ελεύθερης κεφαλής εμφανίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις στην κεφαλή για το ίδιο επίπεδο φόρτισης. Επιπρόσθετα, για το ίδιο φορτίο, ο πάσσαλος ελεύθερης κεφαλής επιδεικνύει μεγαλύτερη καμπυλότητα, με αποτέλεσμα να ρηγματώνεται νωρίτερα σε σχέση με τον πάσσαλο πακτωμένης κεφαλής. Στο Σχήμα 6 δίνονται σε μεγέθυνση οι τύποι παραμόρφωσης για πάσσαλο ελεύθερης και πακτωμένης κεφαλής, όπως προσδιορίστηκαν από τη μη γραμμική ανάλυση για φορτίο ίσο με 0.4 MN. Στο ίδιο σχήμα αποτυπώνονται οι ρηγματωμένες περιοχές των πασσάλων, όπου φαίνεται ότι στην περίπτωση της πακτωμένης κεφαλής τα ρηγματωμένα στοιχεία σκυροδέματος συγκεντρώνονται στο πάνω μέρος του πασσάλου, ενώ ο πάσσαλος με ελεύθερη κεφαλή εμφανίζει εκτεταμένη περιοχή ρηγμάτωσης σε μεγαλύτερο μήκος του.

## 4. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

### 4.1 Αναλυτικός Τρόπος Προσέγγισης

Προ της εκδήλωσης της ρηγμάτωσης η καμπτική ροπή του πασσάλου μπορεί να υπολο-

γισθεί μετά από διπλή παραγωγή του διανύσματος των οριζοντίων μετακινήσεων σύμφωνα με την Εξίσωση 2:

$$M = -E_p I_p \phi = E_p I_p \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (2)$$

όπου  $E_p$  το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος,  $I_p$  η ροπή αδράνειας της διατομής του πασσάλου,  $y$  η οριζόντια μετακίνηση σε βάθος  $z$  από την κεφαλή του πασσάλου.

Μετά την εκδήλωση της ρηγμάτωσης επέρχεται μείωση της καμπτικής δυσκαμψίας του πασσάλου,  $E_p I_p$ , και μετατόπιση του ουδέτερου άξονα. Στην περίπτωση αυτή, για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας, αντί της διπλής παραγωγής χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3:

$$\phi = \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_c)}{h} \quad (3)$$

όπου  $\varepsilon_t$  η εφελκυστική και  $\varepsilon_c$  η θλιπτική παραμόρφωση ράβδου χάλυβα στην εφελκυσόμενη και θλιβόμενη ίνα αντίστοιχα, κατά τη διεύθυνση φόρτισης, και  $h$  η απόσταση μεταξύ των ράβδων.

Η αναλαμβανόμενη καμπτική ροπή μπορεί στη συνέχεια να υπολογισθεί ως το άθροισμα της ροπής που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα και το χάλυβα σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4 και 5 και το Σχήμα 7.

$$M_c = -E_c I_c \phi \quad (4)$$

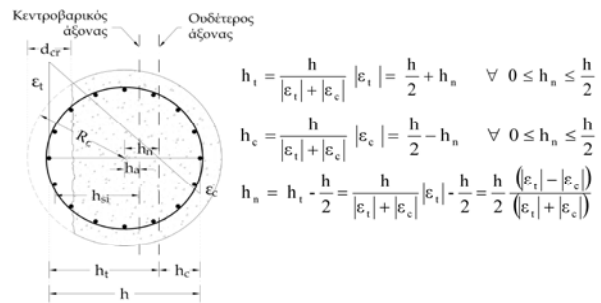
$$M_s = E_s \phi \sum_{i=1}^n \left( I_{si} + A_{si} h_{si}^2 \right) \quad (5)$$

όπου  $M_c$  και  $M_s$  η αναλαμβανόμενη από το σκυρόδεμα και τις ράβδους χάλυβα, αντίστοιχα, καμπτική ροπή,  $E_c$  και  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα,  $I_c$  και  $I_{si}$  η ροπή αδράνειας της διατομής σκυροδέματος και της ράβδου  $i$  αντίστοιχα,  $A_{si}$  η διατομή ράβδου  $i$ ,  $h_{si}$  η απόσταση ράβδου χάλυβα από τον ουδέτερο άξονα, σύμφωνα με το Σχήμα 7, και  $n$  ο αριθμός ράβδων χάλυβα.

Για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας της διατομής από την Εξίσωση 3 απαιτείται ακριβής προσδιορισμός των παραμορφώσεων της θλιβόμενης και εφελκυσόμενης ίνας. Στην περίπτωση πειραματικού προσδιορισμού, είναι προφανές ότι απαιτείται πυκνή διάταξη αισθητήρων παραμόρφωσης κατά μήκος του πασ-

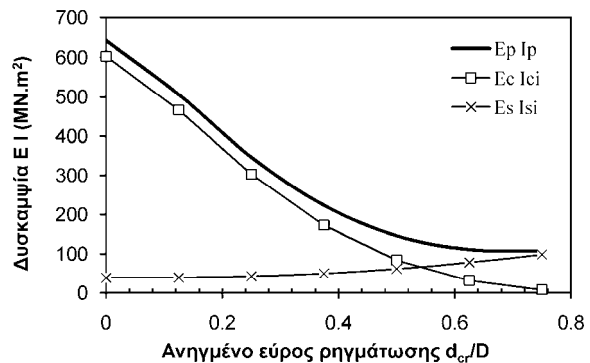
σάλου, καθιστώντας τη μέθοδο ιδιαίτερα ακριβή. Σε αντίστιξη, η αριθμητική τριδιάστατη ανάλυση απαιτεί την προσομοίωση των συστατικών υλικών του προβλήματος με υψηλό βαθμό ακρίβειας, που να ενσωματώνει τις ράβδους οπλισμού του πασσάλου στις ακριβείς τους θέσεις.

Στις ανωτέρω εξισώσεις, τα μέτρα ελαστικότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα παραμένουν σταθερά, ενώ με την επέκταση της ρηγμάτωσης και τη μετατόπιση της θέσης του ουδέτερου άξονα οι ροπές αδράνειας μεταβάλλονται, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η δυσκαμψία του πασσάλου. Με χρήση των Εξισώσεων 4 και 5 και των αντίστοιχων του Σχήματος 7 προσδιορίζεται η μεταβολή της δυσκαμψίας του πασσάλου λόγω της ρηγμάτωσης, η οποία δίνεται στο Σχήμα 8 για τον πάσσαλο της δοκιμαστικής φόρτισης ( $D = 0.80$  m με οπλισμό 16Φ18).



Σχήμα 7. Γεωμετρία κυκλικής διατομής οπλισμένου σκυροδέματος (Comodromos et al., 2009)

Figure 7. Formulation and definition for a circular reinforced concrete section under flexural deformation (Comodromos et al., 2009)



Σχήμα 8. Μεταβολή της δυσκαμψίας του πασσάλου με το εύρος ρηγμάτωσης (Comodromos et al., 2009)

Figure 8. Variation of pile bending stiffness with normalized cracking width (Comodromos et al., 2009)

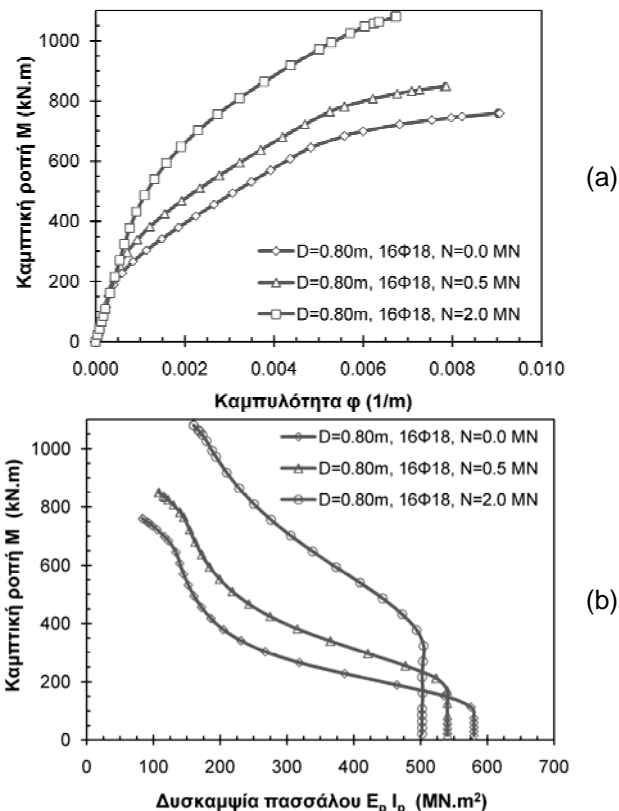
## 4.2 Εφαρμογή της Θεωρίας Δοκού

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας και της καμπτικής ροπής ρηγματωμένης διατομής παρουσιάζει η προσέγγιση με διαγράμματα ροπών – καμπυλοτήτων που προκύπτουν από τη θεωρία δοκού (Park and Paulay, 1975), μοντέλο το οποίο ενσωματώνεται σε πολλούς κώδικες ανάλυσης που έχουν τη δυνατότητα υπολογισμού της μη γραμμικής καμπύλης ροπής - καμπυλοτήτας δεδομένης διατομής οπλισμένου σκυροδέματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων της διατομής του δοκιμαζόμενου πασσάλου προσδιορίστηκε με το πρόγραμμα SOFiSTiK (2003), λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων του Ευρωκώδικα (EN 1992-1-1) για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 και χάλυβα S500.

Κατά κανόνα, οι πάσσαλοι ταυτόχρονα με τα οριζόντια φορτία δέχονται και αξονική φόρτιση, η οποία δρα ευνοϊκά στην απόκριση του πασσάλου σε πλευρική φόρτιση, καθιστώντας τον πιο δύσκαμπτο και μεταθέτοντας την έναρξη της ρηγμάτωσης σε πιο υψηλά επίπεδα φόρτισης. Η επίδραση του αξονικού φορτίου φαίνεται στο Σχήμα 9α, όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων της διατομής για αξονικό φορτίο 0, 0.5 και 2.0 MN. Το τέμνον μέτρο δυσκαμψίας  $E_p I_p$  της διατομής μπορεί να προσδιορισθεί έμμεσα από το λόγο  $M/\phi$ , σύμφωνα με την Εξίσωση 2, ενώ στα διαγράμματα του Σχήματος 9b δίνεται η μεταβολή της με την καμπτική ροπή, ανάλογα με το επίπεδο της αξονικής φόρτισης. Το τμήμα των καμπυλών του Σχήματος 9, όπου η δυσκαμψία παραμένει σταθερή υποδεικνύει ότι η διατομή βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, ενώ με την έναρξη της ρηγμάτωσης, όπου η ροπή ισούται με τη ροπή ρηγμάτωσης,  $M_{cr}$ , η δυσκαμψία αρχίζει να μειώνεται, και η απόκριση του πασσάλου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 9α και 9b παύει να είναι γραμμική ελαστική. Η ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  κυκλικής διατομής οπλισμένου σκυροδέματος δίνεται από την Εξίσωση 1 και για τον εξεταζόμενο πάσσαλο ( $D = 0.80$  m, 16Φ18) υπολογίζεται ίση με 101.4 kN.m, τιμή η οποία συμφωνεί με τα διαγράμματα των Σχημάτων 9 και 10.

Στο Σχήμα 10α απεικονίζεται με συνεχή γραμμή και τριγωνικά σύμβολα η κατανομή της καμπτικής ροπής του πασσάλου, για φορτίο ίσο με 0.10 MN, που προκύπτει από την εφαρμογή της θεωρίας δοκού και την εξαγωγή της καμπύλης ροπών – καμπυλοτήτων με το πρόγραμμα SOFiSTiK, ενώ με συνεχή γραμμή

και σύμβολα ρόμβου δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα που προκύπτει από την τριδιάστατη ανάλυση και την εφαρμογή της Εξίσωσης 2 και του διαγράμματος του Σχήματος 9b. Και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνεται η αρχική δυσκαμψία της διατομής του πασσάλου, δεδομένου ότι η διατομή είναι αρηγμάτωση, ενώ η καμπυλότητα έχει προσδιορισθεί από την τριδιάστατη ανάλυση.

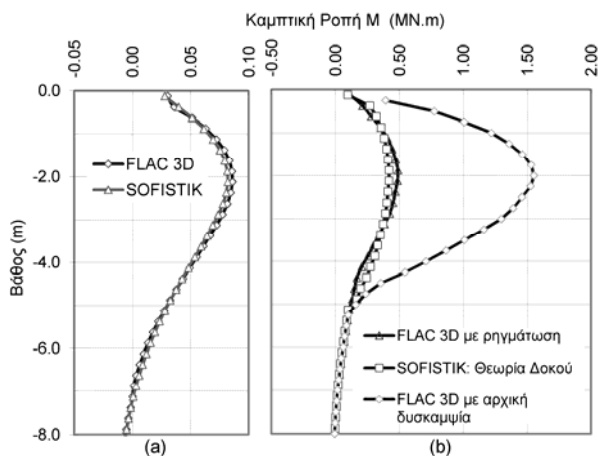


Σχήμα 9. Διαγράμματα (a) ροπών – καμπυλοτήτων, και (b) μεταβολής της δυσκαμψίας με την καμπτική ροπή για τη διατομή του δοκιμαζόμενου πασσάλου και για αξονικό φορτίο 0.5 και 2.0 MN, SOFiSTiK

Figure 9. Moment – curvature curves (a) and variation of bending stiffness with bending moment (b), for the tested pile and for axial loads of 0.5 and 2.0 MN, SOFiSTiK

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση του Σχήματος 10b, όπου, για την περίπτωση άσκησης φορτίου ίσου με 0.40 MN, η υιοθέτηση της αρχικής δυσκαμψίας (συνεχής γραμμή με κυκλικά σύμβολα) οδηγεί σε υπερεκτίμηση της καμπτικής ροπής του πασσάλου, με τιμή που υπερβαίνει τα 1.5 MN.m, η οποία είναι περίπου διπλάσια της ροπής αντοχής της διατομής, σύμφωνα με το Σχήμα 9. Στο ίδιο σχήμα, τα αποτελέσματα από τη χρήση της θεωρίας δοκού (συνεχής γραμμή με τετραγωνικά σύμ-

βολα) και την τριδιάστατη ανάλυση (συνεχής γραμμή με τριγωνικά σύμβολα) βρίσκονται σε καλή συμφωνία, με τη θεωρία δοκού να εμφανίζει ελαφρά μικρότερες τιμές. Η διαφορά αυτή των δύο μεθόδων προσέγγισης βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων αν αναλογισθεί κανείς την πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τους μηχανισμούς του προβλήματος.



Σχήμα 10. Κατανομή της ροπής με το βάθος (a) από το  $FLAC^{3D}$  και το  $SOFiSTiK$  για φορτίο 0.10 MN, και (b) από το  $FLAC^{3D}$  (με και χωρίς θεώρηση της ρηγμάτωσης) και το  $SOFiSTiK$  για φορτίο 0.40 MN

Figure 10. Comparison of bending moment predicted by  $FLAC^{3D}$  and  $SOFiSTiK$ ,  $H=0.1$  MN (a) and  $FLAC^{3D}$ ,  $SOFiSTiK$  and initial pile bending stiffness  $H=0.4$  MN (b)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την αριθμητική διερεύνηση των επιπτώσεων της ρηγμάτωσης στην απόκριση πασσάλου από οπλισμένο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκε σειρά αριθμητικών τριδιάστατων μη γραμμικών αναλύσεων. Η μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος περιλαμβάνει υπορουτίνα προσομοίωσης της εκδήλωσης και ανάπτυξης της ρηγμάτωσης. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι οι οριακές συνθήκες στην κεφαλή του πασσάλου καθορίζουν τις περιοχές και το εύρος ρηγμάτωσης και κατά συνέπεια τη δυσκαμψία και την αντοχή του πασσάλου. Επιβεβαιώθηκε επίσης η ευεργετική δράση ταυτόχρονης θλιπτικής αξονικής δύναμης. Η σύγκριση τέλος των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κώδικες προγραμμάτων ανάλυσης και διαστασιολόγησης διατομών οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίοι ενσωματώνουν τη μεταβολή της δυσκαμψίας συναρτήσει των διαγραμμάτων ροπών – καμπυ-

λοτήτων, με ταυτόχρονη δυνατότητα ορισμού της αντοχής ελκυσμού, είναι σε θέση να προβλέψουν την απόκριση πασσάλου μετά τη ρηγμάτωση. Η χρήση τριδιάστατης μη γραμμικής ανάλυσης περιορίζεται πρακτικά σε ειδικές περιπτώσεις, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης της απόκρισης ή προσδιορισμού της εξέλιξης των εντατικών και κινηματικών μεγεθών εντός του πασσάλου).

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cedolin, L., Darwin, D., Ingraffea, A. R., Pecknold E. A. & Schnobrich W. C. (1982), "Concrete cracking." in "State of the art report on Finite element analysis of reinforced concrete", ASCE, N.Y. pp. 204-233.
- Comodromos, E.M. and Pitilakis, K.D., (2005), "Response evaluation of horizontally loaded fixed-head pile groups using 3-D nonlinear analysis" *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol. 29, No 6, pp. 597-625.
- Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C. & Bousgolitou, X.A., (2007a), "Pile testing for the project of the bridge connecting the port to the motorway Thessaloniki-Athens", GeoStatiki S.A., Thessaloniki, GR, Geotechnical Evaluation Report.
- Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C. & Bousgolitou, X.A., (2007b), "Geotechnical investigation for the project of the bridge connecting the port to the motorway Thessaloniki-Athens", GeoStatiki S.A., Thessaloniki, GR, Geotechnical Evaluation Report.
- Comodromos, E.M., Papadopoulou, M.C., Rentzeperis, I.K., (2009), "The Effect of Cracking on the Response of Pile Test under Horizontal Loading.", *J. Geot. & Geoenv. Engin.*, ASCE, Vol. 135, No 9, pp. 1275-1284.
- Eurocode ENV 1992-1-1, (2001), "Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings together with the United Kingdom National Application Document". London.
- Itasca Consulting Group, (2005).  $FLAC^{3D}$ , Fast Lagrangian analysis of continua user's and theory manuals, Minneapolis.
- Park, R. and Paulay, T., (1975) Reinforced concrete structures, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Sofistik A.G. Sofistik (2003): Finite element code and user's manuals. Munich.