

# Αριθμητική προσομοίωση αντιστηρίξεων. Διερεύνηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων

Numerical simulation of retaining structures. Investigation of the results' sensitivity

ΚΑΡΑΜΠΑΤΑΚΗΣ Δ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.  
ΤΣΟΤΣΟΣ Σ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Α.Π.Θ.  
ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ Θ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση διάταξης αντιστήριξης με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Από το σύνολο των αποτελεσμάτων βαρύτητα αποδίδεται στις οριζόντιες μετακινήσεις, στην καμπτική ροπή και στην τέμνουσα δύναμη του στοιχείου αντιστήριξης, στις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας, στις δυνάμεις των αγκυρώσεων καθώς και στο συντελεστή ασφαλείας έναντι συνολικής ευστάθειας της εκσκαφής. Από την αξιολόγηση των ανωτέρω προκύπτουν ορισμένα στοιχεία βάσει των οποίων παρουσιάζονται προτάσεις για την ορθότερη χρήση των παραμέτρων που εξετάζονται, με σκοπό την όσο το δυνατόν ρεαλιστική και ακριβή αριθμητική ανάλυση τυπικών διατάξεων αντιστηρίξεων.

**ABSTRACT :** In the present paper the results that obtained from the numerical analysis of a retaining structure are both demonstrated and validated. Emphasis is laid on the horizontal displacements, the bending moment and on the shear stress of the retaining structure as well as on the surface settlements, on the anchorage system's forces and finally on the excavation's factor of safety. Taken into consideration the validation of the aforementioned results, some useful data are revealed. Based on them, specific proposals for the reliable use of the examined parameters are presented in order to achieve – as it is possible – a realistic and accurate numerical analysis for typical retaining structures.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων κατά το σχεδιασμό διατάξεων αντιστηρίξεων αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία έτη. Η δυνατότητα που παρέχουν οι αριθμητικές μέθοδοι για την εφαρμογή σύνθετων εδαφικών μοντέλων καθώς και για την προσομοίωση κάθε επιμέρους σταδίου της κατασκευής, αποτελούν ορισμένους από τους βασικούς παράγοντες που οδηγούν στην ευρύτερη χρησιμοποίησή τους έναντι των κλασικών μεθόδων οριακής ισορροπίας.

Παρόλα αυτά, όμως, η ορθή χρήση των αριθμητικών μεθόδων κατά τη μελέτη αντιστηρίξεων προϋποθέτει την ύπαρξη ικανών γνώσεων τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο καθώς οι βασικές παραδοχές και η επιλογή

ορισμένων παραμέτρων, επηρεάζουν καθοριστικά τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω επισημάνσεις, στο παρόν άρθρο εξετάζεται παραμετρικά η συμπεριφορά αντιστήριξης κατακόρυφου μετώπου ανοιχτής εκσκαφής σημαντικού βάθους, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και τη διατύπωση - εν συνεχεία - ανάλογων προτάσεων σχετικά με την όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη αριθμητική προσομοίωση της απόκρισης τυπικών διατάξεων αντιστηρίξεων.

## 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η παραμετρική μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην παρούσα εργα-

σία, πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS (Ver. 8.2, 2004). Ορισμένες από τις βασικές παραδοχές - στοιχεία της μελέτης δίνονται ακολούθως :

- Το σύνολο των αποτελεσμάτων αναφέρεται σε δισδιάστατες αναλύσεις και υπό τη θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης.
- Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων χρησιμοποιούνται συγκριτικά το ελαστοπλαστικό μοντέλο και το αντίστοιχο υπερβολικού τύπου με κρατυνόμηση συμπεριφορά, όπως παρέχονται από τον εν λόγω κώδικα.
- Για τη μελέτη της απόκρισης του εκ σκυροδέματος στοιχείου αντιστήριξης, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα ακολούθως, χρησιμοποιούνται συγκριτικά στοιχεία δοκού με γραμμική ελαστική συμπεριφορά καθώς και ανάλογα εδαφικά στοιχεία.
- Για την προσομοίωση των προεντεταμένων αγκυρώσεων και βάσει των δυνατοτήτων του συγκεκριμένου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται κατάλληλα στοιχεία ελαστικής-τελείως-πλαστικής συμπεριφοράς, τα οποία έχουν τη δυνατότητα παραλαβής τάσεων προέντασης καθώς και εφελκυστικών - θλιπτικών δυνάμεων. Επίσης, για την προσομοίωση της πάκτωσης των ανωτέρω αγκυρώσεων εφαρμόστηκαν στοιχεία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, τα οποία δύναται να παραλάβουν εφελκυστικές δυνάμεις.
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ του στοιχείου αντιστήριξης και των γειτονικών του εδαφικών στοιχείων λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση στοιχείων διεπιφάνειας εικονικού πάχους (Heuze and Barbour, 1982, Karabatakis, 2000, Karabatakis and Hatzigogos, 2002) και διαδοχικής μεταβαλλόμενης διαμητρικής αντοχής, όπως παρουσιάζεται αναλυτικότερα ακολούθως.
- Για τις τιμές των επιμέρους παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις καθώς και για τα επιβαλλόμενα φορτία δεν εφαρμόστηκαν οι οριζόμενοι κατά τον Ευρωκώδικα 7 συντελεστές ασφαλείας, καθώς η αριθμητική προσομοίωση αντιστήριξεων βάσει κανονιστικών διατάξεων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σχετικά με το ανωτέρω θέμα χρήσιμα στοιχεία παρέχονται αναλυτικά σε σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές (PLAXIS Bulletin, 2004, Simpson, 2003, Cushing et al, 2003, Koudelka, 2003).
- Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αναφέρονται σε επιβολή στατικών φορτίων καθώς στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κρίθη-

κε σκόπιμο να μη συμπεριληφθούν αποτελέσματα σεισμικών αναλύσεων. Σχετικά με το σχεδιασμό αντιστήριξεων υπό σεισμική φόρτιση ιδιαίτερα χρήσιμες προτάσεις δίνονται σε ανάλογες μελέτες (McCullough, 1998).

- Η εκτέλεση ανάδρομων αναλύσεων για την εκτίμηση των βασικών εδαφικών παραμέτρων και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της αντιστήριξης, δεν ήταν εφικτή λόγω της έλλειψης επιτόπου μετρήσεων. Σχετικά με τη χρήση επιτόπου καταγραφών και την εκτέλεση σχετικών ανάδρομων αναλύσεων, χρήσιμα στοιχεία παρέχονται και αναπτύσσονται διεξοδικά σε αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές (Gue et al, 1990, Tan, 1997, Teraraksa et al, 1999, Thasnaniran et al, 1999).

Βάσει των παραπάνω, διαπιστώνεται πως κατά την αριθμητική ανάλυση των αντιστήριξεων παρέχονται πολλαπλές επιλογές προσομοίωσης του προβλήματος, ανάλογα με τις αντίστοιχες δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου λογισμικού αλλά και την εμπειρία του χρήστη.

Ως εκ τούτου, η πραγματοποίηση εκτεταμένων παραμετρικών μελετών με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής βασικών παραμέτρων στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (ροπές και τέμνουσες δυνάμεις αντιστήριξης, καθιζήσεις ελεύθερης επιφάνειας κ.λπ.) και η εν συνεχεία εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων, κρίνεται αναγκαία.

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

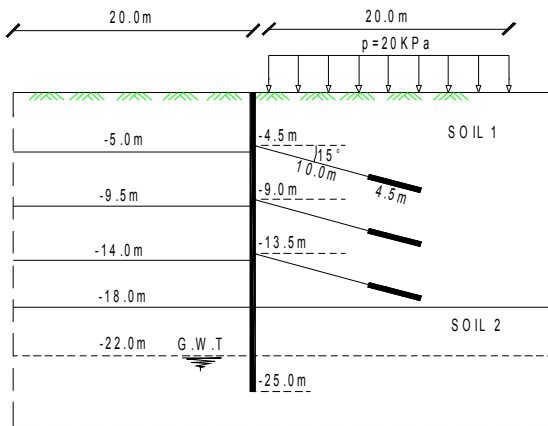
#### 3.1 Γεωμετρία και στάδια ανάλυσης

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος του εξετάσθηκε δίνονται στο Σχήμα 1. Συνοπτικά αναφέρεται πως εξετάσθηκε η συμπεριφορά αντιστήριξης κατακόρυφου μετώπου ανοικτής εκσκαφής συνολικού βάθους 18,0m. Η αντιστήριξη συνίσταται από έγχυτους φρεατοπασσάλους μήκους 25,0m και τρεις σειρές προεντεταμένων αγκυρώσεων ( $L_{ολ}=10,0m$ ,  $L_{π}=4,5m$ ).

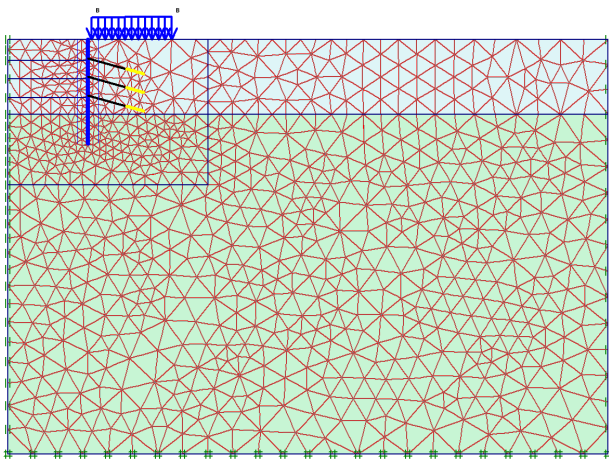
Επίσης, στην επιφάνεια του εδάφους επιβάλλεται ομοιόμορφο συνεχές φορτίο  $P=20kPa$  έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή των υφιστάμενων φορτίων.

Ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων που εφαρμόσθηκε κατά την παραμετρική μελέτη του προβλήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα

2. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 1688 τριγωνικά στοιχεία 15 κόμβων και 9 σημείων ολοκλήρωσης, με αυξημένη πυκνότητα στην περιοχή της αντιστήριξης όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο ως άνω σχήμα.



Σχήμα 1. Γεωμετρικά δεδομένα εκσκαφής  
Figure 1. Geometrical data of the excavation.



Σχήμα 2. Προτεινόμενος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων  
Figure 2. Proposed finite element mesh.

Η υπολογιστική διαδικασία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και της κατασκευαστικής ακολουθίας της αντιστήριξης, αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια :

Στάδιο 0 :Υπολογισμός αρχικού πεδίου τάσεων ( $\sigma_v = \gamma \cdot z$ ,  $\sigma_H = K_0 \cdot \sigma_v$ ,  $K_0 = 1 - \sin \phi$ ).

Στάδιο 1: Επιβολή του κατανεμημένου φορτίου  $P=20\text{kPa}$  στην επιφάνεια του εδάφους.

Στάδιο 2: Μηδενισμός των μετακινήσεων λόγω των προηγούμενων σταδίων και ενεργοποίηση του στοιχείου αντιστήριξης.

Τονίζεται, πως με τον τρόπο αυτό αγνοείται η επιρροή της κατασκευής του στοιχείου αντιστήριξης στο υφιστάμενο εντατικό πεδίο (π.χ.

η χαλάρωση του εδάφους στη θέση του διαφράγματος). Προς απλοποίηση της ανάλυσης, η κατασκευή του στοιχείου αντιστήριξης λαμβάνεται υπόψη θεωρώντας μόνον το αυξημένο ειδικό βάρος των χρησιμοποιούμενων στοιχείων δοκού (έναντι των αντίστοιχων προϋπαρχόντων εδαφικών).

Στάδιο 3: Απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων στην περιοχή της εκσκαφής έως τη στάθμη  $-5,0\text{m}$ .

Στάδιο 4: Ενεργοποίηση της πρώτης σειράς των αγκυρώσεων με ταυτόχρονη επιβολή τάσης προέντασης  $P_{1\pi}=200\text{kN}$  (στάθμη κεφαλής αγκυρώσεων  $-4,5\text{m}$ ).

Στάδιο 5: Απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων έως τη στάθμη  $-9,5\text{m}$ .

Στάδιο 6: Ενεργοποίηση της δεύτερης σειράς των αγκυρώσεων με ταυτόχρονη επιβολή τάσης προέντασης  $P_{2\pi}=200\text{kN}$  (στάθμη κεφαλής αγκυρώσεων  $-9,0\text{m}$ ).

Στάδιο 7: Απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων έως τη στάθμη  $-14,0\text{m}$ .

Στάδιο 8: Ενεργοποίηση της τρίτης σειράς των αγκυρώσεων με ταυτόχρονη επιβολή τάσης προέντασης  $P_{3\pi}=220\text{kN}$  (στάθμη κεφαλής αγκυρώσεων  $-13,5\text{m}$ ).

Στάδιο 9: Απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων έως το πέρας της εκσκαφής (στάθμη  $-18,0\text{m}$ ).

Στάδιο 10: Εύρεση του συντελεστή συνολικής ευστάθειας της εκσκαφής με τη μέθοδο της ταυτόχρονης μείωσης της διατμητικής αντοχής των στοιχείων ( $\phi$ -c reduction method).

### 3.2 Τιμές παραμέτρων

Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο σύνολο των επιλύσεων παρέχονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 1.

Διευκρινιστικά αναφέρεται πως η παράμετρος  $R$  που δίνεται στην τελευταία σειρά του ανωτέρου πίνακα, αποτελεί το μειωτικό συντελεστή της διατμητικής αντοχής των στοιχείων διεπιφάνειας, συναρτήσεως της αντίστοιχης των γειτονικών εδαφικών στοιχείων ( $c_{\text{διστεπ}} = R \cdot c_{\text{εδαφ}}$ ,  $\tan \phi_{\text{διστεπ}} = R \cdot \tan \phi_{\text{εδαφ}}$ ,  $0 < R \leq 1$ ).

Στις περιπτώσεις χρήσης εδαφικού μοντέλου με κρατυνόμενη συμπεριφορά υπερβολικού τύπου και σχετικά με την εκτίμηση των αναγκαίων τιμών του μέτρου ελαστικότητας, θεωρήθηκαν τα εξής:  $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref}$  και  $m = 0,2, 0,5$ . Περαιτέρω στοιχεία σχετικά με το συγκεκριμένο εδαφικό μοντέλο παρέχονται διεξοδικά σε ανάλογες βιβλιογραφικές αναφορές (Schanz et al, 1999).

Επίσης, κατά την εφαρμογή του ελαστικού - τελείως - πλαστικού εδαφικού μοντέλου για την εκτίμηση του "ισοδύναμου" μέτρου ελαστικότητας, χρησιμοποιήθηκε στη μέση στάθμη κάθε εδαφικής στρώσης η Εξίσωση 1:

$$E_{\text{ισοδ.}} = E_{50,\text{ref}} \cdot (\sigma'_v / P_{\text{ref}})^m \quad (1)$$

Τέλος, στο σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων θεωρήθηκε ως κριτήριο διαρροής το αντίστοιχο των Mohr-Coulomb.

Σχετικά με το κατακόρυφο στοιχείο της αντιστήριξης αναφέρεται πως αποτελείται από μία σειρά έγχυτων φρεατοπασσάλων Φ100cm/250cm. Οι τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν την απόκριση του ανωτέρου στοιχείου καθώς και των αντίστοιχων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των αγκυρώσεων και της πάκτωσής τους δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Τιμές εδαφικών παραμέτρων  
Table 1. Soil properties.

Παράμετρο ζ	Έδαφος 1	Έδαφος 2
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,5	21,0
$c_{\text{ref}}$ (kPa)	1	1
$\phi$ (°)	33	37
$\psi'$ (°)	0	4
$E_{50}^{\text{ref}}$ (kPa)	30000	45000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kPa)	21000	31500
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kPa)	90000	135000
$v_{\text{ur}}$ (-)	0,30	0,30
$m$ (-)	0,20	0,50
$P_{\text{ref}}$ (kPa)	100	100
$R_{\text{inter}}$ (-)	0,50/0,67/1,00	0,50/0,67/1,00

Πίνακας 2. Τιμές παραμέτρων  
Table 2. Material properties.

Παράμετρο ζ	Στοιχείο δοκού	Στοιχείο αγκύρ.	Στοιχείο πάκτωσης
$EA$ (x10 <sup>5</sup> )	70,9 (kN/m)	159,2 (kN)	4,0 (kN/m)
$EI$ (x10 <sup>5</sup> )	4,0 (kNm <sup>2</sup> /m)	-	-
$L_{z-z}$ (m)	2,5	2,5	2,5

#### 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

##### 4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων του στοιχείου αντιστήριξης συναρτήσει του μήκους του για τις ακόλου-

θες βασικές περιπτώσεις :

- Περίπτωση A: Χρήση υπερβολικού τύπου εδαφικού μοντέλου με τιμή μειωτικού συντελεστή διατμητικής αντοχής των στοιχείων διεπιφάνειας ίση με  $R=0,50$  (δηλ.  $\delta=\phi/2$ , όπου  $\delta$  η γωνία μεταξύ του διανύσματος των ενεργητικών ωθήσεων και του κάθετου μετώπου του στοιχείου αντιστήριξης).
- Περίπτωση B: Χρήση υπερβολικού τύπου εδαφικού μοντέλου με τιμή  $R=0,67$  ( $\delta=2\phi/3$ ).
- Περίπτωση C: Χρήση υπερβολικού τύπου εδαφικού μοντέλου με τιμή  $R=1,00$  ( $\delta=\phi$ ).
- Περίπτωση D: Χρήση ελαστικού -τελείως-πλαστικού μοντέλου με τιμή  $R=0,67$  και με σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας των εδαφικών στοιχείων.
- Περίπτωση E: Χρήση υπερβολικού τύπου εδαφικού μοντέλου με τιμή  $R=0,67$  και προσομοίωση του κατακόρυφου στοιχείου αντιστήριξης με εδαφικά στοιχεία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, έναντι των στοιχείων δοκού που χρησιμοποιούνται στο σύνολο των προηγούμενων περιπτώσεων.

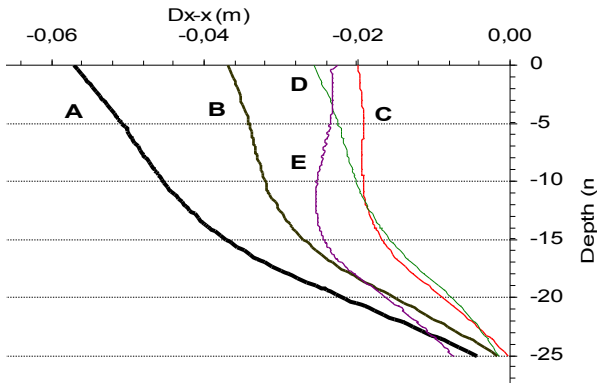
Ομοίως, στα Σχήματα 4, 5 και 6 δίνονται οι αντίστοιχες μεταβολές της αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής, της τέμνουσας δύναμης και της καθίζησης της ελεύθερης επιφάνειας από το χείλος της εκσκαφής και σε απόσταση 30m περίπου.

Επισημαίνεται πως στα Σχήματα 4 και 5 δεν παρουσιάζονται τα ανάλογα αποτελέσματα της περίπτωσης E, καθώς στην εν λόγω περίπτωση δε δύναται η εκτίμηση των συγκεκριμένων εντατικών μεγεθών ( $M$ ,  $Q$ ) του στοιχείου αντιστήριξης.

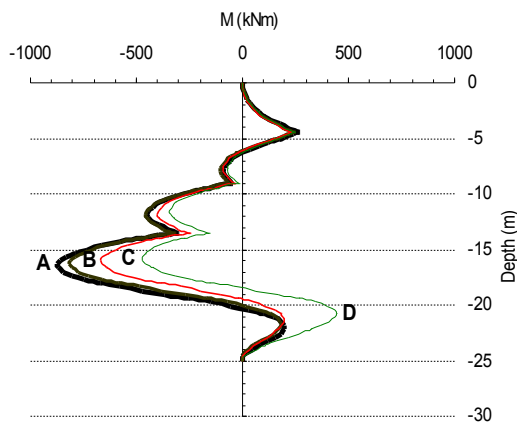
Στα Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζονται οι τιμές των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών δυνάμεων των αγκυρώσεων ανά εξεταζόμενη περίπτωση καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι συνολικής ευστάθειας της εκσκαφής, όπως περιγράφεται στο Στάδιο 10 της υπολογιστικής διαδικασίας.

Ενδεικτικά, η επιφάνεια ολίσθησης που προκύπτει από τον έλεγχο ευστάθειας εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.

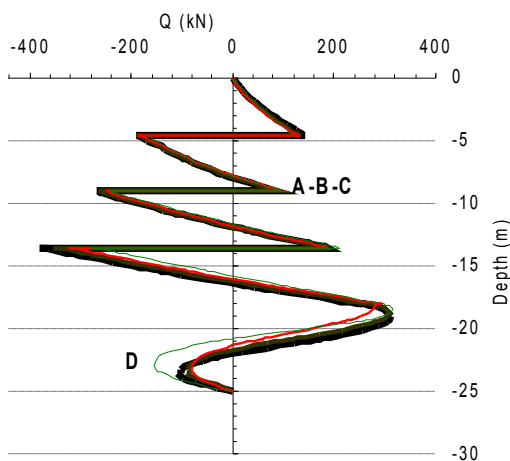
Τέλος, τονίζεται πως το σύνολο των αποτελεσμάτων που δίνονται στα ως άνω σχήματα αναφέρεται στην εντατική κατάσταση που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση του Σταδίου 9 της υπολογιστικής διαδικασίας, όπως αναπτύσσεται αναλυτικά στην ενότητα 3.1.



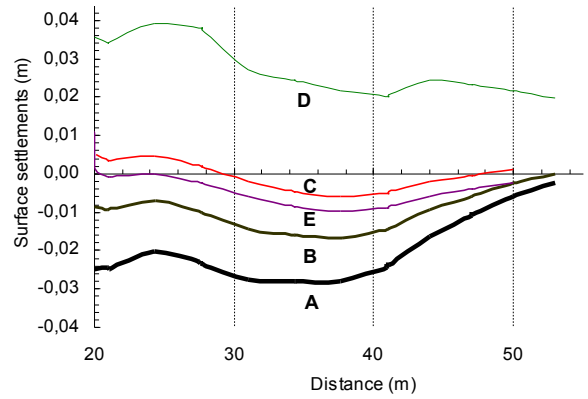
Σχήμα 3. Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσει του βάθους  
Figure 3. Horizontal displacements versus depth.



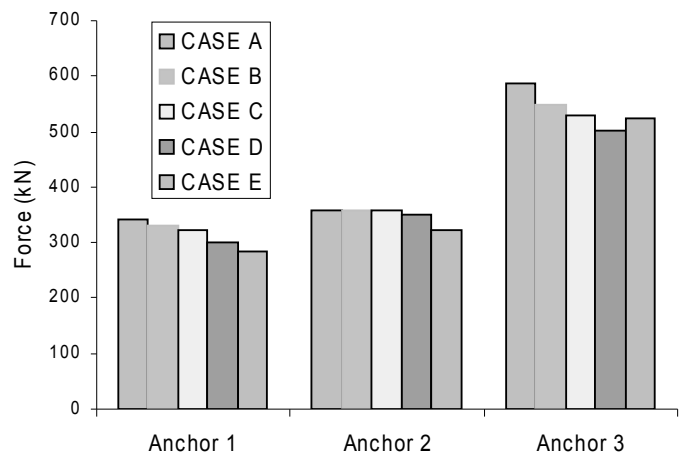
Σχήμα 4. Καμπτική ροπή στοιχείου αντιστήριξης συναρτήσει του βάθους  
Figure 4. Retaining structure's bending moment versus depth.



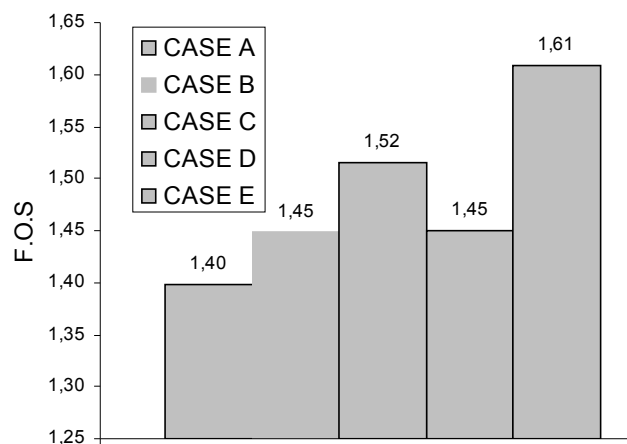
Σχήμα 5. Τέμνουσα δύναμη στοιχείου αντιστήριξης συναρτήσει του βάθους  
Figure 5. Retaining structure's shear stress versus depth.



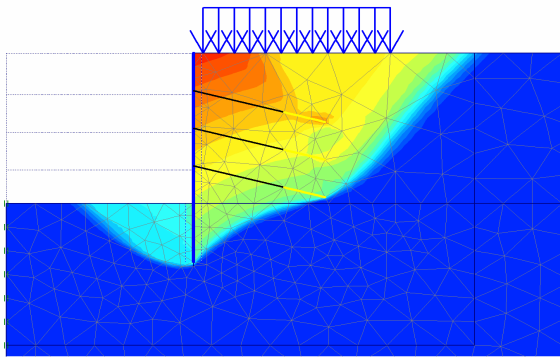
Σχήμα 6. Ολικές καθιζήσεις ελεύθερης επιφάνειας  
Figure 6. Surface settlements.



Σχήμα 7. Εφελκυστικές δυνάμεις αγκυρώσεων  
Figure 7. Tension forces of the anchorage system.



Σχήμα 8. Τιμές συντελεστή ευστάθειας  
Figure 8. Values of factor of stability.



Σχήμα 9. Επιφάνεια ολίσθησης  
Figure 9. Sliding surface.

#### 4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Συνεκτιμώντας το σύνολο των Σχημάτων 3 έως 8 προκύπτουν τα ακόλουθα βασικά στοιχεία:

α) Κατά την εφαρμογή του υπερβολικού τύπου εδαφικού μοντέλου με κρατυνόμενη συμπεριφορά, η επιρροή της τιμής του μειωτικού συντελεστή  $R$  της διατμητικής αντοχής των χρησιμοποιούμενων στοιχείων διεπιφάνειας, είναι καθοριστική κυρίως στη συμπεριφορά του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και στις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας.

Ειδικότερα, στον Πίνακα 3 δίνονται συγκεντρωτικά οι αποκλίσεις μεταξύ των περιπτώσεων A-B και B-C σχετικά με τις υπολογισθείσες τιμές της οριζόντιας μετακίνησης ( $D_{x-x}$ ), της καμπτικής ροπής ( $M$ ) και της τέμνουσας δύναμης ( $Q$ ) του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και της καθιζήσης ( $S$ ) της ελεύθερης επιφάνειας.

Πίνακας 3: Αξιολόγηση περιπτώσεων A, B και C ( $D_{x-x}$ ,  $M$ ,  $Q$ ,  $S$ )

Table 3: Validation of cases A, B and C ( $D_{x-x}$ ,  $M$ ,  $Q$ ,  $S$ )

Περιπτώσεις	$\Delta D_{x-x}$ (%)	$\Delta M$ (%)	$\Delta Q$ (%)	$\Delta S$ (%)
A-B	44	28	17	97
B-C	52	45	24	90

Αντίθετα, αισθητά μικρότερες διαφορές παρουσιάζονται μεταξύ των ως άνω περιπτώσεων στις τιμές των εφελκυστικών δυνάμεων των αγκυρώσεων ( $F_{αγκ}$ ) καθώς και των τιμών του συντελεστή ευστάθειας (F.O.S.), όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Αξιολόγηση περιπτώσεων A, B και C ( $F_{αγκ}$ , F.O.S.)

Table 4 : Validation of cases A, B and C ( $F_{αγκ}$ , F.O.S.).

Περιπτώσεις	$\Delta F_{αγκ1}$ (%)	$\Delta F_{αγκ2}$ (%)	$\Delta F_{αγκ3}$ (%)	$\Delta F.O.S$ (%)
A-B	3,20	0,24	6,90	3,60
B-C	3,00	0,50	3,80	2,40

β) Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των περιπτώσεων B-D και B-E διαπιστώνεται καταρχήν η καθοριστική διαφοροποίηση της μορφής της καθιζήσης της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των περιπτώσεων B-D (καθιζήση έναντι ανύψωσης). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η χρήση του ελαστικού μέτρου αποφόρτισης ( $E_{ur}$ ) στις καταστατικές εξισώσεις υπολογισμού των εντατικών μεγεθών κατά τη φάση αποφόρτισης (στάδιο εκσκαφής) καθώς και η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από το καθεστώς των τάσεων (Περ. B), επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση των μετακινήσεων. Αντίθετα, η χρήση μοντέλων ελαστικής - τελείως - πλαστικής συμπεριφοράς (Περ. D), εξαιτίας της αδυναμίας για τη ρεαλιστική προσομοίωση των φάσεων αποφόρτισης (λόγω χρήσης ενιαίας τιμής του μέτρου ελαστικότητας κατά τα στάδια φόρτισης - αποφόρτισης και ανεξάρτητης των αναπτυσσόμενων τάσεων), οδηγεί σε αυξημένες τιμές μετακινήσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις σε μη αποδεκτά αποτελέσματα (π.χ. αυξημένη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας κατά την εκσκαφή). Σχετικά με τα εντατικά μεγέθη του στοιχείου αντιστήριξης, τις δυνάμεις των αγκυρώσεων και των καθιζήσεων της ελεύθερης επιφάνειας, αναλυτικά στοιχεία παρέχονται στους ακόλουθους Πίνακες 5 και 6.

Πίνακας 5: Αξιολόγηση περιπτώσεων B, D και E ( $D_{x-x}$ ,  $M$ ,  $Q$ ,  $S$ )

Table 3: Validation of cases B, D and E ( $D_{x-x}$ ,  $M$ ,  $Q$ ,  $S$ )

Περιπτώσεις	$\Delta D_{x-x}$ (%)	$\Delta M$ (%)	$\Delta Q$ (%)	$\Delta S$ (%)
B-D	45	44	35	-
B-E	34	-	-	60

Πίνακας 6: Αξιολόγηση περιπτώσεων B, D και E ( $F_{αγκ}$ , F.O.S.)

Table 6 : Verification of cases B, D and E ( $F_{αγκ}$ , F.O.S.)

Περιπτώσεις	$\Delta F_{αγκ1}$ (%)	$\Delta F_{αγκ2}$ (%)	$\Delta F_{αγκ3}$ (%)	$\Delta F.O.S$ (%)
B-D	10,20	2,90	9,30	0,00
B-E	17,20	10,90	5,10	11,10

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συνεκτιμώντας το σύνολο των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων και στοιχείων προκύπτουν τα εξής:

α<sub>1</sub>) Η τιμή του μειωτικού συντελεστή R της διατμητικής αντοχής των στοιχείων διεπιφάνειας που απαιτούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους - στοιχείου αντιστήριξης, επηρεάζει καθοριστικά τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και τις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας (Περ. Α, Β και C). Πιο συγκεκριμένα, αν και ο μηχανισμός παραμόρφωσης του στοιχείου αντιστήριξης παραμένει παραπλήσιος στο σύνολο των παραπάνω περιπτώσεων, η χρήση χαμηλών τιμών του συντελεστή R φαίνεται να οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές της οριζόντιας μετακίνησης, της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας δύναμης του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και της καθίζησης της ελεύθερης επιφάνειας.

α<sub>2</sub>) Εξίσου σημαντική είναι η επιρροή του συντελεστή R και στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας έναντι συνολικής ευστάθειας της εκσκαφής. Ειδικότερα, προκύπτει πως χαμηλές τιμές του συντελεστή R μειώνουν αισθητά την υπολογισθείσα τιμή του συντελεστή ευστάθειας. Το συμπέρασμα αυτό αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς η τιμή του εν λόγω συντελεστή αποτελεί σε ορισμένες περιπτώσεις τον καθοριστικό εδαφοτεχνικό έλεγχο για τη διαστασιολόγηση σύνθετων διατάξεων αντιστήριξεων.

Σχετικά με την τιμή του συντελεστή R αναφέρεται πως είναι δυνατόν να εκτιμηθεί κατά παραδοχή και εκ των προτέρων, λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση του αντιστηριζόμενου γεωυλικού και την τραχύτητα της διεπιφάνειας μεταξύ στοιχείου αντιστήριξης και εδάφους. Παρόλα αυτά, όμως, όπως προέκυψε από την παρούσα παραμετρική μελέτη, ο συντελεστής R αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το σχεδιασμό των αντιστηρίξεων και ως εκ τούτου η επιλογή της τιμής του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

β) Η χρήση ελαστικού - τελείως - πλαστικού εδαφικού μοντέλου (Περ. D) έναντι του αντίστοιχου υπερβολικού τύπου (Περ. B) έχει καταρχήν ως συνέπεια, την μη ρεαλιστική προσομοίωση των καθιζήσεων της ελεύθερης επιφάνειας, όπως αιτιολογείται εν συντομία στην παρ. 4.2 και κατ' επέκταση και του μηχανισμού παραμόρφωσης του στοιχείου αντιστήριξης. Επιπρόσθετα, προκύπτει πως υποεκτιμούνται κατά το ήμισυ περίπου τα βα-

σικά εντατικά μεγέθη του (M, Q). Αντίθετα, από τον έλεγχο συνολικής ευστάθειας της εκσκαφής προέκυψαν και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις παρόμοιες τιμές του συντελεστή ευστάθειας.

Ως εκ τούτου, η χρήση γραμμικού - τελείως - πλαστικού εδαφικού μοντέλου κατά την αριθμητική προσομοίωση αντιστηρίξεων απαιτεί αυξημένη προσοχή καθώς είναι δυνατόν να προκύψουν μη αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με τις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας και τις μετακινήσεις του στοιχείου αντιστήριξης. γ) Η προσομοίωση του στοιχείου αντιστήριξης με εδαφικά στοιχεία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς (Περ.Ε) αφενός μεν οδηγεί στη ρεαλιστική προσομοίωση του μηχανισμού παραμόρφωσης αφετέρου δε δεν επιτρέπει την εκτίμηση των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών που απαιτούνται για τη διαστασιολόγησή του (M,Q). Επίσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται να εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις για τις καθιζήσεις της ελεύθερης επιφάνειας και τις οριζόντιες μετακινήσεις του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και για την υπολογισθείσα τιμή του συντελεστή ευστάθειας (έναντι Περ. Β).

δ) Οι τιμές των δυνάμεων που παραλαμβάνουν οι αγκυρώσεις δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο σύνολο των περιπτώσεων, οι προαναφερθείσες μεταβολές για κάθε μία από τις τρεις σειρές των αγκυρώσεων είναι της τάξης του 4,0%, 3,0% και 4,6% αντιστοίχως. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις σχετικά περιορισμένες μετακινήσεις του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και στις ικανοποιητικές τιμές του συντελεστή ευστάθειας που χαρακτηρίζει το σύνολο των περιπτώσεων.

Βάσει των παραπάνω, διαπιστώνεται πως οι βασικές παραδοχές της αριθμητικής ανάλυσης (εδαφικό μοντέλο, προσομοίωση στοιχείου αντιστήριξης) καθώς και οι τιμές ορισμένων παραμέτρων επηρεάζουν καθοριστικά τόσο την αξιοπιστία όσο και την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Συνεπώς και με στόχο την αξιοποίηση των σημαντικών δυνατοτήτων που προσφέρουν - πράγματι - οι αριθμητικές μέθοδοι, επιβάλλεται ο έλεγχος όχι μόνον των τελικών αποτελεσμάτων αλλά και των αντίστοιχων επιμέρους σταδίων της ανάλυσης, έτσι ώστε να εντοπισθούν άμεσα και να τροποποιηθούν αναλόγως τυχόν εσφαλμένες παραδοχές - δεδομένα. Ως εκ τούτου και ως προς την κατεύθυνση αυτήν, προκύπτει πως η ύπαρξη και η αξιοποίηση επιτόπου μετρήσεων

αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη διαμόρφωση ενός αριθμητικού μοντέλου, βάσει του οποίου θα καθιστάται εφικτή η αξιόπιστη προσομοίωση της συμπεριφοράς τυπικών διατάξεων αντιστηρίξεων. Η συμβολή των επιτόπου μετρήσεων κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση της τιμής εκείνων των παραμέτρων που αφενός μεν επηρεάζουν καθοριστικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης αφετέρου δε η εύρεσή τους δε δύναται να πραγματοποιηθεί βάσει κλασικών εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής παρά μόνον κατά παραδοχή και βάσει βιβλιογραφικών αναφορών (π.χ. συντελεστής R).

Επιπρόσθετα, εκτιμάται πως η εκτέλεση κατάλληλων παραμετρικών μελετών και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους είναι δυνατόν να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την αξιόπιστη αντιμετώπιση του προβλήματος. Ειδικότερα, για την τελική επιλογή του μήκους και της δυσκαμψίας του στοιχείου αντιστήριξης καθώς και των βασικών χαρακτηριστικών των αγκυρώσεων (στάθμη κεφαλής, ολικό μήκος, τάση προέντασης κ.λπ.), προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη οι χαμηλότερες αποδεκτές τιμές του συντελεστή ευστάθειας που προκύπτουν από τις επιμέρους αναλύσεις της παραμετρικής μελέτης. Επίσης, για τη διαστασιολόγηση του στοιχείου αντιστήριξης και των αγκυρώσεων κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιούνται οι περιβάλλουσες των εντατικών μεγεθών, οι οποίες θα προκύψουν συνεκτιμώντας τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών του συνόλου των επιμέρους αναλύσεων.

Τέλος, αναφέρεται πως στην παρούσα εργασία δεν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της επιρροής ορισμένων βασικών παραμέτρων της αριθμητικής ανάλυσης όπως είναι η πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου καννάβου και το πλήθος των κόμβων των εδαφικών στοιχείων. Οι συγκεκριμένες παράμετροι επηρεάζουν εν μέρει τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης αλλά παρόλα αυτά κρίθηκε σκόπιμο να μη συμπεριληφθούν στην παρούσα μελέτη καθώς προέκυψε πως η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση της επιρροής τους και ως εκ τούτου και η χρησιμότητα των συνακόλουθων συμπερασμάτων - προτάσεων, εξαρτώνται καθοριστικά από τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου κώδικα.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brinkgreve, R. (2004), "Plaxis and EuroCode 7", Plaxis Bulletin, Vol. 16, pp.4.

Cushing, A.G., Withiam, J.L., Szwed, A.A. and Nowak, A.S. (2003), "Reliability analysis of anchored and cantilevered flexible retaining structures", Limit State Design in Geotechnical Eng.,(LSD 5/8/2003), M.I.T. U.S.A.

Gue, S.S. and Tan, Y.C. (1998), "Performance of anchored diaphragm walls', for deep basement in Kuala Lumpur, Malaysia", Proc. of the 13<sup>th</sup> S. Asian Geotech. Conf. Taiwan, pp. 511-517.

Hueze, F.E. and Barbour, T.G. (1982), "New models for rock joints and interfaces". Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol 108, pp. 757-776.

Karabatakis, D.A. (2000), "Study of the creeping response of the interface elements", Ph. D., Aristotle Univ. of Thessaloniki, Greece.

Karabatakis, D.A. and Hatzigogos, T.N. (2002), "Analysis of creep behaviour using interface elements". Computers and Geotechnics, Vol. 29, pp. 257-277.

Koudelka, B. (2003), "LSD in Geotechnics: Alternative approach No.1 for slope design", Limit State Design in Geotechnical Eng.,(LSD 5/8/2003), M.I.T. U.S.A.

Mc Cullough, N.J. (1998), "The seismic vulnerability of sheet pile walls", Ph. D. Oregon State Univ., U.S.A.

Schanz, T., Vermeer, P.A. and Bonnier, P.G. (1999), "Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 years of PLAXIS", Balkema, Rotterdam, Holland, Edition 1<sup>st</sup>.

Simpson, B. (2003), "Use of finite element methods in geotechnical limit state design", Limit State Design in Geotechnical Eng.,(LSD 5/8/2003), M.I.T. U.S.A.

Tan, Y.C. (1997), "Performance of anchored diaphragm walls, for deep basement at Berjaya Star City, Kuala Lumpur", Proc. of the 3<sup>rd</sup> Asian Young Geotech. Eng. Conf. Singapore, pp. 121-129.

Teparaska, W. Thasnanipan, N. and Tanseng, P. (1999), "Analysis of lateral wall movement for deep braced excavation in Bangkok subsoils", Civil and Env. Eng. Conf., Bangkok Thailand, Vol. II, pp. 67-76.

Thasnanipan, N., Manng, A.W., Tanseng, P. and Teparaska, W. (1999), "Behavior and performance of diaphragm walls under unbalanced lateral loading along the chao Phraya river", "Field measurements in Geomechanics", Leung, Tan & Phoon (eds), Balkema, Rotterdam, Holland, Edition 1<sup>st</sup>.