

## **ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΠΣ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ**

### **4.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση του προβλήματος με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, με χρήση του εμπορικά διαθέσιμου πρόγραμματος Plaxis (v.7.2). Η ανάλυση αυτή, πραγματοποιήθηκε για τις θέσεις των αποκλισιομέτρων A-1 και A-2 καθώς μόνο για αυτές τις θέσεις υπήρχαν ολοκληρωμένες μετρήσεις των μετακινήσεων του τοίχου.

Σκοπός της διαδικασίας αυτής ήταν η σύγκριση της μετρηθείσας συμπεριφοράς, όπως προέκυψε με τη χρήση αποκλισιομέτρων, με την προβλεπόμενη συμπεριφορά έτσι όπως υπολογίστηκε αναλυτικά.

### **4.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

Για τον υπολογισμό των αναμενόμενων μετακινήσεων, κατασκευάστηκε κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και δόθηκαν οι διαστάσεις του πραγματικού προβλήματος. Για κάθε θέση αποκλισιομέτρου, προσομοιώθηκε η εδαφική τομή στη θέση αυτή, έτσι όπως προέκυψε από τη γεωτεχνική έρευνα και με τη χρήση εμπειρικών τύπων συσχέτισης ιδιοτήτων.

Επιπλέον, δόθηκαν οι κατάλληλες ιδιότητες για το διαφραγματικό τοίχο. Για την προσομοίωση των αγκυρώσεων δόθηκαν οι απαιτούμενες ιδιότητες ώστε να οριστεί το ελεύθερο και το πακτωμένο τμήμα τους.

Τέλος, ορίστηκαν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτές είναι πακτώσεις στον πυθμένα και κυλίσεις

στα πλευρικά όρια του κανάβου. Οι κυλίσσεις αυτές, δεν επιτρέπουν κατακόρυφη μετακίνηση, αλλά μόνο οριζόντια.

#### **4.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΝΑΒΟΥ**

Αφού δόθηκαν οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών και των άλλων κατασκευαστικών μερών, πραγματοποιήθηκε η αυτόματη κατασκευή του κανάβου των δεκαπεντάκομβων τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων.

Στην κρίσιμη περιοχή του προβλήματος, δηλαδή στην περιοχή που αναμένουμε εντονότερες τάσεις και παραμορφώσεις, πραγματοποιήθηκε πύκνωση του κανάβου.

Η πύκνωση αυτή πραγματοποιήθηκε με διαφορετικό τρόπο για κάθε περίπτωση για λόγους εκπαιδευτικούς και εξοικείωσης με το πρόγραμμα. Έτσι, για την περίπτωση του Αποκλισιομέτρου A-1 ορίστηκαν ξεχωριστά εδαφικά τμήματα που περιέβαλαν το τοίχο και την αγκύρωση και σε αυτά πραγματοποιήθηκε πύκνωση του κανάβου, ενώ για την περίπτωση του αποκλισιομέτρου A-2 πραγματοποιήθηκε η πύκνωση του κανάβου στην περιοχή γύρω από το τοίχο και την αγκύρωση. Φυσικά, το αποτέλεσμα είναι πρακτικά το ίδιο και για τις δυο περιπτώσεις.

#### **4.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην γεωτεχνική μηχανική παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα σταδιακής κατασκευής (staged construction) οποιασδήποτε γεωκατασκευής. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι η διαδικασία κατασκευής παίζει σημαντικό ρόλο στην εν γένει εκδήλωση της συμπεριφοράς του τοίχου.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα πραγματοποιήθηκε σταδιακή κατασκευή με τα ακόλουθα στάδια:

1. Αρχική κατάσταση εδάφους με τον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων.

2. Κατασκευή διαφραγματικού τοίχου και εκσκαφή μέχρι βάθος  $-2.1\text{m}$ .
3. Κατασκευή και προένταση αγκυρώσεων.
4. Εκσκαφή μέχρι βάθος  $-7.5\text{m}$

#### 4.5. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Ο ορισμός των εδαφικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, πραγματοποιήθηκε με βάση τη γεωτεχνική έρευνα που διεξήχθη πριν από την κατασκευή του έργου.

Από την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε η στρωματογραφία, τα αποτελέσματα της Τυποποιημένης Δοκιμής (SPT) καθώς και των εργαστηριακών δοκιμών που διεξήχθησαν από την εταιρεία ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ-ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΑΤΕ.

Η θέση του Αποκλισιομέτρου A-1, βρίσκεται πολύ κοντά στη θέση της διερευνητικής γεώτρησης Γ-1 και επομένως χρησιμοποιήθηκε η εδαφική τομή που βρέθηκε από αυτή τη γεώτρηση.

Για την περίπτωση όμως του Αποκλισιομέτρου A-2, δεν κατέστη δυνατόν να ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία καθώς η θέση του A-2 βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τις θέσεις των υπολοίπων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του σκάμματος για την κατασκευή του διαφραγματικού τοίχου στη θέση αυτή, πραγματοποιήθηκε επιτόπου εκτίμηση της στρωματογραφίας του εδάφους. Η προκύπτουσα στρωματογραφία ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση με τη ΜΠΣ. Από τη στρωματογραφία αυτή και τη σύγκρισή της με τις υπόλοιπες διερευνητικές γεωτρήσεις, έγινε εκτίμηση των εδαφικών ιδιοτήτων, ενώ προέκυψε και η ύπαρξη στρώματος αμμοχαλικού σε μικρό βάθος, το οποίο λειτούργησε ευεργετικά στον περιορισμό των μετακινήσεων.

Για συνεκτικά εδάφη χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας 4-1 που συνδέει τον αριθμό κτύπων της Τυποποιημένης Δοκιμής Διείσδυσης  $N_{SPT}$  με την αντοχή σε

ανεμπόδιστη θλίψη  $q_u$ . Από τις τιμές του  $q_u$  υπολογίσθηκαν οι τιμές της συνοχής  $c_u$  ( $c_u = q_u / 2$ ) που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

Πίνακας 4-1: Συσχέτιση αριθμού  $N_{SPT}$  -  $q_u$  για συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη

Χαρακτηρισμός αργίλου	$N_{SPT}$	$q_u$ (kPa)
Πολύ μαλακή	0-2	<25
Μαλακή	3-5	25-50
Μέτρια	6-9	50-100
Στριφρή	10-16	100-200
Πολύ στριφρή	17-30	200-400
Σκληρή	>30	>400

Με την χρήση εμπειρικών συσχετίσεων υπολογίστηκε από τον αριθμό  $N_{SPT}$  της Τυποποιημένης Δοκιμής Διείσδυσης, το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους  $E$ .

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση του αριθμού  $N_{SPT}$  της Τυποποιημένης Δοκιμής με τη τιμή της αντίστασης αιχμής του στατικού Ολλανδικού κώνου  $q_c$  (Πίν. 4-2).

Με γνωστή τη τιμή  $q_c$ , ο Shmertmann προτείνει τη σχέση:

$$E = 3 * q_c$$

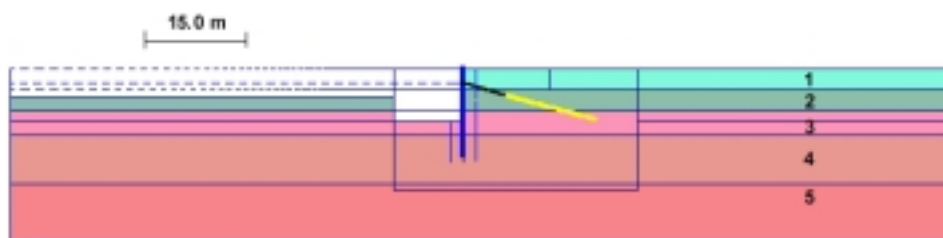
Πίνακας 4.2 : Συσχέτιση του αριθμού  $N_{SPT}$  -  $q_c$  για μη-συνεκτικά εδάφη

Είδος εδάφους	$q_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )/ $N_{SPT}$
Ιλύς, αμμώδης ιλύς, μίγματα άμμου και ιλύος μικρής συνεκτικότητας	2.0 – 4.0
Καθαρή, λεπτή έως μέτρια άμμος και ελαφρά ιλυώδεις άμμοι	3.0 – 5.0
Χονδρή άμμος και άμμος με λίγα χαλίκια	4.0 – 5.0
Αμμώδη χαλίκια και χαλίκια	6.0 – 8.0

## 4.6. ΘΕΣΕΙΣ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟΥ A-1

### 4.6.1 Εισαγωγή δεδομένων

Η στρωματογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις ευστάθειας στη θέση του Αποκλισιομέτρου A-1 φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Στρωματογραφία εδάφους στη Θέση A-1. Διακρίνονται επίσης ο διαφραγματικός τοίχος και το ελεύθερο και το πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης. Στο σχήμα φαίνεται το τελικό στάδιο κατασκευής.

Οι εδαφικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ως δεδομένα και προέκυψαν όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.5, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Ιδιότητες εδαφών (Θέση A-1)

α/α	Έδαφος	$\Gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (μοίρες)
1	Clay1	16,0	18,0	5000	0,35	25,0	0
2	Sand1	18,0	20,0	20000	0,3	3,0	30
3	Clay2	17,0	19,0	5000	0,35	20,0	0
4	Sand2	18,0	20,0	20000	0,3	3,0	30
5	Sand-gravel	19,0	21,0	40000	0,3	2,0	35

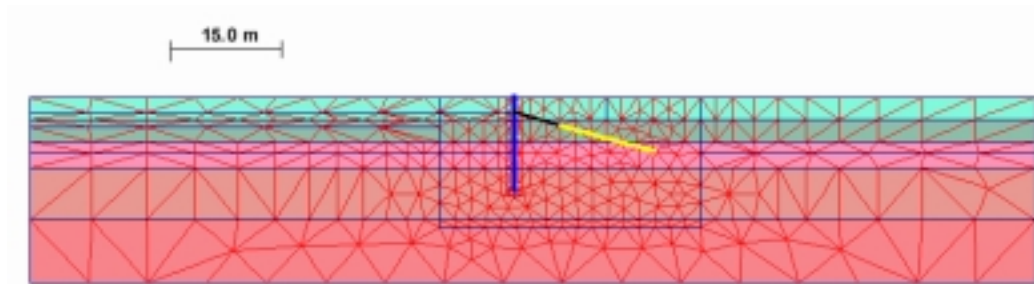
Εκτός από τις εδαφικές ιδιότητες είναι απαραίτητο να δοθούν ιδιότητες και στα υπόλοιπα δομικά μέρη, δηλαδή, στο διαφραγματικό τοίχο και το ελεύθερο και πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πακτωμένο

μήμα προσομοιώθηκε σαν γεώφασμα. Οι ιδιότητες που δόθηκαν στα στοιχεία αυτά φαίνονται στον Πίν. 4-4 και προέκυψαν από τη γνωστή γεωμετρία των διατομών των στοιχείων και των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα.

Πίνακας 4-4: Ιδιότητες δομικών στοιχείων (Θέση A-1)

Στοιχείο	Ιδιότητες
Διαφραγματικός τοίχος	Ελαστική συμπεριφορά $EA=2.1 \cdot 10^7$ kN/m $EI=6.3 \cdot 10^5$ kNm <sup>2</sup> /m $D=0.6$ m, $\nu=0.15$ , $w=15$ kN/m/m
Ελεύθερο τμήμα της αγκύρωσης	$EA=1.0945 \cdot 10^5$ kN/m $L_{\text{spacing}}=2.2$ m
Πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης	$EA=1 \cdot 10^5$ kN/m

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο κάναβος των δεκαπεντάκομβων πεπερασμένων στοιχείων με την κατάλληλη πύκνωση. Ο κάναβος αυτός, διακρίνεται στο Σχ. 4-2.

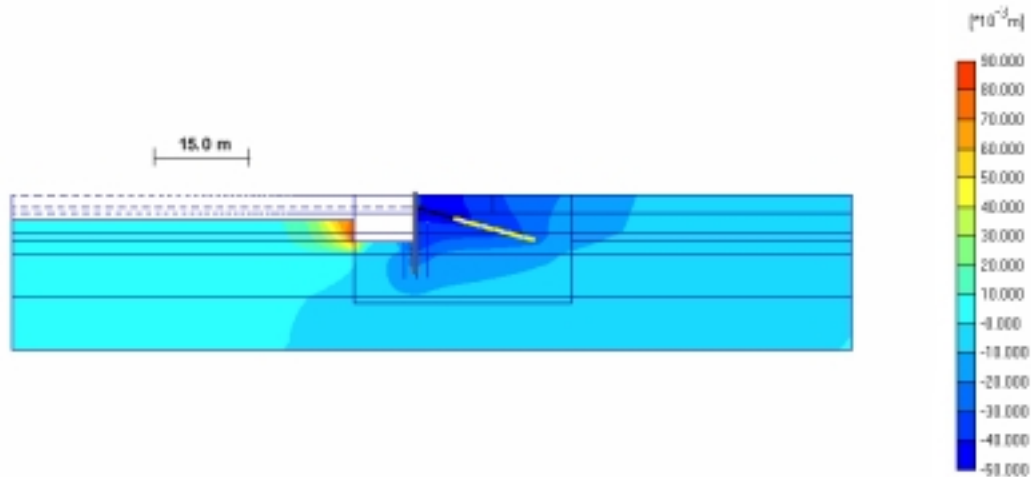


Σχήμα 4-2: Ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων με την πύκνωση στη θέση A-1.

#### 4.6.2 Αποτελέσματα και σύγκριση μετρηθείσας - υπολογισθείσας συμπεριφοράς

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και την εκτέλεση του προγράμματος σε στάδια, προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.

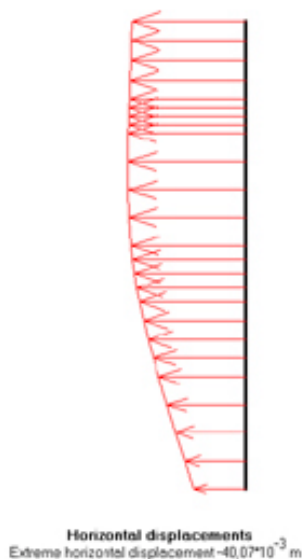
Ένας εποπτικός τρόπος παρουσίασης των οριζόντιων μετακινήσεων στο PLAXIS είναι αυτός της χρωματικής απεικόνισης που φαίνεται στο Σχ. 4-3. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται το εύρος των οριζοντίων μετακινήσεων. Παρατηρείται ότι η περιοχή γύρω από το αγκύριο παρουσιάζει αρκετά μεγάλες μετακινήσεις.



Σχήμα 4-3: Χρωματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων στη θέση A-1 όπως προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος

Η απεικόνιση που διακρίνεται στο σχήμα με έντονο κόκκινο χρώμα, φανερώνει μεγάλες μετακινήσεις προς τα δεξιά. Το ανάχωμα αυτό, μοντελοποιήθηκε, καθώς όταν πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις η εκσκαφή είχε γίνει μόνο σε ένα τμήμα κοντά στον τοίχο και όχι σε όλο το σκάμμα. Στην πραγματικότητα βέβαια το ανάχωμα αυτό είχε μια κλίση ώστε να είναι ευσταθές, αλλά για λόγους απλοποίησης η κλίση αυτή δεν ελήφθη υπόψιν, μια και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Η οριζόντια μετακίνηση του τοίχου είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 4-4. Όπως και για την περίπτωση των μετρήσεων του αποκλισιομέτρου, αφαιρούμε τη μετακίνηση του πόδα από όλες τις μετρήσεις στις άλλες θέσεις του τοίχου και έτσι θεωρούμε ότι η μετακίνηση στον πόδα είναι μηδενική.



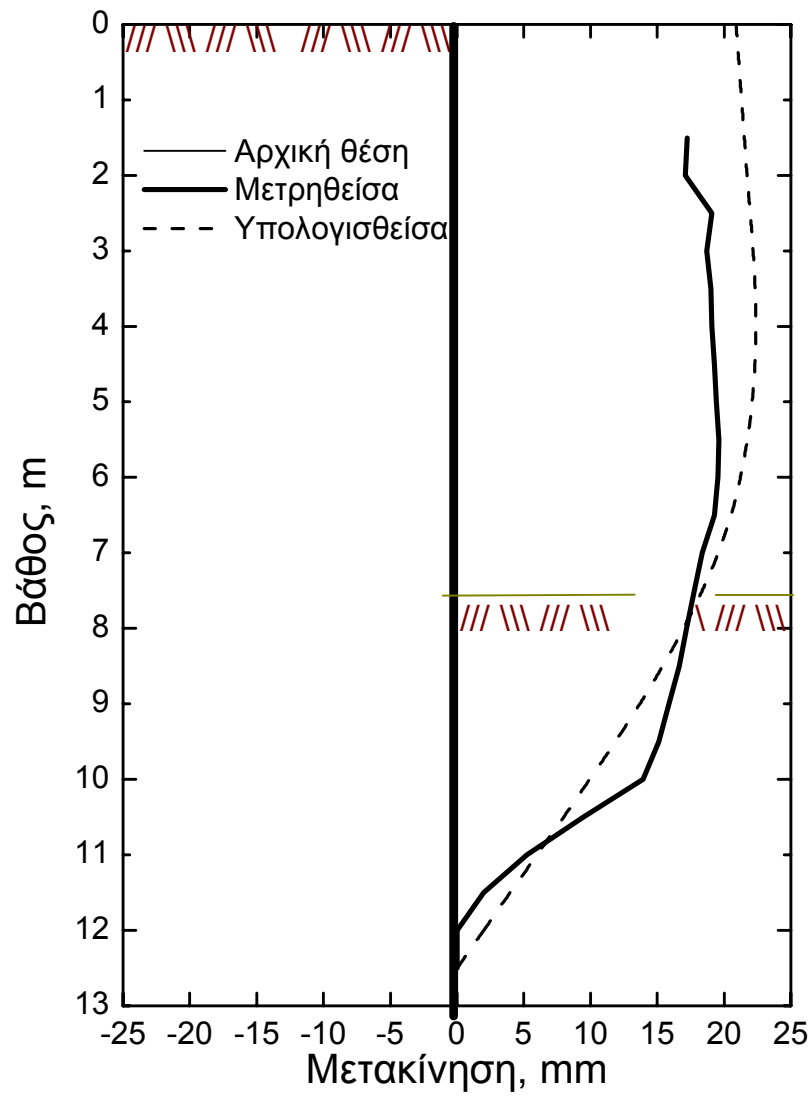
Σχήμα 4-4: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικού τοίχου στη θέση A-1

Οι οριζόντιες μετακινήσεις πάνω στο διαφραγματικό τοίχο, τοποθετούνται σε άξονα που παριστάνει τη μετακίνηση συναρτήσει του βάθους και συγκρίνονται με τις μετρηθείσες μετακινήσεις. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 4-5, οι μετρηθείσα και η αναλυτικά υπολογισθείσα συμπεριφορά του διαφραγματικού τοίχου είναι παρόμοιες.

Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις των μετακινήσεων με το αποκλισίμετρο παρουσιάζουν γενικά λίγο μικρότερες τιμές. Η παρατήρηση αυτή περιλαμβάνεται και στον Πίν. 4.5.

Πίνακας 4.5. Σύγκριση μετακινήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις και την αναλυτική προσομοίωση στη θέση A-1.

	<b>Μετρηθείσα</b>	<b>Υπολογισθείσα</b>
Στη θέση των αγκυρώσεων (στάθμη -2.1m)	17.6mm	21.8mm
Μέγιστη μετακίνηση	19.6mm (σε βάθος -5,5m)	22.4mm (σε βάθος -4.0m)

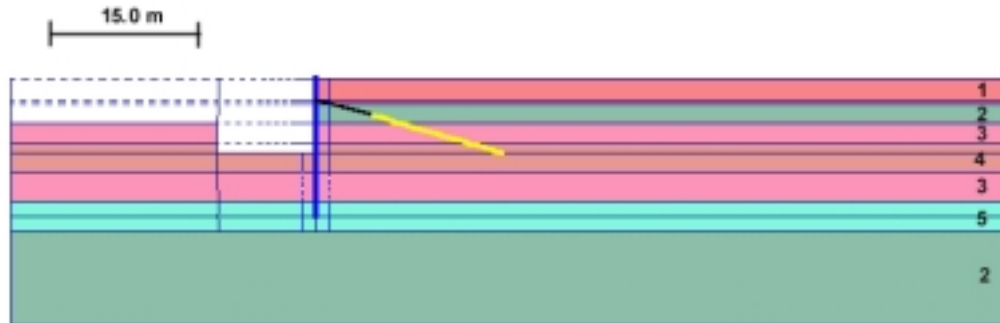


Σχήμα 4-5: Μετρηθείσα και αναλυτικά προβλεφθείσα συμπεριφορά τοίχου στη θέση του Αποκλισιομέτρου A-1.

## 4.7. ΘΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟΥ A-2

### 4.7.1. Εισαγωγή δεδομένων

Η στρωματογραφία που χρησιμοποιήθηκε στη θέση του αποκλισιόμετρου A-2 διακρίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6: Στρωματογραφία εδάφους στη θέση A-2. Διακρίνονται επίσης ο διαφραγματικός τοίχος και το ελεύθερο και το πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης. Στο σχήμα φαίνεται το τελικό στάδιο κατασκευής.

Οι εδαφικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ως δεδομένα και προέκυψαν όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.5, καταγράφονται στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6: Ιδιότητες εδαφών (Θέση A-2)

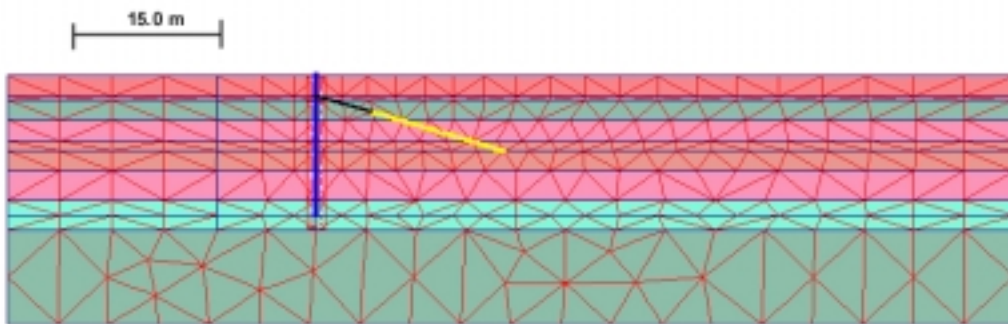
α/α	Έδαφος	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_k$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$E$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$\nu$	$c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$\phi$ (μοίρες)
1	Επιχώσεις	17,5	19,5	15000	0,3	10,0	20
2	Sand-gravel1	19,0	21,0	40000	0,3	2,0	35
3	Sand1	18,0	20,0	20000	0,3	3,0	30
4	Clay2	17,0	19,0	7000	0,35	20,0	0
5	Clay1	16,0	18,0	5000	0,35	25,0	5

Εκτός από τις εδαφικές ιδιότητες είναι απαραίτητο να δοθούν ιδιότητες και στα υπόλοιπα δομικά μέρη, δηλαδή, στον διαφραγματικό τοίχο και το ελεύθερο και το πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πακτωμένο μέρος, προσομοιώθηκε σαν γεώφασμα. Οι ιδιότητες που δόθηκαν στα στοιχεία αυτά φαίνονται στον Πίνακα 4-7 και προέκυψαν από τη γνωστή γεωμετρία των διατομών των στοιχείων και των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα.

Πίνακας 4-7: Ιδιότητες δομικών στοιχείων (Θέση A-2)

Στοιχείο	Ιδιότητες
Διαφραγματικός τοίχος	Ελαστική συμπεριφορά $EA=2.1 \cdot 10^7$ kN/m $EI=6.3 \cdot 10^5$ kNm <sup>2</sup> /m $D=0.6$ m, $\nu=0.15$ , $w=15$ kN/m/m
Ελεύθερο τμήμα της αγκύρωσης	$EA=1.0945 \cdot 10^5$ kN/m $L_{\text{spacing}}=1.75$ m
Πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης	$EA=1 \cdot 10^5$ kN/m

Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο κάναβος των δεκαπεντάκομβων πεπερασμένων στοιχείων με την κατάλληλη πύκνωση. Ο κάναβος αυτός, διακρίνεται στο Σχ. 4-7.

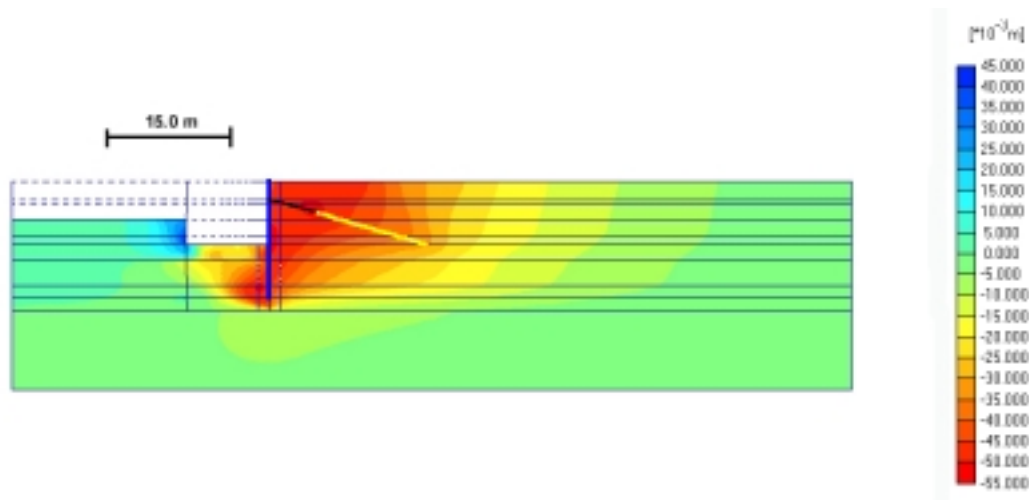


Σχήμα 4-7: Ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων με την πύκνωση στη Θέση A-2.

#### 4.7.2 Αποτελέσματα και σύγκριση μετρηθείσας - υπολογισθείσας συμπεριφοράς

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και την εκτέλεση του προγράμματος σε στάδια, προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.

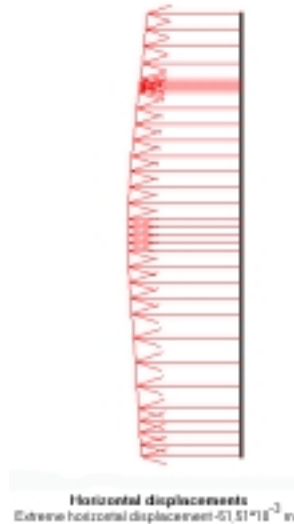
Ένας εποπτικός τρόπος παρουσίασης των οριζόντιων μετακινήσεων στο PLAXIS είναι αυτός της χρωματικής απεικόνισης που φαίνεται στο Σχ. 4-8. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται το εύρος των οριζοντίων μετακινήσεων. Παρατηρείται ότι η περιοχή γύρω από το αγκύριο παρουσιάζει αρκετά μεγάλες μετακινήσεις.



Σχήμα 4-8: Χρωματική απεικόνιση των οριζοντίων μετακινήσεων στη θέση A-2 όπως προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος

Η απεικόνιση που διακρίνεται στο σχήμα με μπλε χρώμα, φανερώνει μεγάλες μετακινήσεις προς τα δεξιά. Το ανάχωμα αυτό, μοντελοποιήθηκε, καθώς όταν πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις η εκσκαφή είχε γίνει μόνο σε ένα τμήμα κοντά στον τοίχο και όχι σε όλο το σκάμμα. Στην πραγματικότητα βέβαια το ανάχωμα αυτό είχε μια κλίση ώστε να είναι ευσταθές, αλλά για λόγους απλοποίησης η κλίση αυτή δεν ελήφθη υπόψιν, μια και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Η οριζόντια μετακίνηση του τοίχου είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 4-9. Όπως και για την περίπτωση των μετρήσεων του αποκλισιομέτρου, αφαιρούμε τη μετακίνηση του πόδα από όλες τις μετρήσεις στις άλλες θέσεις του τοίχου και έτσι θεωρούμε ότι η μετακίνηση στον πόδα είναι μηδενική.

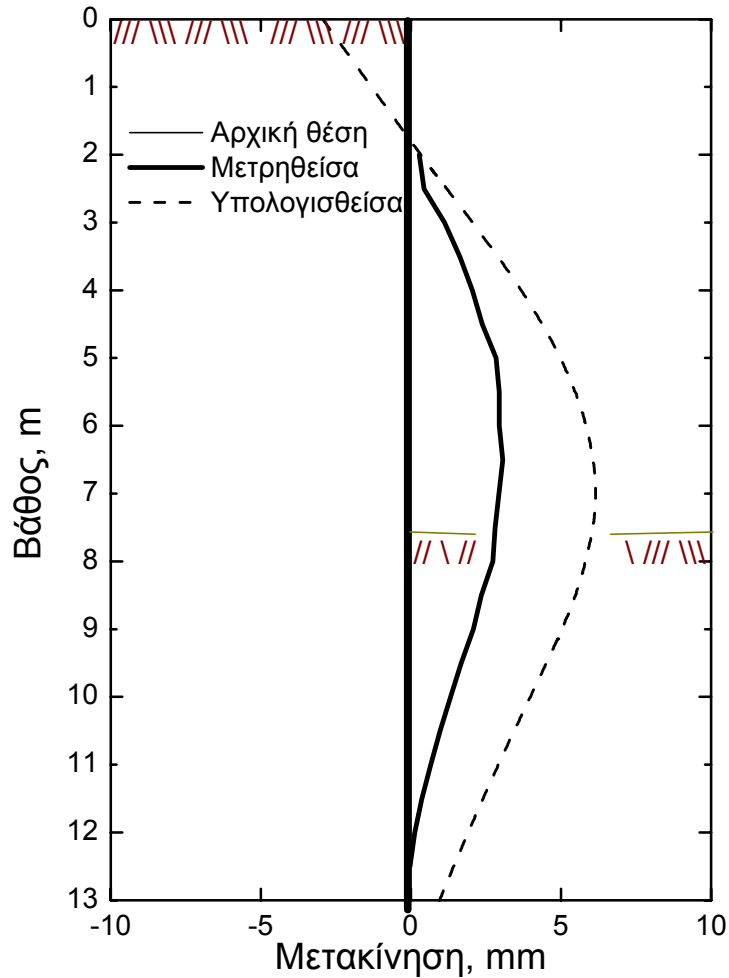


Σχήμα 4-9: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικού τοίχου (Θέση A-2)

Οι οριζόντιες μετακινήσεις πάνω στο διαφραγματικό τοίχο, τοποθετούνται σε άξονα που παριστάνει τη μετακίνηση ως συνάρτηση του βάθους και συγκρίνονται με τις μετρηθείσες μετακινήσεις. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 4-10, οι μετρηθείσα και η υπολογιστικά προβλεφθείσα συμπεριφορά του διαφραγματικού τοίχου έχουν την ίδια γενικά μορφή. Δηλαδή, και στις δυο περιπτώσεις το αγκύριο δεν παρουσιάζει σημαντικές παραμορφώσεις. Παρόλ' αυτά, οι μετακίνηση που αναμέναμε υπολογιστικά είναι μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια από αυτή που μετρήσαμε και ο λόγος ίσως είναι ότι οι εδαφικές συνθήκες είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με αυτές των υπολοίπων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Οι ανωτέρω παρατηρήσεις διακρίνονται και στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8. Σύγκριση μετακινήσεων όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και την αναλυτική προσομοίωση. (Θέση A-2)

	Μετρηθείσα	Υπολογισθείσα
Στη θέση των αγκυρώσεων (στάθμη -2.1m)	0,317 mm	0,498 mm
Μέγιστη μετακίνηση (σε βάθος -6.5m)	3,06mm (σε βάθος -6.5m)	6,16mm (σε βάθος -7.0m)



Σχήμα 4-10: Μετρηθείσα και υπολογιστικά προβλεφθείσα συμπεριφορά τοίχου στη θέση του αποκλισημέτρου A-2.