

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ  
ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ  
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥΣ ΝΟΜΟΥΣ**

ΠΑΠΑΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2013

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν με την αμέριστη βοήθειά τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Α. Κωμοδρόμο για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου εξασφάλισε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου καθώς και για την κατανόηση και υπομονή που έδειξε σε τυχόν καθυστερήσεις και προβλήματα που μου παρουσιάστηκαν από το ξεκίνημα μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής Π. Ντακούλα, Αναπληρωτή Καθηγητή, και την Δρ. Μ. Παπαδοπούλου για τις εύστοχες παρατηρήσεις καθώς επίσης και τη Δρ. Σ. Μπαρέκα για τις πολύτιμες συμβουλές της που διευκόλυναν αρκετές φορές τα διάφορα προβλήματα που συνάντησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Βάιο και Ιωάννα, για την υλική και ηθική συμπαράστασή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ-ΣΤΟΧΟΣ .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πετάσματα αντιστήριξης.....	12
2.1 Γενικά περί πετασμάτων αντιστήριξης.....	12
2.2 Διαφραγματικοί τοίχοι.....	20
2.2.1 Γενικά, πεδίο εφαρμογής .....	20
2.2.2 Φάσεις της κατασκευής.....	22
2.2.3 Διαφραγματικοί τοίχοι από προκατασκευασμένα τμήματα .....	24
2.2.4. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες .....	25
2.2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κατασκευής διαφραγματικού τοίχου ως μέσο αντιστήριξης .....	27
2.2.6 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα χρήσης αντηρίδων ως μέσα αγκύρωσης .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πολυσταδιακή εκσκαφή και κατασκευή διαφραγματικού τοίχου με τέσσερις σειρές αγκυρώσεων.....	30
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά - δυνατότητες του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών, FLAC.....	30
3.2 Γενικές αρχές ελαστοπλαστικών μοντέλων.....	34
3.3 Λειτουργία διαφραγματικού τοίχου .....	35
3.4 Κριτήριο Mohr - Coulomb.....	39
3.5 Κριτήριο Double-Yield.....	41
3.6 Καθορισμός προβλήματος.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Στοιχεία των παραμετρικών αναλύσεων .....	49
4.1 Γενικά - Εισαγωγικά .....	49
4.2 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων.....	50
4.2.1 Επιλύσεις με καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb .....	50
4.2.2 Επιλύσεις με καταστατικό νόμο Double-Yield .....	67
4.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα και των δύο καταστατικών νόμων .....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σύνοψη – Γενικά Συμπεράσματα .....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	104

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Έγχυτοι φρεατοπάσσαλοι σε ασυνεχή διάταξη-Διάτρηση αγκυρίων, (Ζερβογιάννης, 2008).....	13
Σχήμα 2.2 Αλληλοτεμνόμενοι πάσσαλοι με μία σειρά μεταλλικών αντηρίδων, (Ζερβογιάννης, 2008).....	14
Σχήμα 2.3 Διαφραγματικός τοίχος με πανέλα 60εκ. και δύο σειρές μεταλλικών αντηρίδων, (Ζερβογιάννης, 2008) .....	15
Σχήμα 2.4 Παράδειγμα σύνδεσης πασσαλοσανίδας .....	15
Σχήμα 2.5 Τυπική διάταξη συστήματος αντιστήριξης με φρεατοπασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος, (Ζερβογιάννης, 2008) .....	16
Σχήμα 2.6 Πέτασμα αντιστήριξης τύπου «Βερολίνου», (Ζερβογιάννης, 2008).....	17
Σχήμα 2.7 Τυπική διάταξη συστήματος αντιστήριξης με μεταλλικούς πασσάλους 2UNP, (Ζερβογιάννης, 2008) .....	17
Σχήμα 2.8 Διαστάσεις .....	22
Σχήμα 3.1 Υπολογιστική διαδικασία του προγράμματος Flac (Itasca, 2008) .....	32
Σχήμα 3.2 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για μονοαξονική φόρτιση .....	34
Σχήμα 3.3 Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης .....	35
Σχήμα 3.4 Ενεργητικές - Παθητικές ωθήσεις, (Καββαδάς, 2006) .....	36
Σχήμα 3.5 Ανάλυση ωθήσεων για αυτοφερόμενες αντιστηρίξεις, (Μπουκοβάλας, 2009) .....	36
Σχήμα 3.6 Κατανομή ωθήσεων για αντιστηρίξεις με απλή αγκύρωση, (Μπουκοβάλας, 2009) .....	37
Σχήμα 3.7 Κατανομή των πλευρικών ωθήσεων για «δύσκαμπτο» και «εύκαμπτο» πέτασμα, (Κωμοδρόμος, 2008) .....	37
Σχήμα 3.8 Μορφή διαγράμματος ροπών «εύκαμπτου» τοίχου, (Μπουκοβάλας, 2009) .....	38
Σχήμα 3.9 Απεικόνιση του μοντέλου τριβής Mohr-Coulomb στο επίπεδο ορθής τάσης και διατμητικής αντοχής .....	39
Σχήμα 3.10 Τομή της επιφάνειας Mohr- Coulomb στο μεσημβρινό και Π επίπεδο..	40
Σχήμα 3.11 Τομή της επιφάνειας Mohr- Coulomb στο μεσημβρινό και Π επίπεδο..	41
Σχήμα 3.12 Προσδιορισμός του R μέσω της κλίσης της καμπύλης φόρτισης, $dp/de$ και της κλίσης $K_c=dp/dee$ του κλάδου αποφόρτισης. ....	43
Σχήμα 3.13 Κάναβος και εισαγωγή αρχικού εντατικού πεδίου .....	45
Σχήμα 3.14 Εισαγωγή όμορης οικοδομής .....	45
Σχήμα 3.15 Εισαγωγή διαφραγματικού τοίχου.....	46
Σχήμα 3.16 1ο Στάδιο εκσκαφής .....	46
Σχήμα 3.17 2ο Στάδιο εκσκαφής .....	47
Σχήμα 3.18 3ο Στάδιο εκσκαφής .....	47
Σχήμα 3.19 4ο Στάδιο εκσκαφής .....	48
Σχήμα 3.20 Τελικό στάδιο εκσκαφής.....	48
Σχήμα 4. 1 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	51

Σχήμα 4. 2 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	52
Σχήμα 4. 3 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	53
Σχήμα 4. 4 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	54
Σχήμα 4. 5 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	55
Σχήμα 4. 6 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	57
Σχήμα 4. 7 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	58
Σχήμα 4. 9 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	60
Σχήμα 4. 10 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	61
Σχήμα 4. 11 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	62
Σχήμα 4. 12 Αξονικές δυνάμεις 1 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	63
Σχήμα 4. 13 Αξονικές δυνάμεις 2 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	64
Σχήμα 4. 14 Αξονικές δυνάμεις 3 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	64
Σχήμα 4. 15 Αξονικές δυνάμεις 4 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	65
Σχήμα 4. 16 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	68
Σχήμα 4. 17 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	69

Σχήμα 4. 18 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	70
Σχήμα 4. 19 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	71
Σχήμα 4. 20 Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής .....	72
Σχήμα 4. 21 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	73
Σχήμα 4. 22 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	74
Σχήμα 4. 23 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	75
Σχήμα 4. 24 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής .....	76
Σχήμα 4. 25 Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής .....	77
Σχήμα 4. 26 Κατακόρυφες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	78
Σχήμα 4. 27 Αξονικές δυνάμεις 1 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	79
Σχήμα 4. 28 Αξονικές δυνάμεις 2 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	80
Σχήμα 4. 29 Αξονικές δυνάμεις 3 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	80
Σχήμα 4. 30 Αξονικές δυνάμεις 4 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής .....	81
Σχήμα 4. 31 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	84
Σχήμα 4. 32 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	85

Σχήμα 4. 33 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	86
Σχήμα 4. 34 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	87
Σχήμα 4. 35 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	88
Σχήμα 4. 36 Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	90
Σχήμα 4. 37 Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	91
Σχήμα 4. 38 Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	92
Σχήμα 4. 39 Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 4 <sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.....	93
Σχήμα 4. 40 Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	94
Σχήμα 4. 41 Συγκριτικό διάγραμμα κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής.....	95
Σχήμα 4. 42 Αξονικές δυνάμεις 1 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής.....	96
Σχήμα 4. 43 Αξονικές δυνάμεις 2 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής.....	97
Σχήμα 4. 44 Αξονικές δυνάμεις 3 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής.....	97
Σχήμα 4. 45 Αξονικές δυνάμεις 4 <sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής.....	98

## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1 Παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδάφους.....	44
Πίνακας 3.2 Ιδιότητες διαφραγματικού τοίχου .....	44
Πίνακας 3.3 Ιδιότητες αντηρίδων .....	44
Πίνακας 4. 1 Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb.....	65
Πίνακας 4. 2 Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb ...	66
Πίνακας 4. 3 Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield .....	81
Πίνακας 4. 4 Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield .....	82
Πίνακας 4. 5 Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield.....	98
Πίνακας 4. 6 Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας $K_0$ με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield .....	99





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και τη διερεύνηση των παραγόντων που συμμετέχουν στην κατασκευή μιας βαθιάς, πολυσταδιακής εκσκαφής με σύστημα αντιστήριξης αποτελούμενο από ένα διαφραγματικό τοίχο και τέσσερις σειρές αντηρίδων, με ύπαρξη υπόγειου υδάτινου ορίζοντα και ύπαρξη οικοδομής στην δεξιά πλευρά της εκσκαφής.

Το υπό μελέτη πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών *FLAC v6.0*, δύο διαστάσεων.

Πρώτος στόχος της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάλυση της αλληλεπίδρασης εδάφους και στοιχείων αντιστήριξης σε κάθε στάδιο κατασκευής μελετώντας τα κινηματικά και εντατικά μεγέθη του συστήματος που προέκυψαν, με μεταβολή του συντελεστή ωθήσεων σε κατάσταση ηρεμίας  $K_0$  (0.5, 0.75, 1.00).

Στη συνέχεια και με βάση τα ανωτέρω, διερευνήθηκε η επιρροή του καταστατικού νόμου με τον οποίο γίνεται η προσομοίωση του προβλήματος στα παραπάνω μεγέθη. Έγιναν επιλύσεις του προβλήματος με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb και Double-Yield, και αξιολογήθηκε το πώς μεταβάλλονται τα εντατικά και κινηματικά μεγέθη του συστήματος και σε ποια από αυτά παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες αλλαγές. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν:

- Καμπτική ροπή κατά μήκος του διαφραγματικού τοίχου
- Οριζόντια μετακίνηση διαφραγματικού τοίχου
- Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες
- Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής
- Μετακίνηση της κορυφής της όμορης με τον διαφραγματικό τοίχο οικοδομής
- Κατακόρυφη μετακίνηση της βάσης της όμορης οικοδομής

# 1

## Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής.

Το κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει ανασκόπηση των χαρακτηριστικών των τοίχων αντιστήριξης, τα πεδία εφαρμογής τους και τις φάσεις κατασκευής τους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των διαφραγματικών τοίχων και οι κατασκευαστικές τους λεπτομέρειες.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος αριθμητικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι καταστατικοί νόμοι (Mohr-Coulomb, Double-Yield).

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών. Πραγματοποιούνται συγκρίσεις και σχολιάζονται οι διαφοροποιήσεις στα ακόλουθα κινηματικά και εντατικά μεγέθη:

- Καμπτική ροπή κατά μήκος του διαφραγματικού τοίχου
- Οριζόντια μετακίνηση διαφραγματικού τοίχου
- Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες
- Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής
- Μετακίνηση της κορυφής της όμορης με τον διαφραγματικό τοίχο οικοδομής
- Κατακόρυφη μετακίνηση της βάσης της όμορης οικοδομής

Αρχικά έγιναν επιλύσεις για κάθε καταστατικό νόμο ξεχωριστά και σύγκριση των αποτελεσμάτων με μεταβολή του συντελεστή ωθήσεων σε κατάσταση ηρεμίας  $K_0$  (0.5, 0.75, 1.00) και στη συνέχεια έγινε σύγκριση για να δούμε το πώς επηρεάζονται οι τιμές όταν αλλάζουμε τον καταστατικό νόμο.

Στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί ο τρόπος απόκρισης ενός διαφραγματικού τοίχου η επιφάνεια του οποίου συνορεύει με ήδη υπάρχουσα κατασκευή αν μεταβάλλουμε τον καταστατικό νόμο προσομοίωσης του εδάφους.

# 2

## Πετάσματα αντιστήριξης

### 2.1 Γενικά περί πετασμάτων αντιστήριξης

Σε πολλές περιπτώσεις έργων απαιτείται η αντιστήριξη πρανών και εκσκαφών για κατασκευή θεμελιώσεων, την κατασκευή υπόγειων ορόφων, την κατασκευή αντλιοστασίων, την απομάκρυνση υπόγειων υδάτων, κ.α.

Τρεις βασικές ομάδες αντιστήριξης είναι οι τοίχοι βαρύτητας, οι τοίχοι αντιστήριξης και τα πετάσματα. Οι τοίχοι βαρύτητας αντιστέκονται με το ίδιο βάρος τους, καθώς είναι ογκώδεις. Οι τοίχοι αντιστήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα, παρουσιάζουν στατική συμπεριφορά προβόλου, με την πάκτωση να διαμορφώνεται με τη μορφή πεδύλου, σχήματος L ή T, με κλείδα ή αντέρεισμα. Η κατασκευή πετασμάτων ως στοιχεία αντιστήριξης σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους αντιστήριξης παρουσιάζει σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα. Η διαφοροποίηση της λειτουργίας τους έγκειται κατά κύριο λόγο στη λειτουργία τους κατά τη φάση κατασκευής του έργου. Στις περισσότερες περιπτώσεις έργων επιτρέπεται η εγκατάσταση του αντιστηριζόντος στοιχείου πριν από τη διεξαγωγή των εκσκαφών.

Τα πετάσματα αντιστήριξης έχουν μικρό πάχος και ομοιόμορφη διατομή σε αντίθεση με τους τοίχους βαρύτητας, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζονται σε βαθιές θεμελιώσεις και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη μόνιμη ή προσωρινή λειτουργία τους στο έργο, τη συνεχή ή ασυνεχή μορφή τους και τη δυσκαμψία τους.

Τα πετάσματα διαθέτουν πάντα κατάλληλο βάθος έμπηξης ώστε οι ωθήσεις των γαιών να εξισορροπούνται από το κατάντη έδαφος κατά μήκος της έμπηξης. Τα πετάσματα αντιστήριξης συναντώνται με τρεις πιθανές μορφές: α) ως αυτοφερόμενα, δηλαδή υπό μορφή στατικής συμπεριφοράς προβόλων, με περιορισμένη όμως εφαρμογή λόγω κυρίως των υπερβολικά μεγάλων πλευρικών μετατοπίσεων, β) ως πετάσματα με μία αγκύρωση, έτσι ώστε η αντίσταση στην ώθηση των γαιών να προέρχεται από το κατάντη έδαφος και από το αγκύριο και τέλος, γ) ως πετάσματα με πολλαπλές αγκυρώσεις. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, η αντίσταση στην ώθηση γαιών επιτυγχάνεται με αρκετές σειρές αγκυρίων ή αντηρίδων με αποτέλεσμα την πρόκληση μικρών ή μέτριων μετατοπίσεων, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον και σε «απαιτητικά» περιβάλλοντα, αναφορικά με τις προκαλούμενες μετατοπίσεις ή βυθίσεις πίσω από αυτά.

Η επιλογή του τύπου του πετάσματος αντιστήριξης γίνεται κυρίως σε συνάρτηση με τη φύση του εδάφους και τις απαιτήσεις οριζόντιων ή κατακόρυφων μετακινήσεων και την παρουσία υπόγειου υδάτινου ορίζοντα.

Στα πετάσματα αντιστήριξης συγκαταλέγονται τα πασσαλοδιαφράγματα, σχηματιζόμενα από έγχυτους φρεατοπασσάλους από οπλισμένο σκυρόδεμα σε ασυνεχή διάταξη. Στην ανάληψη των οριζόντιων φορτίων - εδαφικών ωθήσεων είναι δυνατόν να συμμετέχει σύστημα προεντεταμένων αγκυρώσεων ή οριζόντιων αντηρίδων. Η κατασκευή πασσαλοδιαφράγματος από συνήθεις έγχυτους πασσάλους (μη αλληλοτεμνόμενους) δεν προσφέρεται για περιπτώσεις ύπαρξης υπόγειων υδάτων ή μη συνεκτικών εδαφών αφού χαρακτηρίζεται ως διαπερατό σύστημα αντιστήριξης, (Σχήμα 2.1).

Πετάσματα αντιστήριξης αποτελούν επίσης τα διαφράγματα συνεχών έγχυτων πασσάλων και τα διαφράγματα αλληλοτεμνόμενων έγχυτων πασσάλων. Τα συνεχή διαφράγματα είναι ένα σύστημα αδιαπέρατο και για το λόγο αυτό αυτή η υπόψη μέθοδος αντιστήριξης εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις που ο υπόγειος υδάτινος ορίζοντας είναι πάνω από την τελική στάθμη εκσκαφής και ιδιαίτερα σε αμμώδεις-αμμοχαλικώδεις σχηματισμούς υψηλής διαπερατότητας, σε μαλακές αργίλους ή ακόμη και σε ημιβραχώδεις σχηματισμούς, έντονα κερματισμένους και με υψηλή διαπερατότητα. (Σχήμα 2.2)



**Σχήμα 2.1** Έγχυτοι φρεατοπάσσαλοι σε ασυνεχή διάταξη-Διάτρηση αγκυρίων, (Ζερβογιάννης, 2008)



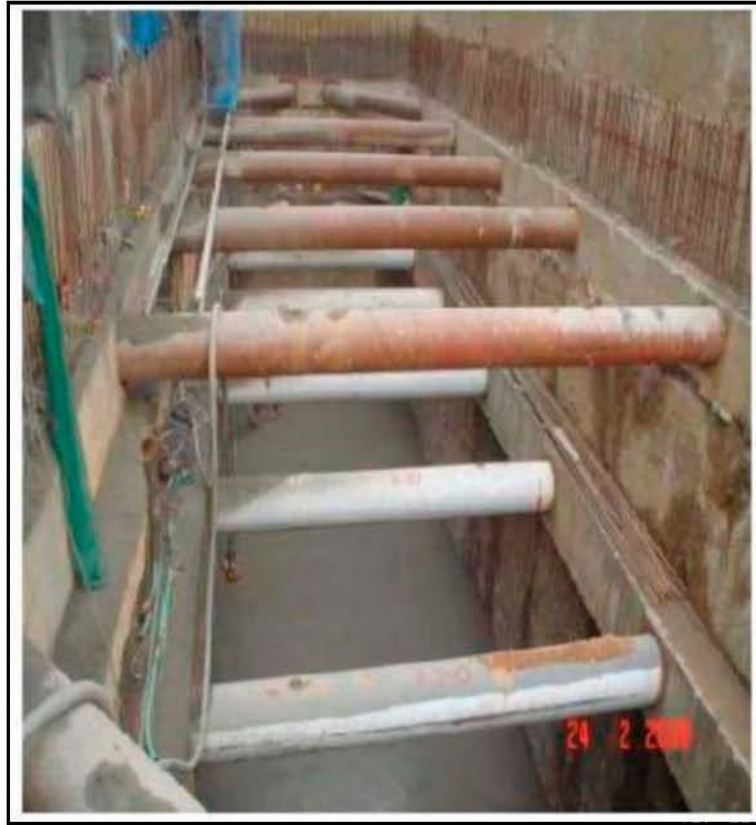
**Σχήμα 2.2** Αλληλοτεμνόμενοι πάσσαλοι με μία σειρά μεταλλικών αντηρίδων, (Ζερβογιάννης, 2008)

Όμοια χαρακτηριστικά με τους αλληλοτεμνόμενους πασσάλους, ως προς τη λειτουργία τους, παρουσιάζουν οι διαφραγματικοί τοίχοι. Οι διαφραγματικοί τοίχοι έχουν συνεχή μορφή και θεωρούνται κατάλληλοι για αντιστήριξη με υπόγειο υδάτινο ορίζοντα και διαπερατά εδάφη. Συχνά, σύστημα προεντεταμένων αγκυρώσεων συμμετέχει στην ανάληψη τμήματος των οριζόντιων φορτίων, δηλαδή των εδαφικών ωθήσεων, με στόχο τον περιορισμό των οριζόντιων μετακινήσεων του πετάσματος και συνεπώς και του αντιστηριζόμενου εδάφους. (Σχήμα 2.3)

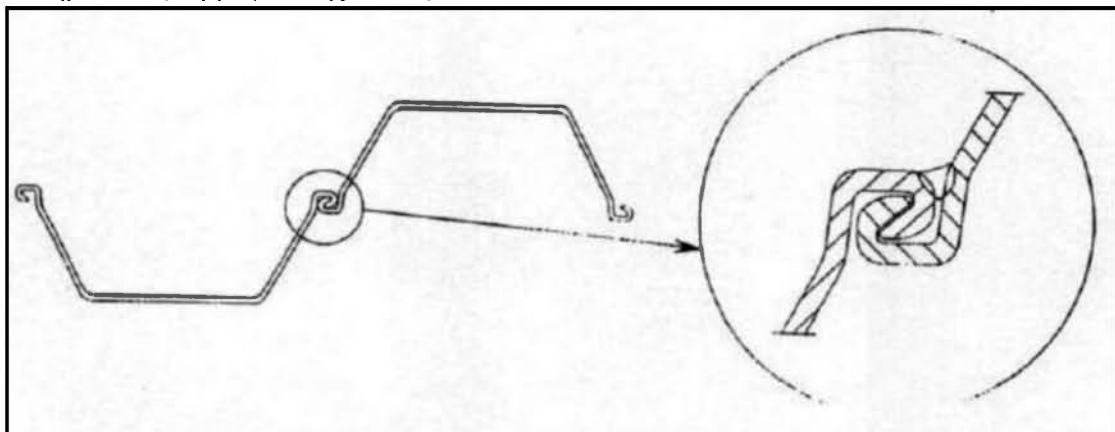
Στην κατηγορία των προσωρινών μέτρων αντιστήριξης εμφανίζονται οι πασσαλοσανίδες και οι μεταλλικοί πάσσαλοι, γνωστοί και ως τύπου «Βερολίνου», (Berlinoise).

Οι τοίχοι αντιστήριξης από μεταλλικές πασσαλοσανίδες διακρίνονται σε ενιαίου τύπου με ένα κύριο, επαναλαμβανόμενο στοιχείο αντιστήριξης και σε συνδυασμένου τύπου με κύρια και δευτερεύοντα στοιχεία αντιστήριξης. Τα κύρια στοιχεία μπορεί να είναι χαλύβδινοι σωλήνες, δοκοί ή κιβώτια αποτελούμενα από μεταλλικές πασσαλοσανίδες, ενώ τα δευτερεύοντα στοιχεία είναι συνήθως από μεταλλικές πασσαλοσανίδες σχήματος U ή Z. Οι τοίχοι, οι οποίοι διαμορφώνονται από ενιαίου τύπου πασσαλοσανίδες, (Larssen), διαμορφώνονται από μεταλλικές διατομές οι οποίες διατάσσονται μεταξύ τους σε συνεχή μορφή. Η συνέχεια της

κατασκευής παρέχεται μέσω αρμών αλληλεμπλοκής της κατά μήκος τοποθέτησης εγκοπών ή μέσω ειδικών συνδετήρων. (Σχήμα 2.4)



**Σχήμα 2.3** Διαφραγματικός τοίχος με πάνελα 60εκ. και δύο σειρές μεταλλικών αντηρίδων, (Ζερβογιάννης, 2008)



**Σχήμα 2.4** Παράδειγμα σύνδεσης πασσαλοσανίδας

Σημαντική προϋπόθεση αποτελεί η ικανοποίηση απαιτήσεων πριν και κατά τη διάρκεια τοποθέτησης των πασσαλοσανίδων, όπως η μελέτη των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας των εδαφικών στρώσεων, η πιθανότητα προσκόλλησης συνεκτικών εδαφών στις πασσαλοσανίδες κατά την εξαγωγή τους από το έδαφος, η πιθανή παρουσία ογκόλιθων εντός του εδάφους και τις υδραυλικές συνθήκες της

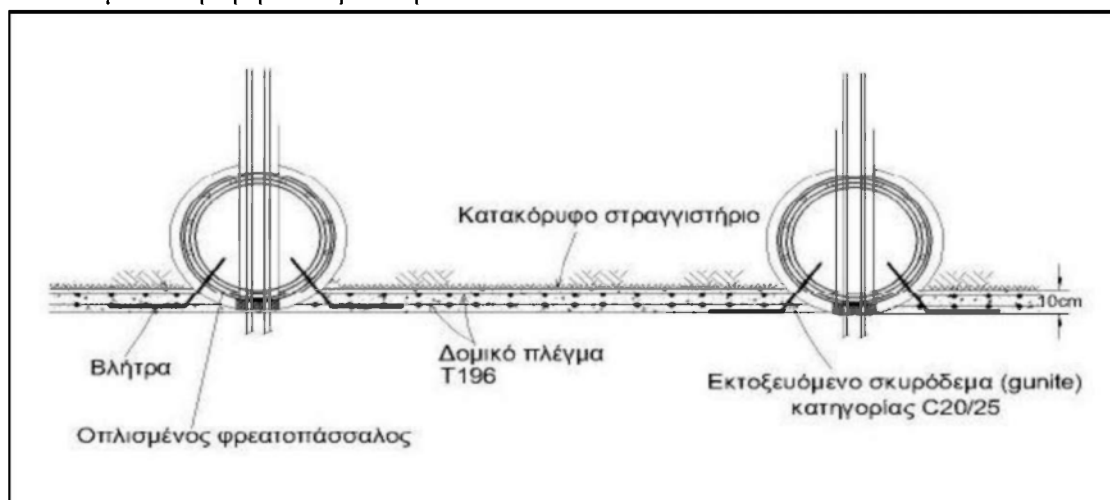


περιοχής εγκατάστασης τους. Σημαντικό μειονέκτημα αυτού του τύπου αντιστήριξης αποτελεί η πρόκληση οχλήσεων σε αστικά κέντρα.

Οι τοίχοι αντιστήριξης τύπου «Βερολίνου» είναι εύκαμπτο σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ως προσωρινή αντιστήριξη βαθιών εκσκαφών με κατακόρυφα πρανή. Το σύστημα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. Κατακόρυφες νευρώσεις, σε αποστάσεις της τάξεως των δύο μέτρων, που εκτείνονται από τη στέψη του κατακόρυφου πρανούς έως μερικά μέτρα χαμηλότερα από το τελικό στάδιο της εκσκαφής. Οι νευρώσεις κατασκευάζονται πριν από την έναρξη της κύριας εκσκαφής και μπορεί να είναι:

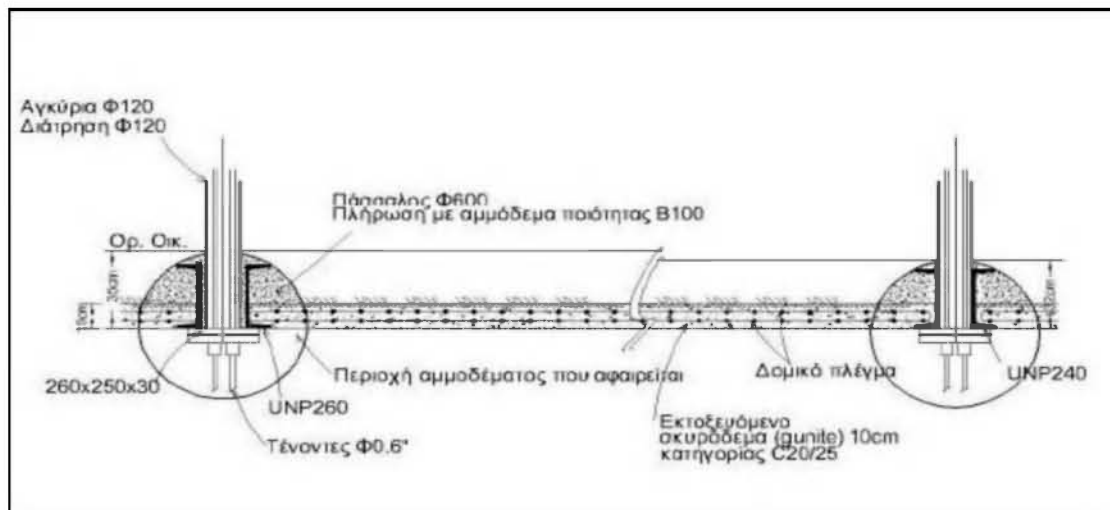
- i. Πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα δι' εκσκαφής (έγχυτοι πάσσαλοι) (Σχήμα 2.5)
- ii. Χαλύβδινα στοιχεία, συνήθως διατομές HEB (Σχήμα 2.6) ή δύο διατομές UPN (τοποθετημένες πλάτη με πλάτη σε απόσταση μερικών εκατοστών με εγκάρσιους συνδέσμους ώστε να αποτελούν ενιαίο φορέα), (Σχήμα 2.7). Τα χαλύβδινα στοιχεία συνήθως τοποθετούνται εντός προδιατρημένης οπής (η οποία στη συνέχεια πληρούται με ισχύο κονίαμα από τσιμέντο και άμμο) ενώ, σε ορισμένες περιπτώσεις (μόνον σε διατομές HEB), εμπήγνυνται στο έδαφος με δόνηση ή/και κρούση.



**Σχήμα 2.5** Τυπική διάταξη συστήματος αντιστήριξης με φρεατοπασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος, (Ζερβογιάννης, 2008)



Σχήμα 2.6 Πέτασμα αντιστήριξης τύπου «Βερολίνου», (Ζερβογιάννης, 2008)



Σχήμα 2.7 Τυπική διάταξη συστήματος αντιστήριξης με μεταλλικούς πασσάλους 2UNP, (Ζερβογιάννης, 2008)

2. Σανίδωμα («πέτσωμα») μεταξύ των νευρώσεων, το οποίο κατασκευάζεται σε φάσεις κατά τη διάρκεια και με την πρόοδο της εκσκαφής. Το πέτσωμα συνήθως αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (συχνά οπλισμένο με δομικό πλέγμα) και ενίοτε έγχυτο οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε περιπτώσεις νευρώσεων από χαλύβδινες διατομές HEB, το «πέτσωμα» αποτελείται από ξύλινες δοκούς που τοποθετούνται μεταξύ γειτονικών νευρώσεων και στηρίζονται στον αύλακα που δημιουργείται μεταξύ του κορμού και των πελμάτων της διατομής HEB. Η στατική λειτουργία του «πετσώματος» είναι να μεταφέρει τις πιέσεις γαιών στις εκατέρωθεν νευρώσεις.

3. Σύστημα ανάληψης των πρακτικά οριζόντιων φορτίων των νευρώσεων. Το σύστημα αυτό, αποτελείται είτε από προεντεταμένες αγκυρώσεις (με κεφαλές εδραζόμενες επί των νευρώσεων), είτε από οριζόντιες αντηρίδες που εδράζονται στις νευρώσεις και συνδέουν δύο απέναντι τοίχους αντιστήριξης σε περιπτώσεις που το άνοιγμα είναι περιορισμένο. Σε σπάνιες περιπτώσεις εκσκαφών μικρού βάρους

(αντιστηριζόμενες κυρίως με εμπηγνυόμενες νευρώσεις από ΗΕΒ και «πέτσωμα» από ξύλινες δοκούς), οι νευρώσεις μπορεί να λειτουργούν ως πρόβολοι, δηλαδή χωρίς αγκυρώσεις ή αντηρίδες. Αυτός ο τύπος αντιστήριξης εφαρμόζεται κυρίως σε συνεκτικά εδάφη, βραχώδη ή ημιβραχώδη ή γενικά σε σταθερά εδάφη που δεν υπάρχει σημαντική υδροφορία.

Όπως προαναφέρθηκε, σε πολλές περιπτώσεις έργων το σύστημα αντιστήριξης ενισχύεται από αγκύρια προσωρινά ή μόνιμα, αλλά και αντηρίδες.

Η διαμόρφωση ενός εσωτερικού συστήματος αντιστήριξης με μεταλλικές αντηρίδες προτιμάται όταν είναι αδύνατη η κατασκευή αγκυρώσεων λόγω ύπαρξης δικτύων Ο.Κ.Ω., όταν τα όμορα κτήρια δημιουργούν εσοχή στο σκάμμα και τα αγκύρια «διασταυρώνονται», όταν οι αγκυρώσεις πρέπει να γίνουν κάτω από τον υπόγειο υδάτινο ορίζοντα με σημαντική παροχή νερού και σε ορθογωνικά οικόπεδα, όπου η μικρή διάσταση αυτών επιτρέπει τη χρήση αντηρίδων με μικρό κόστος.

Μειονεκτήματα της τοποθέτησης αντηρίδων αποτελούν τα εξής δύο: Οι δυσκολίες εκσκαφής κάτω από αυτές, οι δυσκολίες τοποθέτησης στεγανωτικής μεμβράνης και οι δυσκολίες στη μόνιμη κατασκευή δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Για την ασφαλή κατασκευή όλων των παραπάνω έργων αντιστήριξης προαπαιτείται η διεξαγωγή γεωτεχνικής έρευνας και η τοπογραφική αποτύπωση των όμορων κατασκευών. Η γεωτεχνική έρευνα θα πρέπει να εκτείνεται σε όλο το βάθος επιρροής του συστήματος αντιστήριξης και θα πρέπει να διαπιστώνονται τα εξής: η ύπαρξη ή μη χαλαρών ή μαλακών εδαφικών υλικών με πιθανά προβλήματα αστάθειας κατά την εκσκαφή- κατασκευή των στοιχείων αντιστήριξης, η ύπαρξη σχηματισμών μεγάλης διαπερατότητας (όπως άμμοι, αμμοχάλικα κ.λπ.), η παρουσία βραχωδών σχηματισμών ή ογκόλιθων που θα ήταν δυνατό να προκαλέσουν δυσκολίες κατά την εκσκαφή ή τη διάτρηση των στοιχείων αντιστήριξης, η παρουσία υπόγειου υδάτινου ορίζοντα και η στάθμη του.

Παράλληλα, η τοπογραφική αποτύπωση προσδιορίζει τη θέση των Δικτύων Κοινής Ωφέλειας, των υπογείων των όμορων κατασκευών, την καταγραφή της κατάστασης των δομικών στοιχείων των όμορων κατασκευών, το είδος θεμελίωσης των όμορων κτηρίων, δεξαμενές ή πηγάδια σε ακάλυπτους χώρους.

Τα έργα αντιστήριξης σχεδιάζονται υπό συνθήκες οριακών καταστάσεων. Χαρακτηριστικό έλεγχο οριακής κατάστασης αποτελεί έλεγχος έναντι αστοχίας της κατασκευής (Ultimate Limit State - ULS), ενώ για την απρόσκοπτη λειτουργία ενός έργου απαιτείται πλέον συχνά και ο έλεγχος έναντι σε κατάσταση λειτουργίας (Serviceability Limit States - SLS). Συνεπώς, διακρίνονται δύο τύποι οριακών καταστάσεων:

- Οριακές καταστάσεις αστοχίας (Ultimate Limit State - ULS)
- Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (Serviceability limit States - SLS)

Η οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) συμβαίνει όταν δημιουργηθεί ένας μηχανισμός θραύσεως μέσα στο έδαφος (αστοχία τύπου GEO) είτε όταν δημιουργηθεί ένας μηχανισμός θραύσεως ή σοβαρές βλάβες στην κατασκευή (αστοχία τύπου STR) λόγω μεγάλων παραμορφώσεων στο έδαφος θεμελιώσεως.

Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS) συμβαίνει όταν οι παραμορφώσεις του εδάφους επιφέρουν προβλήματα στη λειτουργικότητα της κατασκευής ή οδηγούν μη αποδεκτές μετακινήσεις γενικότερα.

## 2.2 Διαφραγματικοί τοίχοι

### 2.2.1 Γενικά, πεδίο εφαρμογής

Η τεχνική των διαφραγματικών τοίχων έχει τις ρίζες στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όπου εφαρμόστηκαν διάφορες τεχνικές γεώτρησης για την εξόρυξη πετρελαίου. Μια τέτοια τεχνική βασιζόταν σε γέμισμα των οπών με υγρό μεγάλου ειδικού βάρους, με σκοπό να δημιουργήσουν ένα αντίβαρο του φορτισμένου υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και της πίεσης του αερίου, αλλά και να στηρίξουν τις παραμορφώσεις του εδάφους που μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστάθεια.

Παρόλα αυτά το βήμα από τις διατρημένες χωρίς σωλήνωση οπές στα επίπεδα στοιχεία των διαφραγματικών τοίχων ολοκληρώθηκε στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα από τους Lorenz και Veder.

Σήμερα οι διαφραγματικοί τοίχοι αποτελούν εναλλακτική περίπτωση των πασσαλότοιχων και έχουν εξελιχθεί σε ένα σημαντικό στοιχείο των υπόγειων κατασκευών. Χρησιμοποιούνται:

- ως περιμετρικά τοιχώματα ορυγμάτων με υψηλές απαιτήσεις ακαμψίας
- ως τοίχοι αντιστήριξης στην περίπτωση κατακρημνίσεων της εδαφικής επιφάνειας, στην κατασκευή λιμανιών, κατασκευή φρεάτων κλπ.
- ως εξωτερική (μόνιμη) επένδυση ορυγμάτων για την περίπτωση κατασκευής μονού τοίχου
- ως μεμονωμένο στοιχείο ποικίλου σχεδιασμού για την παραλαβή κατακόρυφων φορτίων ή λοξών εφελκυστικών δυνάμεων
- ως καθαρά στεγανό τοίχωμα για την κατακόρυφη στεγανοποίηση του υπεδάφους, ιδίως σε φράγματα και αποθήκες απορριμμάτων.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και μηχανήματα:

- Αρπάγη σε συρματόσχοινα
- Αρπάγη σε βάκτρο
- Φρέζα διάτρησης με υδραυλική υποσκαφή
- Φτυάρια σε υδραυλικούς εκσκαφείς
- Συρτοί κάδοι σε εκσκαφείς με συρματόσχοινα

Για την υποστήριξη των τοιχωμάτων της εκσκαφής χρησιμοποιούνται αιωρήματα από μπετονίτη και νερό, των οποίων η σύνθεση καθορίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Τα στοιχεία που αποτελούν τον διαφραγματικό τοίχο χωρίζονται γενικά μεταξύ τους με έναν αρμό εργασίας.

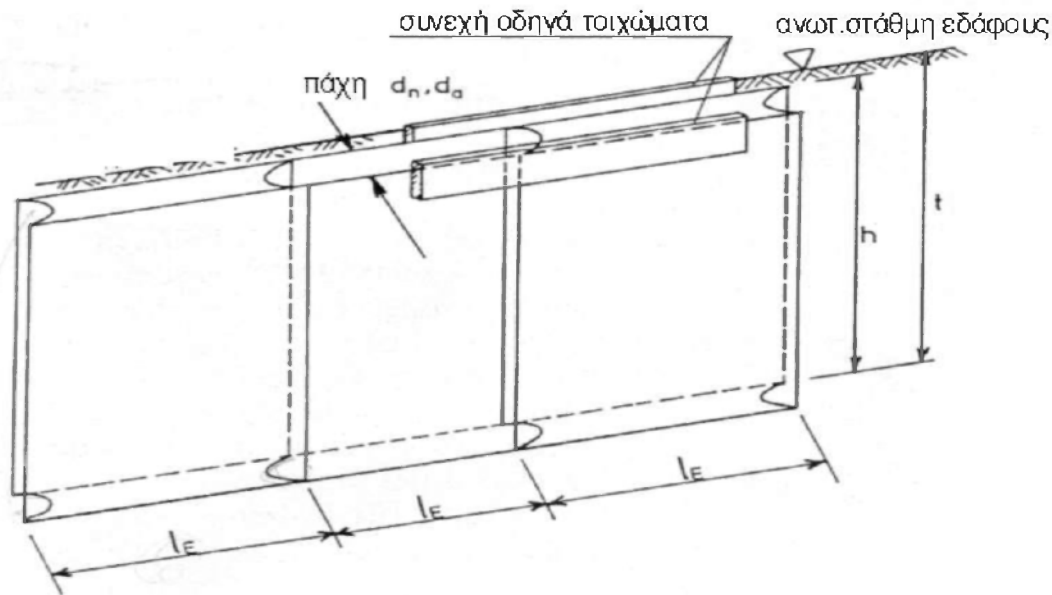
Τα συνήθη πάχη ενός διαφραγματικού τοίχου  $d_n$  είναι 40, 50, 60, 80, 100 cm, σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευάζονται διαφραγματικοί τοίχοι και με μεγαλύτερα πάχη. Το δυνατό βάθος  $t$  των στοιχείων που συνθέτουν έναν διαφραγματικό τοίχο δεν είναι θεωρητικά περιορισμένο, όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για μεγάλα βάθη υπάρχει ο κίνδυνος εκτροπής των στοιχείων από την προδιαγεγραμμένη θέση τους. Έχει παρατηρηθεί, ότι ακόμα και για μικρές αποκλίσεις της κατασκευής των στοιχείων από την κατακόρυφο προκύπτουν στην κατώτερη περιοχή του τοίχου χάσματα μεταξύ των στοιχείων. Εξαιτίας αυτού διαφραγματικοί τοίχοι βάθους άνω των 40 m κατασκευάζονται σπάνια και απαιτούν ιδιαίτερη εμπειρία και μέτρα κατά την κατασκευή.

Τα οριζόντια μεμονωμένα μήκη  $l_E$  των τμημάτων του διαφραγματικού τοίχου εξαρτώνται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος π.χ από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα εξωτερικά φορτία, τη στάθμη του υπογείου νερού, την πυκνότητα του υποστηρικτικού υγρού κλπ. και προκύπτουν από τον έλεγχο ευστάθειας. Το ελάχιστο μήκος εξαρτάται από το πλάτος των μηχανημάτων εκσκαφής και για τις αρπάγες που χρησιμοποιούνται. Εάν εξασφαλίζεται η ευστάθεια, θα πρέπει για λόγους οργάνωσης εργοταξίου, καθώς και για να διατηρηθεί μικρός ο αριθμός των κάθετων αρμών, να επιλεγούν τα μεμονωμένα μήκη των εκσκαφών  $l_E$  όσο το δυνατόν πιο μεγάλα. Γενικά το μήκος των τμημάτων κυμαίνεται μεταξύ 2,50 και 7,50 m.

Για την κατασκευή του διαφραγματικού τοίχου σκάβονται και σκυροδετούνται τμήματα εδάφους, τα λεγόμενα φατνώματα, ένα παρά ένα, ενώ ανάμεσα τους παραμένουν εδαφικές γέφυρες. Τα φατνώματα φτάνουν σε βάθος  $t$ , το οποίο προκύπτει από τις στατικές απαιτήσεις σχετικά με την ευστάθεια της εδαφικής επιφάνειας, και κατασκευάζονται σε μήκος  $l_E$  από 2,5 μέχρι 7,5 m.

Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει οι διαφραγματικοί τοίχοι να εξασφαλίζονται έναντι των παρακάτω μορφών αστοχίας:

- Γενικευμένη αστοχία
- Αστοχία λόγω περιορισμένης πάκτωσης και περιστροφής περί το σημείο αγκύρωσης
- Αστοχία λόγω περιορισμένης πάκτωσης και περιστροφής στη βάση του τοίχου
- Αστοχία αγκύρωσης ή αντηρίδας
- Αστοχία διατομής τοίχου λόγω διάτμησης ή κάμψης



### Σχήμα 2.8 Διαστάσεις

$d_n$  = Ονομαστικό πάχος (πλάτος αρπάγης εκσκαφής)

$d_a$  = Πάχος εκσκαφής  $d$  είναι 2 - 5 cm μεγαλύτερο από  $d$

$l_e$  = Μήκος (αξονική απόσταση των διατάξεων διακοπής)

$t$  = Βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους

$h$  = Ύψος τοίχου

### 2.2.2 Φάσεις της κατασκευής

Μετά την κατασκευή των οδηγών τοιχωμάτων ακολουθεί η κατασκευή του διαφραγματικού τοίχου με την ακόλουθη σειρά:

#### - Εκσκαφή τμήματος

Πρώτα - πρώτα σκάβεται ένα φάτνωμα με την βοήθεια ενός ειδικού μηχανήματος εκσκαφής. Για την υποστήριξη των τοιχωμάτων της εκσκαφής χρησιμοποιείται ένα αώρημα από μπετονίτη και νερό. Οι απώλειες σε υποστηρικτικό υγρό με την εκσκαφή πρέπει να συμπληρώνονται διαρκώς δια της προσθήκης μέσω αντλίας νέου αιωρήματος μπετονίτη. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι, η στάθμη του υγρού στην περιοχή των οδηγών τοιχωμάτων, κατά τις διακυμάνσεις της, να μην υπολείπεται σε καμία περίπτωση της καθορισμένης ελαχίστης στάθμης.

#### - Τοποθέτηση ακραίων αγωγών

Για τον ακραίο περιορισμό των πρώτων φατνωμάτων μέσα στο έδαφος τοποθετούνται συνήθως χαλύβδινοι σωλήνες (κοίλοι). Το επιθυμητό μήκος αυτών των ονομαζόμενων ακραίων αγωγών, το οποίο είναι ανάλογο του

βάθους της εκσκαφής, μπορεί να προκύψει από την συναρμολόγηση περισσότερων μεμονωμένων τμημάτων.

- Τοποθέτηση του οπλισμού

Ο οπλισμός μοντάρεται από πριν σε κλωβούς και τοποθετείται στην εκσκαφή. Για μεγαλύτερα βάθη εκσκαφών μπορεί να κριθεί απαραίτητη η τοποθέτηση μεμονωμένων κλωβών οπλισμών σε τμήματα. Η επικάλυψη σκυροδέματος εξασφαλίζεται με δυο τρόπους, είτε προσδένοντας στον κλωβό τεμάχια διατήρησης αποστάσεων μεγάλης επιφανείας, είτε κρεμώντας μέσα στην εκσκαφή, εκατέρωθεν του κλωβού, χαλύβδινα προφίλ που εκτείνονται σε μήκος. Εσωτερικές κατασκευές όπως εσοχές ορθογωνικής μορφής για τα αγκύρια ή άλλες εσοχές πραγματοποιούνται πριν την καταβίβαση του κλωβού.

- Σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση της εκσκαφής γίνεται με τεχνολογία υποβρύχιας σκυροδέτησης, με υδαρές σκυρόδεμα και κατακόρυφο σωλήνα σκυροδέτησης (tremie pipe). Το εκτοπιζόμενο αιώρημα αντλείται σε εγκαταστάσεις καθαρισμού και επαναχρησιμοποίησης ή μεταφέρεται σε κάδους απόρριψης.

- Ανέλκυση των ακραίων αγωγών

Μετά την έναρξη της πήξης του σκυροδέματος ανελκύονται οι ακραίοι αγωγοί με τη βοήθεια υδραυλικών πρεσών εξόλκευσης. Μεγάλο βάρος πρέπει να δοθεί στο σωστό χρονικό σημείο ανέλκυσης, το οποίο πρέπει να επιλεγεί έτσι, ώστε αφ' ενός το σκυρόδεμα, που έχει ήδη αρχίσει να πήζει, να μην ωθείται υπό το ίδιο βάρος του στην κοιλότητα που δημιουργείται μετά την ανέλκυση των ακραίων αγωγών, και αφ' ετέρου το σκυρόδεμα να μην είναι τόσο σκληρό, ώστε να κρίνεται αδύνατη η επανάκτηση των αγωγών.

Η εκσκαφή γίνεται κατά φατνώματα, εναλλάξ. Αυτό σημαίνει ότι, τα τμήματα εδάφους εκσκάπτονται και σκυροδετούνται ένα παρά ένα, ενώ ανάμεσα τους παραμένουν γέφυρες από έδαφος. Μετά την σκλήρυνση του σκυροδέματος σε αυτά συμπληρώνεται και η εκσκαφή των ενδιάμεσων φατνωμάτων και η σκυροδέτηση τους πάνω στους καθαρισμένους αρμούς των γειτονικών φατνωμάτων. Φυσικά, μπορεί ένα φάτνωμα να συνδεθεί και μονόπλευρα στα γειτονικά του φατνώματα αν από την άλλη πλευρά, που γειτονεύει με το έδαφος, εφαρμοστεί ένας κοίλος σωλήνας.



### 2.2.3 Διαφραγματικοί τοίχοι από προκατασκευασμένα τμήματα

Τα κύρια μειονεκτήματα των επί τόπου εγχυόμενων τοίχων είναι τα ακόλουθα:

- υδατοστεγανότητα
- αδρή υφή της επιφάνειας του τοίχου
- αποκλίσεις από την κατακόρυφο
- ανοχές στην σκυροδέτηση της κορυφής του διαφραγματικού τοίχου

Τα μειονεκτήματα αυτά οδήγησαν στην ανάπτυξη της μεθόδου κατασκευής διαφραγματικών τοίχων από προκατασκευασμένα τμήματα. Τα προκατασκευασμένα τμήματα τοποθετούνται στη σειρά μέσα στην εκσκαφή του εδάφους, η οποία έχει γίνει 10 με 20 cm πλατύτερη από τα προκατασκευασμένα στοιχεία. Η εκσκαφή υποστηρίζεται με ένα αυτοσκληρυνόμενο αιώρημα από μπετονίτη, τσιμέντο και νερό. Η εξέλιξη της αντοχής αυτού του αιωρήματος πρέπει να προσαρμόζεται με την πορεία του έργου:

- χαμηλό ιξώδες και χαμηλό όριο ροής κατά την διάρκεια της εκσκαφής και κατά την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων τμημάτων
- ενίσχυση του αιωρήματος ευθύς μετά την εισαγωγή των προκατασκευασμένων τμημάτων, ώστε η εκσκαφή της γειτονικής εκσκαφής να μην επηρεάσει αρνητικά το έτοιμο τμήμα
- αργή αύξηση της αντοχής, έτσι ώστε κατά την εφαρμογή του επόμενου προκατασκευασμένου τμήματος μετά από πολυήμερη παύση των εργασιών - όπως π.χ. κατά το σαββατοκύριακο - να μπορεί και πάλι να εκτοπιστεί το αιώρημα.
- 28 ημερών αντοχή για στατικούς λόγους περί τα 0,2 - 0,5 N/mm<sup>2</sup>.

Το σκληρυμένο υποστηρικτικό υγρό λειτουργεί ταυτόχρονα και ως υλικό στεγανοποίησης στην περιοχή των αρμών και του πόδα του τοίχου. Εάν θέλουμε να αποκλείσουμε με σιγουριά την διαβροχή των αρμών (μόνιμος τοίχος του έργου), κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση στεγανωτικών ταινιών από χάλυβα ή ελαστικό. Η στεγανωτική ταινία των αρμών σκυροδετείται μέσα στην κατά μέτωπο πλευρά του προκατασκευασμένου τμήματος και κατά την βύθιση αυτού μέσα στην εκσκαφή εμπηγνύεται στο γειτονικό στοιχείο.

Οι εκσκαφές πραγματοποιούνται συνεχώς προς μια κατεύθυνση εργασίας, τα προκατασκευασμένα τμήματα τοποθετούνται, το ένα μετά το άλλο, στην προδιαγεγραμμένη θέση με τη βοήθεια βαρέων ανυψωτικών μηχανημάτων και

αναρτώνται στα οδηγία τοιχώματα, μέχρι το υποστηρικτικό υγρό αναπτύξει μια επαρκή αντοχή.

Επιφάνειες έδρασης και εσοχές για την σύνδεση περαιτέρω τμημάτων του έργου όπως είναι τα δάπεδα και οι οροφές προβλέπονται κατά την κατασκευή των προκατασκευασμένων τμημάτων και αποκαλύπτονται σχετικά εύκολα κατά την μετέπειτα εκσκαφή του εδάφους.

## **2.2.4. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες**

### 2.2.4.1 Γενικά

Κατά την κατασκευαστική διαμόρφωση ενός διαφραγματικού τοίχου θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στις λεπτομέρειες του συγκεκριμένου τρόπου κατασκευής. Ιδιαίτερος θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο ότι κατά την σκυροδέτηση πρέπει να εκτοπίζεται το υποστηρικτικό υγρό. Για την καθοδήγηση του οπλισμού, για την κατασκευή των συνδέσεων και των ελεύθερων εσοχών για την στερέωση μερών της κατασκευής, για την κατασκευή των υδατοφραγμών των αρμών κλπ. θα πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερα κατασκευαστικά μέτρα. Βασικά θα πρέπει να δοθεί προσοχή στον λεπτομερή σχεδιασμό των διαφραγματικών τοίχων, ώστε το νωπό σκυρόδεμα να περιρρέει τον οπλισμό και τις εσωτερικές κατασκευές, και το υποστηρικτικό υγρό να μπορεί να εκτοπιστεί σε όλη τη διατομή της εκσκαφής.

### 2.2.4.2 Οπλισμός

Ο οπλισμός ενός φατνώματος διαφραγματικού τοίχου αποτελείται από προπαρασκευασμένους κλωβούς. Οι διαστάσεις των κλωβών είναι ανάλογες των διαστάσεων της εκσκαφής, εξαρτώνται όμως και από τα διατιθέμενα ανυψωτικά μηχανήματα. Για ιδιαίτερα μεγάλου βάθους εκσκαφές, διπλές - ή επαναλαμβανόμενες εκσκαφές, μπορούν να τοποθετηθούν και δύο ή περισσότεροι κλωβοί σε παράθεση. Για στατικούς λόγους θα πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις ο κατακόρυφος οπλισμός να περικλείεται από οριζόντιους συνδετήρες. Οι ενισχύσεις θα πρέπει να σταθεροποιούν τον κλωβό κατά την μεταφορά και τοποθέτηση του με τον γερανό και κυρίως να εξασφαλίζουν στην περίπτωση έντονα ασύμμετρου οπλισμού με ασύμμετρη κατανομή του βάρους την τοποθέτηση του στην προδιαγεγραμμένη (μέσα στην εκσκαφή) θέση.

Κατασκευαστικά θα πρέπει προς τις πλευρές του εδάφους του ορύγματος να προβλεφθούν ανάλογα με το μήκος του κλωβού ένας ή περισσότεροι σταυροί από χαλύβδινες ράβδους ή επικαλύψεις από δομικά πλέγματα. Σκοπός τους δεν είναι άλλος από την ενίσχυση. Επιπρόσθετα απαιτούνται στους οριζόντιους συνδετήρες και ιδιαίτερα σε πλατιά σώματα μεμονωμένοι αναβολείς ή πρόσθετοι συνδετήρες ως ενίσχυση κάθετα στο επίπεδο του σώματος. Ο διαμήκης οπλισμός φτάνοντας στην

κορυφή του κλωβού συγκολλάται αμετάθετα πάνω σε ένα πλαίσιο ενίσχυσης, το οποίο συντίθεται από χαλύβδινες ράβδους ορθογωνικής διατομής ή από χαλυβδοσωλήνες. Αυτό το πλαίσιο πρέπει να είναι ιδιαίτερα άκαμπτο ώστε να μπορεί να αναλάβει το βάρος του κλωβού στην περίπτωση που αναρτάται από τα οδηγία τοιχώματα.

Όταν έχουμε να κάνουμε με ιδιαίτερα βαθιές εκσκαφές ή όταν το ύψος εργασίας για την κατασκευή του διαφραγματικού τοίχου είναι περιορισμένο, δηλ. γενικότερα όταν ο κλωβός δεν μπορεί να τοποθετηθεί με όλο του το μήκος μέσα στην εκσκαφή, τότε ένα τμήμα του κλωβού κρέμεται μέσα στην εκσκαφή και ένα άλλο μοντάρεται με αυτό. Ως συνδετήρια μέσα προτείνονται οπλισμοί περισφίξεως στις περιοχές των ενώσεων και κοχλιωτές μούφες.

#### 2.2.4.3 Σύνδεση αντηρίδων

Σε διαφραγματικούς τοίχους με αντηρίδες τοποθετείται μεταλλική πλάκα για την ασφαλή παραλαβή και διανομή των δυνάμεων από τις αντηρίδες. Οι επιφάνειες στις οποίες εδράζονται τα χαλύβδινα προφίλ μοντάρονται από πριν με την μορφή χαλύβδινων πλακών πάνω στον κλωβό οπλισμών και αποκαλύπτονται μετά την σκυροδέτηση και την εκσκαφή του διαφραγματικού τοίχου. Μια άλλη δυνατότητα είναι η εκ των υστέρων ενσφήνωση των πλακών σύνδεσης πάνω στον αποκαλυπτόμενο διαφραγματικό τοίχο.

Κατά την σύνδεση των αντηρίδων δεν απαιτούνται γενικά, λόγω της ακαμψίας των μεμονωμένων φατνωμάτων των διαφραγματικών τοίχων, φέρουσες δοκοί. Εάν ωστόσο πρέπει να μεταβιβαστούν τα φορτία από τις αντηρίδες στα γειτονικά φατνώματα, τότε μπορεί πάνω στην κεφαλή του διαφραγματικού τοίχου να σκυροδετηθεί μια συνδετήρια δοκός (κεφαλόδεσμος).

#### 2.2.4.4 Κατασκευή των αρμών

##### Γενικά

Προδιαγεγραμμένοι αρμοί κατά την κατασκευή ενός διαφραγματικού τοίχου προκύπτουν δια του περιορισμού των μεμονωμένων φατνωμάτων με αρμούς διακοπής εργασίας. Επειδή αυτοί οι αρμοί διακοπής δεν μπορούν να εμποδίσουν πλήρως τη ροή ύδατος, δεν αποτελούν στεγανό σχηματισμό. Οι αρμοί μεταξύ των φατνωμάτων είναι συνήθως άοπλοι και επιτρέπεται γενικά να μην συμμετέχουν στην μεταβίβαση των διατημητικών δυνάμεων.

Μεγαλύτερες κάθετες δυνάμεις μπορούν να μεταβιβαστούν από τους αρμούς μόνο τότε, όταν είναι κατάλληλα ενσφηνωμένοι. Αυτό μπορεί γενικά να συμβεί μετά την αποκάλυψη του διαφραγματικού τοίχου.

### Ακραίοι αγωγοί

Συχνά χρησιμοποιούνται ως κατασκευές διακοπής χαλύβδινοι σωλήνες, οι λεγόμενοι ακραίοι αγωγοί, οι οποίοι ανακτώνται μετά την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Ο χώρος που απομένει μετά την ανέλκυση χρησιμεύει στην καθοδήγηση της αρπάγης κατά την εκσκαφή του γειτονικού φατνώματος.

Στη συνήθη περίπτωση χρησιμοποίησης των ακραίων αγωγών ως προσωρινό μέτρο οι αρμοί μπορεί να είναι τόσο άψογα κατασκευασμένοι ώστε να μην χρειάζονται καμία ιδιαίτερη στεγανοποίηση ακόμα και αν βρίσκονται μέσα σε υπόγειο νερό.

### Προκατασκευασμένα χαλύβδινα τμήματα

Σπάνια αντί των ακραίων αγωγών χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα χαλύβδινα τμήματα, τα οποία παραμένουν μέσα στην εκσκαφή. Το πλεονέκτημα αυτής της ειδικής εκτέλεσης είναι από τη μια, ότι υπάρχει ένας οπλισμός στην περιοχή σύνδεσης των δυο φατνωμάτων και από την άλλη, ότι αποφεύγεται έτσι η εξόλκευση αυτών των ακραίων αγωγών με μηχανήματα βαρέως τύπου.

### Αρμοί διαστολής

Οι αρμοί μεταξύ των μεμονωμένων τμημάτων σκυροδέτησης μπορούν, λόγω παραμορφώσεως του τοίχου από ωθήσεις γαιών και πιέσεις νερού και λόγω συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος, να ανοίξουν λίγο. Αυτό μπορεί εν τέλει να οδηγήσει σε μικρές διαπερατότητες. Με μια διάταξη των αρμών διαστολής σε προδιαγεγραμμένες θέσεις μπορεί να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, ωστόσο τέτοιου είδους δαπάνες αξίζουν μόνο στην περίπτωση που ο διαφραγματικός τοίχος χρησιμοποιηθεί ως μόνιμος τοίχος του έργου.

## **2.2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κατασκευής διαφραγματικού τοίχου ως μέσο αντιστήριξης**

Συμπερασματικά, η κατασκευή ενός διαφραγματικού τοίχου ως μέσο αντιστήριξης μιας βαθιάς εκσκαφής, αποδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα στη περίπτωση που στο σύστημα συμμετέχουν αγκυρώσεις (αγκύρια ή αντηρίδες) και πιο συγκεκριμένα πολλαπλές (διαφορετικά, σε αυτοφερόμενα πετάσματα παρουσιάζονται μεγάλες παραμορφώσεις που ίσως να μην είναι επιτρεπτές). Κατά τον τρόπο αυτό,

περιορίζονται οι παραμορφώσεις του τοίχου και συνεπώς και οι μετατοπίσεις του εδάφους. Συγκεκριμένα, η λύση του διαφραγματικού τοίχου επιτρέπει την εγκατάσταση του πριν από τη διεξαγωγή εκσκαφών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται στο ελάχιστο ή ακόμα αποφεύγεται τελείως η διατάραξη των επικρατουσών εδαφικών συνθηκών του αντιστηριζόμενου εδάφους και περιορίζεται η εκτόνωση τάσεων.

Για τον παραπάνω λόγο, ο διαφραγματικός τοίχος αποτελεί μία εφικτή λύση για έργα σε αστικό περιβάλλον (π.χ. υπόγειοι όροφοι) στα οποία οι παραμορφώσεις πρέπει να είναι κατά το δυνατόν περιορισμένες ώστε να υπάρξει η ελάχιστη επιρροή σε γειτονικά κτίρια. Σχετικά με αυτή την εφαρμογή, ο διαφραγματικός τοίχος μπορεί να έχει μόνιμο χαρακτήρα στη μετέπειτα κατασκευή και να λειτουργήσει ως τοίχωμα υπογείου σε συνεργασία με τις πλάκες της κατασκευής μέσω οπλισμού συνεργασίας μεταξύ τους για μεταβίβαση εντατικών μεγεθών. Ακόμη, πλεονέκτημα της κατασκευής του διαφραγματικού τοίχου αποτελεί η ιδιότητα της υδατοστεγανότητας και συνεπώς καθίσταται μια κατασκευή κατάλληλη για έργα όπου απαιτείται υποβιβασμός του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα, αλλά επίσης και για έργα με ύπαρξη εδαφικών σχηματισμών υψηλής υδροπερατότητας.

Ωστόσο, θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στον εξοπλισμό, στην ορθή διαδικασία της εκσκαφής, στον έλεγχο των δομικών υλικών, στην παραγωγή μπεντονιτικού αιωρήματος κατάλληλων ιδιοτήτων και στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες τοποθέτησης των κλωβών οπλισμού και σκυροδέτησης, με βάση πάντα τις τοπικές συνθήκες και τον σκοπό του εκάστοτε έργου. Παράλληλα, θα πρέπει να ισχύουν οι κανονιστικές διατάξεις τοποθέτησης αγκυρώσεων, ώστε να αξιοποιούνται με τον βέλτιστο τρόπο στο έργο.

### **2.2.6 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα χρήσης αντηρίδων ως μέσα αγκύρωσης**

Οι αντηρίδες είναι προκατασκευαζόμενου τύπου, μεταλλικές συνήθως tubo χαλύβδινες. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι η πολύ καλή αντιστήριξη, με σημαντικό περιορισμό της οριζόντιας εκτροπής των πετασμάτων, με αποτέλεσμα την μείωση σε σημαντικό βαθμό των κατακόρυφων καθιζήσεων της εδαφικής επιφανείας. Βεβαίως το τελικό αποτέλεσμα, εξαρτάται και από την δυσκαμψία του πετάσματος, αλλά και από την δυστένεια των αντηρίδων.

Εδώ βεβαίως πρέπει να πούμε, ότι ίδιο αποτέλεσμα μπορούμε να επιτύχουμε και με αγκυρώσεις, αφού τα υπολογιζόμενα φορτία αντηρίδων, μπορούμε να τα εφαρμόσουμε ως φορτία προεντάσεως στα αγκύρια, για τον λόγο αυτό άλλωστε οι μέθοδοι προβλέψεως της μορφής της καμπύλης καθιζήσεως, ουσιαστικά δεν διαφοροποιούνται σχετικώς με τον τρόπο αγκύρωσης (αγκύρια ή αντηρίδες). Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα με την χρήση των αντηρίδων, είναι ότι δεν ενοχλούνται οι όμορες ιδιοκτησίες. Όμως η εφαρμογή τους εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από

την γεωμετρία του ορύγματος, την φύση του υπεδάφους και το καθεστώς των υπογείων υδάτων. Έτσι στην περίπτωση πολύ μεγάλου πλάτους εκσκαφής, π.χ. >30 μ, λόγω των προβλημάτων λυγισμού των αντηρίδων, η μέθοδος καθίσταται έως και αδύνατη. Επίσης ένα σημαντικό της μειονέκτημα, είναι και οι μεγάλες δυσχέρειες στην διακίνηση υλικών και εργασιών εντός του ορύγματος, λόγω της τοποθετήσεως των αντηρίδων.

# 3

## Πολυσταδιακή εκσκαφή και κατασκευή διαφραγματικού τοίχου με τέσσερις σειρές αγκυρώσεων

### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά - δυνατότητες του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών, FLAC

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος *FLAC 2D, version 6.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua - Itasca 2008)*. Πρόκειται για πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης κυρίως προσανατολισμένο σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής, το οποίο λειτουργεί βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

Αντικείμενο της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, ή ακόμη της Μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών, αποτελεί η αναγωγή ενός συνεχούς συστήματος σε διακριτό. Ο βαθμός αυτοματοποίησης της διαδικασίας προσδιορισμού των γεωμετρικών παραμέτρων των στοιχείων αυτών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Τούτο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εισαγωγή μετασχηματισμού και αναγωγής των στοιχείων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δεδομένη θέση στο πραγματικό σύστημα συντεταγμένων, σε κοινό στοιχείο αναφοράς (master ή reference element). (Κωμοδρόμος, 2008)

Σε ένα φυσικό, συνεχές πρόβλημα είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός κάποιας μεταβλητής με διεξαγωγή μετρήσεων σε καθορισμένα σημεία. Ο περαιτέρω προσδιορισμός της μεταβολής της μεταβλητής σε όλο το εύρος του προβλήματος μπορεί να γίνει με μαθηματική προσομοίωση του προβλήματος. Για την κατάστρωση των εξισώσεων προσομοίωσης, κατά κανόνα πολυωνυμικής μορφής, χρησιμοποιούνται οι γνωστές ακριβείς τιμές σε ορισμένα σημεία, τα οποία προήλθαν από τη διακριτοποίηση, ως συνοριακές συνθήκες. Οι πολυωνυμικές εξισώσεις μπορούν να δώσουν τις τιμές της εξεταζόμενης μεταβλητής σε οποιοδήποτε σημείο του προβλήματος. Οι προσδιοριζόμενες τιμές εμπεριέχουν πάντα ποσοστό σφάλματος το οποίο εξαρτάται από τις πολυωνυμικές βάσεις που χρησιμοποιούνται. Η αύξηση

του βαθμού των πολυωνυμικών βάσεων βελτιώνει την προσέγγιση και μειώνει το σφάλμα, προϋποθέτει εντούτοις αύξηση των σημείων στα οποία είναι γνωστή η ακριβής τιμή της προς προσδιορισμό μεταβλητής. Οι μεταβλητές, των οποίων ο προσδιορισμός επιδιώκεται, είναι τιμές τάσεων, παραμορφώσεων, μετακινήσεων, μεταβολής θερμοκρασίας, μεταβολής ροών.

Με στόχο τη συστηματικοποίηση της διαδικασίας ώστε, για όμοιου τύπου στοιχεία, να χρησιμοποιούνται ίδιες συναρτήσεις παρεμβολής, γίνεται χρήση ενός στοιχείου αναφοράς. Κάθε στοιχείο του χώρου ανάγεται σε ένα και μοναδικό στοιχείο αναφοράς του χώρου αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, στο *FLAC* ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διακριτοποιήσει το κάθε στοιχείο σε μικρότερα τετράπλευρα και το πρόγραμμα υποδιαιρεί το τετράπλευρο σε δύο τρίγωνα με ανεξάρτητους τανυστές τάσεων, όποτε απαιτούνται 16 συνιστώσες τάσεων για κάθε τετράπλευρο. Έτσι, το διάνυσμα της δύναμης που προκύπτει από κάθε κόμβο είναι ο μέσος όρος των διανυσμάτων των δυνάμεων των άλλων δύο κόμβων που βρίσκονται σε υπέρθεση αυτού.

Το *FLAC* στην κάθε επίλυση εμπεριέχει δυναμικές, κινηματικές συναρτήσεις. Ένας λόγος εφαρμογής τους είναι η σταθερότητα της αριθμητικής επίλυσης σε καταστάσεις που στη πραγματικότητα θα είχε επέλθει αστάθεια - αστοχία στο φυσικό σύστημα. Στη πραγματικότητα όταν το φυσικό σύστημα υπερβεί τις αντοχές παραμορφώσεων του μετατρέπει τη παραμόρφωση σε κίνηση, σε αντίθεση με τα υπολογιστικά συστήματα. Έτσι, αφού τα προγράμματα δεν συμπεριλαμβάνουν όρους αδρανείας, επιστρατεύουν αριθμητικές μεθόδους για να αντιμετωπίσουν τις πιθανές αστάθειες του φυσικού συστήματος.

Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί την εξίσωση κίνησης (equilibrium equation) προκειμένου να προσδιοριστούν οι νέες ταχύτητες και μετακινήσεις ενός κόμβου. Στη συνέχεια, από τις νέες ταχύτητες, υπολογίζονται οι νέες παραμορφώσεις, οι οποίες βάσει των καταστατικών εξισώσεων (stress / strain relation) προσδιορίζουν τις αντίστοιχες νέες τάσεις, ολοκληρώνοντας έτσι έναν πρώτο «υπολογιστικό» κύκλο (Basic explicit calculation cycle). Κάθε «υπολογιστικός» κύκλος αντιστοιχεί σε ένα χρονικό βήμα (timestep).

Σε κάθε «υπολογιστικό» κύκλο, οι ταχύτητες θεωρούνται σταθερές (frozen) και επομένως οι νέες τάσεις που προκύπτουν δεν επηρεάζουν τις ήδη υπάρχουσες ταχύτητες. Αυτό, εκ πρώτης όψεως, δεν φαίνεται ρεαλιστικό, καθότι είναι γνωστό ότι αλλαγές στις τάσεις συνεπάγονται αλλαγές στη ταχύτητα. Ωστόσο, εάν επιλεγεί ένα επαρκώς μικρό υπολογιστικό χρονικό βήμα, τότε η πληροφορία αυτή δεν προλαβαίνει να «διαδοθεί» από τον έναν στον διπλανό κόμβο (δοθέντος ότι κάθε εδαφικό ή άλλο υλικό διαθέτει μια μέγιστη ταχύτητα διάδοσης της πληροφορίας). Κατά συνέπεια, αφού κάθε «υπολογιστικός κύκλος» αντιστοιχεί σε ένα χρονικό βήμα, η υπόθεση για «σταθερές» ταχύτητες στο βήμα αυτό, είναι τεκμηριωμένη και επομένως δεν επηρεάζονται οι γειτονικοί κόμβοι στο ίδιο «υπολογιστικό» βήμα. Φυσικά, ύστερα



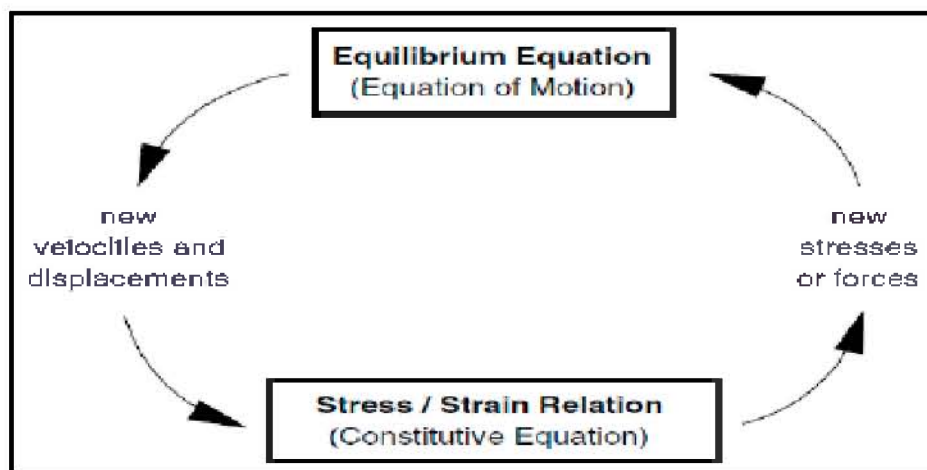
από αρκετούς «υπολογιστικούς» κύκλους, η οποία διατάραξη θα διαδοθεί σε γειτονικούς κόμβους, όπως ακριβώς συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Η υπόψη διαδικασία είναι γνωστή ως «Άμεση Μέθοδος Υπολογισμού, (explicit method)» και ακολουθείται από λογισμικά πεπερασμένων διαφορών. Η διαδικασία αυτή διαθέτει σοβαρά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα υπολογισμού μεγάλων παραμορφώσεων, της απόκρισης έντονα μη γραμμικών συστημάτων ή και φυσικών ασταθειών χωρίς τη θαμιστική διαδικασία υπολογισμού.

Αντίθετα, με τις έμμεσες μεθόδους υπολογισμού (implicit methods) που συνήθως υιοθετούνται σε λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, κάθε στοιχείο επικοινωνεί με όλα τα υπόλοιπα σε κάθε υπολογιστικό βήμα.

Τέλος, βασικό μειονέκτημα της άμεσης μεθόδου ανάλυσης (explicit method) θεωρείται η ύπαρξη ενός πολύ μικρού χρονικού βήματος το οποίο συνεπάγεται σημαντικό αριθμό βημάτων που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος (επίτευξη συμβατότητας και ισορροπίας).

Συνοψίζοντας, οι άμεσες μέθοδοι υπολογισμού (explicit methods) είναι οι πλέον κατάλληλες για επίλυση προβλημάτων με έντονες μη γραμμικότητες, μεγάλες παραμορφώσεις ή και φυσικές αστάθειες των συστημάτων. Αντίθετα, είναι λιγότερο κατάλληλες για προσομοίωση γραμμικών προβλημάτων ή μικρών παραμορφώσεων, λόγω του μεγάλου χρόνου που απαιτείται για την επίλυση.



**Σχήμα 3.1** Υπολογιστική διαδικασία του προγράμματος *FLAC* (Itasca, 2008)

Με βάση τα παραπάνω το *FLAC* προσφέρει δυνατότητες για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με τη βοήθεια πλήθους καταστατικών προσομοιωμάτων που διαθέτει, ώστε να επιλέξει ο χρήστης το κατάλληλο, καθώς επίσης σημαντικό εργαλείο αποτελεί η ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού του *FLAC*, η *FISH*.

Η υπόψη γλώσσα προγραμματισμού έχει την ικανότητα να προσομοιώνει τη συμπεριφορά εδαφικών κατασκευών όταν τα υλικά αυτών φτάνουν στο όριο της διαρροής τους και εισέρχονται στην πλαστική περιοχή τους. Η συμπεριφορά κάθε στοιχείου εκφράζεται από έναν προκαθορισμένο από τον χρήστη γραμμικό ή μη γραμμικό νόμο τάσεων - παραμορφώσεων σε συνδυασμό με τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

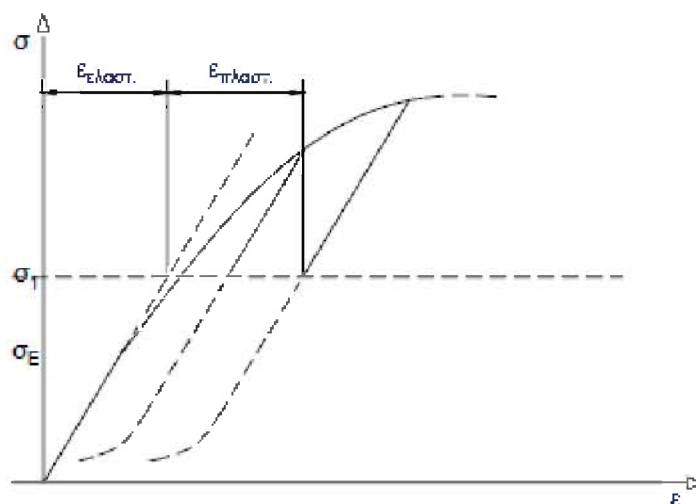
Ορισμένες άλλες δυνατότητες χρήσης του προγράμματος είναι οι εξής:

- Το *FLAC* περιλαμβάνει 12 εδαφικά καταστατικά προσομοιώματα παρέχοντας ταυτοχρόνως στον χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει δικό του καταστατικό νόμο μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Fish.
- Παρέχεται η δυνατότητα διαμόρφωσης διεπιφάνειας ή επιφάνειας ολίσθησης ή επιφάνειας αποκόλλησης.
- Βασική εφαρμογή του προγράμματος είναι η μελέτη σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Αυτές οι συνθήκες εφαρμόζονται σε μεγάλες επιμήκεις κατασκευές ή εκσκαφές με σταθερή διατομή που ενεργοποιούνται υπό φορτία που δρουν στο επίπεδο της διατομής. Επίσης, το *FLAC* προσφέρει συνθήκες επίπεδης έντασης για ελαστική ανάλυση και πλαστική ανάλυση κατά Mohr-Coulomb. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης μοντέλου αξονοσυμμετρικής γεωμετρίας χρησιμοποιούμενο κυρίως για σφαιρικές οπές σε συνεχές υλικό. Η εκτός επιπέδου  $\sigma_{zz}$  υπολογίζεται πάντα και για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις από το πρόγραμμα και συμμετέχει στους υπολογισμούς των μεγεθών της πλαστικής κατάστασης για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικής γεωμετρίας.
- Διαμόρφωση συνοριακών συνθηκών με εφαρμογή ταχύτητας ή δύναμης σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Διαμόρφωση αρχικών συνοριακών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένου του φορτίου βαρύτητας. Καθορισμός της στάθμης του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα για τον υπολογισμό των παθητικών τάσεων.
- Το *FLAC* διαθέτει την ικανότητα να προσομοιώνει την υπόγεια υδάτινη ροή, την πίεση του νερού των πόρων και τη διαφυγή ρευστού μέσω των κενών των πόρων. Έτσι, μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση ρευστού και εδάφους, είτε μέσω της επίδρασης της ογκομετρικής παραμόρφωσης του εδάφους λόγω της πίεσης του νερού των πόρων ή είτε μέσω των αλλαγών των πιέσεων του νερού των πόρων προκαλώντας μεταβολές στις ενεργές τάσεις που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού. Ως συνέπεια, το *Flac* διαθέτει τη δυνατότητα συζευγμένης μηχανικής και υδραυλικής ανάλυσης.
- Το *Flac* διαθέτει επίσης τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων σε δυναμική φόρτιση.
- Η διαδικασία προγραμματισμού κατά την οποία αρχικό στάδιο αποτελεί ο καθορισμός του εκάστοτε προβλήματος μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι εξής διαδικασίες: η δημιουργία πλέγματος διακριτοποιημένων στοιχείων, ο καθορισμός των ιδιοτήτων και συμπεριφορών των υλικών, ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών, της αρχικής εντατικής και παραμορφωσιακής

κατάστασης. Αυτά τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα από τον χρήστη με μορφή εντολών, είτε από τη γραμμή εντολών (menu-driven), είτε με μορφή γλώσσας προγραμματισμού (command driven). Έπειτα ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος και τέλος αφού επέλθει η μηχανική ισορροπία στο προσομοίωμα, προκύπτουν τα αποτελέσματα τα οποία ο χρήστης μπορεί να εξάγει ως γραφική απεικόνιση (plot) ή ως αρχείο μορφής πίνακα (print).

### 3.2 Γενικές αρχές ελαστοπλαστικών μοντέλων

Η αντιμετώπιση της συμπεριφοράς των υλικών με βάση την ελαστική θεωρία, προϋποθέτει μια εξιδανικευμένη συμπεριφορά η οποία πρακτικά δεν υφίσταται σχεδόν ποτέ.

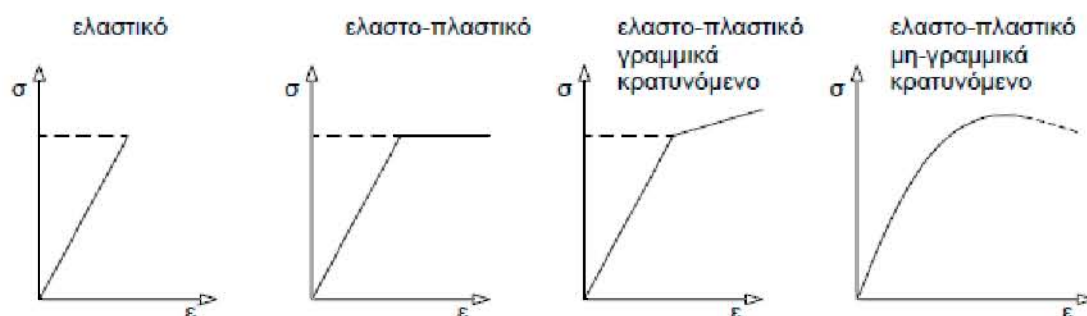


**Σχήμα 3.2** Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για μονοαξονική φόρτιση

Όπως φαίνεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε μια απλή περίπτωση μονοαξονικής φόρτισης (Σχήμα 3.2), υπάρχει μια περιοχή που το υλικό εμφανίζει μακροσκοπικά ελαστική συμπεριφορά, ακολουθούμενη από μια άλλη όπου η συμπεριφορά του υλικού είναι μη-ελαστική. Η μη-ελαστική περιοχή της καμπύλης αρχίζει από το λεγόμενο όριο ελαστικότητας το σημείο δηλαδή εκείνο πέρα από το οποίο εμφανίζονται οι μόνιμες, ή πλαστικές παραμορφώσεις. Στην περιοχή των πλαστικών παραμορφώσεων δεν ισχύει ο λόγος της αναλογικότητας  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $\epsilon$  η ανηγμένη παραμόρφωση. Το κοίλο μέρος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης ανταποκρίνεται στη συμπεριφορά του υλικού που ονομάζουμε συμπεριφορά κράτυνσης.

Στο Σχήμα 3.3 δίδονται καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης εξιδανικευμένων υλικών. Οι καμπύλες συμπεριφοράς αυτών των υλικών προέκυψαν από πειραματικές παρατηρήσεις κυρίως σε μέταλλα και συνέβαλλαν σημαντικά στην εξέλιξη των

ελαστο-πλαστικών θεωριών, με τις οποίες μπορεί να περιγραφεί η πλαστική συμπεριφορά ενός υλικού για πιο σύνθετες περιπτώσεις, όπως π.χ. ενός υλικού με μη γραμμική συμπεριφορά κράτυνσης.



Σχήμα 3.3 Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης

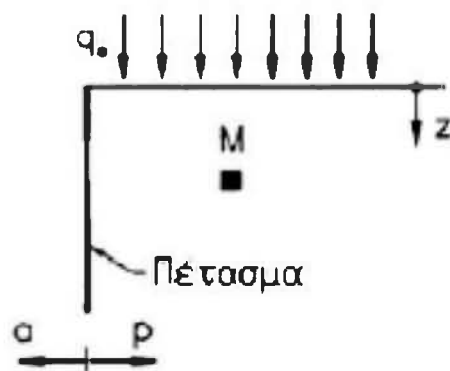
### 3.3 Λειτουργία διαφραγματικού τοίχου

Ο διαφραγματικός τοίχος έχει σκοπό την αντιστήριξη εδαφικών μαζών. Συνεπώς τα εδάφη, λόγω του βάρους τους, ασκούν πιέσεις (πλευρικές ωθήσεις) στα κατακόρυφα στοιχεία που τα περιορίζουν. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η πλευρική ώθηση που ασκείται κατά τη γεωστατική κατάσταση, δηλαδή όταν παρεμποδίζεται η πλευρική παραμόρφωση, οπότε:  $\sigma_h = u + \sigma'_h = u + K_o \sigma'_v$

Όπου,  $\sigma'_v$  είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση σε κάποια στάθμη, λόγω του βάρους των υπερκείμενων γαιών και τυχόν επιφόρτισης,  $u$  είναι η πίεση των πόρων και  $K_o$  ο συντελεστής πλευρικής ώθησης για παρεμπόδιση της πλευρικής παραμόρφωσης, (ωθήσεις ηρεμίας).

Η εκτίμηση των ωθήσεων που ασκούν τα εδαφικά υλικά είναι απαραίτητη σε πολλούς τύπους τοίχων αντιστήριξης.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ώθησης γαιών είναι ότι το μέγεθος της εξαρτάται από την πλευρική μετακίνηση, δηλαδή από τη δυνατότητα του στοιχείου που δέχεται την ώθηση να ενδώσει στην οριζόντια διεύθυνση ή να κινηθεί προς το έδαφος και να το συμπιέσει. Εάν το πέτασμα κινηθεί στη διεύθυνση "α" η οριζόντια τάση θα μειωθεί, ενώ αν κινηθεί στη διεύθυνση "β" η οριζόντια τάση θα αυξηθεί. Αν η κίνηση συνεχιστεί, η οριζόντια τάση θα συνεχίσει να μεταβάλλεται μέχρις ότου το εδαφικό στοιχείο αστοχήσει.

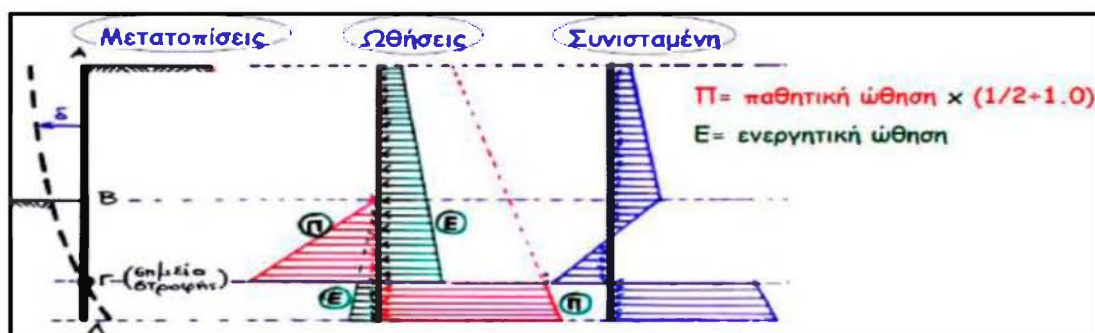


**Σχήμα 3.4** Ενεργητικές - Παθητικές ωθήσεις, (Καββαδάς, 2006)

Η τιμή των πλευρικών ωθήσεων δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής, ανάλογα με τη σχετική μετακίνηση του έργου αντιστήριξης. Η πλευρική ώθηση στο πέτασμα κατά την κίνηση στη διεύθυνση "a" κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $\sigma'_{ho}$  (μέγιστη) και  $\sigma'_{ha}$  (ελάχιστη), ενώ κατά την κίνηση στη διεύθυνση "p" κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $\sigma'_{ho}$  (ελάχιστη) και  $\sigma'_{hp}$  (μέγιστη).

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ανάλογα με το στατικό προσομοίωμα του πετάσματος, επιτρέπονται και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις και διαμορφώνονται ανάλογα και οι σχετικές εδαφικές ωθήσεις.

Στη περίπτωση αυτοφερόμενων αντιστηρίξεων, δηλαδή στατική συμπεριφορά προβόλου, οι εδαφικές ωθήσεις λαμβάνουν τη παρακάτω μορφή, θεωρώντας ότι οι μετακινήσεις του πετάσματος είναι ικανές για την ανάπτυξη πλήρους ενεργητικής ώθησης και μέρους της παθητικής ώθησης.

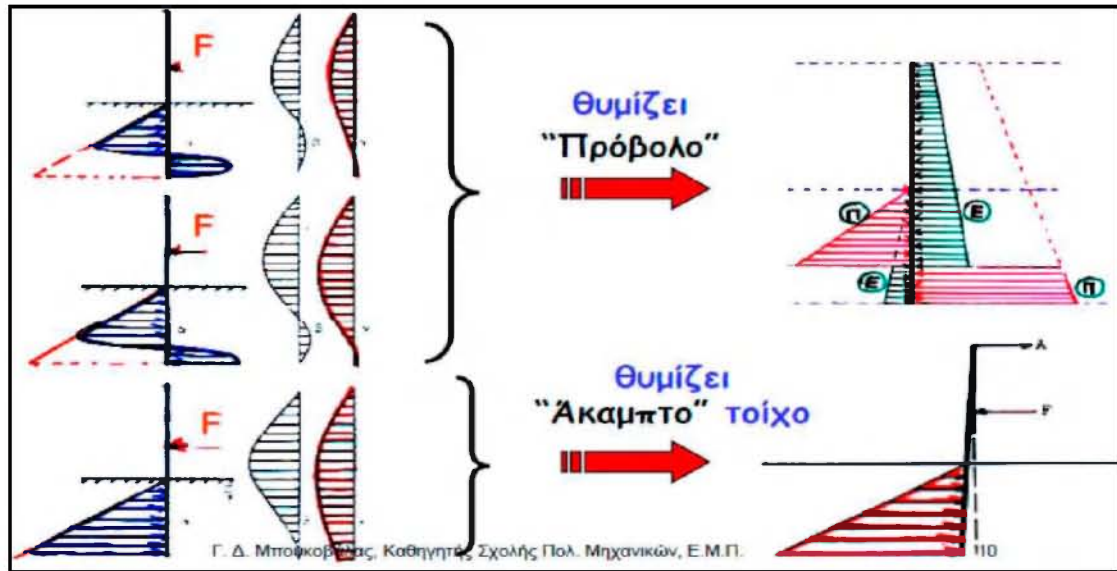


**Σχήμα 3.5** Ανάλυση ωθήσεων για αυτοφερόμενες αντιστηρίξεις, (Μπουκοβάλας, 2009)

Σε περίπτωση έργου αντιστήριξης με απλή αγκύρωση μιας αντηρίδας ή ενός αγκυρίου, η αγκύρωση αναλαμβάνει μέρος των ωθήσεων, περιορίζοντας τις μετατοπίσεις του τοίχου άρα και των εδαφικών μαζών.

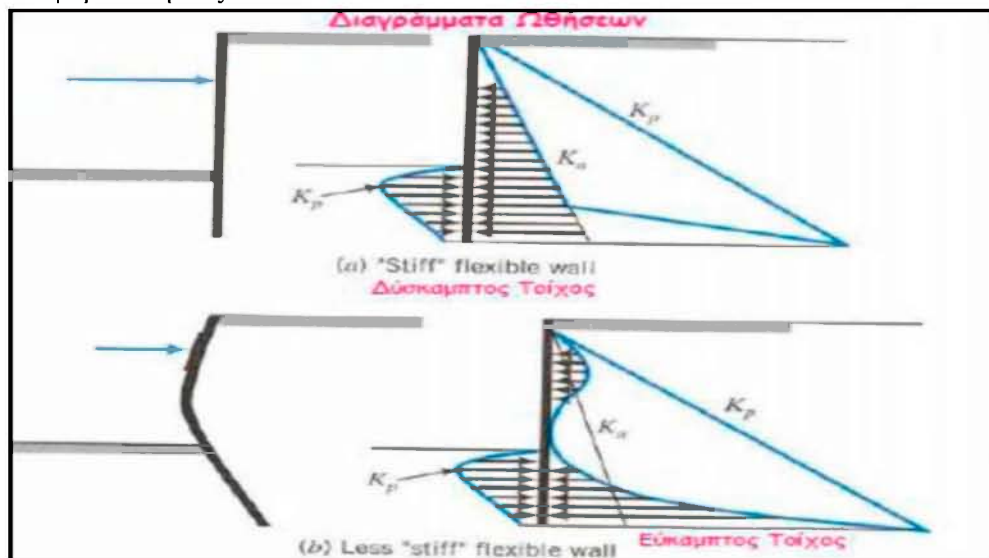
Οι ωθήσεις ανάντη, όπως και στα αυτοφερόμενα πετάσματα, είναι κατά προσέγγιση ενεργητικές. Οι ωθήσεις κατόντη, στη περίπτωση αυτή, μεταβάλλονται

ανάλογα με το στάδιο της φόρτισης. Στην αστοχία προσεγγίζει τις παθητικές ωθήσεις όπως περίπου σε ένα άκαμπτο πέτασμα που στρέφεται περί το σημείο αγκύρωσης, ενώ μακράν της αστοχίας προσεγγίζει τη κατανομή των αυτοφερόμενων πετασμάτων.



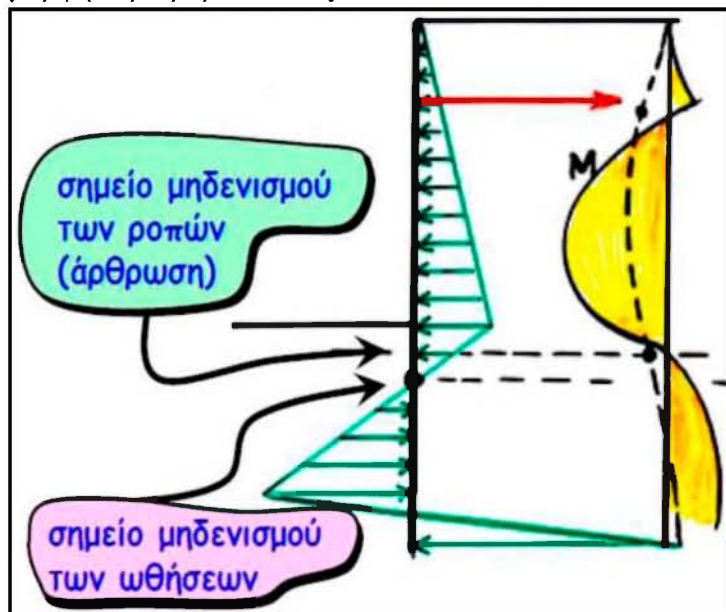
**Σχήμα 3.6** Κατανομή ωθήσεων για αντιστηρίξεις με απλή αγκύρωση, (Μπουκοβάλας, 2009)

Πιο συγκεκριμένα, επειδή η κατανομή των ωθήσεων εξαρτάται άμεσα από την ενδοσιμότητα του πετάσματος, διακρίνονται οι περιπτώσεις του δύσκαμπτου πετάσματος και του «εύκαμπτου» πετάσματος. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις.



**Σχήμα 3.7** Κατανομή των πλευρικών ωθήσεων για «δύσκαμπτο» και «εύκαμπτο» πέτασμα, (Κωμοδρόμος, 2008)

Στη περίπτωση του εύκαμπτου πετάσματος το διάγραμμα ροπών έχει την παρακάτω μορφή «τριαρθρωτού τόξου».



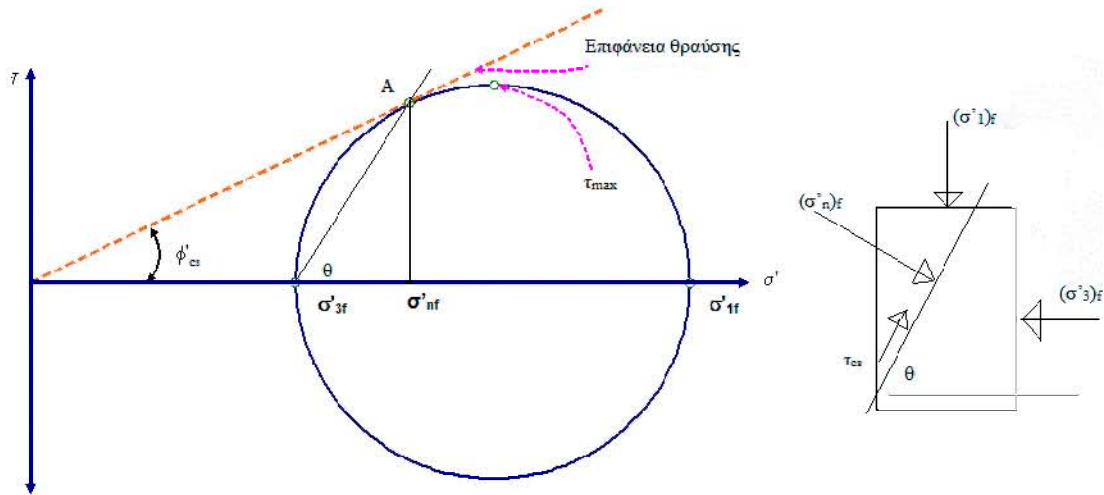
**Σχήμα 3.8** Μορφή διαγράμματος ροπών «εύκαμπτου» τοίχου, (Μπουκοβάλας, 2009)

Στις περιπτώσεις αντιστηρίξεων με πολλαπλές αγκυρώσεις, η κατανομή των ωθήσεων γίνεται πιο περίπλοκη, οπότε χρησιμοποιούνται είτε ημι-εμπειρικές μέθοδοι, είτε μέθοδοι ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών.



### 3.4 Κριτήριο Mohr - Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb βασίζεται στη θεωρία εσωτερικής τριβής (Coulomb 1773 ) και προτάθηκε από το Mohr το 1900. Σύμφωνα με αυτό η διατμητική αντοχή αυξάνει αυξανομένης της ορθής τάσης στο επίπεδο θραύσης, Σχήμα 3.9



**Σχήμα 3.9** Απεικόνιση του μοντέλου τριβής Mohr-Coulomb στο επίπεδο ορθής τάσης και διατμητικής αντοχής

Μαθηματικά εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi \quad (3.1)$$

από την οποία με τη βοήθεια του Σχήματος 3.9 προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} * \sin \varphi + c * \cos \varphi \quad (3.2)$$

Όπου :

$\sigma_1$  : η μέγιστη κύρια τάση

$\sigma_3$  : η ελάχιστη κύρια τάση

Η εξίσωση 3.2 μπορεί να μετασχηματισθεί ως ακολούθως :

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} * \sin \varphi + c * \cos \varphi \quad (3.3)$$

η οποία εκφρασμένη συναρτήσει των αναλλοίωτων παίρνει τη μορφή :

$$f(I_1, I_2, \theta) = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{2} \sin \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{I_2}}{\sqrt{3}} \cos \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \quad (3.4)$$

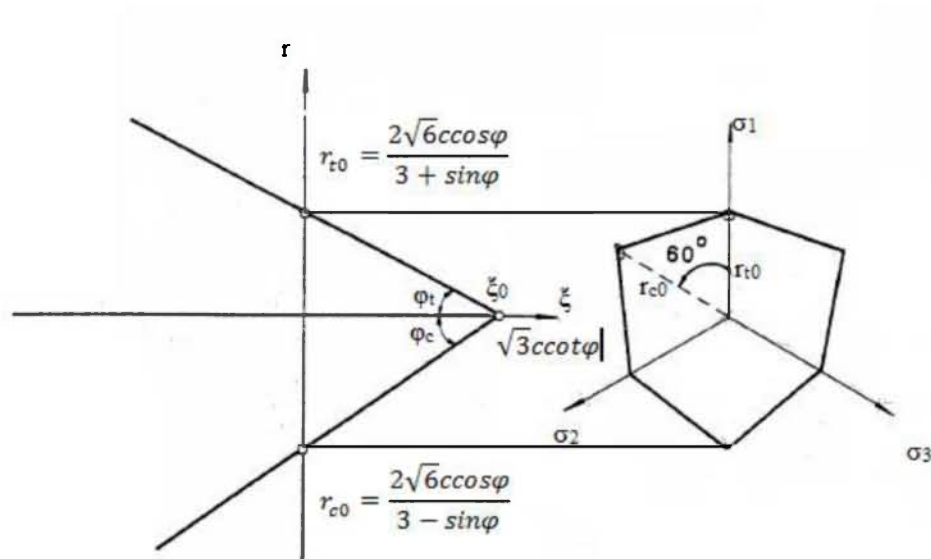


ή εναλλακτικά :

$$f(\xi, r, \theta) = \sqrt{2} \xi \sin\varphi + \sqrt{3} r \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + r \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \sin\varphi - \sqrt{6} c \cos\varphi = 0 \quad (3.5)$$

με  $0 \leq \theta \leq 60^\circ$

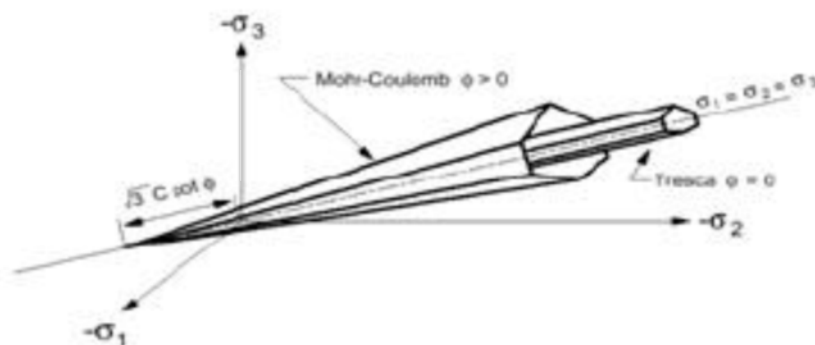
Η εξίσωση 3.5 απεικονίζεται στο μεσημβρινό και εκτροπικό επίπεδο στο Σχήμα 3.10.



**Σχήμα 3.10** Τομή της επιφάνειας Mohr- Coulomb στο μεσημβρινό και Π επίπεδο

Η τιμή  $r_{c0}$  αντιστοιχεί σε τριαξονική θλίψη (triaxial compression) ενώ η  $r_{t0}$  σε τριαξονικό εφελκυσμό (triaxial extension). Η μορφή της επιφάνειας Mohr- Coulomb στο χώρο αποτελεί μη κανονική εξαγωνική πυραμίδα, ανοικτή προς το σφαιρικό άξονα και με κορυφή στο σημείο  $\sqrt{3} c \cot\varphi$ . Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η απεικόνιση της σε σχέση με αυτήν της επιφάνειας Tresca. Από τη μορφή της είναι φανερό το μαθηματικό πρόβλημα (όπως και στην περίπτωση της επιφάνειας Tresca) μη μονοσήμαντου προσδιορισμού της διαφορικής παραγώγου στις γωνίες της πυραμίδας, γεγονός που καθιστά προβληματική την ενσωμάτωσή της σε προγράμματα αριθμητικής ανάλυσης τριών διαστάσεων. Ένα δεύτερο μειονέκτημα της Εξίσωσης 3.3 είναι η παράλειψη της επίδρασης της κύριας ενδιάμεσης τάσης  $\sigma_2$ .

Σημαντικό πλεονέκτημα του κριτηρίου Mohr- Coulomb αποτελεί η αποδεδειγμένη ισχύς του για πολλές κατηγορίες εδαφών (κατά κύριο λόγο ψαθυρών).



Σχήμα 3.11 Τομή της επιφάνειας Mohr- Coulomb στο μεσημβρινό και Π επίπεδο

### 3.5 Κριτήριο Double-Yield

Το μοντέλο double-yield είναι ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο, θετικά και μη γραμμικά κρατυνόμενου τύπου με διπλό μηχανισμό πλαστικής παραμόρφωσης, που προτάθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατά βάση κοκκωδών υλικών. Η μη γραμμικότητα του υλικού επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός Mohr-Coulomb μοντέλου με μεταβαλλόμενη περιβάλλουσα ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση (strain-dependent Mohr-Coulomb). Ουσιαστικά αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του Mohr-Coulomb διαθέτοντας μεταβαλλόμενη περιβάλλουσα και μεταβαλλόμενο μέτρο παραμορφωσιμότητας ανάλογα με τις παραμορφώσεις.

Η ύπαρξη διπλού μηχανισμού πλαστικής παραμόρφωσης επελέγη για τους εξής λόγους:

- Η φυσική ερμηνεία του τρόπου και του βαθμού παραμόρφωσης των υλικών συναρτάται με πολλαπλούς μηχανισμούς. Για παράδειγμα η παραμόρφωση κοκκωδών υλικών μπορεί να οφείλεται είτε στη συμπίεση των κόκκων, είτε στην ολίσθηση ή κύλιση των κόκκων, είτε στη θραύση των κόκκων λόγω συμπίεσης ή ολίσθησης.
- Τα μοντέλα διπλού μηχανισμού παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων κρίνοντας κύρια από την καλύτερη εφαρμογή τους σε διαφορετικούς τύπους καταπόνησης.
- Η αποδοχή πολλαπλών μηχανισμών οδηγεί σε αναζήτηση απλούστερων συναρτήσεων φορτίου και πλαστικού δυναμικού από ότι η αποδοχή ενός μόνο μηχανισμού, ο οποίος υποθετικά θα προσομοίωνε εξίσου το πρόβλημα.

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει η αποδοχή δυο μηχανισμών πλαστικής παραμόρφωσης, ο μηχανισμός συμπίεσης και ο μηχανισμός ολίσθησης.

Οι συνολικές παραμορφώσεις δίνονται από τη σχέση 3.5

$$de = de^e + de^{pv} + de^{ps} \quad (3.5)$$

όπου  $de^e$  οι ελαστικές παραμορφώσεις,  $de^{pv}$  οι πλαστικές παραμορφώσεις «συμπίεσης» και  $de^{ps}$  οι πλαστικές παραμορφώσεις «ολίσθησης».

Οι πλαστικές παραμορφώσεις συμπίεσης λαμβάνουν χώρα κυρίως όταν η ανισοτροπία της επιβαλλόμενης εντατικής κατάστασης έχει χαμηλή τιμή και οδηγούν πάντα σε μείωση του όγκου της καταπονούμενης μάζας. Σε περιπτώσεις ισότροπης φόρτισης όλες οι παραμένουσες παραμορφώσεις ανήκουν σε αυτή την κατηγορία παραμορφώσεων.

Οι πλαστικές παραμορφώσεις ολίσθησης λαμβάνουν χώρα όταν η ανισοτροπία της εντατικής κατάστασης είναι ήδη μεγάλη και λόγω της καταπόνησης προσεγγίζεται το σημείο θραύσης του υλικού. Η προκαλούμενη αντίστοιχη μεταβολή του όγκου είναι διαστολή ή συστολή ανάλογα του μεγέθους της μέσης τάσης και του βαθμού ανισοτροπίας της φόρτισης.

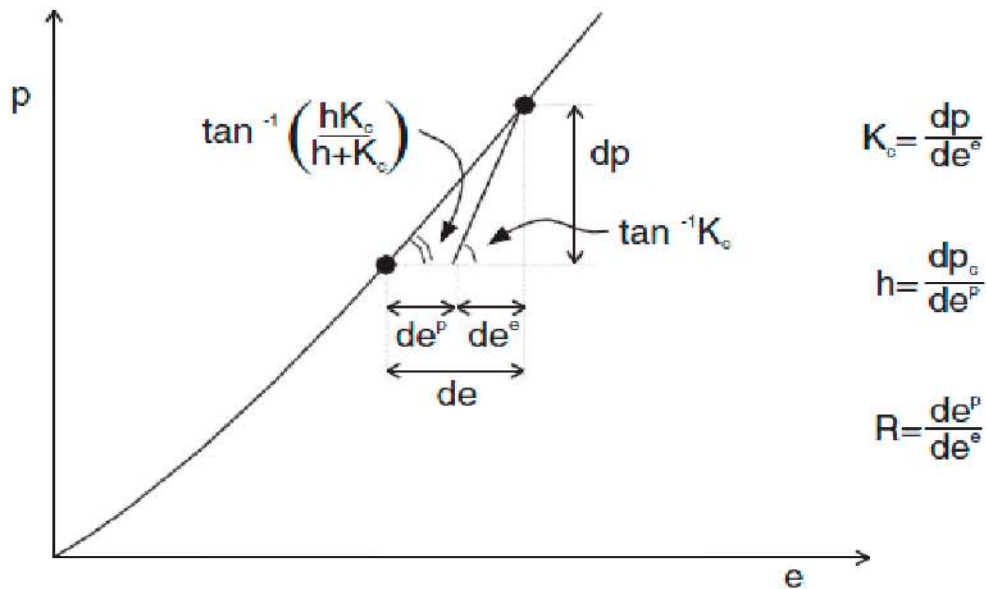
Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου Double-Yield προσομοίωσης της συμπεριφοράς του υλικού, απαιτείται ο προσδιορισμός των αριθμητικών τιμών των διαφόρων σταθερών που περιγράφουν το μοντέλο υπολογιστικά. Απαιτείται ο προσδιορισμός δύο παραμέτρων και ενός πίνακα:

- Η αρχική τιμή του  $p_c$ , η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη μέση πίεση που το υλικό εμφάνισε στο παρελθόν
- Η τιμή της παραμέτρου  $R$ , μεγαλύτερη της μονάδας, η οποία ελέγχει την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης
- Τον πίνακα που συνδέει το  $p_c$  με το  $e^{pu}$

Ο προσδιορισμός των αριθμητικών τιμών των σταθερών γίνεται με διαδοχικές εκτιμήσεις - προσεγγίσεις αυτών, για κάθε μηχανισμό παραμόρφωσης του μοντέλου χωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συσχέτιση τιμών παραμορφώσεων (των υπολογισμένων με βάση το μοντέλο και των πειραματικά μετρημένων) και των αντίστοιχων τάσεων, όπου λαμβάνει χώρα βασικά ένας από τους δύο μηχανισμούς παραμόρφωσης ως ακολούθως:

- Μόνο πλαστικές παραμορφώσεις «συμπίεσης» έχουμε στη φάση ισότροπης φόρτισης, σε τριαξονικές δοκιμές.
- Μόνο πλαστικές παραμορφώσεις «ολίσθησης» έχουμε σε υψηλές τάσεις πριν την αστοχία του υλικού σε ανεμπόδιστη ή τριαξονική θλίψη.

Το σχήμα 3.12 περιγράφει τον τρόπο λήψης της παραμέτρου  $R$  του μηχανισμού "συμπίεσης" μέσα από την καμπύλη δοκιμής ισότροπης συμπίεσης:



**Σχήμα 3.12** Προσδιορισμός του  $R$  μέσω της κλίσης της καμπύλης φόρτισης,  $dp/de$  και της κλίσης  $K_c = dp/de^e$  του κλάδου αποφόρτισης.

### 3.6 Καθορισμός προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο παράδειγμα βαθιάς, πολυσταδιακής εκσκαφής και κατασκευής διαφραγματικού τοίχου με τέσσερις σειρές αντηρίδων και στη συγκριτική ανάλυση της απόκρισης της αντιστήριξης με διαφορετικούς καταστατικούς νόμους.

Αποτελεί κοινή παραδοχή ότι κατά την υλοποίηση της κατασκευής υπογείων και την εφαρμογή των όποιων έργων αντιστήριξης σε αστικό περιβάλλον με άμεσα γειτνιάζουσες οικοδομές είναι δυνατόν να παρατηρηθεί διατάραξη των συνθηκών θεμελίωσης των γειτνιάζουσών κατασκευών. Οι επιπτώσεις είναι εντονότερες στην περίπτωση χαλαρών κατασκευών με χαμηλή διατμητική αντοχή, όπου είναι δυνατόν να προκληθεί εκτόνωση τάσεων κάτω από τις γειτνιάζουσες οικοδομές με αποτέλεσμα την πρόκληση διαφορικών καθιζήσεων.

Η επίλυση του προβλήματος έγινε με το πρόγραμμα FLAC ver 5.0. Οι εδαφικές στρώσεις προσομοιώθηκαν με μη συζευγμένο καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb, το δε προσομοίωμα περιλαμβάνει 6960 στοιχεία δύο διαστάσεων για την προσομοίωση του εδάφους και 125 στοιχεία δοκού για την προσομοίωση της παρακείμενης οικοδομής (115 στοιχεία) και των κατακόρυφων χαλύβδινων σωλήνων (10 στοιχεία). Η ανάλυση έγινε με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ στην πραγματικότητα η τρισδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος αποτελεί ευμενέστερη περίπτωση από την υιοθετούμενη για τις γωνιακές περιοχές.

Η αριθμητική ανάλυση περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια και αντιστοιχεί κατά το δυνατόν στις φάσεις κατασκευής. Απαιτούνται εκσκαφές βάθους της τάξης των 12.0m με διαστάσεις 20.00 x 25.00 m. Για την κατασκευή των υπογείων προβλέπεται

η κατασκευή διαφραγματικών τοίχων οπλισμένου σκυροδέματος και η εκσκαφή κατά φάσεις με αντίστοιχες κατά φάσεις αντιστηρίξεις.

### Καθορισμός παραμέτρων των εδαφικών και δομικών στοιχείων

Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδάφους δίνονται στον Πίνακα 3.1

<b>Βάθος (m)</b>	0.0 – 7.0	7.0 – 10.0	10.0 – 13.0	13.0 – 17.0	17.0 – 22.0
<b>Φαιν.Βάρος <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	19.4	16.5	15.8	21.1	21.5
<b>Μ. Διόγκωσης <math>b</math> (MPa)</b>	7.4	5.0	2.5	5.0	8.3
<b>Μ. Διάτμησης <math>s</math> (MPa)</b>	3.4	2.3	1.1	2.3	3.8
<b>Συνοχή <math>c</math> (kPa)</b>	3	1	2	5	10
<b>Γωνία τριβής <math>\phi</math> (°)</b>	30	30	20	32	28
<b>Γωνία διαστολής <math>\psi</math> (°)</b>	0	0	0	0	0

**Πίνακας 3.1** Παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδάφους

Ο διαφραγματικός τοίχος και οι αντηρίδες προσομοιώνονται ως στοιχεία δοκού, ακολουθούν γραμμική, ελαστική συμπεριφορά και χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω ιδιότητες.

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Τιμή</b>
Ροπή αδράνειας (m <sup>4</sup> )	0.018
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	27.5
Εμβαδό διατομής (m <sup>2</sup> )	0.6

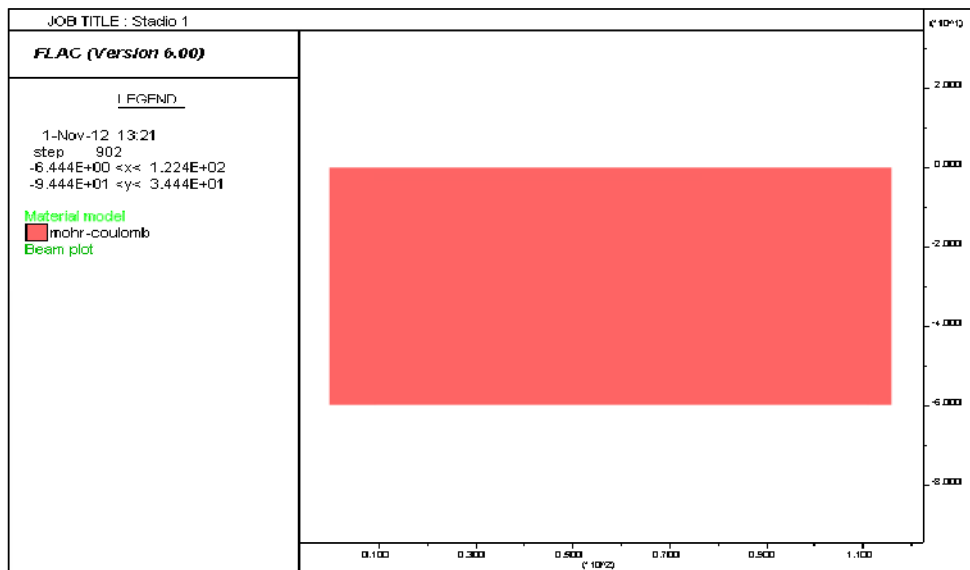
**Πίνακας 3.2** Ιδιότητες διαφραγματικού τοίχου

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Σειρά 1</b>	<b>Σειρά 2</b>	<b>Σειρά 3</b>	<b>Σειρά 4</b>
Βάθος τοποθέτησης (m)	1.8	4.3	6.5	9.5
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	210	210	210	210
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	7.85	7.85	7.85	7.85
Εμβαδό διατομής (m <sup>2</sup> )	2.969*10 <sup>-3</sup>	2.969*10 <sup>-3</sup>	2.969*10 <sup>-3</sup>	2.969*10 <sup>-3</sup>

**Πίνακας 3.3** Ιδιότητες αντηρίδων

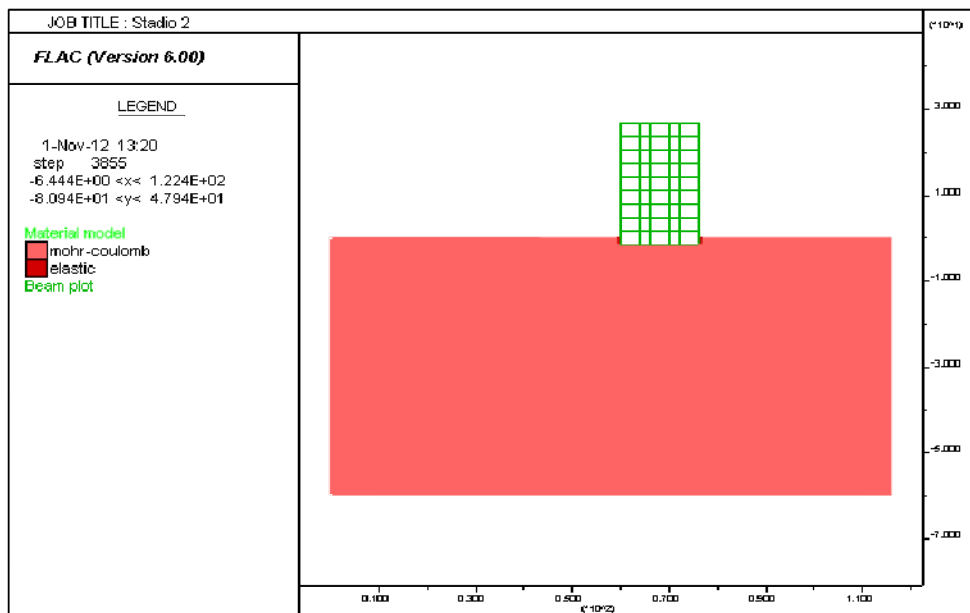
Η ανάλυση του προβλήματος συμπεριλαμβάνει τα παρακάτω διαδοχικά στάδια:

Στάδιο 1: Ορισμός κανάβου και εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου



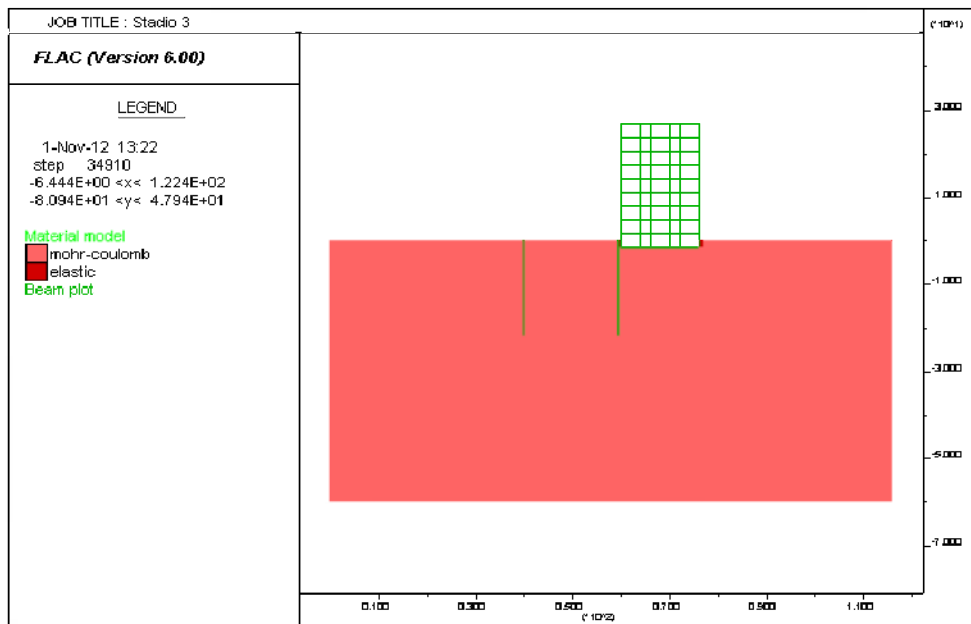
**Σχήμα 3.13** Κανάβος και εισαγωγή αρχικού εντατικού πεδίου

Στάδιο 2: Εισαγωγή της όμορης οικοδομής



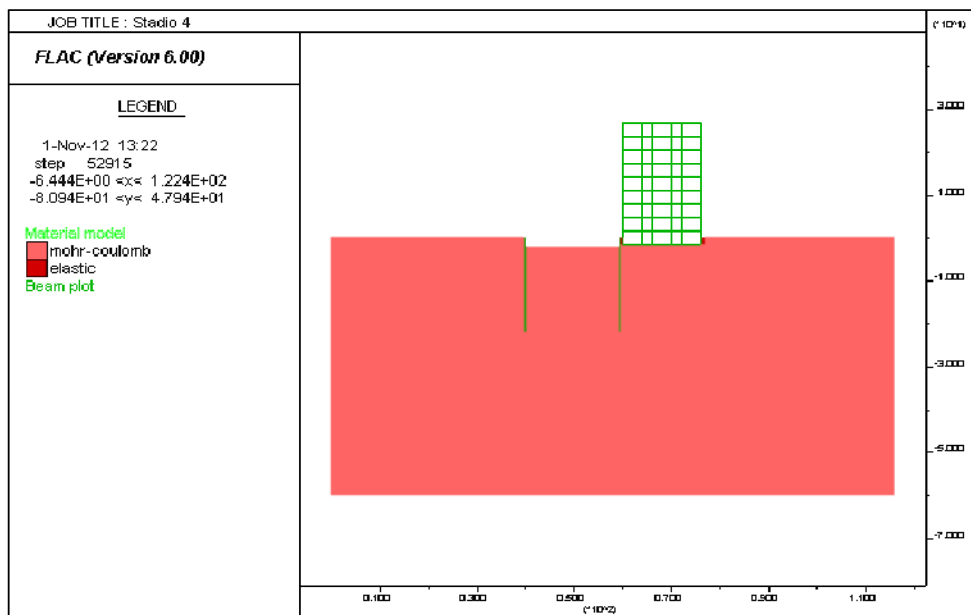
**Σχήμα 3.14** Εισαγωγή όμορης οικοδομής

Στάδιο 3: Εισαγωγή του διαφραγματικού τοίχου μήκους 22 m.



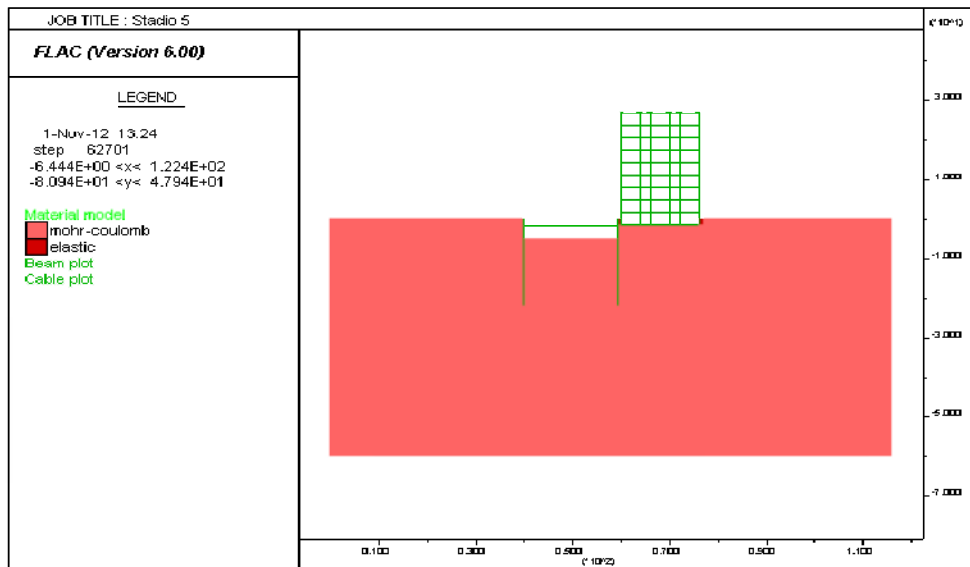
**Σχήμα 3.15** Εισαγωγή διαφραγματικού τοίχου

Στάδιο 4: Πραγματοποίηση του 1<sup>ου</sup> σταδίου εκσκαφής μέχρι το βάθος των 2m



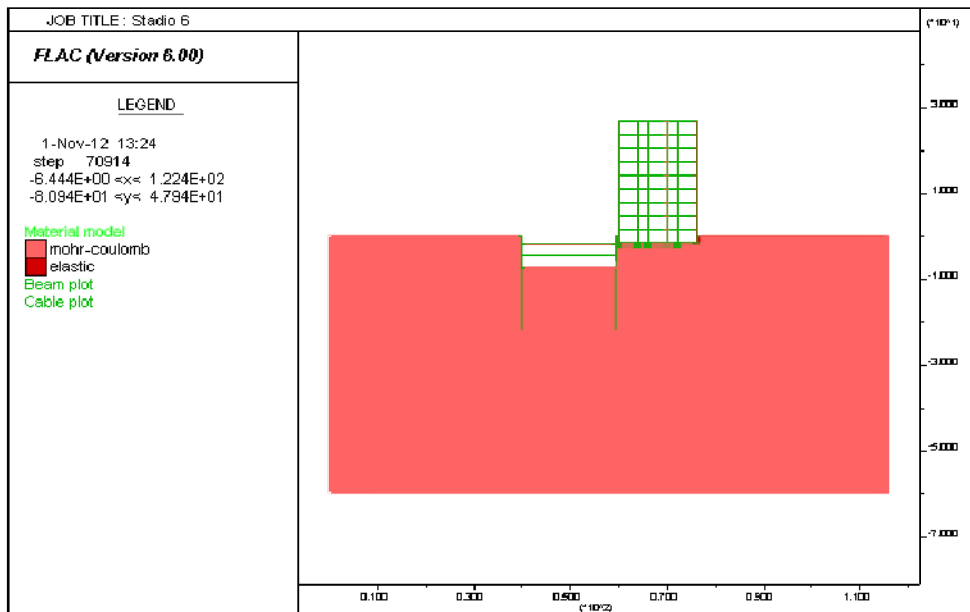
**Σχήμα 3.16** 1<sup>ο</sup> Στάδιο εκσκαφής

Στάδιο 5: Τοποθέτηση πρώτης αντηρίδας σε βάθος 1.8m και εκσκαφή μέχρι βάθος 5m.



Σχήμα 3.17 2<sup>ο</sup> Στάδιο εκσκαφής

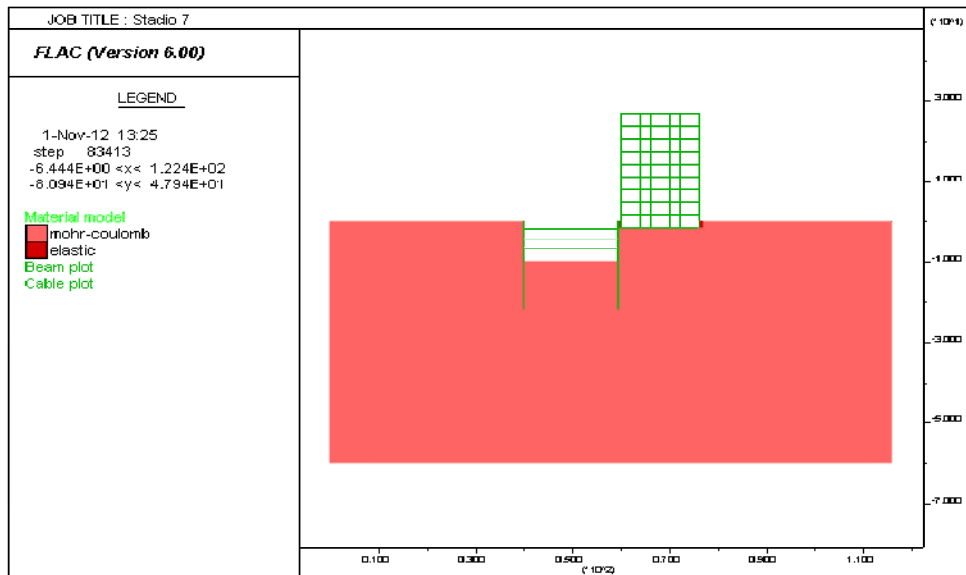
Στάδιο 6: Τοποθέτηση δεύτερης αντηρίδας σε βάθος 4.3m και εκσκαφή μέχρι βάθος 7m.



Σχήμα 3.18 3<sup>ο</sup> Στάδιο εκσκαφής

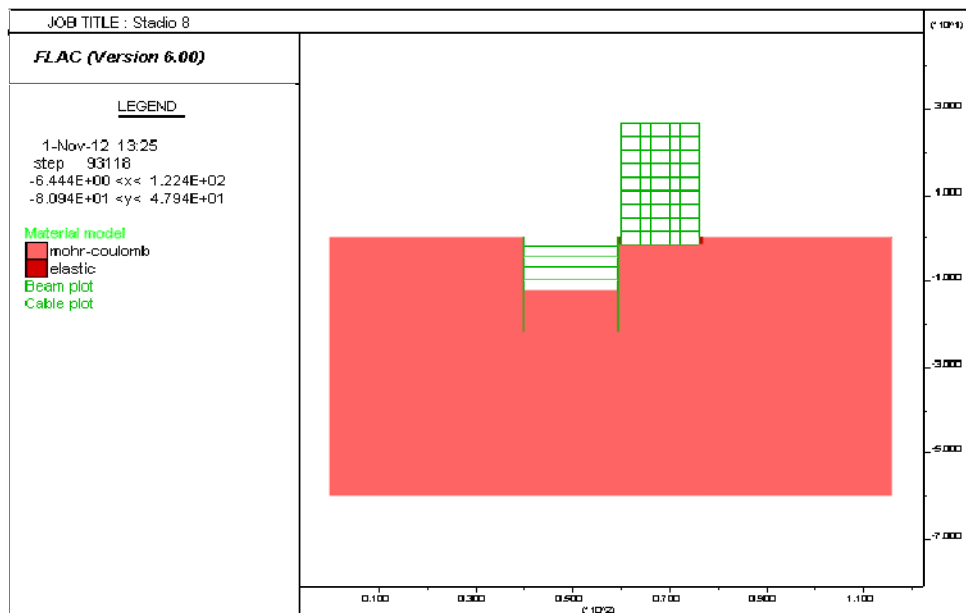


Στάδιο 7: Τοποθέτηση τρίτης αντηρίδας σε βάθος 6.5m και εκσκαφή μέχρι βάθος 10m.



**Σχήμα 3.19** 4<sup>ο</sup> Στάδιο εκσκαφής

Στάδιο 8: Τοποθέτηση τέταρτης αντηρίδας σε βάθος 9.5m και εκσκαφή μέχρι το τελικό επίπεδο των 12m.



**Σχήμα 3.20** Τελικό στάδιο εκσκαφής

# 4

## Στοιχεία των παραμετρικών αναλύσεων

### 4.1 Γενικά - Εισαγωγικά

Η συμπεριφορά ενός συστήματος αντιστήριξης εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων. Στο παρόν κεφάλαιο διερευνώνται οι επιπτώσεις στα εντατικά και κινηματικά μεγέθη του συστήματος αντιστήριξης και της πολυσταδιακής εκσκαφής όταν μεταβληθεί ο καταστατικός νόμος που το διέπει αλλά και ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ . Συγκεκριμένα έγιναν επιλύσεις με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb και Double-Yield για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  (0.5 , 0.75 , 1.00). Μελετήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- Καμπτική ροπή κατά μήκος του διαφραγματικού τοίχου
- Οριζόντια μετακίνηση διαφραγματικού τοίχου
- Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες
- Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής
- Μετακίνηση της κορυφής της όμορης με τον διαφραγματικό τοίχο οικοδομής
- Κατακόρυφη μετακίνηση της βάσης της όμορης οικοδομής

Αρχικά έγιναν επιλύσεις για κάθε καταστατικό νόμο ξεχωριστά και σύγκριση των αποτελεσμάτων με μεταβολή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  (0.5, 0.75, 1.00) και στη συνέχεια έγινε σύγκριση για να δούμε το πώς επηρεάζονται οι τιμές όταν αλλάζουμε τον καταστατικό νόμο.

## 4.2 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων

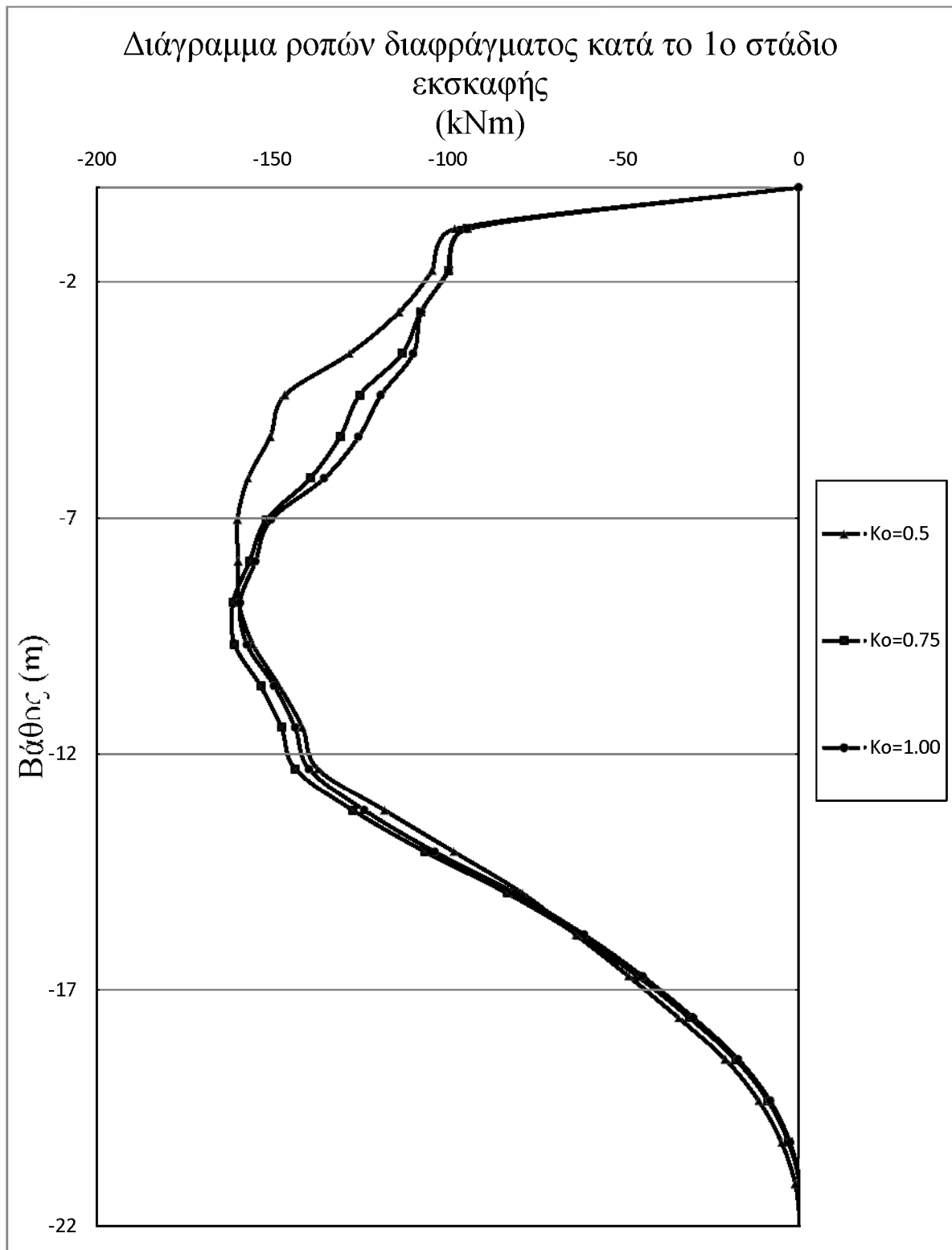
### 4.2.1 Επιλύσεις με καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αναλύσεις με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb με τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  (0.5, 0.75, 1.00)

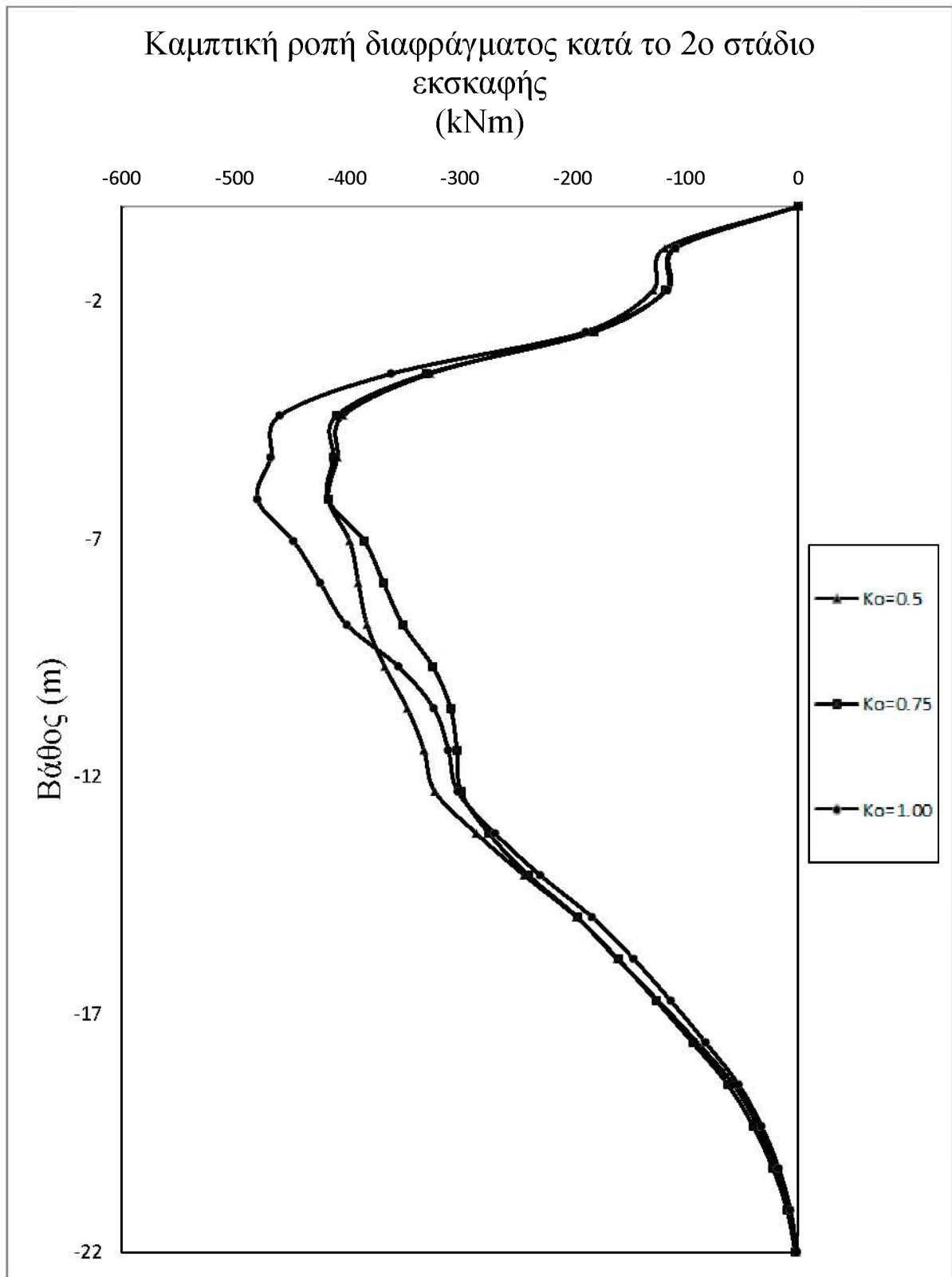
Από τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων προκύπτει ότι:

➤ Μεταβολή της καμπτικής ροπής του διαφραγματικού τοίχου

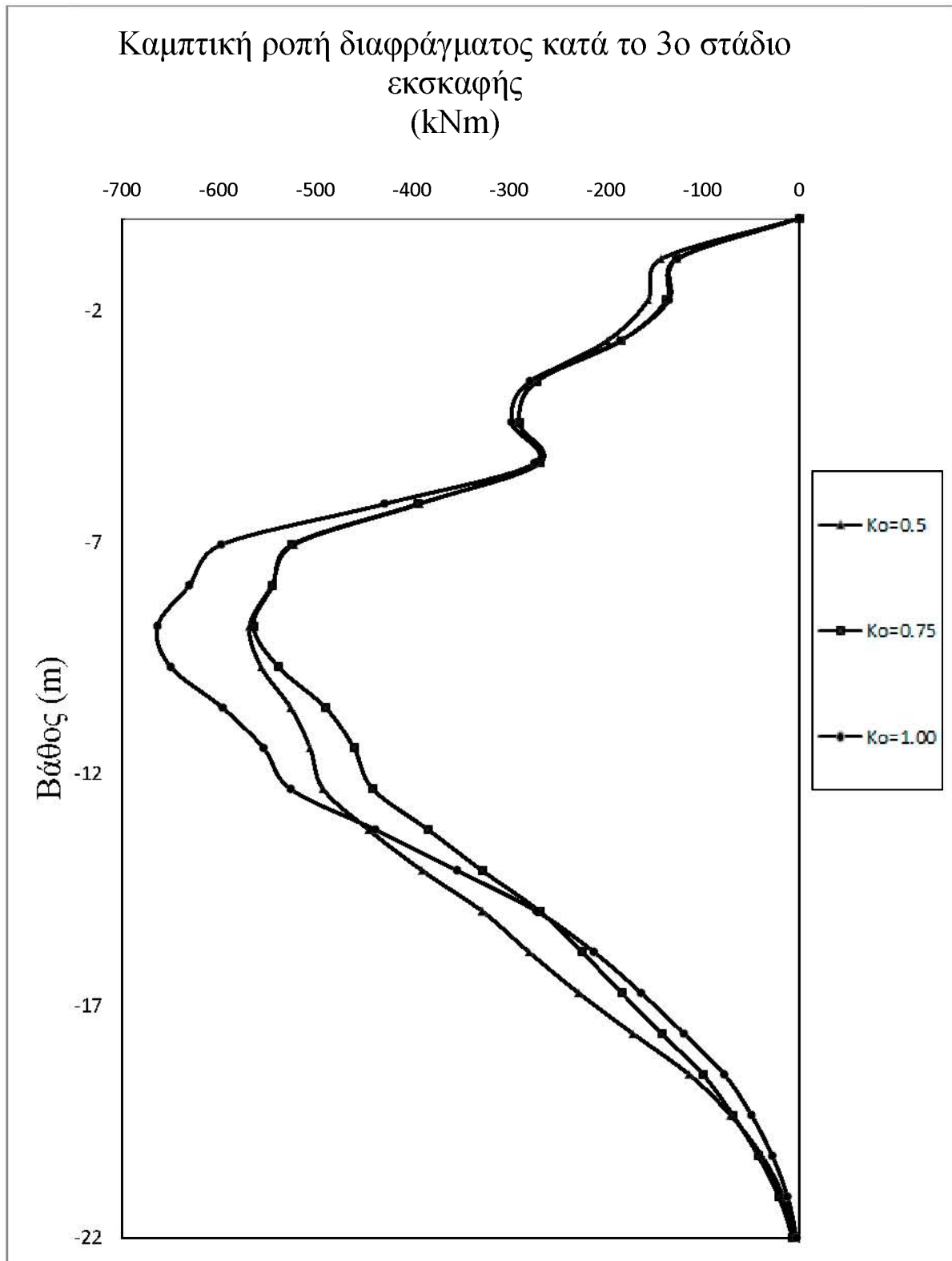
Η μεγαλύτερη ροπή που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση για  $K_0=1.00$  με τιμή 1216 kNm ακολουθεί η επίλυση με  $K_0=0.5$  με τιμή 1139 kNm και τη μικρότερη καμπτική ροπή εμφανίζει η επίλυση  $K_0=0.75$  με τιμή 1032 kNm. Παρατηρούμε πως αρχικά αυξάνοντας το  $K_0$  έχουμε πτώση της καμπτικής ροπής αλλά στη συνέχεια περαιτέρω αύξηση του  $K_0$  έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της μέγιστης τιμής της ροπής. Η μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής εμφανίζεται και στις τρεις περιπτώσεις σε βάθος 14.2m. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται και στα 4 πρώτα στάδια της εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές ροπής να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο. (Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5)



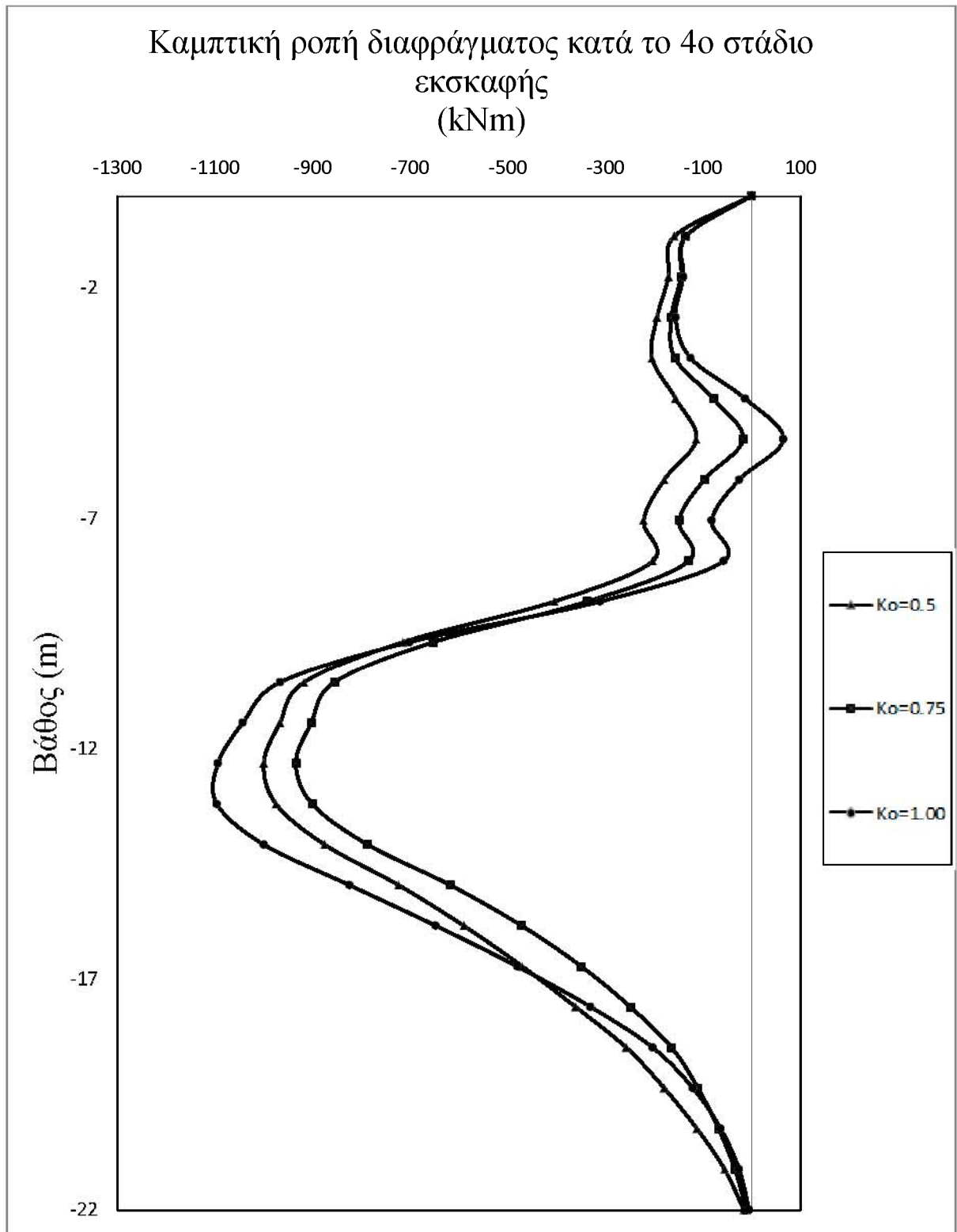
**Σχήμα 4.1** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



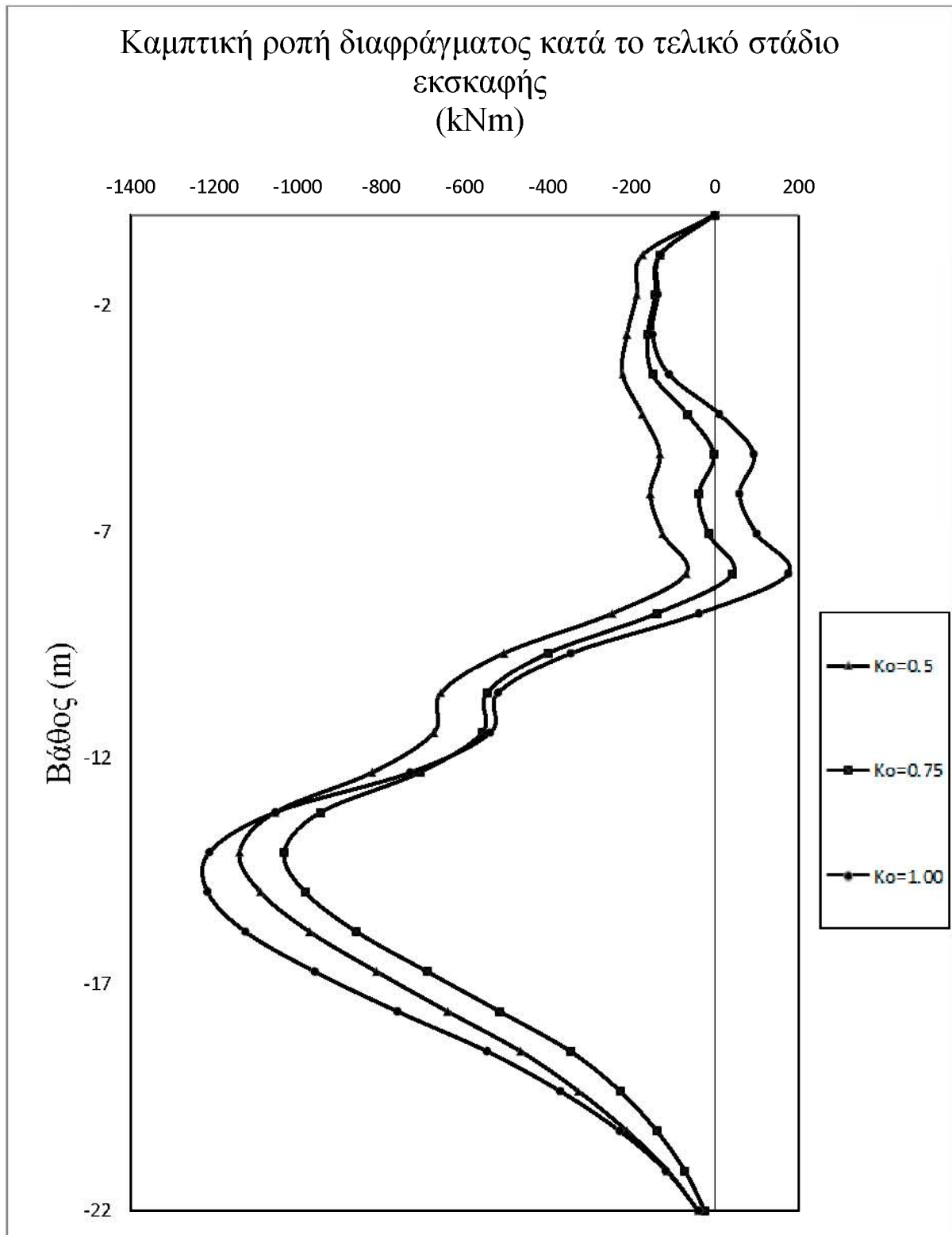
**Σχήμα 4.2** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_a$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.3** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_c$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.4** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής

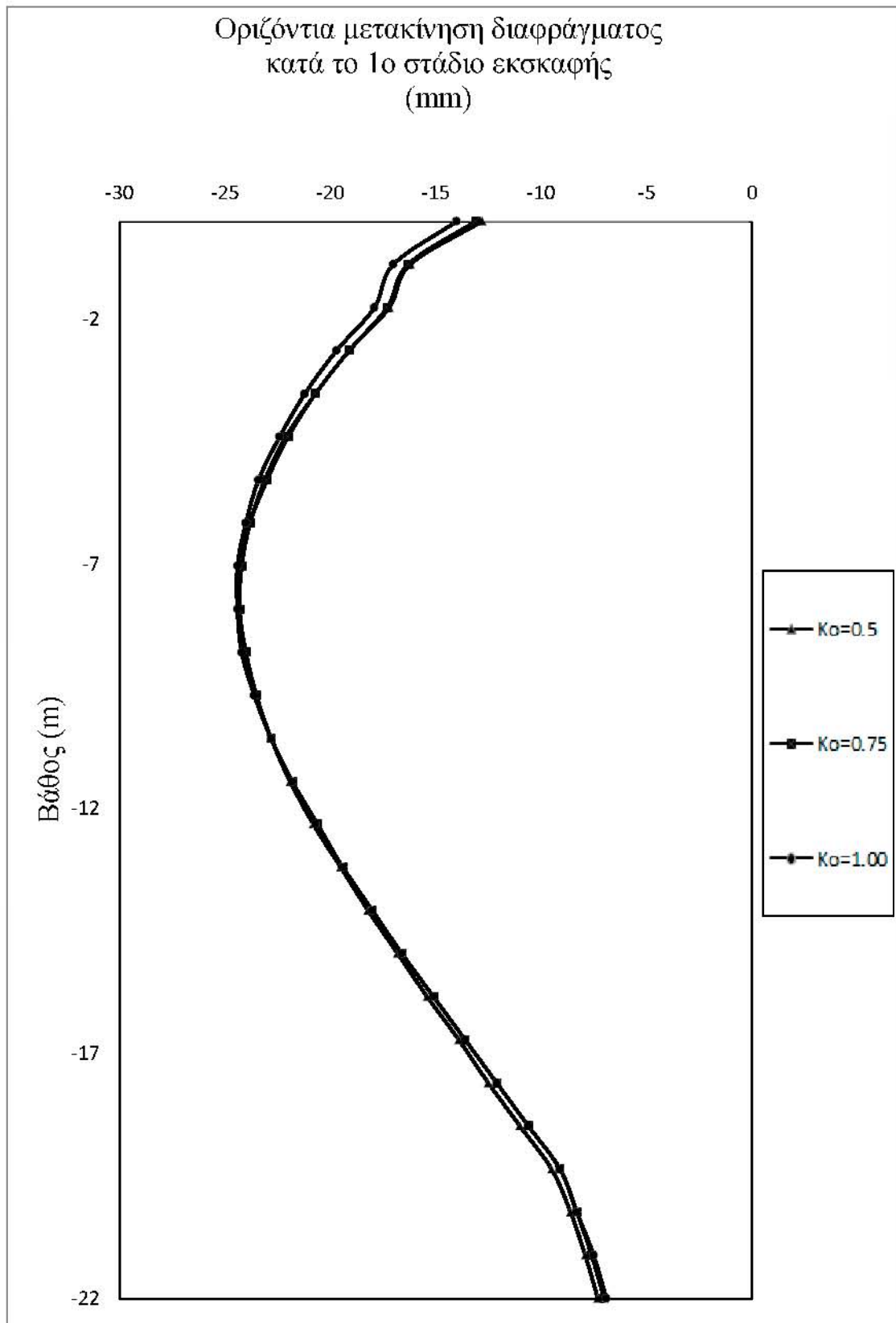


**Σχήμα 4.5** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

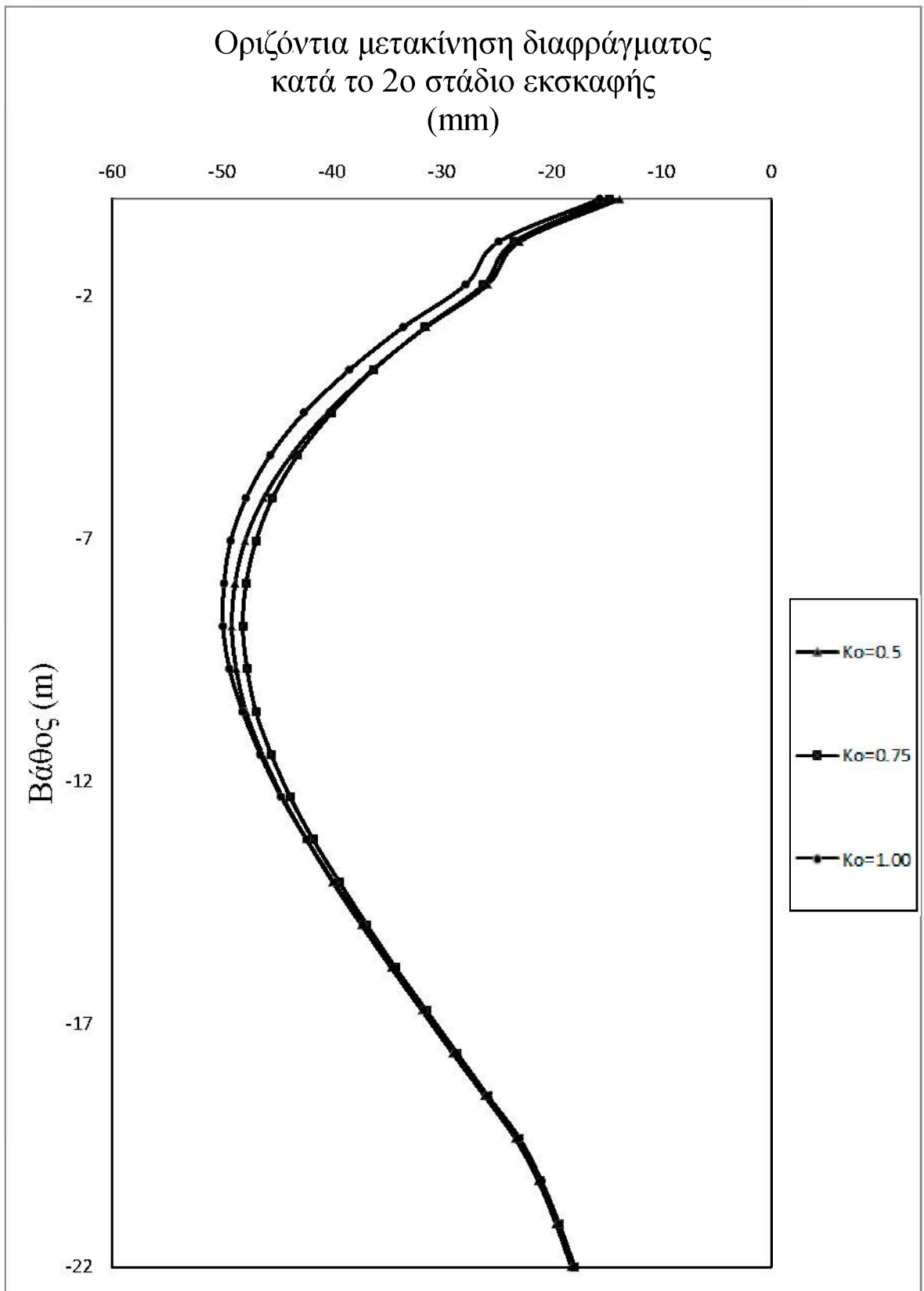


➤ Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του διαφραγματικού τοίχου

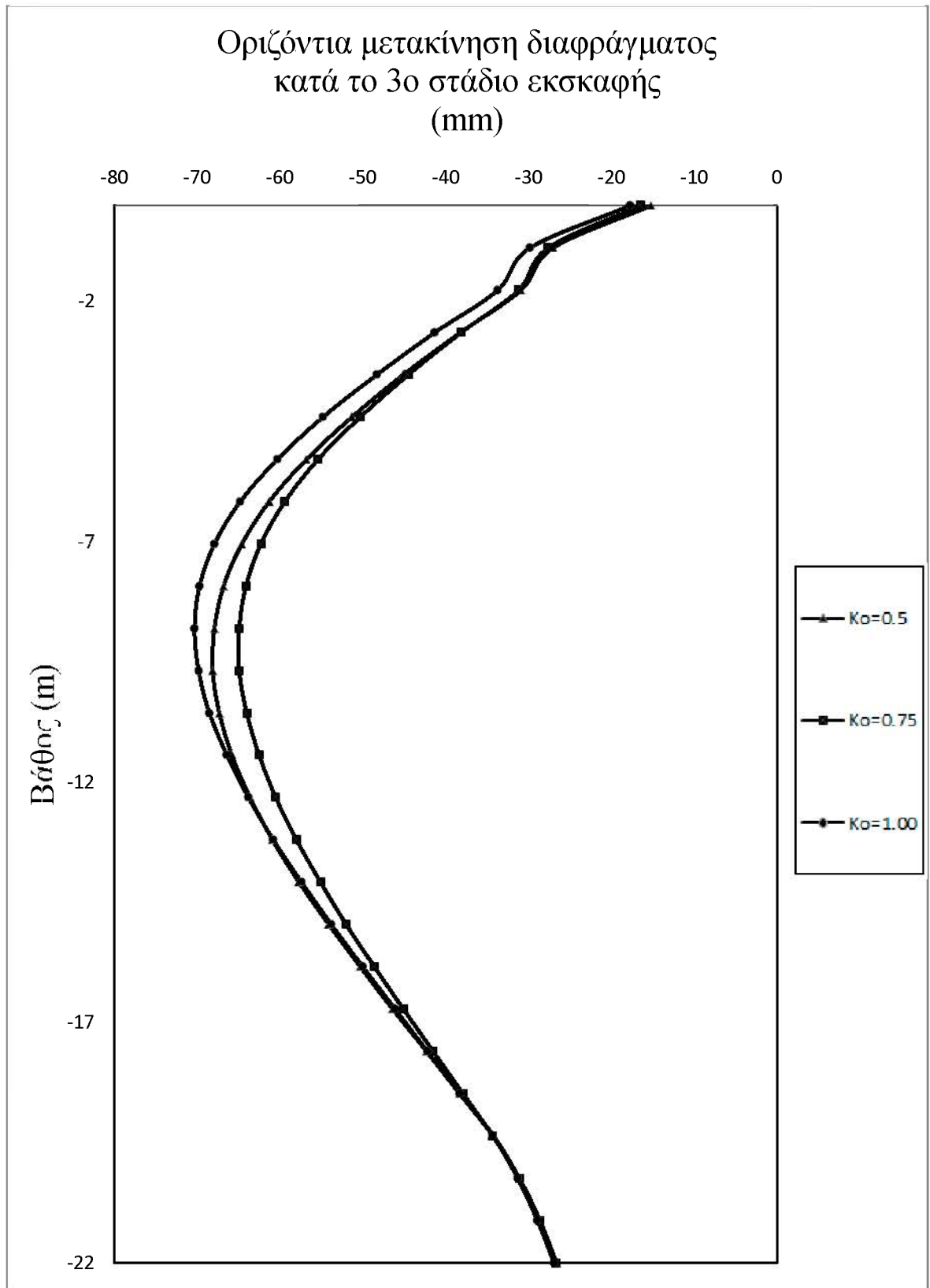
Η μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση για  $K_0=1.00$  με τιμή 131.1 mm ακολουθεί η επίλυση με  $K_0=0.5$  με τιμή 126 mm και τη μικρότερη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζει η επίλυση  $K_0=0.75$  με τιμή 112.7 mm. Όπως και με την καμπτική ροπή έτσι και εδώ παρατηρούμε πως αρχικά αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  έχουμε πτώση της οριζόντιας μετακίνησης αλλά στη συνέχεια περαιτέρω αύξηση του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της μέγιστης τιμής της. Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετακίνησης εμφανίζεται και στις τρεις περιπτώσεις σε βάθος 12 m με τη μετακίνηση να μειώνεται μέχρι τη στέψη. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται και στα 4 πρώτα στάδια της εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο. Τέλος παρατηρούμε ότι η οριζόντια μετακίνηση συνδέεται άμεσα με τη καμπτική ροπή αφού παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. (Σχήματα 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10)



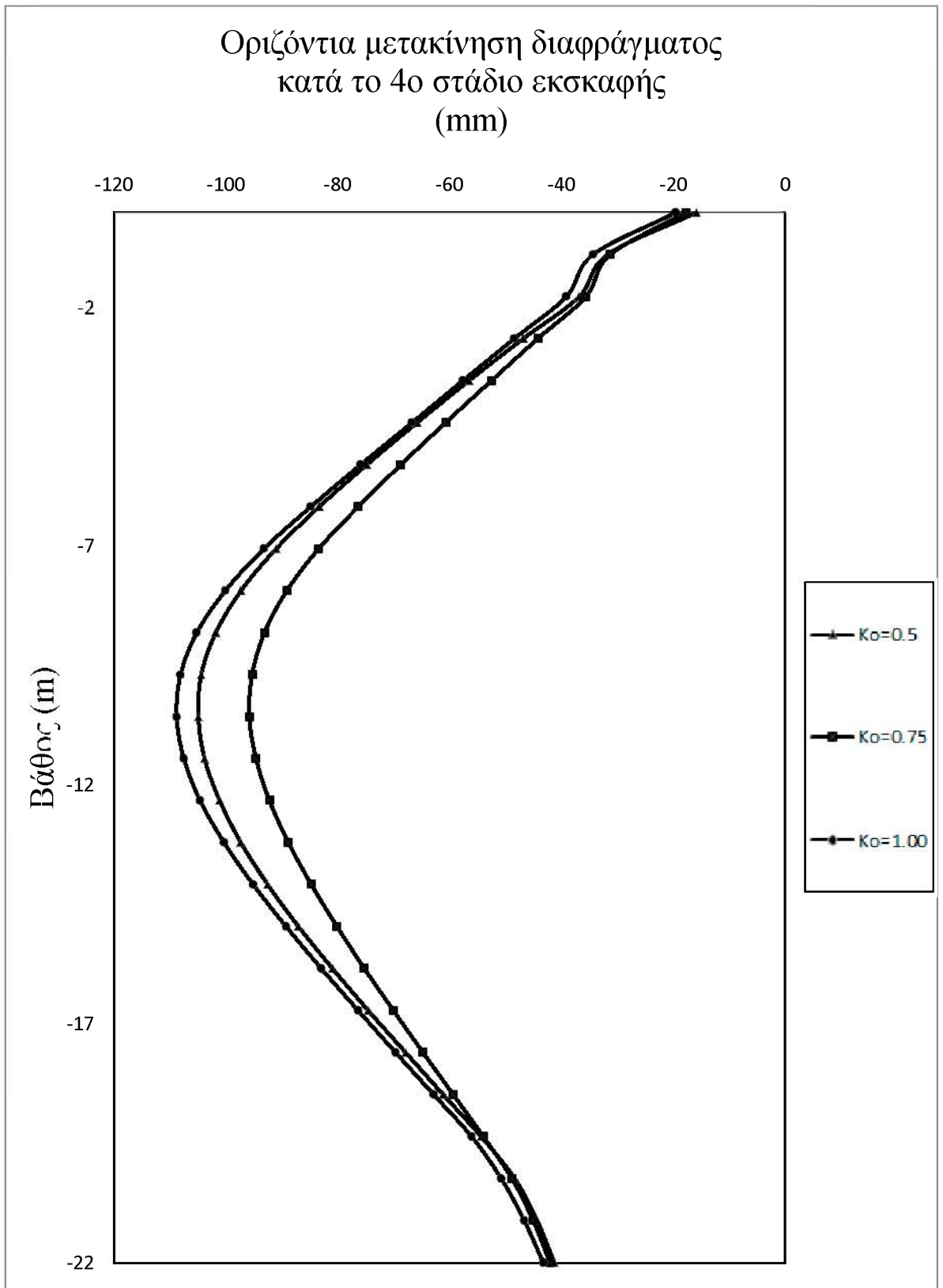
**Σχήμα 4.6** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



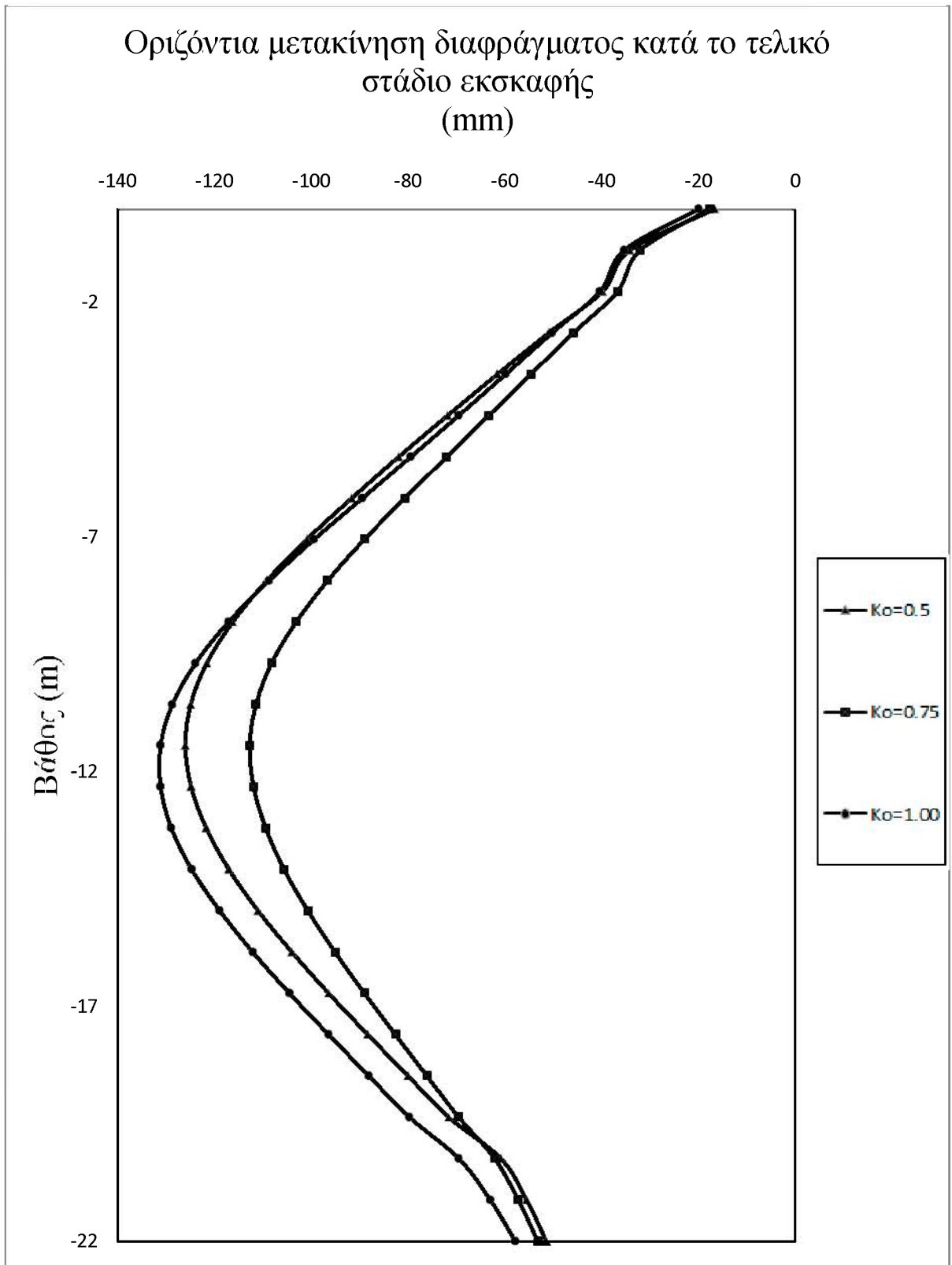
**Σχήμα 4.7** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.8** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



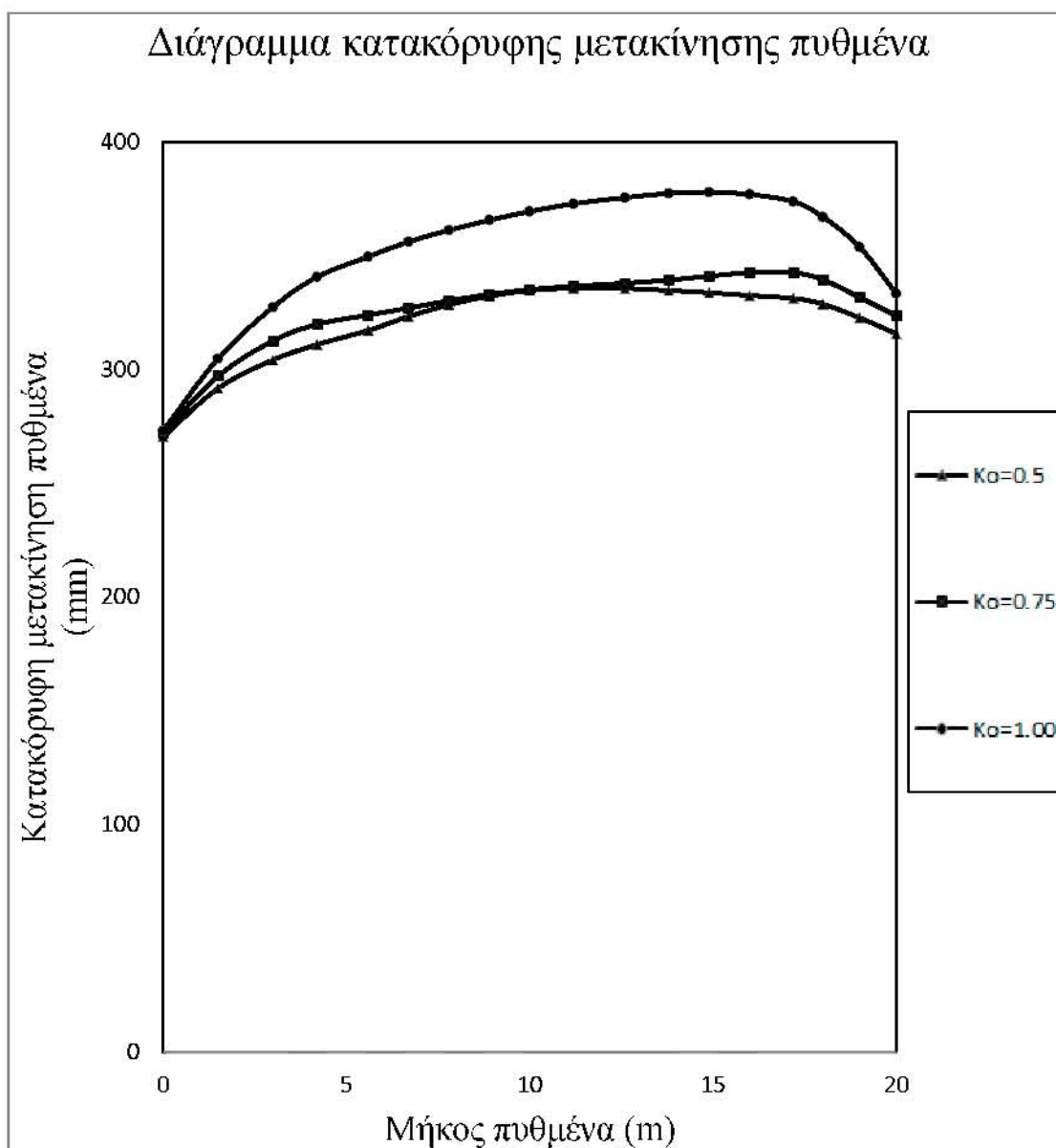
**Σχήμα 4.5** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.10** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

➤ Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής

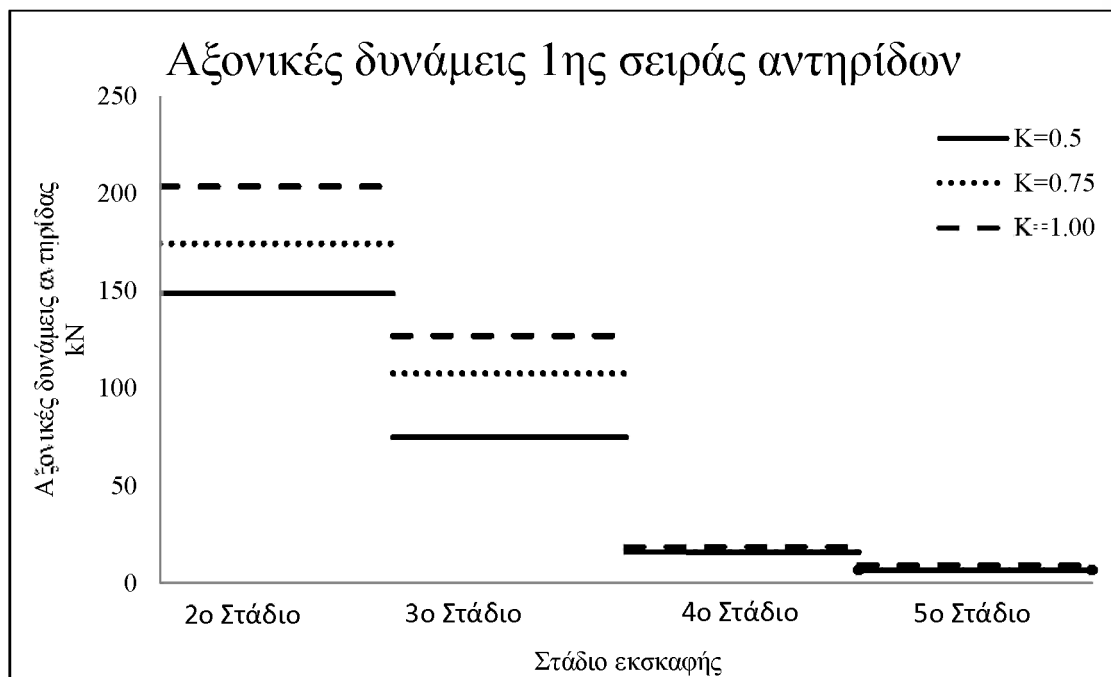
Η μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση για  $K_0=1.00$  με τιμή 378 mm, ακολουθεί η επίλυση  $K_0=0.75$  με τιμή 342.6 mm και τη μικρότερη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζει η επίλυση  $K_0=0.5$  με τιμή 335.8 mm. Παρατηρούμε πως αυξάνοντας το  $K_0$  έχουμε αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα. Είναι φανερό από τα διαγράμματα ότι παρουσιάζεται αύξηση της τιμής της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα όσο πλησιάζουμε την δεξιά πλευρά της εκσκαφής πράγμα λογικό αφού στην επιφάνεια υπάρχει οικοδομή με αποτέλεσμα οι ωθήσεις να είναι μεγαλύτερες από ότι στην αριστερή πλευρά. (Σχήμα 4.11)



**Σχήμα 4.11** Κατακόρυφες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

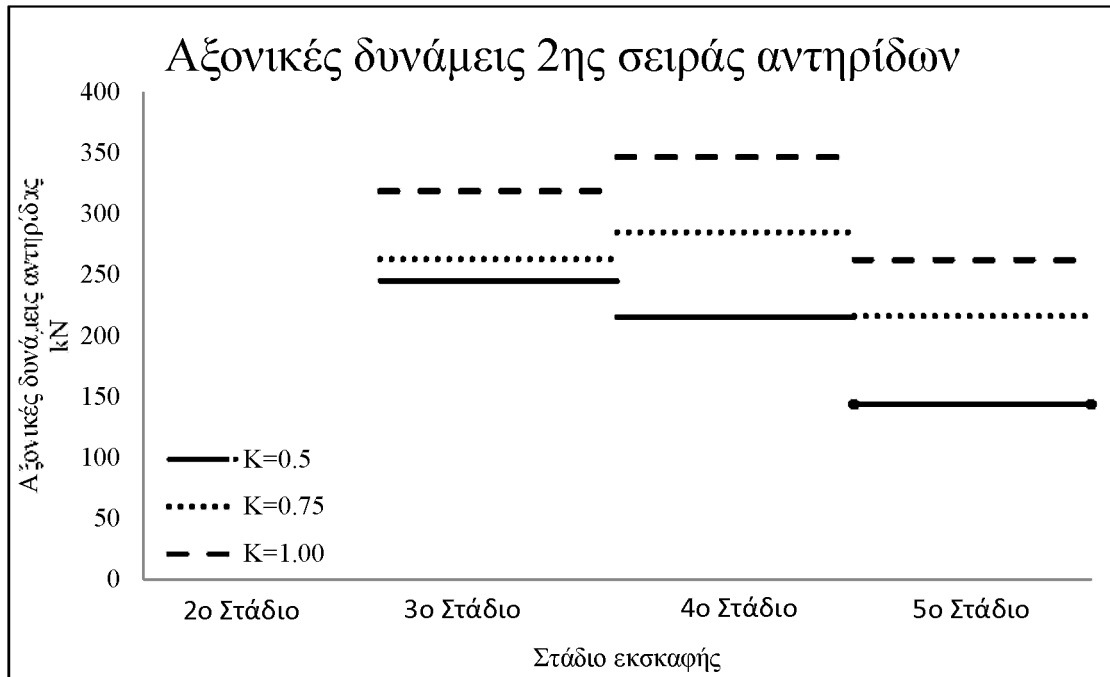
➤ Μεταβολή της αξονικής δύναμης των αντηρίδων

Η μεγαλύτερη αξονική δύναμη που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση  $K_0=1.00$  με τιμές 210 kN για την πρώτη σειρά αντηρίδων, 350 kN για τη δεύτερη σειρά αντηρίδων, 580.3 kN για την τρίτη σειρά αντηρίδων και 445.6 kN για την τέταρτη σειρά αντηρίδων. Παρατηρούμε πως αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  αυξάνεται η αξονική δύναμη σε όλες τις σειρές των αντηρίδων. Τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη από τις τέσσερις σειρές εμφανίζει η 3<sup>η</sup> σειρά αντηρίδων που είναι τοποθετημένη σε βάθος 6.5 m. (Σχήματα 4.12, 4.13, 4.14, 4.15)

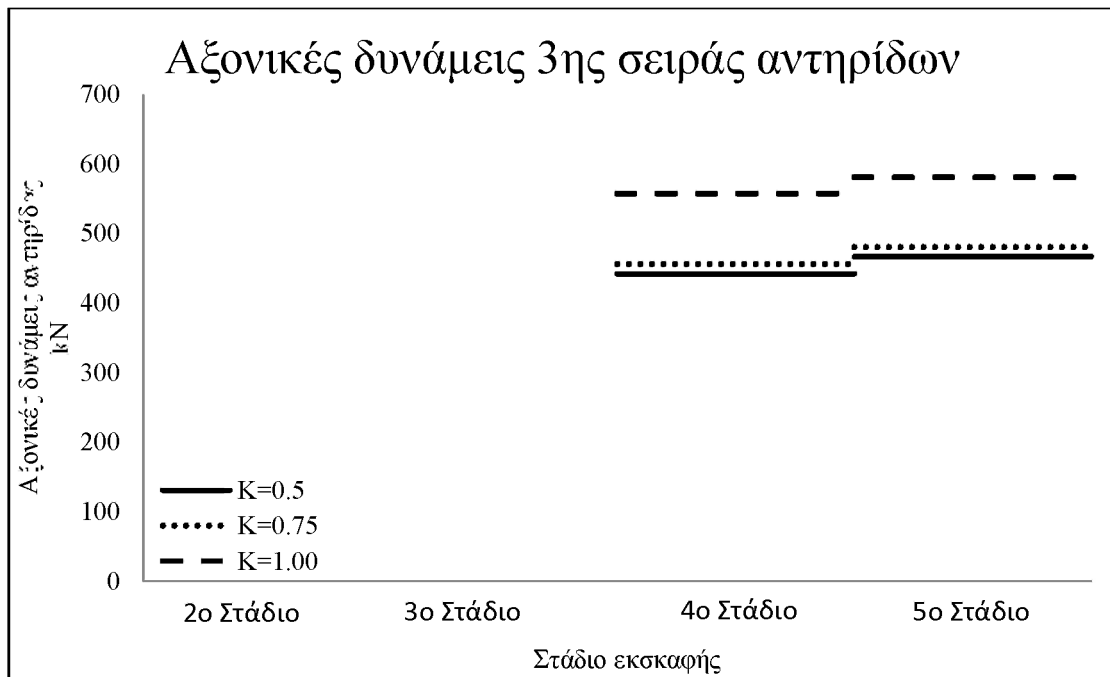


**Σχήμα 4.12** Αξονικές δυνάμεις 1<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής

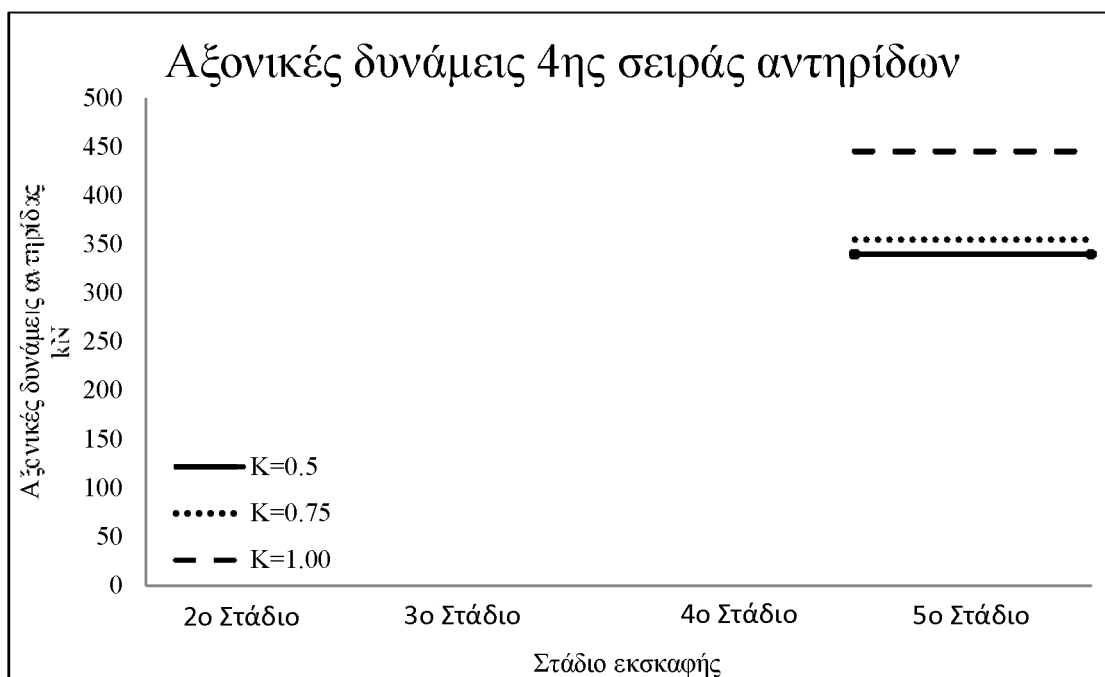




**Σχήμα 4.13** Αξονικές δυνάμεις 2<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.14** Αξονικές δυνάμεις 3<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.15** Αξονικές δυνάμεις 4<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb σε όλα τα στάδια εκσκαφής

➤ Οριζόντια μετακίνηση και κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής

Η μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση της όμορης οικοδομής σημειώνεται για την επίλυση  $K_0=1.00$  με τιμή 163mm και κατεύθυνση προς τα δεξιά, ακολουθεί η επίλυση με  $K_0=0.75$  και τιμή 165mm και κατεύθυνση προς τα δεξιά και η μικρότερη οριζόντια μετακίνηση παρατηρείται για την επίλυση  $K_0=0.5$  με τιμή 18,9mm προς τα αριστερά. Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  η τιμή της οριζόντιας μετακίνησης αυξάνεται αισθητά, ανάμεσα στις επιλύσεις  $K_0=0.5$  και  $K_0=0.75$ , ενώ στη συνέχεια δείχνει να είναι σταθερή αλλά και ελάχιστα μικρότερη στην επίλυση  $K_0=1.00$ . Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται σε όλα τα στάδια εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο για τις επιλύσεις  $K_0=0.75$  και  $K_0=1.00$ , ενώ για την επίλυση  $K_0=0.5$  η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.

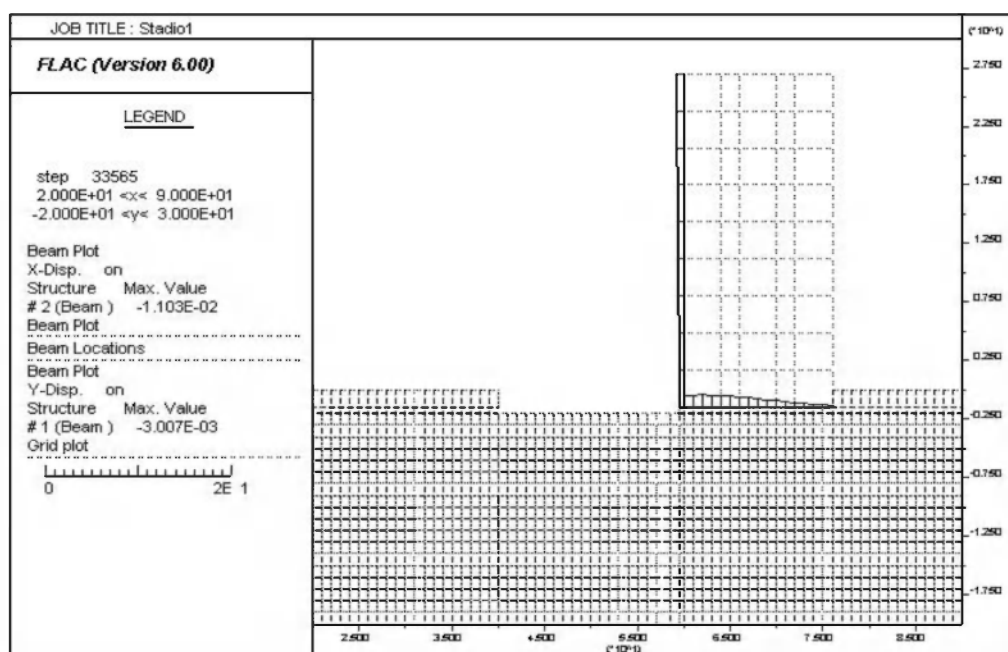
	$K_0=0.5$	$K_0=0.75$	$K_0=1.00$
<b>Στάδιο 1</b>	-4,45 mm	31,9 mm	30,4 mm
<b>Στάδιο 2</b>	-13,7 mm	75,6 mm	69,7 mm
<b>Στάδιο 3</b>	-17,7 mm	97,7 mm	93 mm
<b>Στάδιο 4</b>	-18,9 mm	138 mm	130 mm
<b>Στάδιο 5</b>	-15,1 mm	165 mm	163 mm

**Πίνακας 4.1** Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb

Η μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής σημειώνεται για την επίλυση  $K_0=1.00$  με τιμή 115 mm και κατεύθυνση προς τα κάτω (βύθιση), ακολουθεί η επίλυση  $K_0=0.75$  και τιμή 116 mm με κατεύθυνση προς τα κάτω (βύθιση) και η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση παρατηρείται για την επίλυση  $K_0=0.5$  με τιμή 21,4 mm και κατεύθυνση προς τα πάνω (ανύψωση). Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  η τιμή της κατακόρυφης μετακίνησης αυξάνεται αισθητά, ανάμεσα στις επιλύσεις  $K_0=0.5$  και  $K_0=0.75$ , ενώ στη συνέχεια δείχνει να είναι σταθερή αλλά και ελάχιστα μικρότερη στην επίλυση  $K_0=1.00$ . Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται σε όλα τα στάδια εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο για τις επιλύσεις  $K_0=0.75$  και  $K_0=1.00$ , ενώ για την επίλυση  $K_0=0.5$  η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής.

	$K_0=0.5$	$K_0=0.75$	$K_0=1.00$
<b>Στάδιο 1</b>	1,22 mm	-21,7 mm	-21,6 mm
<b>Στάδιο 2</b>	4,77 mm	-55 mm	-54,6 mm
<b>Στάδιο 3</b>	8,53 mm	-72,8 mm	-72,5 mm
<b>Στάδιο 4</b>	16,5 mm	-99,6 mm	-96,6 mm
<b>Στάδιο 5</b>	21,4 mm	-116 mm	-115 mm

**Πίνακας 4.2** Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb



**Εικόνα 4.1** Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις όμορου κτιρίου, Στάδιο 1

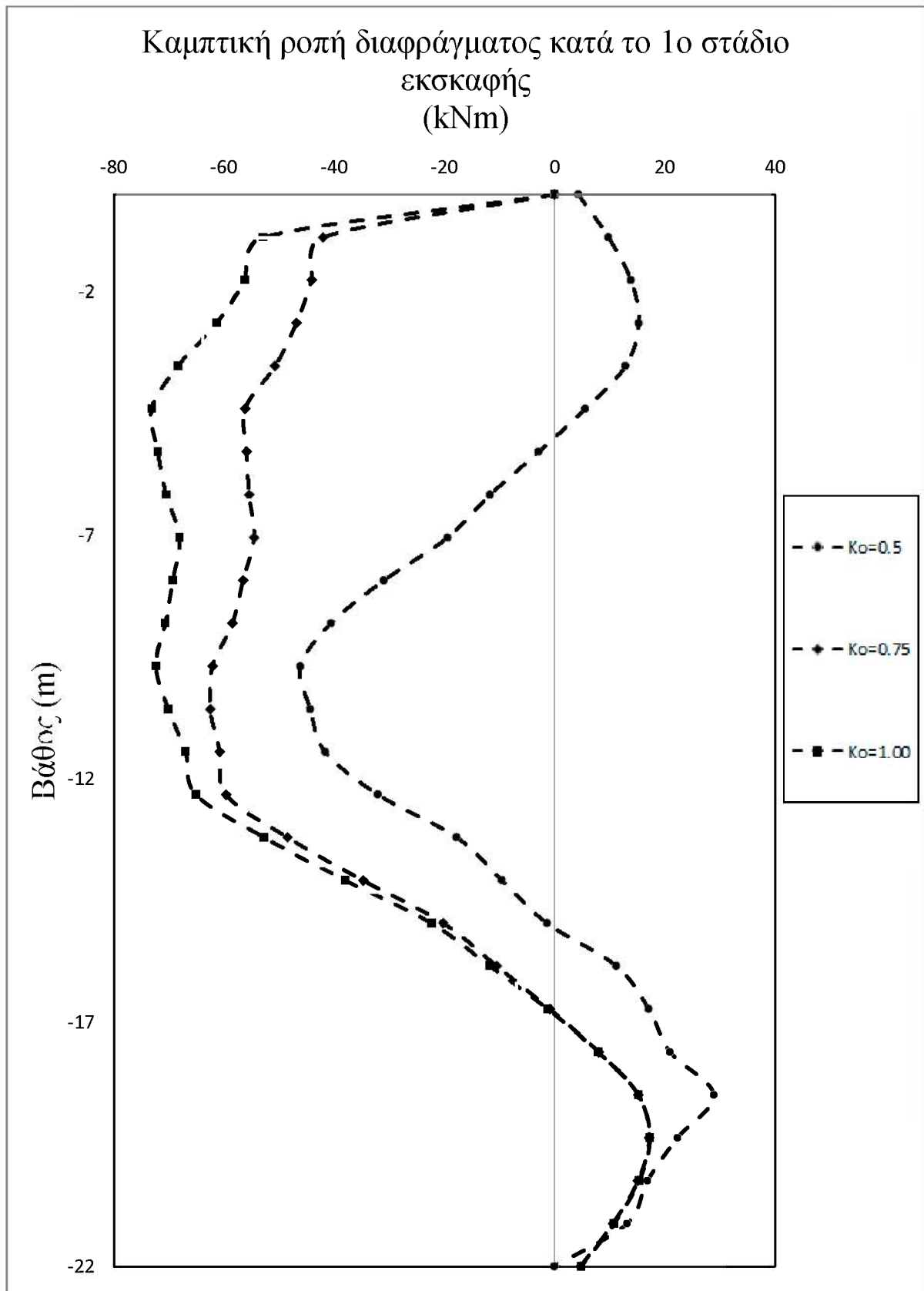
## 4.2.2 Επίλυσεις με καταστατικό νόμο Double-Yield

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αναλύσεις με χρήση τον καταστατικό νόμο Double-Yield με τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  (0.5, 0.75, 1.00)

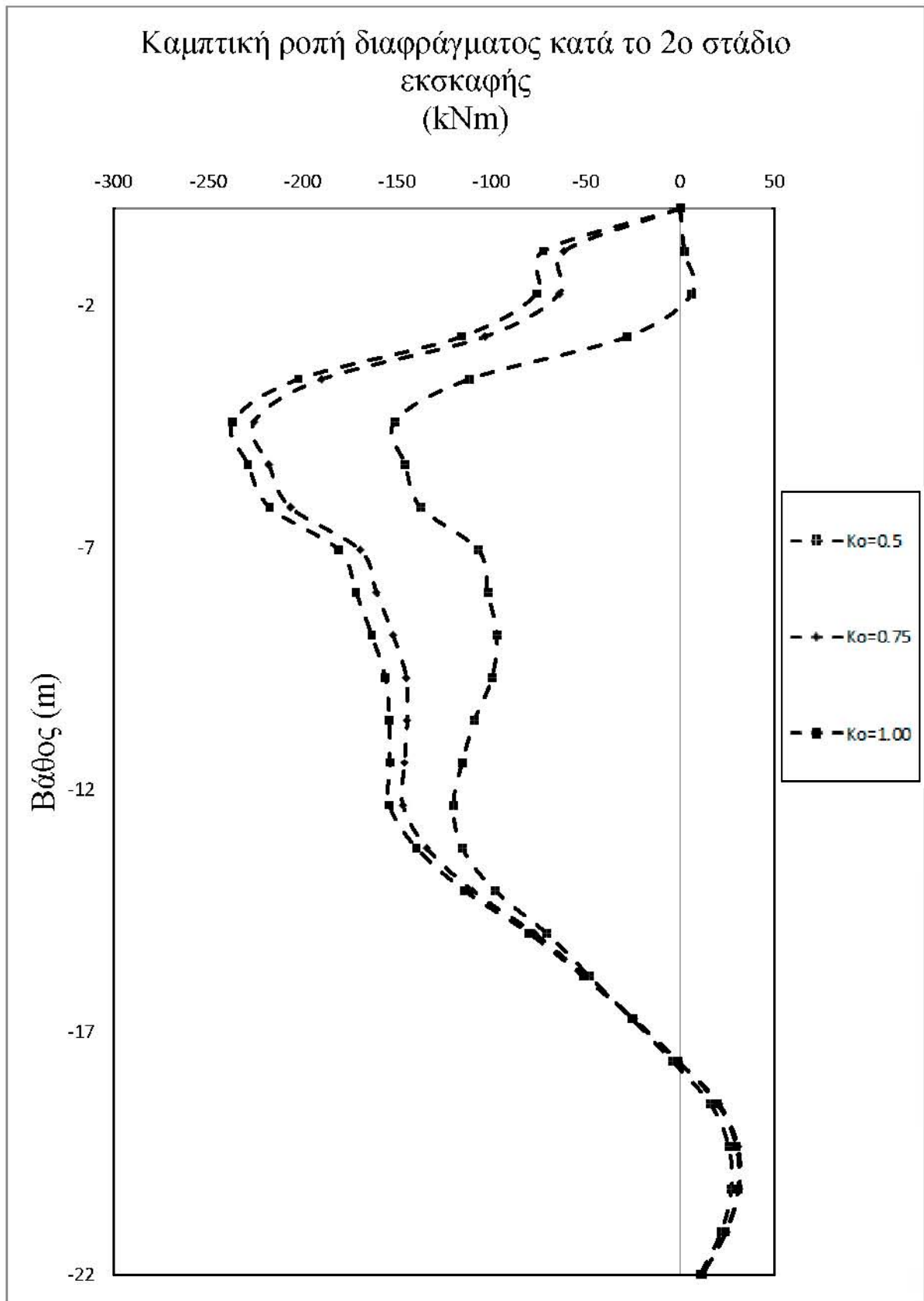
Από τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων προκύπτει ότι:

➤ Μεταβολή της καμπτικής ροπής του διαφραγματικού τοίχου

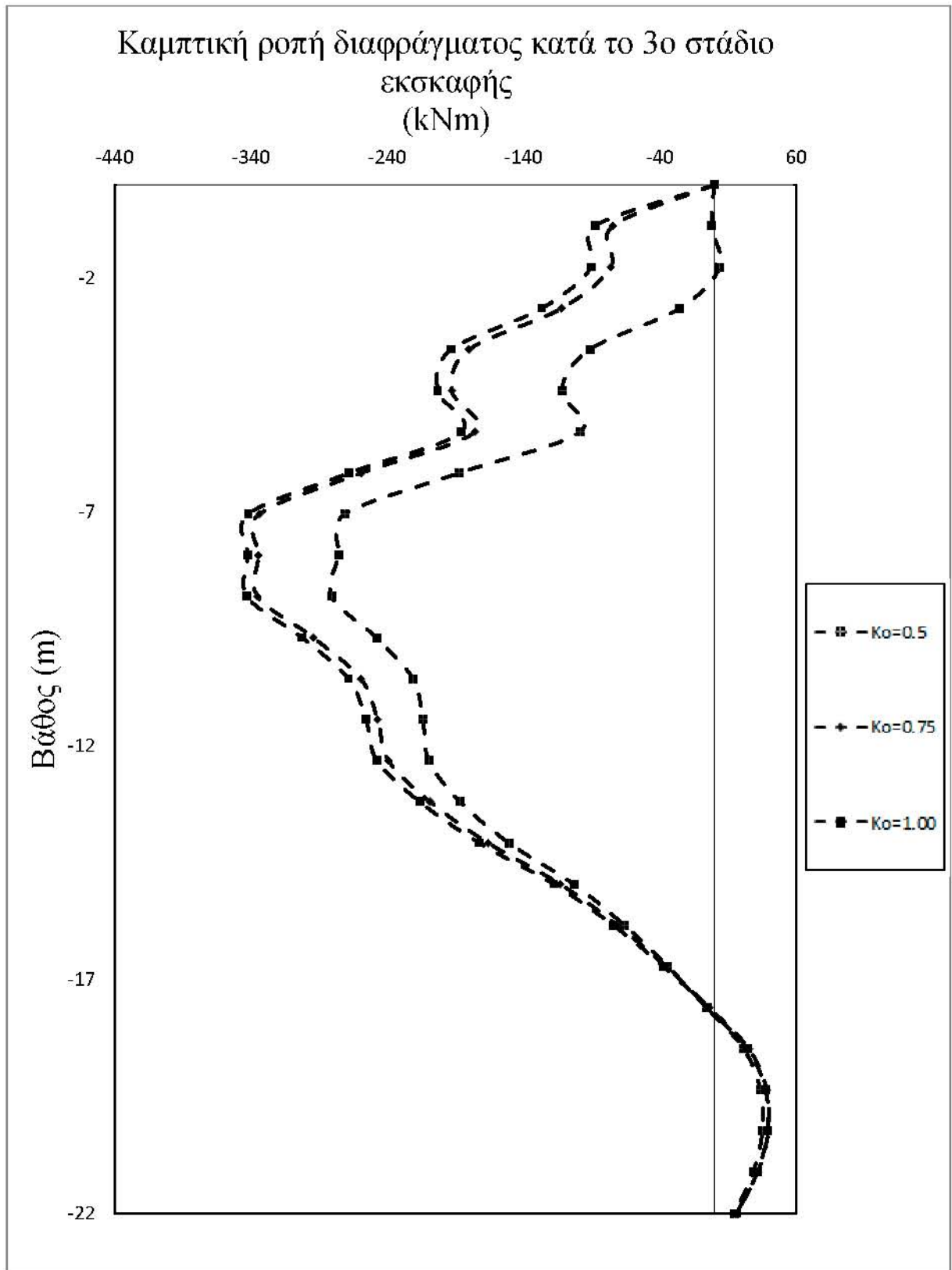
Η μεγαλύτερη ροπή που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση για  $K_o=1.00$  με τιμή 769.9 kNm ακολουθεί η επίλυση με  $K_o=0.75$  με τιμή 763.7 kNm και τη μικρότερη καμπτική ροπή εμφανίζει η επίλυση  $K_o=0.5$  με τιμή 754.1 kNm. Παρατηρούμε πως αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  έχουμε αύξηση της καμπτικής ροπής. Η μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής εμφανίζεται και στις τρεις περιπτώσεις σε βάθος 14.2 m. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται και στα 4 πρώτα στάδια της εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές ροπής να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο. (Σχήματα 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20)



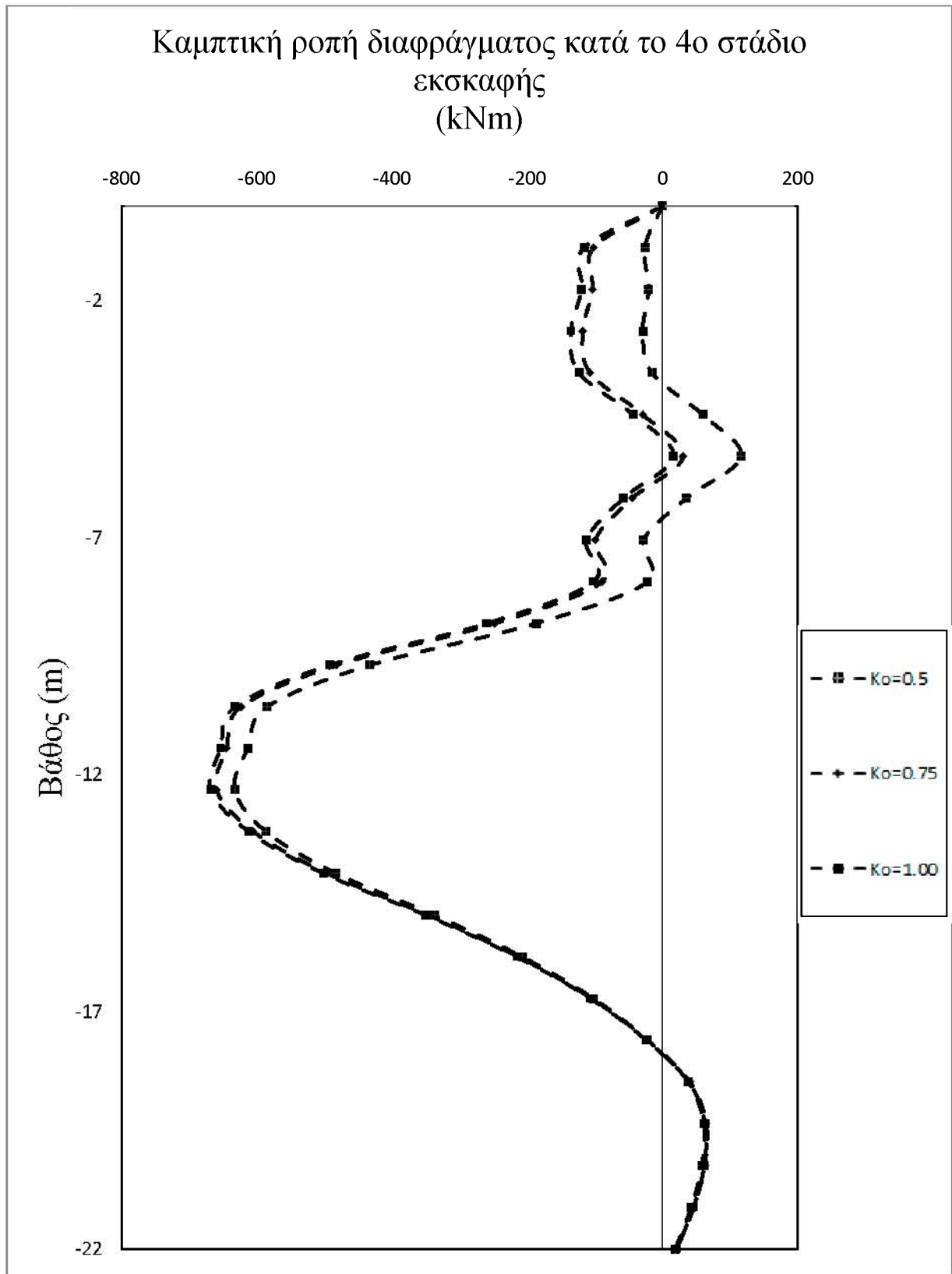
**Σχήμα 4.16** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.17** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_{\sigma}$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής

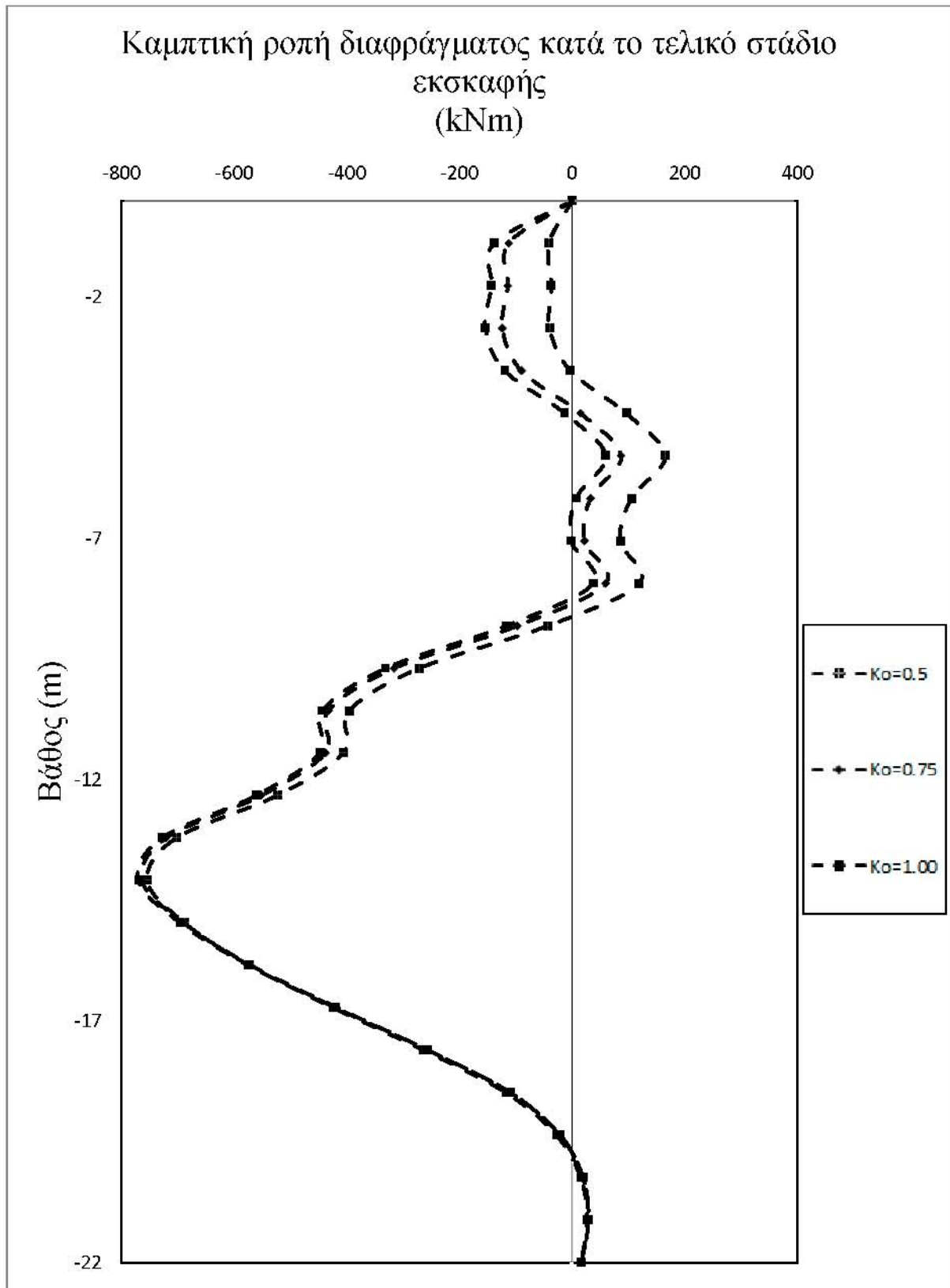


**Σχήμα 4.18** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.19** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής

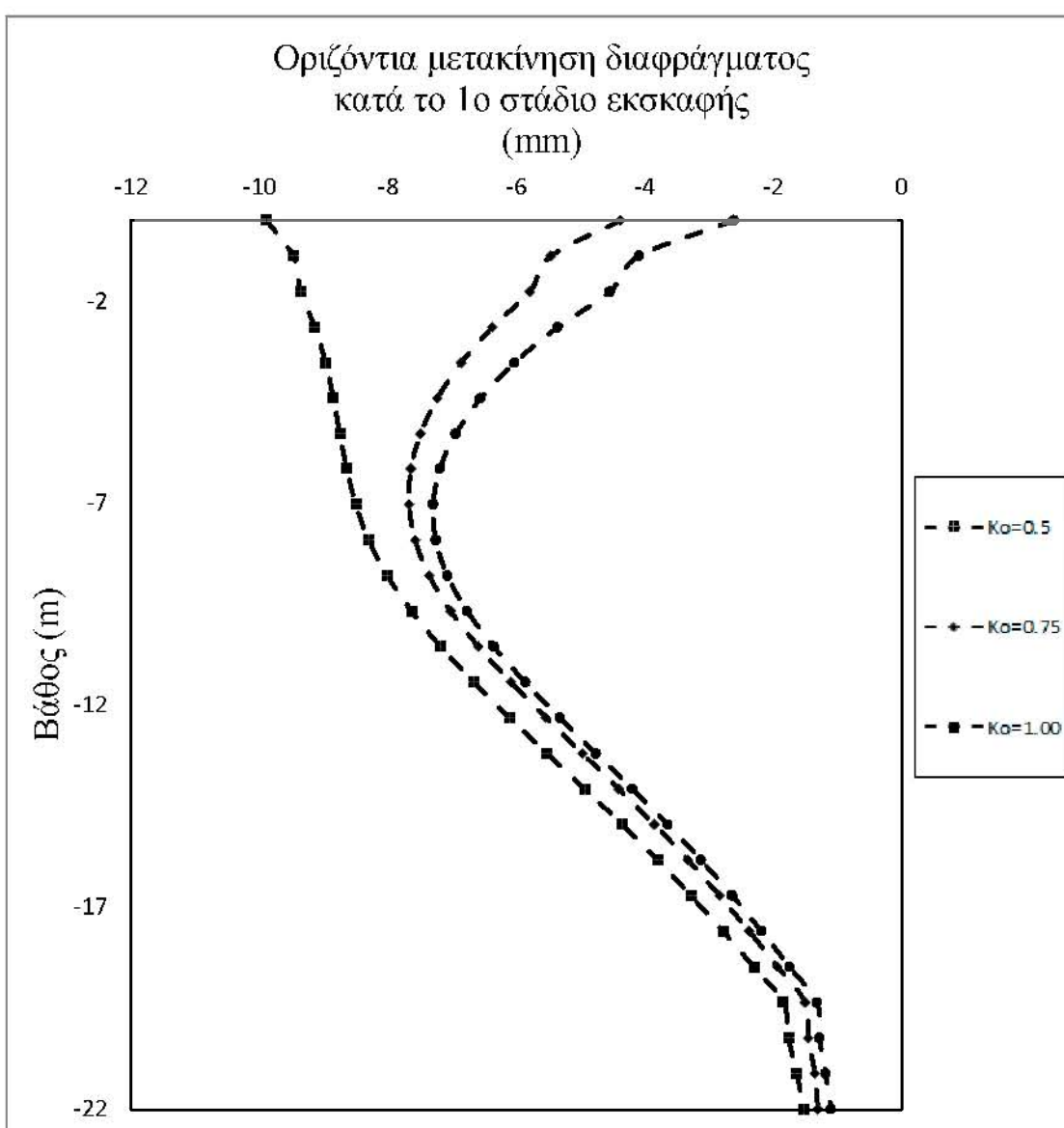




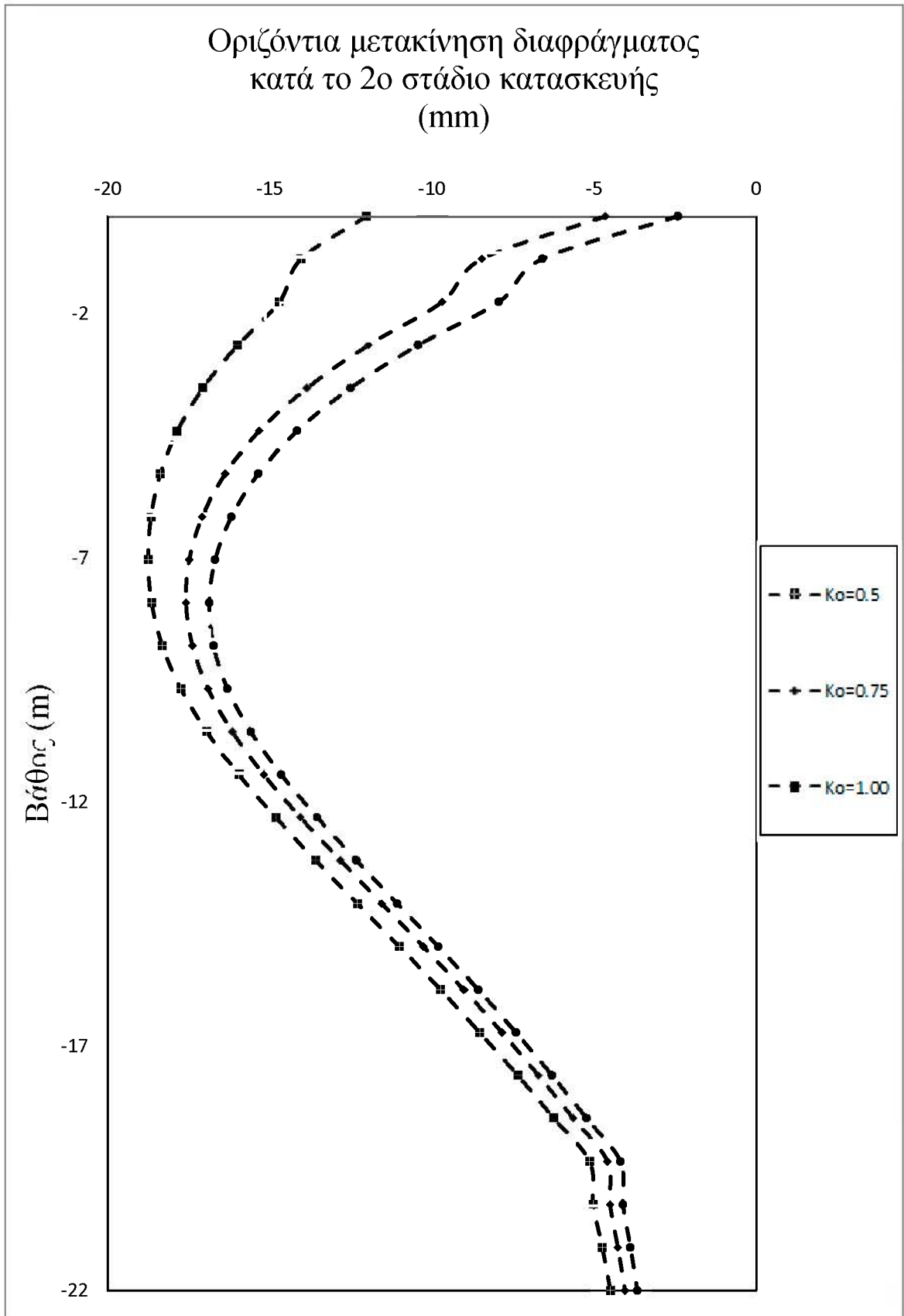
**Σχήμα 4.20** Καμπτικές ροπές διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

➤ Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του διαφραγματικού τοίχου

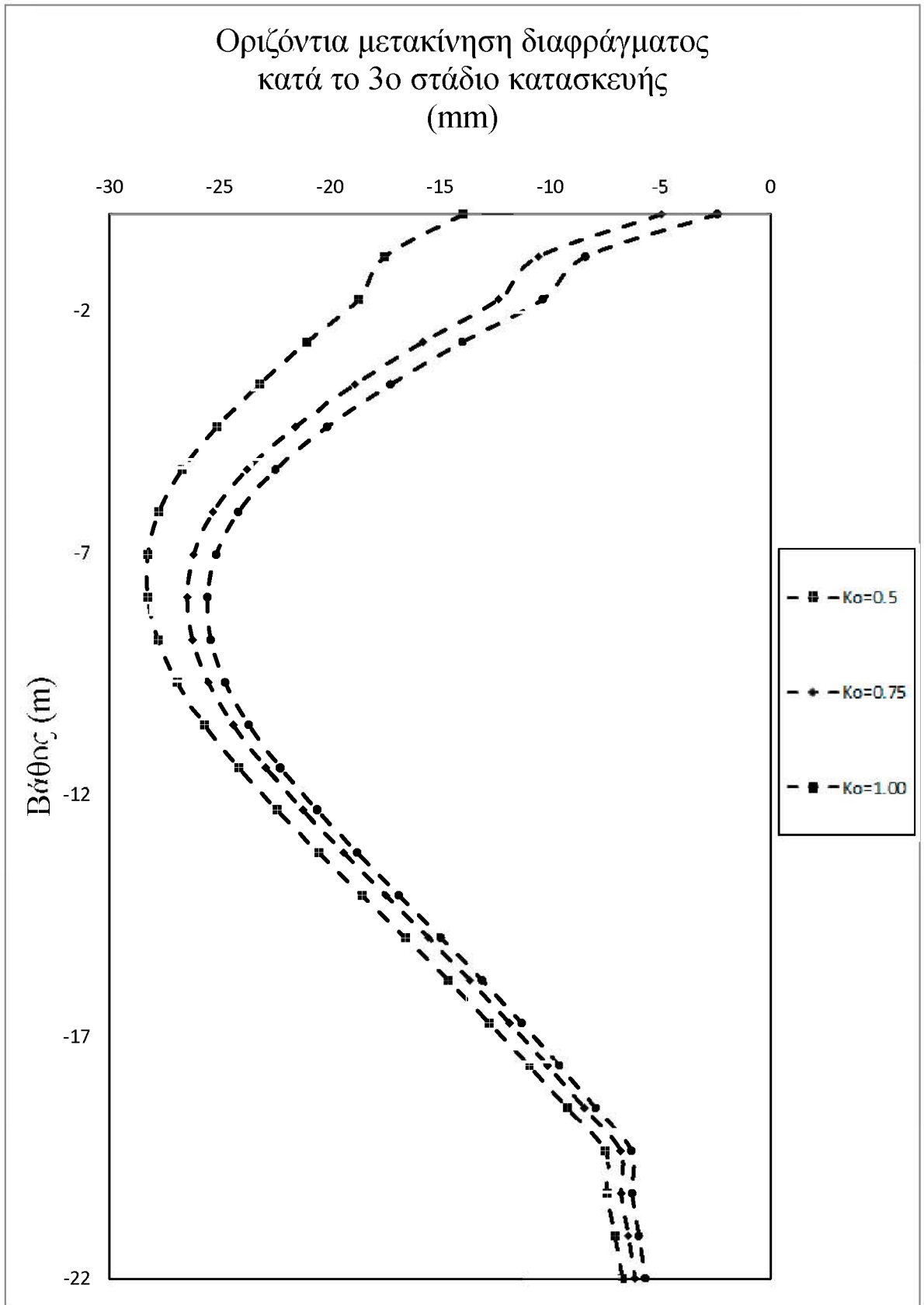
Η μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση για  $K_0=0.5$  με τιμή 55.79 mm ακολουθεί η επίλυση με  $K_0=0.75$  με τιμή 52.63 mm και τη μικρότερη οριζόντια μετακίνηση εμφανίζει η επίλυση  $K_0=0.1$  με τιμή 52.55 mm. Σε αντίθεση με την καμπτική ροπή που είδαμε πριν, παρατηρούμε πως αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  έχουμε μείωση της οριζόντιας μετακίνησης. Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετακίνησης εμφανίζεται και στις τρεις περιπτώσεις σε βάθος 11 m με τη μετακίνηση να μειώνεται μέχρι τη στέψη. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται και στα 4 πρώτα στάδια της εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο. (Σχήματα 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25)



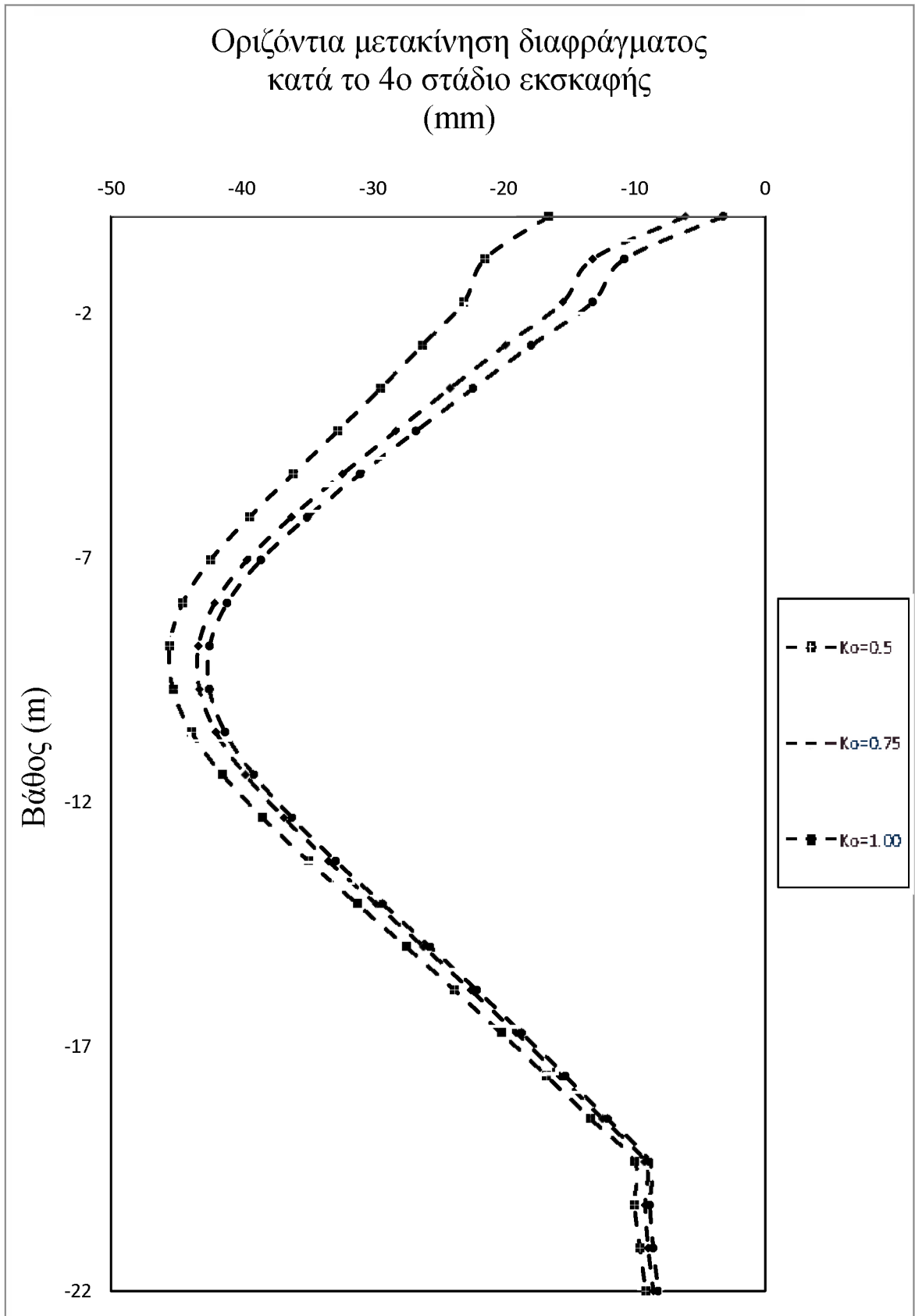
**Σχήμα 4.21** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



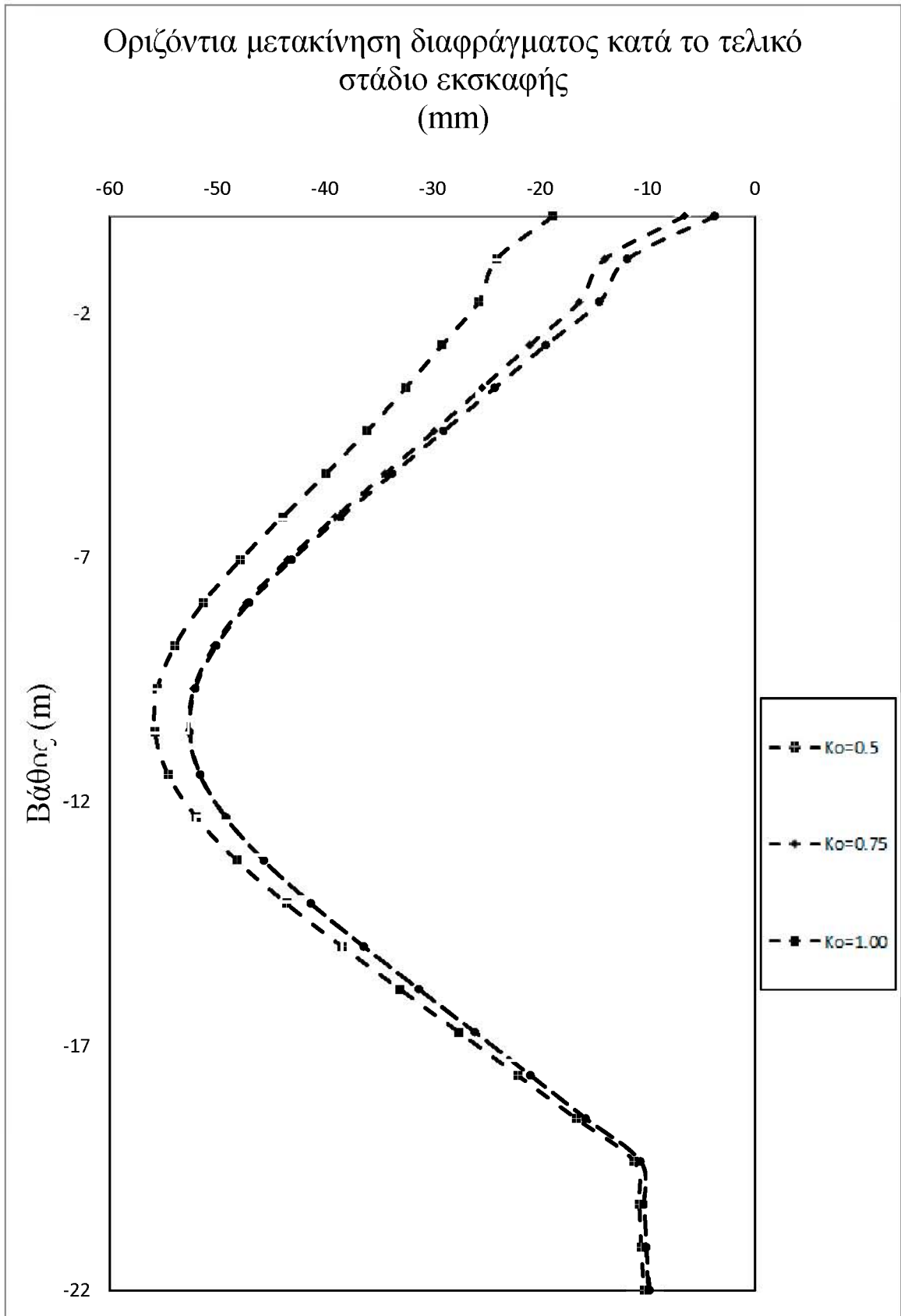
**Σχήμα 4.22** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.23** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



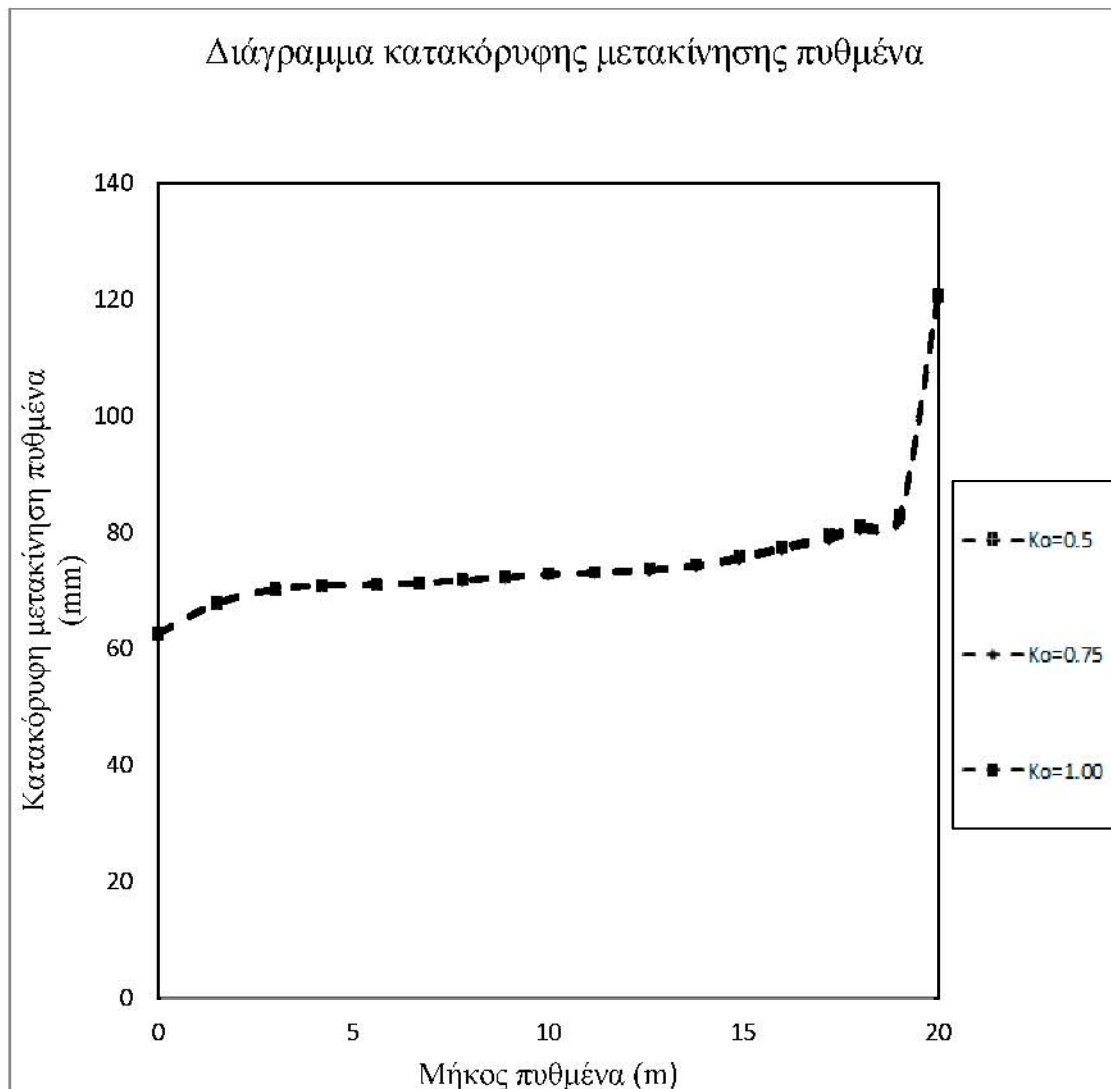
**Σχήμα 4.24** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.25** Οριζόντιες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

➤ Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής

Στην περίπτωση της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα για την επίλυση με καταστατικό νόμο Double-Yield παρατηρούμε ότι η μεταβολή της τιμής του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  (0.5, 0.75, 1.00) δεν επηρεάζει καθόλου τις τιμές της κατακόρυφης μετακίνησης. Και στις τρεις επιλύσεις οι τιμές που πάρθηκαν ήταν ίδιες. Παρατηρούμε βέβαια ότι και στις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται αύξηση της τιμής της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα όσο πλησιάζουμε την δεξιά πλευρά της εκσκαφής, πράγμα λογικό αφού στην επιφάνεια υπάρχει οικοδομή με αποτέλεσμα οι ωθήσεις να είναι μεγαλύτερες από ότι στην αριστερή πλευρά. (Σχήμα 4.26)



**Σχήμα 4.26** Κατακόρυφες μετατοπίσεις διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

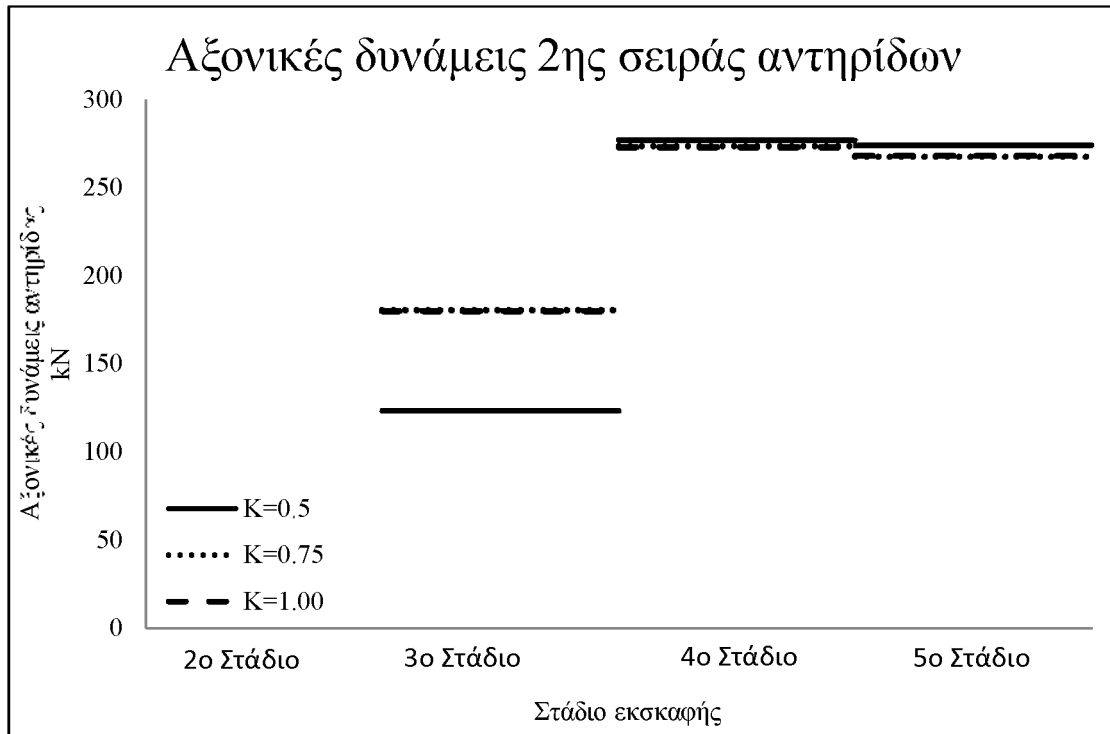
➤ Μεταβολή της αξονικής δύναμης των αντηρίδων

Η μεγαλύτερη αξονική δύναμη που παρουσιάζεται αφορά την επίλυση  $K_0 = 0.5$  με τιμές 185 kN για την πρώτη σειρά αντηρίδων, 274 kN για τη δεύτερη σειρά αντηρίδων, 410 kN για την τρίτη σειρά αντηρίδων και 280 kN για την τέταρτη σειρά αντηρίδων. Παρατηρούμε πως στην πρώτη σειρά αντηρίδων αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  μειώνεται η αξονική δύναμη, στη δεύτερη σειρά αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  παρατηρείται αύξηση της αξονικής δύναμης στο στάδιο τοποθέτησης της αντηρίδας ενώ στα επόμενα δύο στάδια οι τιμές και για τις 3 επιλύσεις είναι σχεδόν ίδιες. Στις δύο κατώτερες σειρές αντηρίδων παρατηρείται πως οι τιμές των αξονικών δυνάμεων είναι σχεδόν ίδιες και στις 3 επιλύσεις. Τέλος η μεγαλύτερη αξονική δύναμη από τις τέσσερις σειρές εμφανίζει η 3<sup>η</sup> σειρά αντηρίδων που είναι τοποθετημένη σε βάθος 6.5 m. (Σχήματα 4.27, 4.28, 4.29, 4.30)

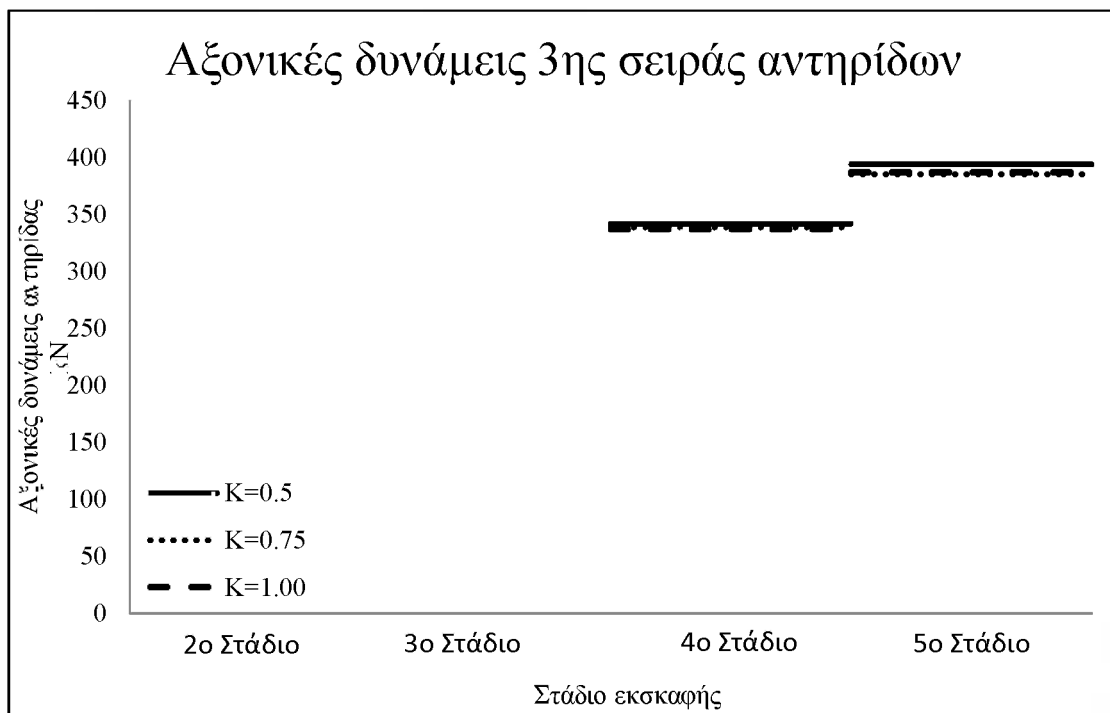


**Σχήμα 4.27** Αξονικές δυνάμεις 1<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής

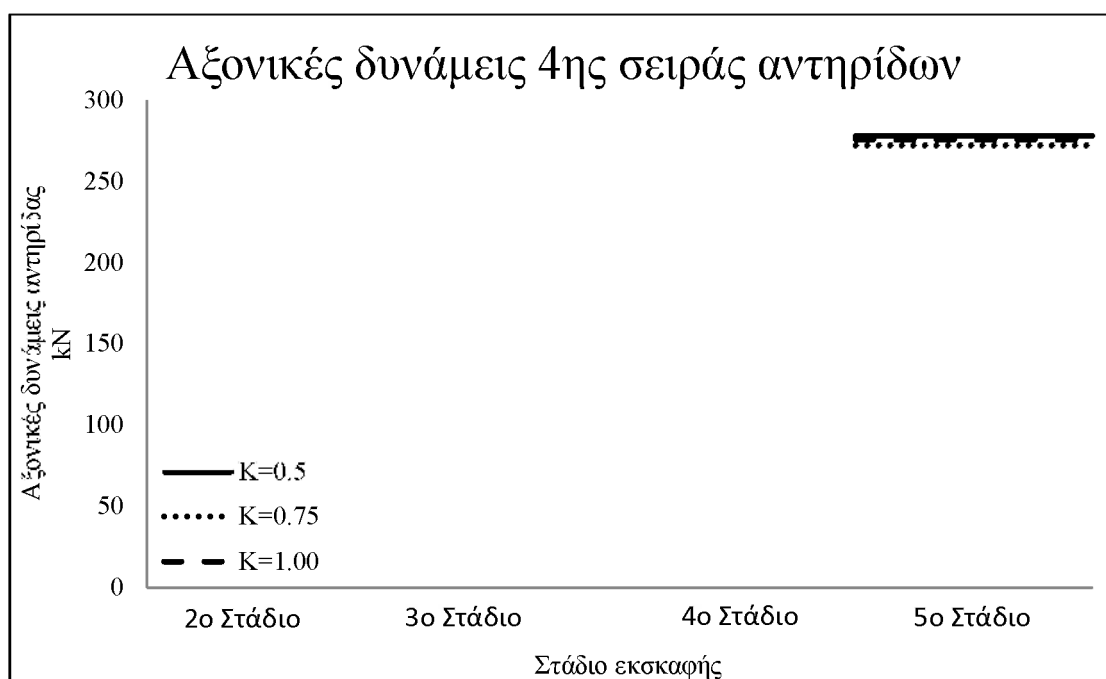




**Σχήμα 4.28** Αξονικές δυνάμεις 2<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.29** Αξονικές δυνάμεις 3<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.30** Αξονικές δυνάμεις 4<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής

➤ Οριζόντια μετακίνηση και κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής

Η μεγαλύτερη οριζόντια μετακίνηση της όμορης οικοδομής σημειώνεται για την επίλυση  $K_0=0.5$  με τιμή 24,2 mm και κατεύθυνση προς τα αριστερά, ακολουθεί η επίλυση με  $K_0=1.00$  και τιμή 18,4 mm και κατεύθυνση προς τα αριστερά και η μικρότερη οριζόντια μετακίνηση παρατηρείται για την επίλυση  $K_0=1.00$  με τιμή 17 mm προς τα αριστερά. Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  η τιμή της οριζόντιας μετακίνησης μειώνεται. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται σε όλα τα στάδια εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο και για τις τρεις επιλύσεις.

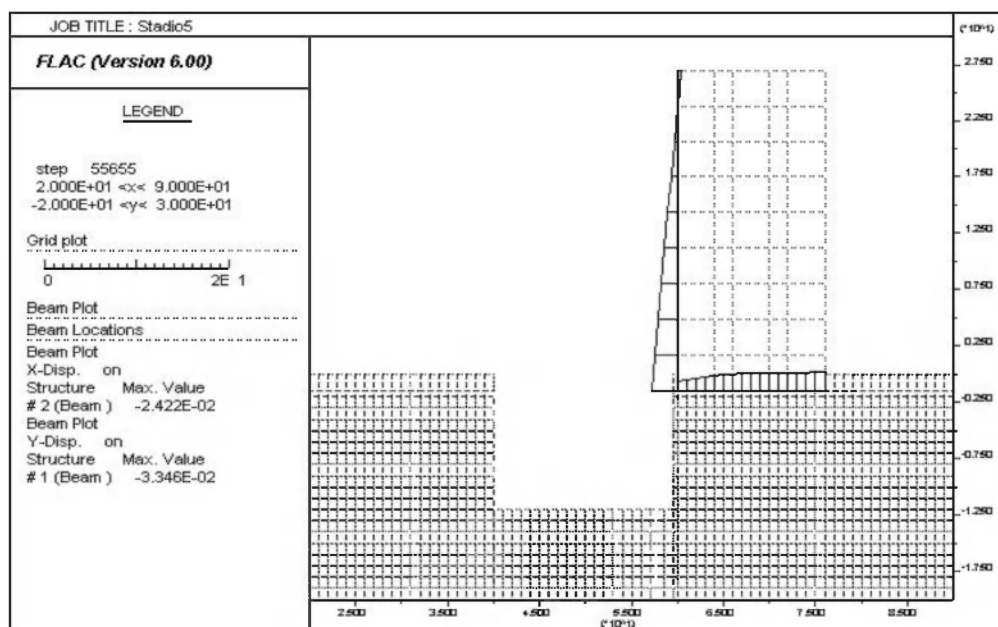
	$K_0=0.5$	$K_0=0.75$	$K_0=1.00$
<b>Στάδιο 1</b>	-11 mm	-9 mm	-9 mm
<b>Στάδιο 2</b>	-15,9 mm	-13,2 mm	-11,5 mm
<b>Στάδιο 3</b>	-16,2 mm	-13,3 mm	-12,4 mm
<b>Στάδιο 4</b>	-21,3 mm	-17 mm	-15,2 mm
<b>Στάδιο 5</b>	-24,2 mm	-18,4 mm	-17 mm

**Πίνακας 4.3** Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield

Η μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής σημειώνεται για την επίλυση  $K_0=0.5$  με τιμή 33,5 mm και κατεύθυνση προς τα πάνω (ανύψωση), ακολουθεί η επίλυση  $K_0=0.75$  και τιμή 29,9 mm με κατεύθυνση προς τα πάνω (ανύψωση) και η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση παρατηρείται για την επίλυση  $K_0=1.00$  με τιμή 29,8 mm και κατεύθυνση προς τα πάνω (ανύψωση). Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  η τιμή της κατακόρυφης μετακίνησης μειώνεται. Παρόμοια διακύμανση στις τιμές παρατηρείται σε όλα τα στάδια εκσκαφής με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στο τελικό στάδιο και για τις τρεις επιλύσεις.

	$K_0=0.5$	$K_0=0.75$	$K_0=1.00$
<b>Στάδιο 1</b>	3 mm	2,23 mm	2,53 mm
<b>Στάδιο 2</b>	8,4 mm	7,5 mm	7,38 mm
<b>Στάδιο 3</b>	13,9 mm	12,5 mm	12,2 mm
<b>Στάδιο 4</b>	24,7 mm	23,1 mm	22,6 mm
<b>Στάδιο 5</b>	33,5 mm	29,9 mm	29,8 mm

**Πίνακας 4.4** Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield



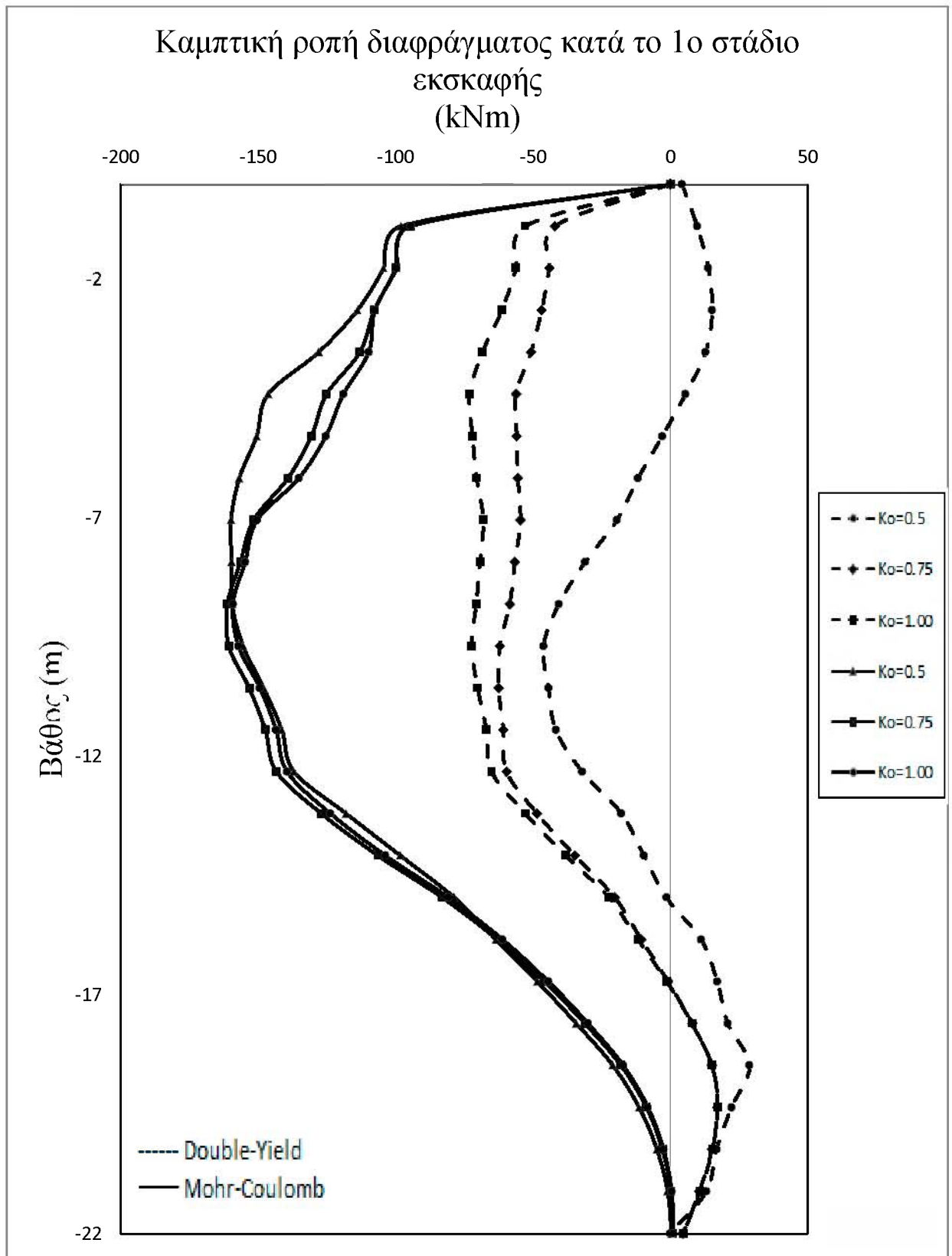
**Εικόνα 4.2** Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις όμορου κτιρίου, Στάδιο 5

### 4.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα και των δύο καταστατικών νόμων

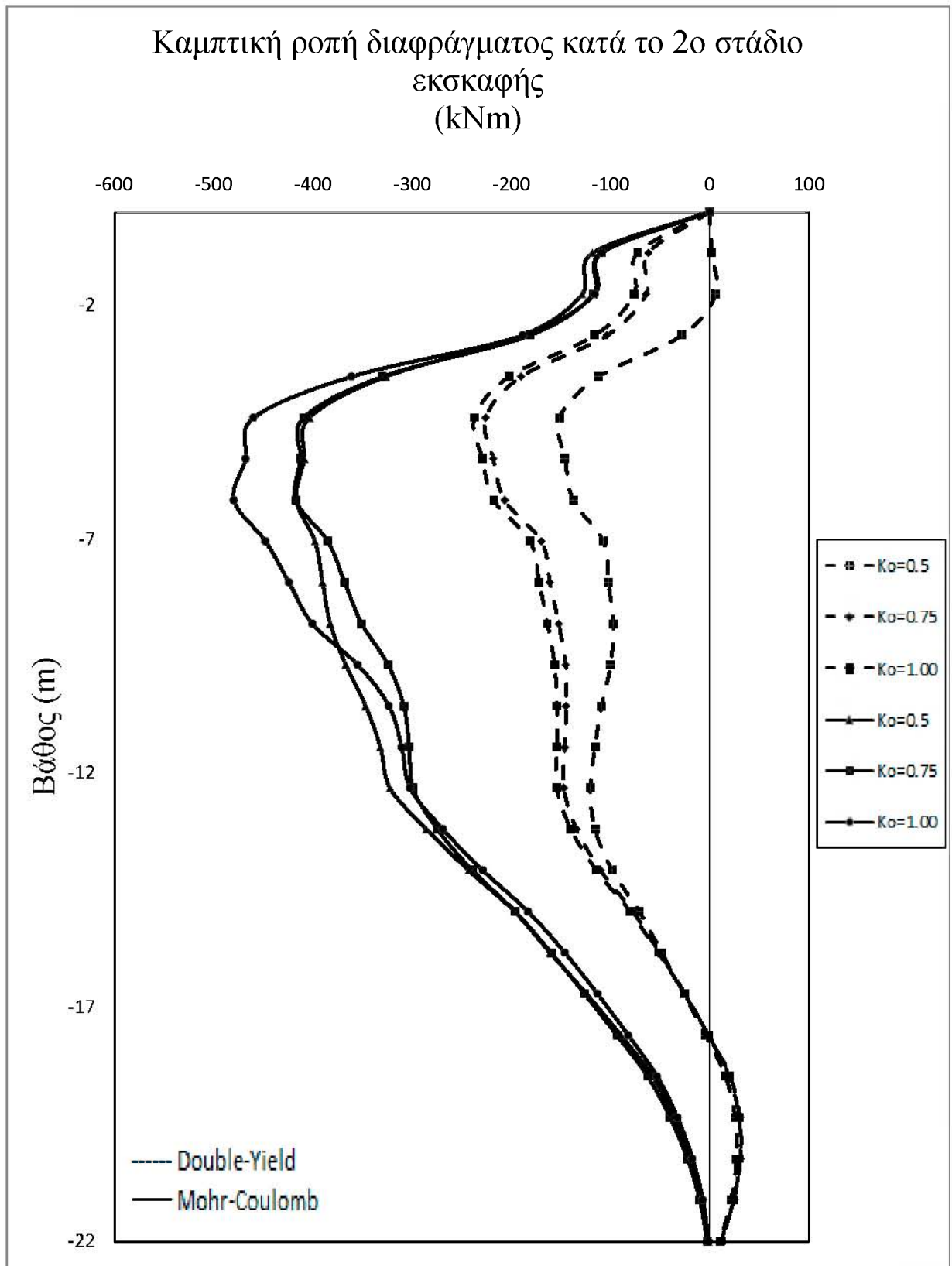
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να εξετάσουμε τη διαφοροποίηση των εντατικών και κινηματικών μεγεθών του συστήματος μας.

➤ Μεταβολή της καμπτικής ροπής του διαφραγματικού τοίχου

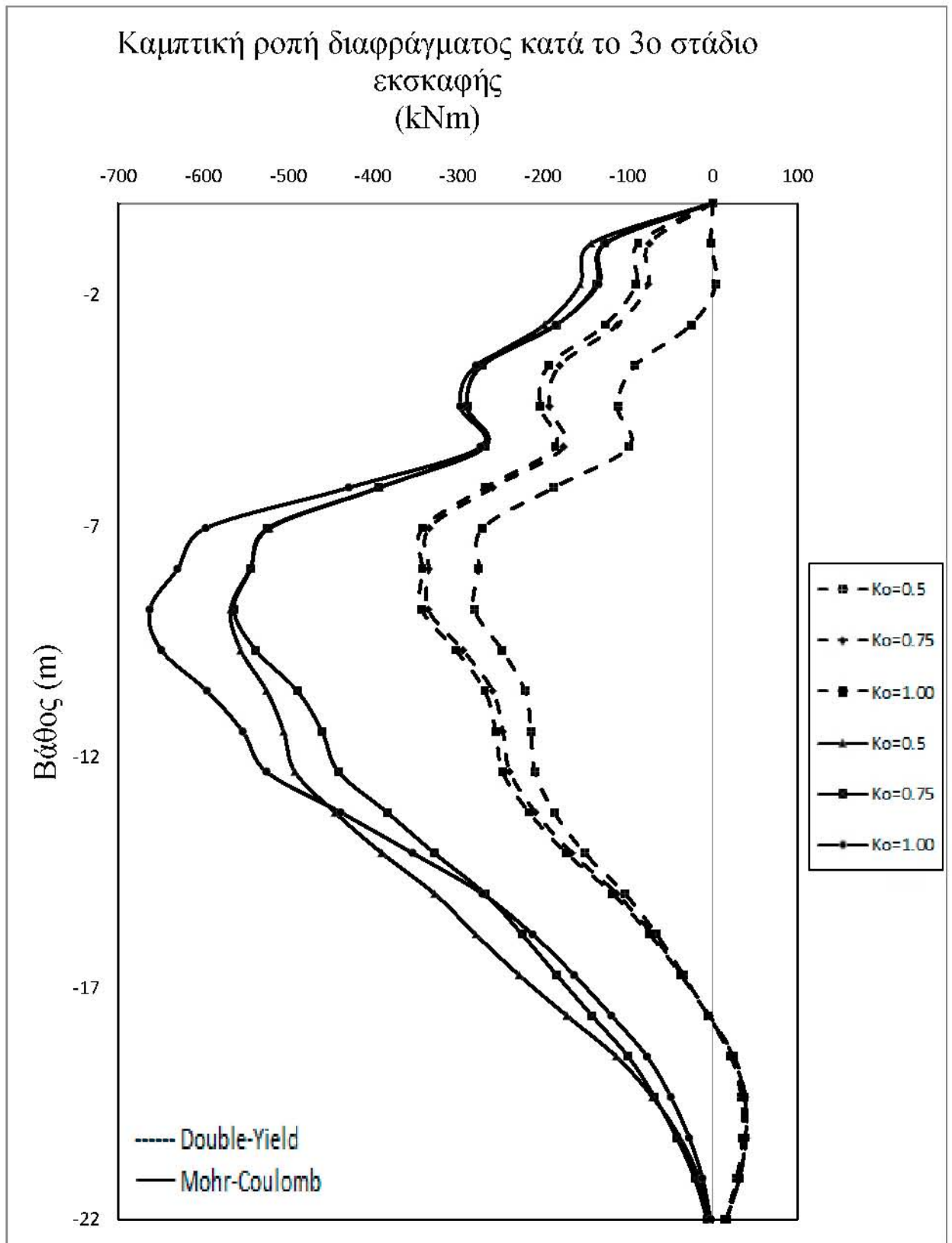
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Double-Yield για κάθε τιμή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ . Παρατηρούμε μία διαφορά, όσον αφορά τις μέγιστες τιμές, της τάξης του 50% στο πρώτο στάδιο, 100% στο δεύτερο στάδιο, 70% στο τρίτο στάδιο, 60% στο τέταρτο στάδιο και 50% στο τελικό στάδιο εκσκαφής. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι ίδια για όλες τις επιλύσεις με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται σε όλες σε βάθος 14.2 m. (Σχήματα 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35)



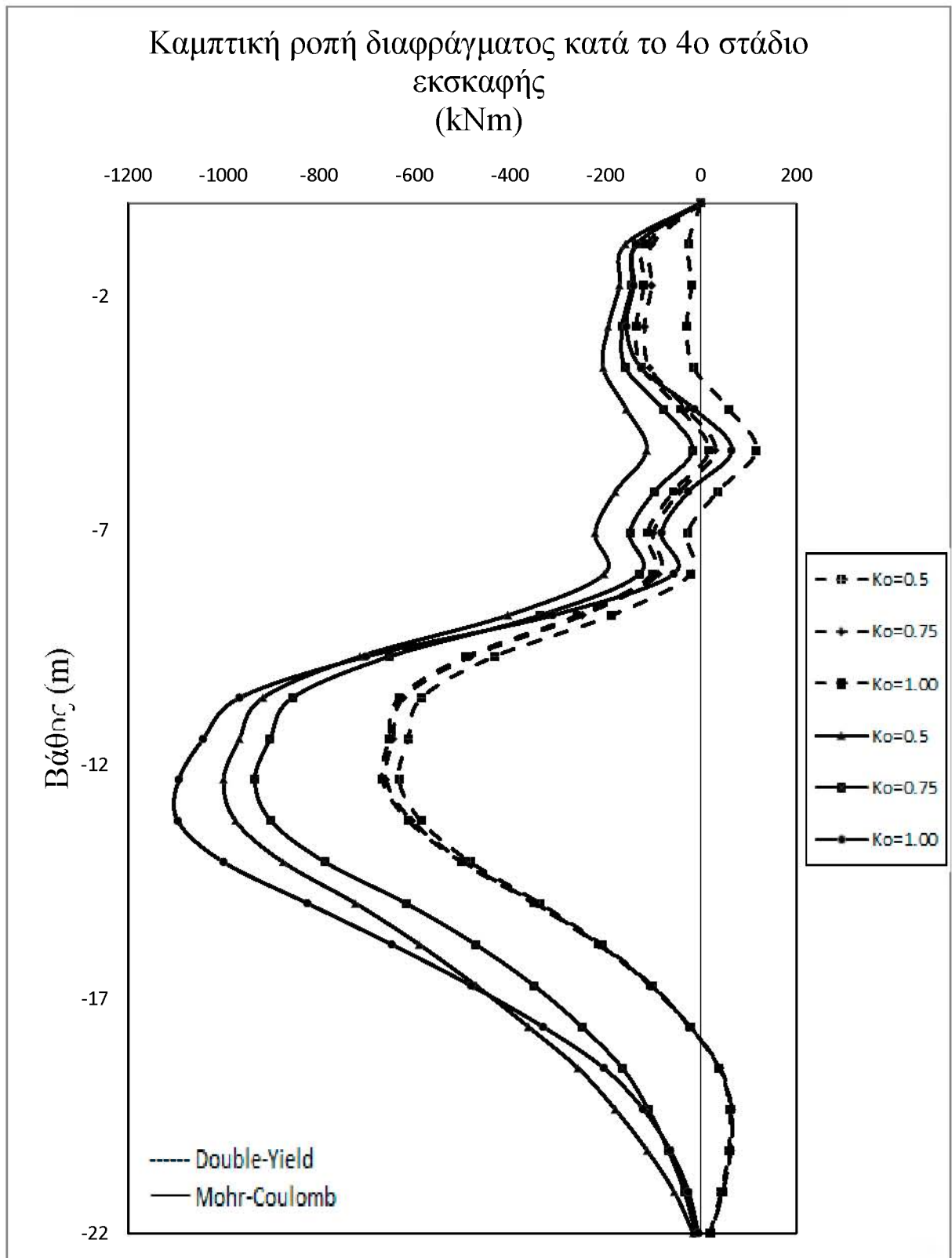
**Σχήμα 4.31** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.32** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_o$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής

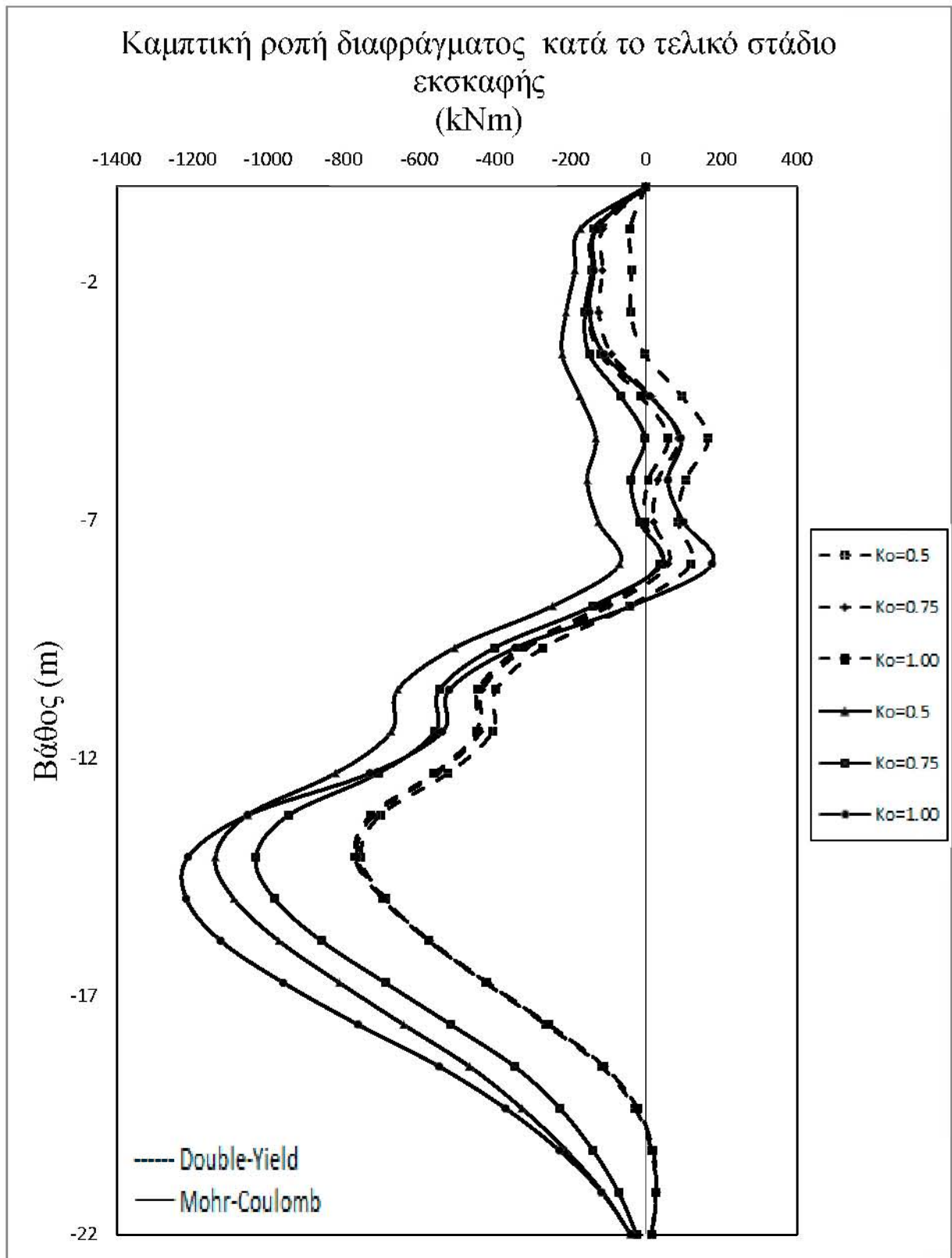


**Σχήμα 4.33** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.34** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής

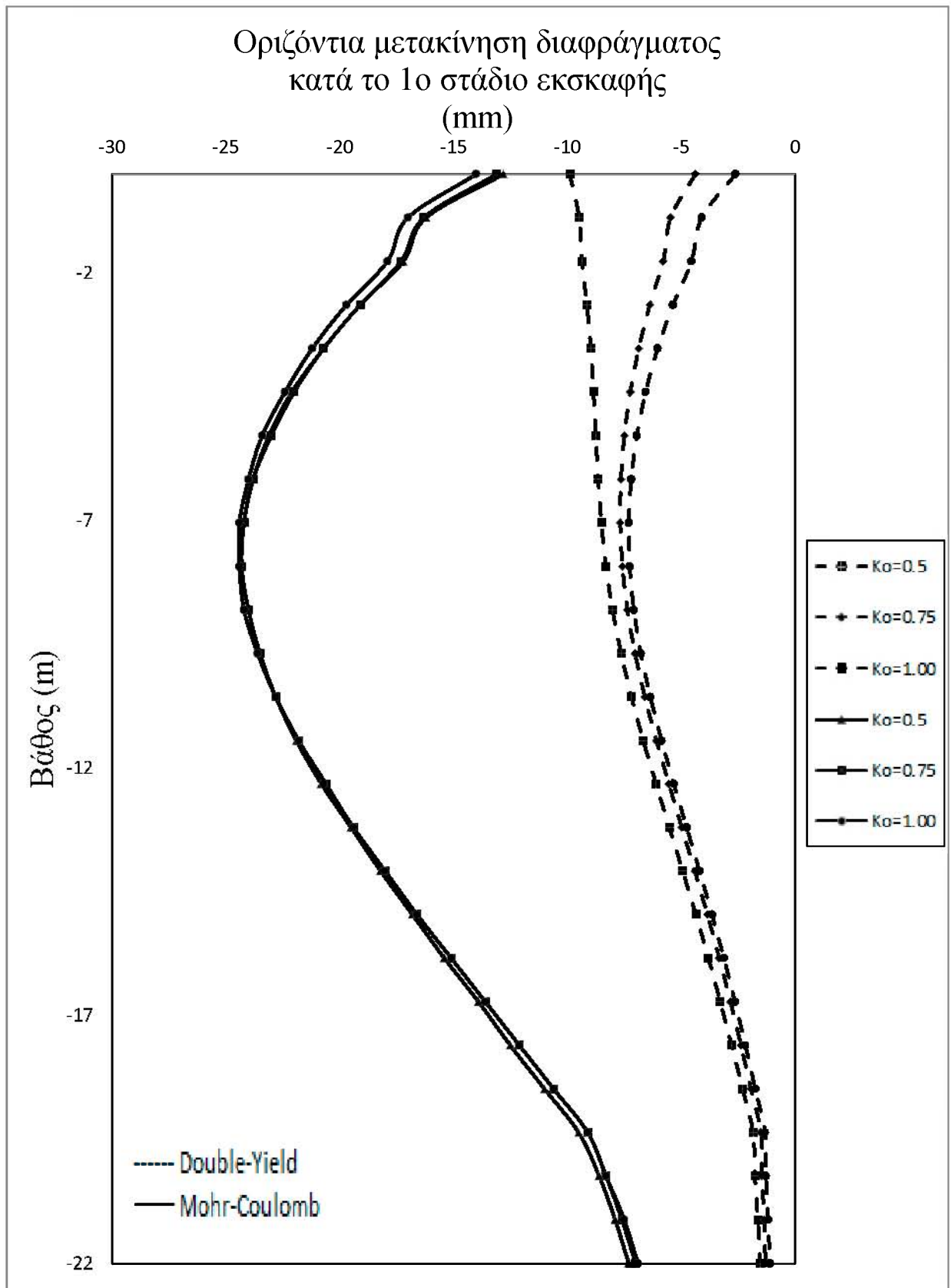




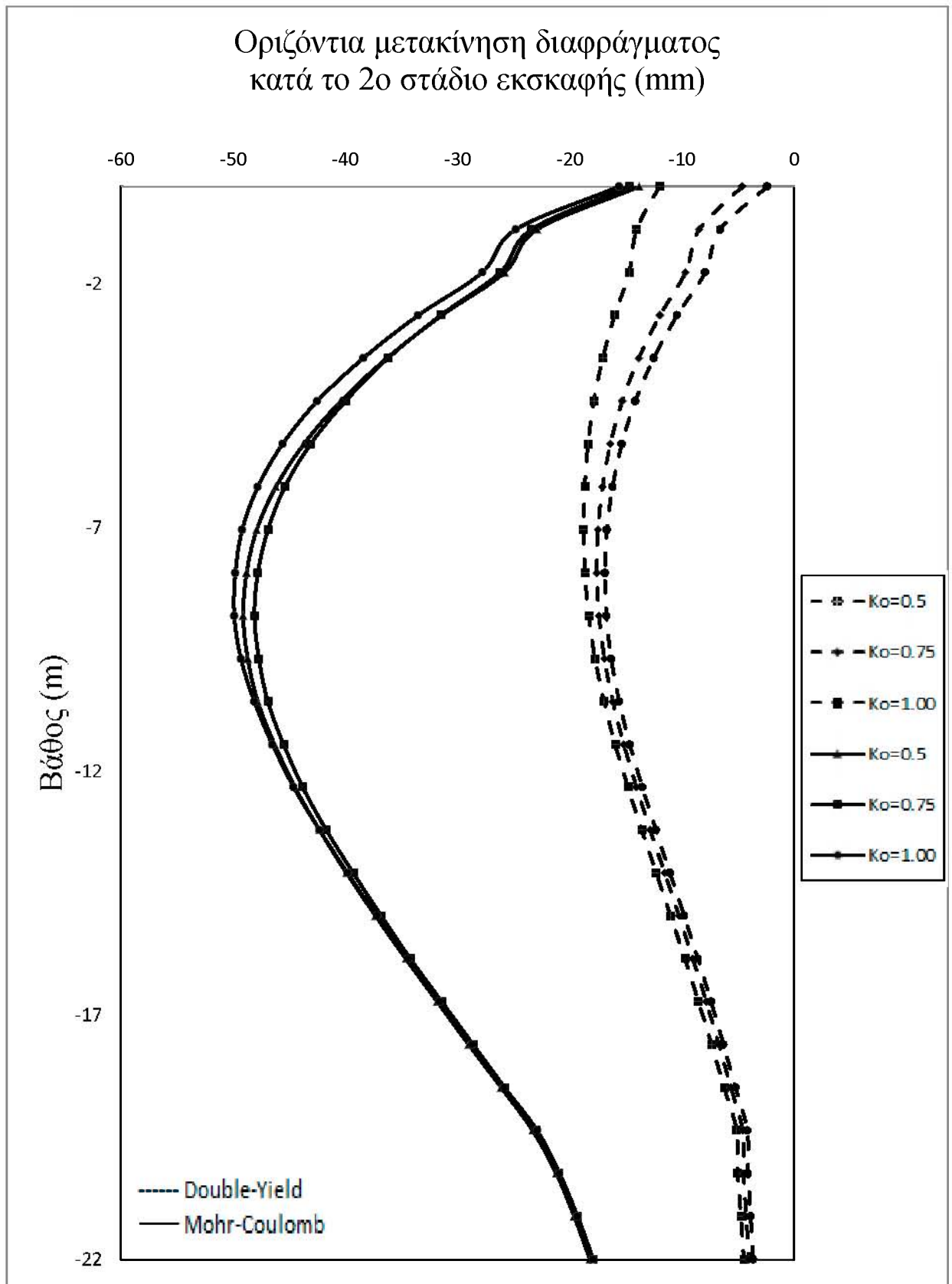
**Σχήμα 4.3ε** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

➤ Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του διαφραγματικού τοίχου

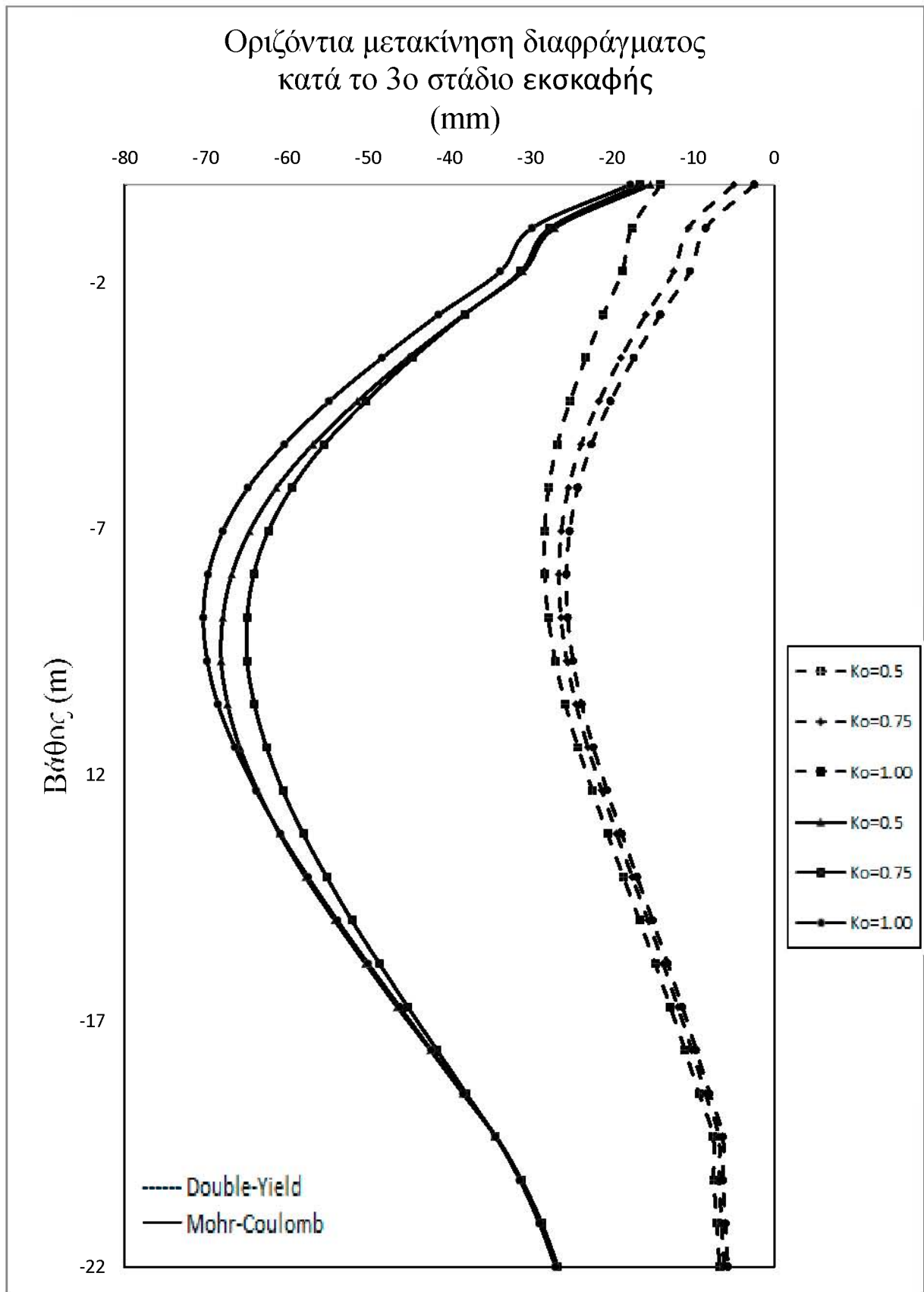
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της οριζόντιας μετακίνησης του διαφράγματος των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Double-Yield για κάθε τιμή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ . Παρατηρούμε μία διαφορά, όσον αφορά τις μέγιστες τιμές, της τάξης του 200% στο πρώτο στάδιο, 188% στο δεύτερο στάδιο, 150% στο τρίτο στάδιο, 133% στο τέταρτο στάδιο και 129% στο τελικό στάδιο εκσκαφής. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το βάθος εκσκαφής η διαφορά ανάμεσα στις δύο επιλύσεις μειώνεται αλλά παρόλα αυτά διατηρείται σε μεγάλο ποσοστό άνω του 100%. Η μορφή των διαγραμμάτων σε όλες τις επιλύσεις είναι όμοια, με τη μέγιστη τιμή αυτών να παρουσιάζεται για την επίλυση με Mohr-Coulomb σε βάθος 12 m και για την επίλυση Double-Yield σε βάθος 11 m. (Σχήματα 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40)



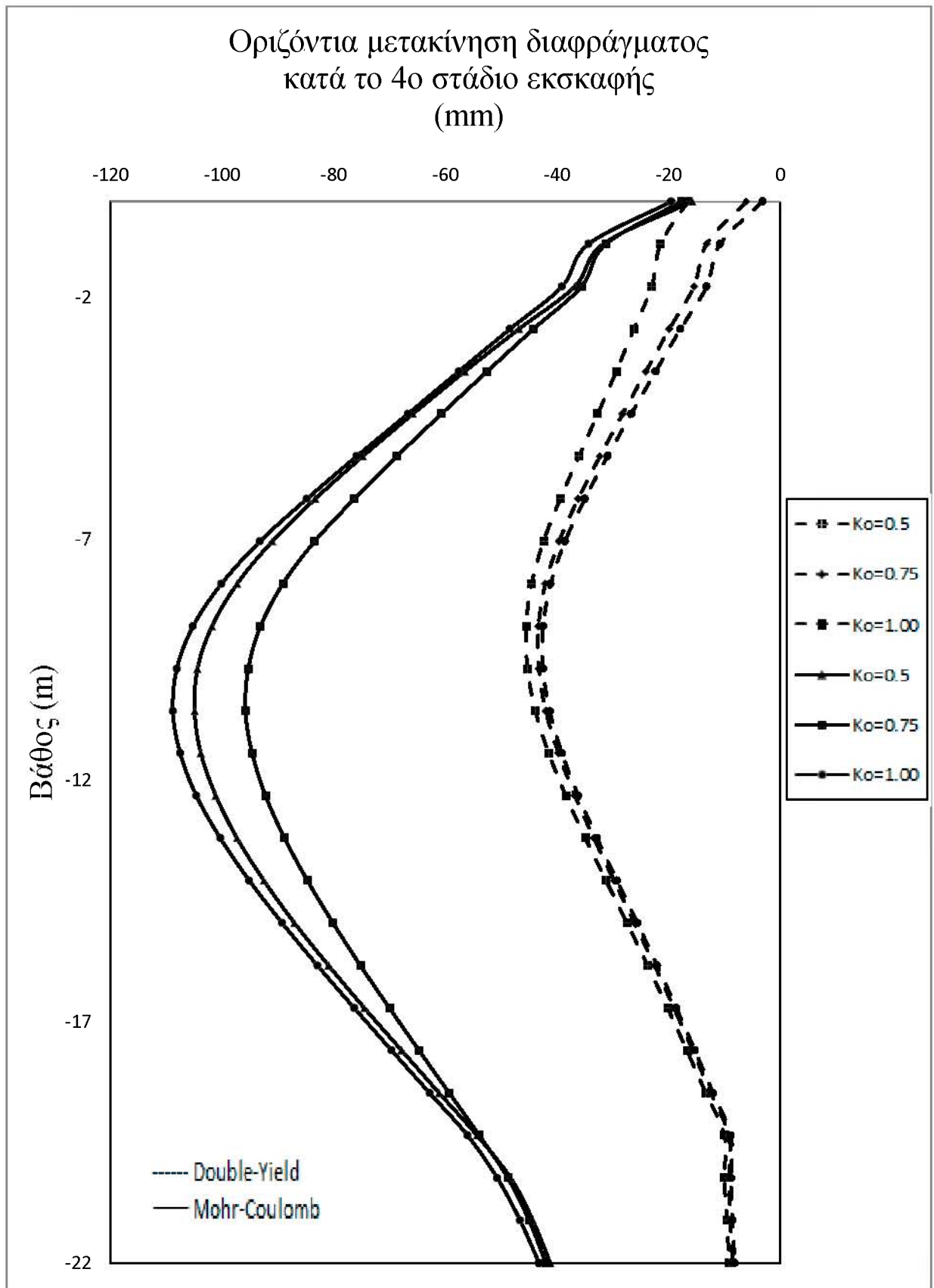
**Σχήμα 4.36** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 1<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



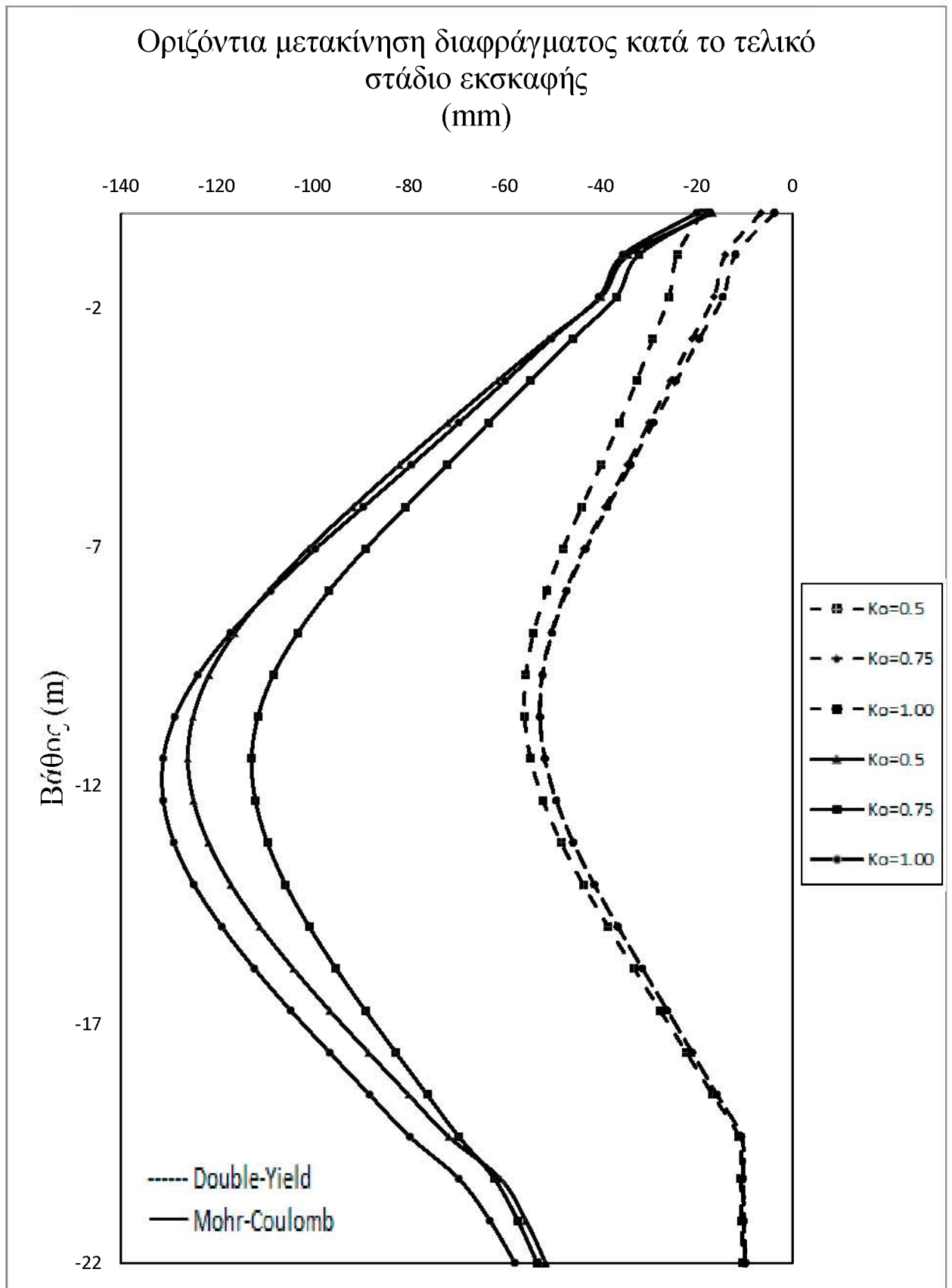
**Σχήμα 4.37** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 2<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.38** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



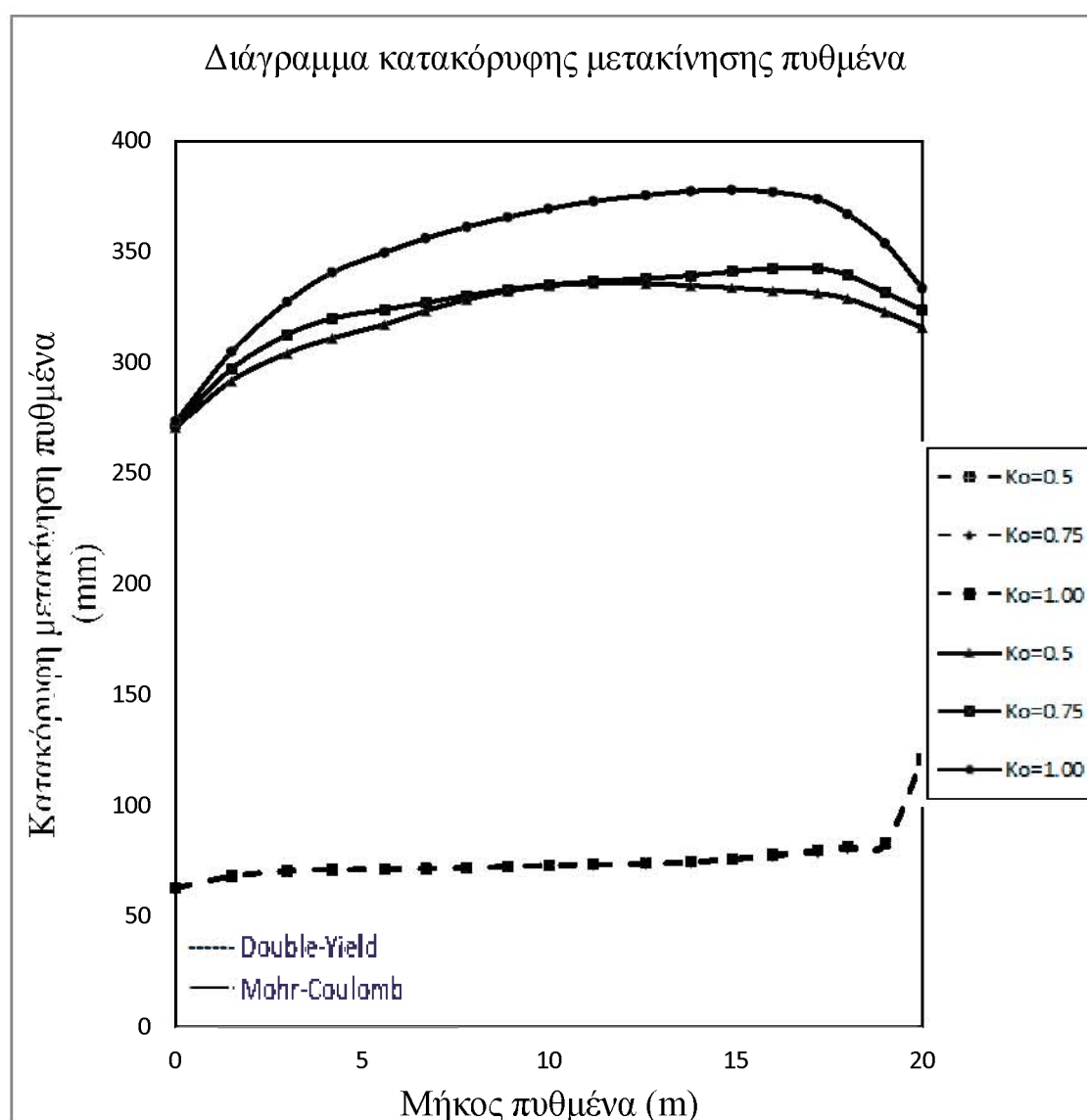
**Σχήμα 4.39** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το 4<sup>ο</sup> στάδιο εκσκαφής



**Σχήμα 4.40** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

➤ Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής

Συγκρίνοντας το διάγραμμα της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Double-Yield για κάθε τιμή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ . Επίσης, παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις με Mohr-Coulomb δείχνουν να επηρεάζονται και από την αλλαγή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  στα μεταξύ τους αποτελέσματα, σε αντίθεση με τις επιλύσεις με Double-Yield όπου οι τιμές για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  είναι ίδιες. Η διαφορά στις τιμές που παρουσιάζουν οι επιλύσεις είναι τις τάξης του 380% στο μέγιστο σημείο και 320% στο ελάχιστο. (Σχήμα 4.41)

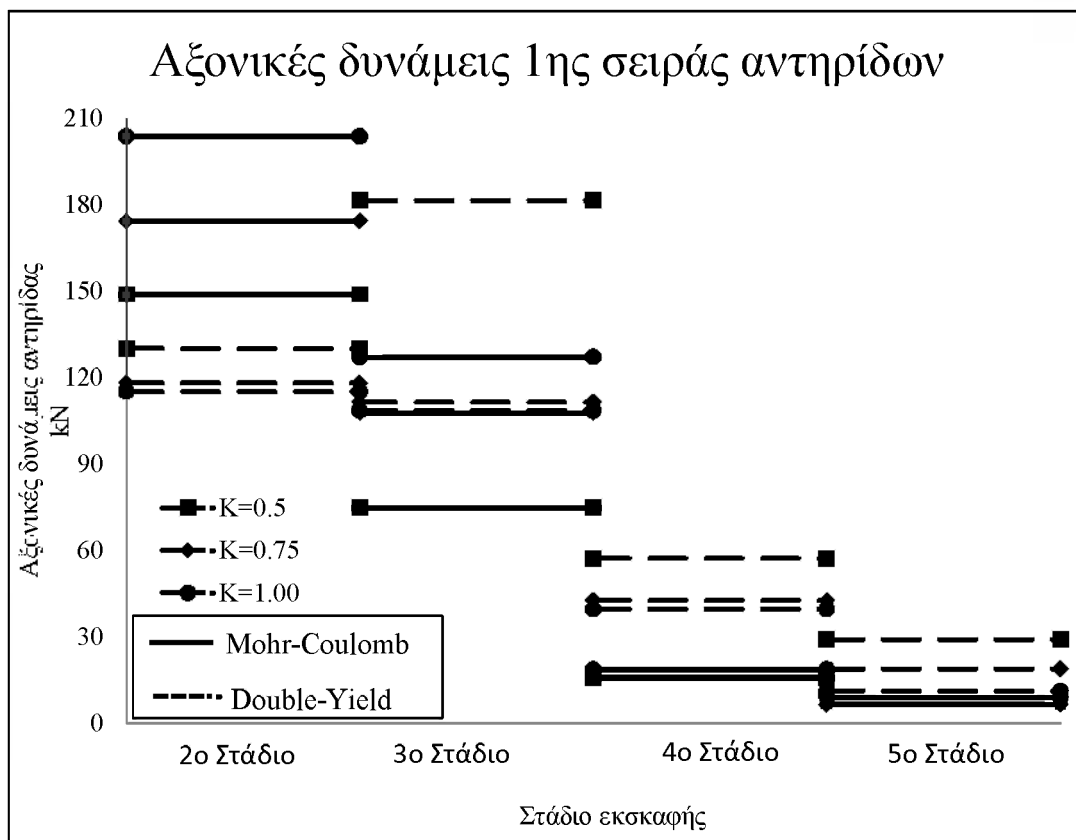


**Σχήμα 4.41** Συγκριτικό διάγραμμα κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield κατά το τελικό στάδιο εκσκαφής

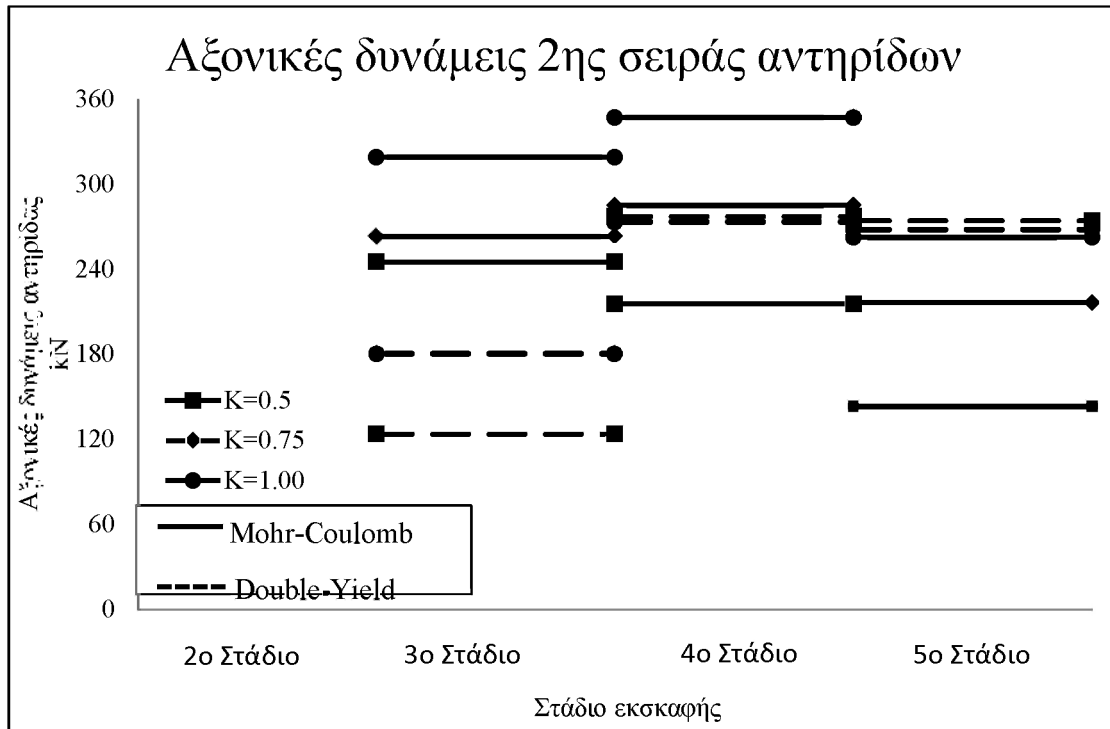


➤ Μεταβολή της αξονικής δύναμης των αντηρίδων

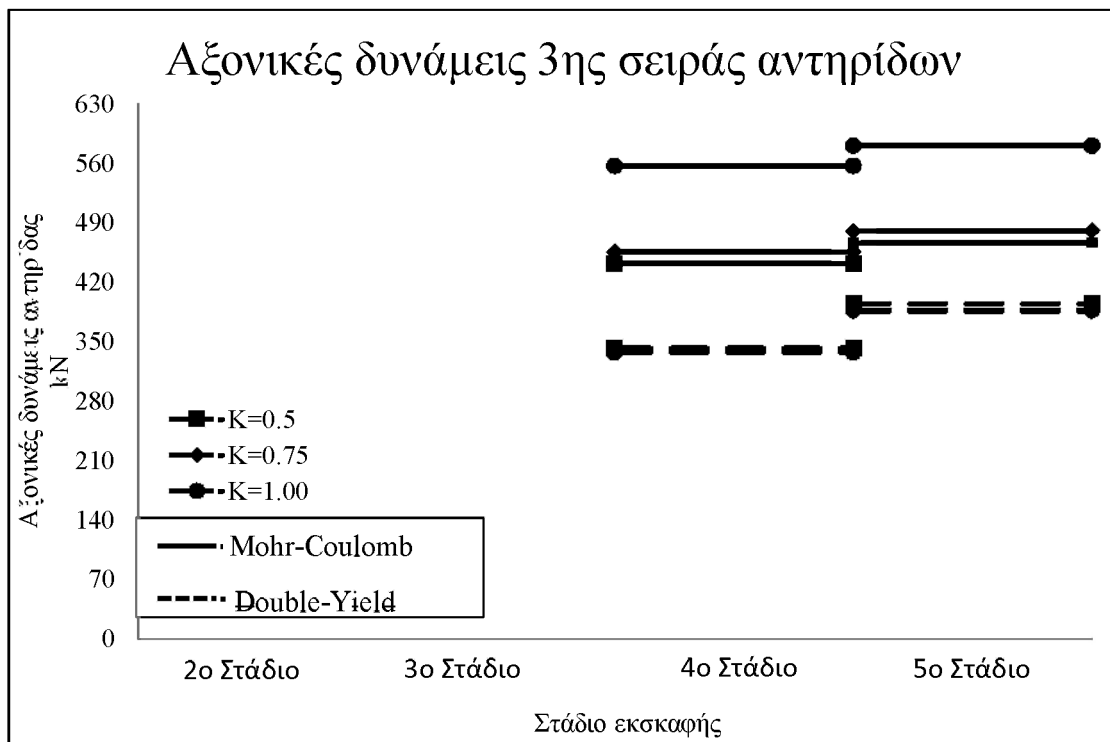
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων των αντηρίδων παρατηρούμε ότι οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του καταστατικού νόμου Double-Yield για κάθε τιμή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ . Η διαφορά που παρατηρούμε ανάμεσα στις τιμές ποικίλει ανάλογα με το βάθος αλλά και την τιμή του  $K_0$ . Σε άλλες περιπτώσεις είναι της τάξης του 200% και σε άλλες περιπτώσεις της τάξης του 2%. Παρατηρούμε ότι για τις δύο πρώτες σειρές αντηρίδων όσο αυξάνεται το βάθος εκσκαφής η αξονική δύναμη μειώνεται αισθητά και μάλιστα σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στις επιλύσεις Mohr-Coulomb απ'ότι στις επιλύσεις Double-Yield και καταλήγει στο τελικό στάδιο να είναι ίση ή μικρότερη. Σε αντίθεση με τις δύο κατώτερες σειρές αντηρίδων όπου στις επιλύσεις Double-Yield φαίνεται να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η αξονική δύναμη όταν μεταβάλλουμε το  $K_0$  σε αντίθεση με τις επιλύσεις Mohr-Coulomb όπου οι τιμές μεταβάλλονται. (Σχήματα 4.42, 4.43, 4.44, 4.45)



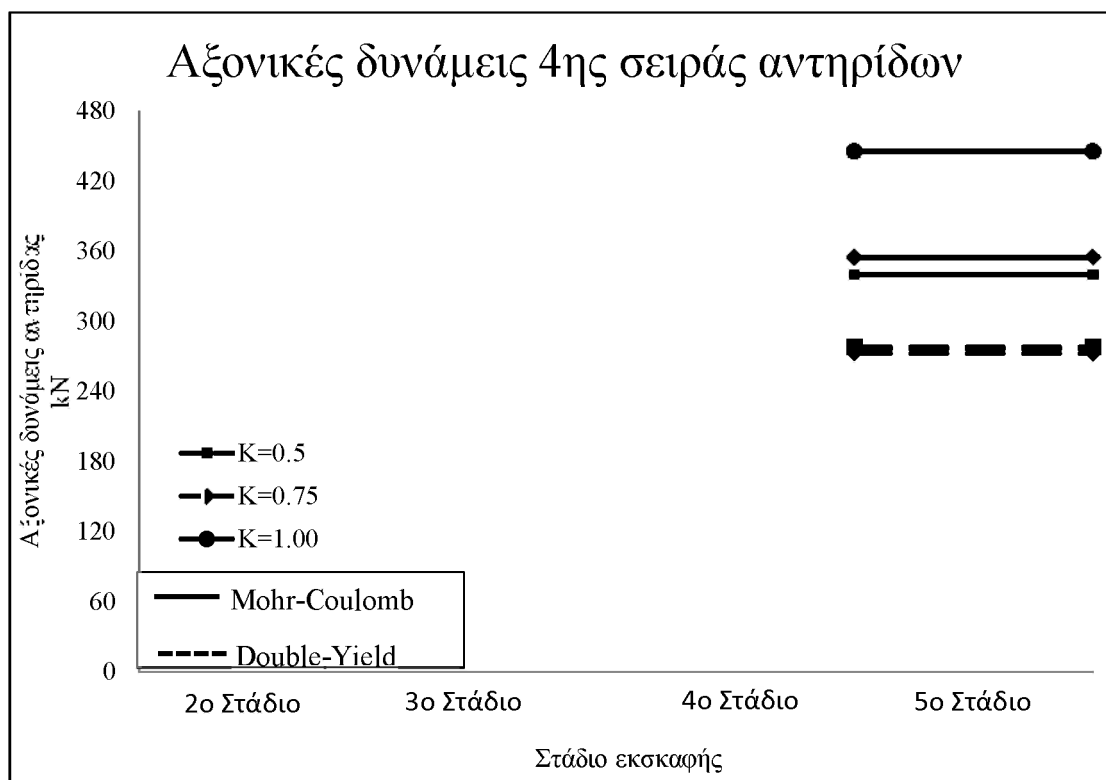
**Σχήμα 4.42** Αξονικές δυνάμεις 1<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.43** Αξονικές δυνάμεις 2<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.44** Αξονικές δυνάμεις 3<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής



**Σχήμα 4.45** Αξονικές δυνάμεις 4<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield σε όλα τα στάδια εκσκαφής

➤ Οριζόντια μετακίνηση και κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής

Συγκρίνοντας τις τιμές της οριζόντιας μετακίνησης της όμορης οικοδομής παρατηρούμε ότι οι τιμές για τις επιλύσεις με καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των επιλύσεων με καταστατικό νόμο Double-Yield εκτός των επιλύσεων για  $K_0=0.5$  ενώ παρουσιάζεται μεταβολή ακόμη και ως προς την κατεύθυνση της μετακίνησης. Σε όλες τις επιλύσεις Double-Yield είχαν κατεύθυνση προς τα αριστερά ενώ στις επιλύσεις Mohr-Coulomb για  $K_0=0.5$  είχαν κατεύθυνση προς τα αριστερά ενώ για τις υπόλοιπες δύο επιλύσεις είχαν κατεύθυνση προς τα δεξιά.

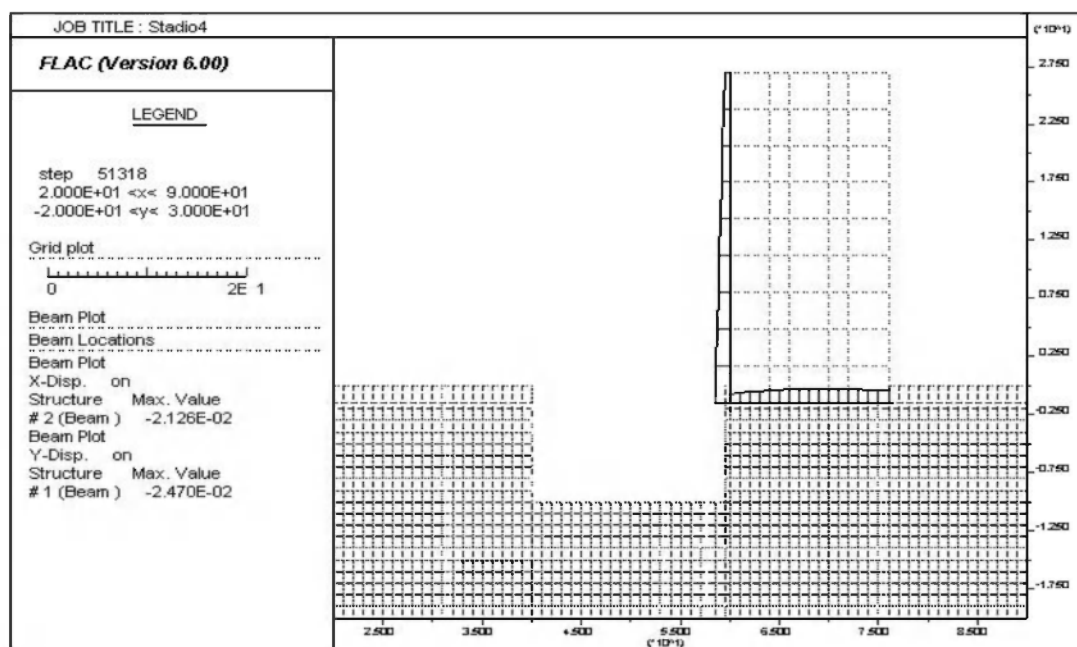
	$K_0=0.5$		$K_0=0.75$		$K_0=1.00$	
	Mohr	DY	Mohr	DY	Mohr	DY
<b>Στάδιο 1</b>	-4,45 mm	-11 mm	31,9 mm	-9 mm	30,4 mm	-9 mm
<b>Στάδιο 2</b>	-13,7 mm	-15,9 mm	75,6 mm	-13,2 mm	69,7 mm	-11,5 mm
<b>Στάδιο 3</b>	-17,7 mm	-16,2 mm	97,7 mm	-13,3 mm	93 mm	-12,4 mm
<b>Στάδιο 4</b>	-18,9 mm	-21,3 mm	138 mm	-17 mm	130 mm	-15,2 mm
<b>Στάδιο 5</b>	-15,1 mm	-24,2 mm	165 mm	-18,4 mm	163 mm	-17 mm

**Πίνακας 4.5** Οριζόντια μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield

Συγκρίνοντας τις τιμές της κατακόρυφης μετακίνησης της όμορης οικοδομής παρατηρούμε ότι οι τιμές για τις επιλύσεις με καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των επιλύσεων με καταστατικό νόμο Double-Yield εκτός των επιλύσεων για  $K_0=0.5$  ενώ παρουσιάζεται μεταβολή ακόμη και ως προς την κατεύθυνση της μετακίνησης, σε όλες τις επιλύσεις Double-Yield είχαμε ανύψωση της βάσης ενώ στις επιλύσεις Mohr-Coulomb για  $K_0=0.5$  είχαμε ανύψωση ενώ για τις υπόλοιπες δύο επιλύσεις είχαμε βύθιση της βάσης.

	$K_0=0.5$		$K_0=0.75$		$K_0=1.00$	
	Mohr	DY	Mohr	DY	Mohr	DY
<b>Στάδιο 1</b>	1,22 mm	3 mm	-21,7 mm	2,23 mm	-21,6 mm	2,53 mm
<b>Στάδιο 2</b>	4,77 mm	8,4 mm	-55 mm	7,5 mm	-54,6 mm	7,38 mm
<b>Στάδιο 3</b>	8,53 mm	13,9 mm	-72,8 mm	12,5 mm	-72,5 mm	12,2 mm
<b>Στάδιο 4</b>	16,5 mm	24,7 mm	-99,6 mm	23,1 mm	-96,6 mm	22,6 mm
<b>Στάδιο 5</b>	21,4 mm	33,5 mm	-116 mm	29,9 mm	-115 mm	29,8 mm

**Πίνακας 4.6** Κατακόρυφη μετακίνηση οικοδομής για διάφορες τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  με χρήση καταστατικού νόμου Double-Yield



**Εικόνα 4.3** Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις όμορου κτιρίου, Στάδιο 4

# 5

## Σύνοψη – Γενικά Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια συγκριτική ανάλυση απόκρισης αντιστήριξης με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών καταστατικών νόμων και μεταβάλλοντας ταυτόχρονα το συντελεστή ωθήσεων σε κατάσταση ηρεμίας  $K_0$ .

Το υπό μελέτη πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC v6.0 σε 2D προσέγγιση. Η επίλυση έγινε με χρήση των καταστατικών νόμων Mohr-Coulomb και Double-Yield με τιμές του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  0.5, 0.75 και 1.00. Μελετήθηκε συγκεκριμένα η απόκριση των αντηρίδων και του δεξιού διαφραγματικού τοίχου ο οποίος συνορεύει με ήδη υπάρχουσα οικοδομή της οποίας μελετήθηκαν τα κινηματικά της χαρακτηριστικά.

Η βασική πορεία επίλυσης του προβλήματος περιγράφεται μέσω των επιμέρους σταδίων κατασκευής του σύνθετου έργου αντιστήριξης, τα οποία εξάλλου συνάδουν με την πραγματικότητα:

Στάδιο 1: Ορισμός κανάβου και εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου

Στάδιο 2: Εισαγωγή της όμορης οικοδομής

Στάδιο 3: Εισαγωγή του διαφραγματικού τοίχου

Στάδιο 4: Πραγματοποίηση του 1<sup>ου</sup> σταδίου εκσκαφής μέχρι το επίπεδο των 2m

Στάδιο 5: Τοποθέτηση πρώτης αντηρίδας σε βάθος 1.8m και εκσκαφή μέχρι βάθος 5m

Στάδιο 6: Τοποθέτηση δεύτερης αντηρίδας σε βάθος 4.3m και εκσκαφή μέχρι βάθος 7m

Στάδιο 7: Τοποθέτηση τρίτης αντηρίδας σε βάθος 6.5m και εκσκαφή μέχρι βάθος 10m

Στάδιο 8: Τοποθέτηση τέταρτης αντηρίδας σε βάθος 9.5m και εκσκαφή μέχρι το τελικό επίπεδο των 12m.

Οι καταστατικοί νόμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους στο πρόβλημα της πολυσταδιακής εκσκαφής είναι τα Mohr-Coulomb και Double-Yield, τα οποία αναλύονται στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

Στο υπό μελέτη πρόβλημα συμμετέχουν τόσο ο διαφραγματικός τοίχος, όσο και οι τέσσερις σειρές αντηρίδων που χρησιμοποιούνται. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής σε κάθε στάδιο κατασκευής του έργου, μελετώνται τα εξαγόμενα από το λογισμικό αποτελέσματα. Μελετήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- Καμπτική ροπή κατά μήκος του διαφραγματικού τοίχου
- Οριζόντια μετακίνηση διαφραγματικού τοίχου
- Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες
- Κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής
- Μετακίνηση της κορυφής της όμορης με τον διαφραγματικό τοίχο οικοδομής
- Κατακόρυφη μετακίνηση της βάσης της όμορης οικοδομής

Αρχικά παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της αλλαγής του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  για κάθε καταστατικό νόμο ξεχωριστά και στο τέλος γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των καταστατικών νόμων.

### **Συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων**

#### **Καμπτική ροπή διαφραγματικού τοίχου**

Στα στάδια της πρώτης εκσκαφής και της τοποθέτησης της 1<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων οι καμπτικές ροπές του διαφραγματικού τοίχου είναι μικρές, ενώ στα επόμενα στάδια του προβλήματος και μέχρι το τελικό αυξάνονται. Η μέγιστη καμπτική ροπή παρουσιάζεται σε όλες τις περιπτώσεις σε βάθος 14.2m. Οι τιμές που πήραμε από τις επίλυσεις καταδεικνύουν αύξηση με την αύξηση του  $K_0$ . Ανάμεσα στα δύο μοντέλα παρατηρείται μάλιστα ότι η μορφή των διαγραμμάτων δε μεταβάλλεται, παρόλα αυτά όμως το μοντέλο Mohr-Coulomb δίνει σταθερά μεγαλύτερες τιμές από αυτές του μοντέλου Double-Yield σε όλα τα στάδια της εκσκαφής.

#### **Οριζόντια μετακίνηση διαφραγματικού τοίχου**

Στα στάδια της πρώτης εκσκαφής και της τοποθέτησης της 1<sup>ης</sup> σειράς αντηρίδων οι οριζόντιες μετατοπίσεις του διαφραγματικού τοίχου είναι μικρές, ενώ στα επόμενα στάδια του προβλήματος και μέχρι το τελικό αυξάνονται μέχρι τις μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται στο τελικό στάδιο. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση παρουσιάζεται για την επίλυση Double-Yield σε βάθος 11 m ενώ για την επίλυση Mohr-Coulomb σε βάθος 12 m. Οι τιμές που πήραμε για την επίλυση Double-Yield έχουν την τάση να μειώνονται αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  σε αντίθεση με την επίλυση Mohr-Coulomb όπου αρχικά αυξάνοντας το  $K_0$  έχουμε μείωση της οριζόντιας μετακίνησης αλλά στη συνέχεια περαιτέρω αύξηση

του  $K_0$  έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μετακίνησης μέχρι τη μέγιστη τιμή της. Ανάμεσα στα δύο μοντέλα παρατηρείται μεν ότι η μορφή των διαγραμμάτων δε μεταβάλλεται, παρόλα αυτά όμως το μοντέλο Mohr-Coulomb δίνει σταθερά μεγαλύτερες τιμές από αυτές του μοντέλου Double-Yield σε όλα τα στάδια της εκσκαφής.

### **Κατακόρυφη μετακίνηση πυθμένα**

Η κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα της εκσκαφής παρουσιάζει σε όλες τις επιλύσεις την ίδια μορφή. Ξεκινά από μικρότερες τιμές στην αριστερή πλευρά και αυξάνεται πλησιάζοντας τη δεξιά πλευρά της εκσκαφής πράγμα λογικό αφού στην επιφάνεια υπάρχει οικοδομή με αποτέλεσμα οι ωθήσεις να είναι μεγαλύτερες από ότι στην αριστερή πλευρά. Οι τιμές που πήραμε για την επίλυση Double-Yield ήταν ίδιες και για τις τρεις περιπτώσεις επίλυσης ενώ για την επίλυση Mohr-Coulomb αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  έχουμε αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα. Ανάμεσα στα δύο μοντέλα η μορφή δε μεταβάλλεται αλλά παρατηρούμε ότι το μοντέλο Mohr-Coulomb δίνει σταθερά μεγαλύτερες τιμές από αυτές του μοντέλου Double-Yield.

### **Αξονικές δυνάμεις αντηρίδων**

Η αξονική δύναμη που προέκυψε από μία εκσκαφή μειώνεται μετά την τοποθέτηση της επόμενης σειράς αντηρίδων. Από τις τέσσερις σειρές αντηρίδων αυτή που εμφανίζει τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη είναι η τρίτη σειρά σε βάθος 6.5 m. Οι τιμές που πήραμε για την επίλυση Double-Yield έχουν την τάση αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  να μειώνεται η αξονική δύναμη στις δύο πρώτες σειρές αντηρίδων ενώ στις δύο κατώτερες σειρές αυξάνοντας το  $K_0$  δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή της αξονικής δύναμης. Για την επίλυση Mohr-Coulomb παρατηρούμε πως αυξάνοντας το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  αυξάνεται η αξονική δύναμη σε όλες τις σειρές των αντηρίδων. Ανάμεσα στα δύο μοντέλα παρατηρούμε ότι για τις δύο πρώτες σειρές αντηρίδων για μικρή τιμή του  $K_0$  οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά ενώ όσο αυξάνεται το  $K_0$  παρατηρούμε μία σύγκλιση των τιμών. Σε αντίθεση με τις δύο κατώτερες σειρές αντηρίδων όπου αρχικά για μικρό  $K_0$  οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν μικρή διαφορά ενώ στη συνέχεια αυξάνοντας το  $K_0$  η διαφορά αυξάνεται αισθητά. Και στα δύο μοντέλα τις μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις παρουσιάζει η 3<sup>η</sup> σειρά αντηρίδων. Τέλος, θα μπορούσαμε να πούμε ότι συγκρίνοντας τα διαγράμματα με αυτά των προηγούμενων μεγεθών παρατηρούμε ότι μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες μετακινήσεις.

### **Οριζόντια μετακίνηση της όμορης οικοδομής**

Η οριζόντια μετακίνηση της όμορης οικοδομής παρουσιάζει έως και 110% μεγαλύτερες τιμές για την επίλυση Mohr-Coulomb από την επίλυση Double-Yield. Λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα της οριζόντιας μετακίνησης του διαφραγματικού τοίχου συμπεραίνουμε ότι συνδέονται άμεσα τα δύο αυτά μεγέθη

αφού στις περιπτώσεις που είχαμε μεγάλη μετακίνηση του τοίχου παρουσιάστηκαν και μεγάλες μετατοπίσεις στην όμορη κατασκευή. Επίσης, και για τα δύο μοντέλα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  τόσο λιγότερο επηρεάζεται η οριζόντια μετακίνηση αφού αρχικά από  $K_0 = 0.5$  σε  $K_0 = 0.75$  είχαμε μεγάλη μεταβολή της μετακίνησης ενώ από  $K_0 = 0.75$  σε  $K_0 = 1.00$  είχαμε συγκριτικά πολύ μικρότερη μεταβολή. Τέλος, φαίνεται ότι η μεταβολή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  επηρεάζει στο μοντέλο Mohr-Coulomb την κατεύθυνση της μετακίνησης, αφού αυτή μεταβαλλόταν όταν μεταβαλλόταν το  $K_0$ , ενώ στο μοντέλο Double-Yield η κατεύθυνση της μετακίνησης δεν άλλαξε σε καμία αλλαγή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ .

### Κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής

Η κατακόρυφη μετακίνηση της όμορης οικοδομής παρουσιάζει έως και 125% μεγαλύτερες τιμές για την επίλυση Mohr-Coulomb από την επίλυση Double-Yield. Και για τα δύο μοντέλα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  τόσο λιγότερο επηρεάζεται η οριζόντια μετακίνηση αφού αρχικά από  $K_0 = 0.5$  σε  $K_0 = 0.75$  είχαμε μεγάλη μεταβολή της μετακίνησης ενώ από  $K_0 = 0.75$  σε  $K_0 = 1.00$  είχαμε συγκριτικά πολύ μικρότερη μεταβολή. Τέλος, φαίνεται ότι η μεταβολή του  $K_0$  επηρεάζει στο μοντέλο Mohr-Coulomb την κατεύθυνση της μετακίνησης, αφού αυτή μεταβαλλόταν όταν μεταβαλλόταν το  $K_0$ , ενώ στο μοντέλο Double-Yield η κατεύθυνση της μετακίνησης δεν άλλαξε σε καμία αλλαγή του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$ .

Συνολικά παρατηρείται πως οι επιλύσεις που έγιναν με χρήση του καταστατικού νόμου Double-Yield έδωσαν αρκετά μικρότερες τιμές όσον αφορά τα κινηματικά μεγέθη του συστήματος αλλά και τα εντατικά μεγέθη του διαφραγματικού τοίχου σε σχέση με τις επιλύσεις που έγιναν με χρήση του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο Mohr-Coulomb είναι πιο ευαίσθητο όταν μεταβάλλουμε το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  σε σχέση με το μοντέλο Double-Yield αφού παρατηρήσαμε στα περισσότερα μεγέθη που μελετήσαμε ότι οι μεταβολές όταν αλλάζαμε το συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας  $K_0$  ήταν αρκετά μεγαλύτερες στις επιλύσεις Mohr-Coulomb ενώ σε ορισμένα μεγέθη (π.χ. μετακίνηση πυθμένα) δεν παρουσιάστηκαν καθόλου μεταβολές για τις επιλύσεις Double-Yield.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εγχειρίδιο, FLAC Version 6.0, Itasca (2008)
2. Κωμοδρόμος Α. (2009) ‘Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική’, εκδόσεις Κλειδάριθμος
3. Κωμοδρόμος Α. (2011) ‘Αριθμητικές Μέθοδοι: Αλληλεπίδραση Εδάφους – Κατασκευών’, Διαφάνειες διαλέξεων
4. Κωμοδρόμος Α. (2009) ‘Βαθιές Θεμελιώσεις Αντιστηρίξεις’, εκδόσεις Κλειδάριθμος
5. Ζερβογιάννης Χ. (2008) ‘Έργα Αντιστήριξης’, διαφάνειες διαλέξεων
6. Καββαδάς Μ. (2006) ‘Στοιχεία Εδαφομηχανικής’
7. Αθανασόπουλος Γ. (2005) ‘Συνοπτική Θεωρία και Προβλήματα Εδαφομηχανικής’
8. Κιτσάκης Κ. (2011) ‘Διερεύνηση Κατανομών Ωθήσεων Γαιών σε Πολλαπλά Αγκυρωμένα Εύκαμπτα Πετάσματα’, Μεταπτυχιακή εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών: ‘Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών’
9. Αγγελοπούλου Σ. (2009) ‘Πειραματική και Υπολογιστική Έρευνα των Εντατικών Καταστάσεων και Μηχανισμών Παραμόρφωσης – Αστοχίας Υπογείων Ανοιγμάτων σε Αδύναμα Υλικά’, Διδακτορική διατριβή
10. Γιαννόπουλος Π. (2011) ‘Διαφραγματικοί Τοίχοι’, διαφάνειες διαλέξεων