



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΛΟΓΩ  
ΑΒΑΘΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

**ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ**

**Επιβλέπων καθηγητής: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ**

**Αναπληρωτής καθηγητής σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Ιούλιος 2013**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Βασίλη Παπαδόπουλο για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

## Περίληψη

Η κατασκευή σήραγγας συνοδεύεται αναπόφευκτα από εδαφικές μετακινήσεις. Όταν η κατασκευή γίνεται σε αστικό περιβάλλον, οι μετακινήσεις αυτές επηρεάζουν τη θεμελίωση υπερκείμενων κατασκευών και είναι πιθανό να επηρεάσουν την αισθητική, τη λειτουργικότητα και τη στατική επάρκειά τους. Επομένως, είναι αναγκαίο να γίνει στα πλαίσια του σχεδιασμού της σήραγγας η εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας για τις ανωδομές. Κρίσιμοι παράγοντες επιρροής των εδαφικών μετακινήσεων που οφείλονται στη διάνοιξη σήραγγας αποτελούν οι εδαφικές συνθήκες και η κατασκευαστική διαδικασία.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων διερευνάται η επίδραση ορισμένων παραμέτρων των εδαφικών συνθηκών και της κατασκευαστικής διαδικασίας (λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου, βαθμός αποτόνωσης, συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων, μέτρο ελαστικότητας, συνοχή εδάφους και πάχος επένδυσης σήραγγας) στη δημιουργία των επιφανειακών καθιζήσεων. Επίσης, μελετάται η κατανομή των καθιζήσεων επιφάνειας σε εγκάρσια και σε διαμήκη τομή του άξονα της σήραγγας, αλλά και η επιρροή του πάχους της επένδυσης στις προαναφερθείσες κατανομές.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι για διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο TBM, κρίσιμοι παράγοντες επιρροής των επιφανειακών καθιζήσεων είναι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων του εδάφους και ο λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου της διατομής, ενώ μικρότερη είναι η επιρροή του πάχους της επένδυσης. Για διάνοιξη με τη μέθοδο NATM, αυξημένη είναι η συμβολή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων, του βαθμού αποτόνωσης τάσεων και του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους, ενώ μικρότερη είναι η συμβολή της συνοχής του εδάφους. Τέλος, διαπιστώθηκε η επίδραση του πάχους επένδυσης στις μέγιστες τιμές των κατανομών των επιφανειακών καθιζήσεων.

## Abstract

The tunnel construction is inevitably accompanied by ground movements. When construction takes place in urban areas, these movements influence the foundation of neighboring structures and is likely to affect their aesthetics, functionality and static balance. Therefore, it is necessary, during the design process, to assess the degree of risk for the structures. Critical factors that influence soil movements due to tunnelling are soil conditions and the construction process.

In this work, is used the finite elements method to investigate the influence of some parameters of soil conditions and the construction process (contraction, deconfinement ratio, coefficient of horizontal earth pressure at rest, elastic modulus, cohesion and thickness) causing surface settlements. Also the distribution of surface settlements in cross and longitudinal section of the tunnel axis and the influence of the thickness of the tunnel lining is studied.

The results showed, that while tunnelling with TBM method, critical factors of surface settlement are coefficient of horizontal earth pressure at rest and contraction, while the influence of the thickness of the tunnel lining is lesser. For NATM, critical factors of surface settlement are coefficient of horizontal earth pressure at rest, deconfinement ratio and elastic modulus, while the effect of cohesion is lesser. Finally, it was found that the thickness of the tunnel lining influence the maximum values of the distribution of surface settlements.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Κατάλογος σχημάτων.....	6
Κατάλογος πινάκων.....	10
Κεφάλαιο 1 Ανάπτυξη καθιζήσεων επιφάνειας λόγω αβαθών σηράγγων και απόκριση κατασκευών.....	11
1.1. Αίτια απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής....	11
1.2. Εμπειρικές εκτιμήσεις των εδαφικών μετακινήσεων.....	14
1.3. Απόκριση κατασκευών.....	21
Κεφάλαιο 2 Διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάνοιξη με T.B.M...38	
2.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και χαρακτηριστικά προσομοίωσης.....	38
2.2. Παραμετρικές αναλύσεις.....	42
2.2.1. Επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων.....	43
2.2.2. Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.....	49
2.2.3. Επιρροή της συνοχής του εδάφους.....	50
2.2.4. Επιρροή του πάχους της επένδυσης.....	51
Κεφάλαιο 3 Διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάνοιξη με NATM...53	
3.1. Χαρακτηριστικά προσομοίωσης.....	53
3.2. Παραμετρικές αναλύσεις.....	55
3.2.1. Επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων.....	56
3.2.2. Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.....	60
3.2.3. Επιρροή της συνοχής του εδάφους.....	61
Κεφάλαιο 4 Τριδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις.....	62
4.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και χαρακτηριστικά προσομοίωσης.....	62
4.2. Ανάλυση με πάχος επένδυσης 15 cm.....	67
4.3. Ανάλυση με πάχος επένδυσης 40 cm.....	71
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	75

5.1. Συμπεράσματα διδιάστατων αναλύσεων.....	75
5.2. Συμπεράσματα τριδιάστατων αναλύσεων.....	76
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	77

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1.: Προσδιορισμός της παραμέτρου GAP.....	13
Σχήμα 1.2.: Κατανομή της επιφανειακής καθίζησης σε εγκάρσια τομή.....	15
Σχήμα 1.3.: Προσδιορισμός της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου $V_s$ (%)..	16
Σχήμα 1.4.: Εγκάρσια κατανομή καθιζήσεων, οριζόντιων μετακινήσεων και παραμορφώσεων της επιφάνειας.....	18
Σχήμα 1.5.: Εκτίμηση των σχετικών μεγεθών των εδαφικών απωλειών της διατομής ( $V_t$ ) και της επιφάνειας του εδάφους ( $V_s$ ) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης.....	19
Σχήμα 1.6.: Προσδιορισμός μετακινήσεων θεμελίωσης.....	22
Σχήμα 1.7.: Παραμόρφωση ισοδύναμης δοκού σε συνθήκες κάμψης και κύρτωσης.....	26
Σχήμα 1.8.: Ρηγμάτωση της ισοδύναμης δοκού.....	27
Σχήμα 1.9.: Επιρροή της οριζόντιας παραμόρφωσης στο λόγο $\Delta/L_{lim}$ .....	29
Σχήμα 1.10.: Κατηγορία βλαβών συναρτήσει $\Delta/L$ και $\epsilon_h$ για τιμή του λόγου $L/H=1$ .....	30
Σχήμα 1.11.: Κριτήριο βλαβών των Boscardin και Cording (1989).....	31
Σχήμα 1.12.: Εγκάρσια τομή προσομοιώματος.....	33
Σχήμα 1.13.: Συντελεστές τροποποίησης συναρτήσει των σχετικών δυσκαμψιών.....	34
Σχήμα 2.1.: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ελαστικού-ιδεωδώς πλαστικού υλικού.....	39
Σχήμα 2.2.: Προσομοίωση εδάφους και δακτυλίου υποστήριξης.....	41
Σχήμα 2.3.: Αποτελέσματα επίλυσης: κατακόρυφες μετακινήσεις και μείωση διατομής σήραγγας.....	42
Σχήμα 2.4.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 25 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	43
Σχήμα 2.5.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 50 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	44

Σχήμα 2.6.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 25 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	44
Σχήμα 2.7.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 20 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	45
Σχήμα 2.8.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 30 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων.....	46
Σχήμα 2.9.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 60 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	46
Σχήμα 2.10.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 15 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	47
Σχήμα 2.11.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 30 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων.....	48
Σχήμα 2.12.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 40 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων .....	48
Σχήμα 2.13.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.....	49
Σχήμα 2.14.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.....	50



Σχήμα 2.15.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές του πάχους της επένδυσης και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.....	51
Σχήμα 3.1.: Αποτελέσματα επίλυσης της 1 <sup>ης</sup> φάσης για διάνοιξη με NATM.....	55
Σχήμα 3.2.:Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 25MPa.....	56
Σχήμα 3.3.:Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 50MPa.....	57
Σχήμα 3.4.:Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 100MPa.....	57
Σχήμα 3.5.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 20 kPa.....	58
Σχήμα 3.6.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 30 kPa.....	59
Σχήμα 3.7.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 60 kPa.....	59
Σχήμα 3.8.:Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους για διάνοιξη με NATM και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.....	60
Σχήμα 3.9.: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους για διάνοιξη με NATM και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.....	61

Σχήμα 4.1.: Προσομοίωση τριδιάστατου προβλήματος σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας.....	64
Σχήμα 4.2.: Προοπτική απεικόνιση τριδιάστατου προβλήματος.....	64
Σχήμα 4.3.: Παραμορφωμένη μορφή του προσομοιώματος μετά την επίλυση της φάσης 20 της διάνοιξης.....	66
Σχήμα 4.4.: Κατανομή καθιζήσεων επιφάνειας εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 15 cm.....	67
Σχήμα 4.5.: Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 15cm.....	68
Σχήμα 4.6.:Κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή βάσει των αποτελεσμάτων της τριδιάστατης ανάλυσης και κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων της διατομής ακολουθώντας τον εκθετικό νόμο .....	69
Σχήμα 4.7.: Κατανομή καθιζήσεων επιφάνειας εδάφους σε διαμήκη τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 40 cm.....	70
Σχήμα 4.8.: Κατανομή τελικών καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm.....	71
Σχήμα 4.9.: Κατανομή τελικών οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm.....	73
Σχήμα 4.10.: Κατανομή τελικών καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους σε διαμήκη τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm.....	74

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1.: Κατηγοριοποίηση ορατών βλαβών σε τοίχους και ειδικότερα σε πλινθοδομές, ξύλινες κατασκευές και λιθοδομές από Burland et al (1977).....	23
Πίνακας 1.2.: Σχέση μεταξύ κατηγορίας βλαβών και οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης $\epsilon_{lim}$ σύμφωνα με τους Boscardin και Cording (1989).....	25
Πίνακας 1.3.: Σύνοψη επιτρεπόμενων τιμών της γωνιακής στροφής $\theta$ και του λόγου σχετικής μετατόπισης $\Delta/L$ κατά Tomlinson (1980).....	27
Πίνακας 2.1.: Παράμετροι εδαφικού καταστατικού προσομοιώματος.....	40
Πίνακας 2.2.: Παράμετροι υπό εξέταση.....	42
Πίνακας 3.1.: Εδαφικά χαρακτηριστικά.....	53
Πίνακας 3.2.: Χαρακτηριστικά σήραγγας.....	53
Πίνακας 3.3.: Παράμετροι υπό εξέταση.....	55
Πίνακας 4.1.: Τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις επιφάνειας του εδάφους και στέψης της σήραγγας στη διατομή παρακολούθησης για πάχη της επένδυσης 15 και 40 cm.....	72

# 1. Ανάπτυξη καθιζήσεων επιφάνειας λόγω αβαθών σηράγγων και απόκριση κατασκευών

## 1.1. Αίτια απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής

Η διάνοιξη υπόγειου ανοίγματος δημιουργεί διατάραξη του εδάφους και κατά συνέπεια παραμορφώσεις και ανακατανομή των τάσεων περιμετρικά της εκσκαφής. Η διατάραξη αυτή εκφράζεται με χαλάρωση του εδάφους περιμετρικά του υπόγειου ανοίγματος και απώλεια εδαφικού όγκου, η οποία είναι δυνατόν να περιοριστεί σε κάποιο βαθμό με την τοποθέτηση υποστήριξης. Με τον όρο “απώλεια εδαφικού όγκου” εννοούμε τη μείωση της αρχικής διατομής της σήραγγας, η οποία οφείλεται στην αποτόνωση των τάσεων που ασκούνται γύρω από το άνοιγμα. Έτσι, ορίζεται η **σχετική απώλεια όγκου διατομής (contraction)  $V_t$**  (%) ως ο λόγος του εμβαδού της τελικής διατομής της σήραγγας προς το εμβαδό της αρχικής διατομής. Αρκετοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με την εκτίμηση της εδαφικής απώλειας κάνοντας μετρήσεις σε υπό κατασκευή σήραγγες και αναπτύσσοντας εμπειρικές μεθόδους για τον προσδιορισμό της.

Οι Oteo και Sagasetta τονίζουν τη δυσκολία που υπάρχει στη μέτρηση της εδαφικής απώλειας σε υπό κατασκευή σήραγγες, καθώς ένα μεγάλο μέρος της μετακίνησης συμβαίνει μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας. Επομένως, οι μετρητές πρέπει να εισέλθουν στο έδαφος από την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, η εγκατάστασή των μετρητών πρέπει να γίνει κοντά στην περιφέρεια της σήραγγας με αποτέλεσμα την καταστροφή τους κατά την εκσκαφή. Έτσι, οι περισσότερες μετρήσεις για την απώλεια εδάφους γίνονται στην επιφάνεια και όχι περιμετρικά της σήραγγας.

Σύμφωνα με τον Burland (2001), οι μετακινήσεις του εδάφους γύρω από εκσκαφές είναι κρίσιμα εξαρτώμενες όσον αφορά τις εδαφικές συνθήκες από

- τη στρωματογραφία του εδάφους
- τις συνθήκες που επικρατούν σε σχέση με την υπόγεια ροή
- την αντοχή του εδάφους

- την παραμορφωσιμότητα του εδάφους και όσον αφορά τη μέθοδο εκσκαφής από
- την ακολουθία των διαδικασιών εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας
- την ακαμψία της υποστήριξης

Επιπλέον, είναι σημαντικό η διάνοιξη της σήραγγας να γίνει υπό αυστηρή επιτήρηση έμπειρου μηχανικού.

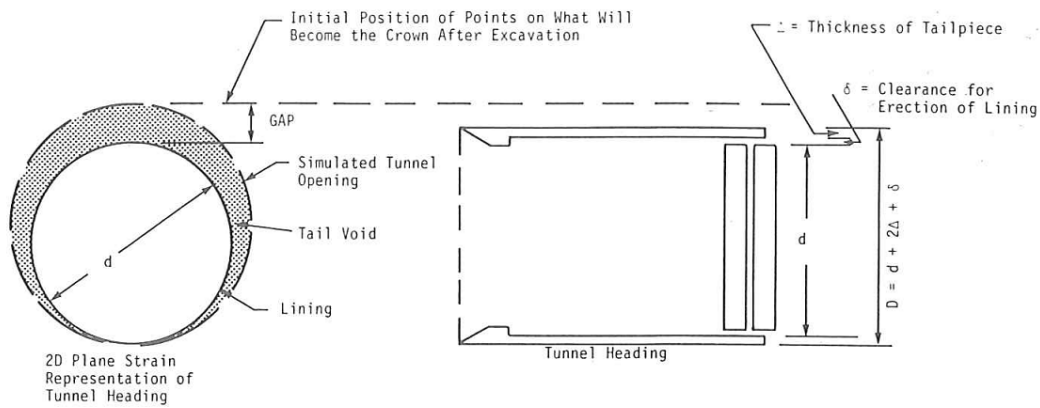
Η εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων περιμετρικά του ανοίγματος και στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της διάνοιξης σήραγγας μπορεί να βασιστεί σε δεδομένα από:

- αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Methods)
- εργαστηριακές αναλύσεις
- παρατηρήσεις σε κατασκευασμένες σήραγγες

Μία σχετικά πρόσφατη εκτίμηση της εδαφικής απώλειας περιμετρικά της εκσκαφής έγινε από τον Lee (1992), ο οποίος αξιοποίησε τα αποτελέσματα από ελαστοπλαστικές αναλύσεις σε τριδιάστατα προσομοιώματα με πεπερασμένα στοιχεία (Lee και Rowe-1990) και έχει συνοψίσει τα αίτια εδαφικής απώλειας σε συνεκτικά εδάφη στα εξής:

- 1) στη διαφορά μεταξύ των διαμέτρων του μηχανήματος κοπής και της επένδυσης
- 2) στις τριδιάστατες μετακινήσεις του εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας
- 3) στη δυσκολία ευθυγράμμισης της ασπίδας από το χειριστή του μηχανήματος

Έτσι, παρουσίασε την παράμετρο “gap” για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση των παραπάνω παραγόντων. Η παράμετρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διδιάστατες αναλύσεις και να απεικονιστεί από την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής της επένδυσης της σήραγγας και του σημείου του εδάφους, το οποίο τελικά θα γίνει η στέψη της εκσκαφείσης περιοχής.



**Σχήμα 1.1.:** Προσδιορισμός της παραμέτρου GAP

$$GAP = G_p + u^*_{3D} + \omega$$

όπου  $G_p$  : φυσικό διάκενο (συνήθως η διαφορά μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου του μηχανήματος κοπής και της εξωτερικής διαμέτρου της επένδυσης για κυκλική σήραγγα)

$u^*_{3D}$  : τριδιάστατη ελαστοπλαστική παραμόρφωση

$$u^*_{3D} \leq 0,5 \delta_x$$

$\delta_x$  : μετακίνηση του μετώπου =  $\Omega a P_0 / E$

$$P_0 = K_0' P_v' + P_w - P_i$$

$\Omega$  : αδιάστατος παράγοντας μετακίνησης συναρτήσει

$$\text{του } N = \frac{(\gamma * H - P_i)}{Cu}$$

a: ακτίνα σήραγγας

E: μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

$K_0'$ : συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων

$P_v'$ ,  $P_w$ : κατακόρυφη γεωστατική τάση και πιέσεις πόρων στο βάθος του άξονα της σήραγγας

$P_i$ : πίεση υποστήριξης

$\gamma$ ,  $C_u$  : ειδικό βάρος και αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδάφους

H: βάθος άξονα σήραγγας

$\omega$  : ανθρώπινος παράγοντας

## 1.2. Εμπειρικές εκτιμήσεις των εδαφικών μετακινήσεων

Η απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά του ανοίγματος συνεπάγεται παραμορφώσεις του εδάφους που μεταφέρονται σταδιακά μέχρι την επιφάνεια. Αν η εκσκαφή γίνεται σε κατοικημένη περιοχή, οι μετακινήσεις και παραμορφώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια ανάλογα με το μέγεθός τους, είναι ικανές να προκαλέσουν αμελητέα έως σοβαρά προβλήματα σε υπερκείμενες κατασκευές. Επομένως, είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του τρόπου διάνοιξης και της απαιτούμενης υποστήριξης, η προεκτίμηση των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας. Παρακάτω παρουσιάζονται μέθοδοι εκτίμησης των μετακινήσεων που έχουν επικρατήσει. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούν εμπειρικές προσεγγίσεις.

### A. Εμπειρική κατανομή καθιζήσεων επιφάνειας σε εγκάρσια τομή

Για τον καθορισμό των καθιζήσεων, είναι ευρέως αποδεκτή η εμπειρική προσέγγιση που έχει ερευνηθεί από τους Schmidt (1969), Attewell (1978) και Attewell και Woodman (1982), σύμφωνα με την οποία η εγκάρσια κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων έχει τη μορφή της καμπύλης Gauss και ακολουθεί τον εκθετικό νόμο :

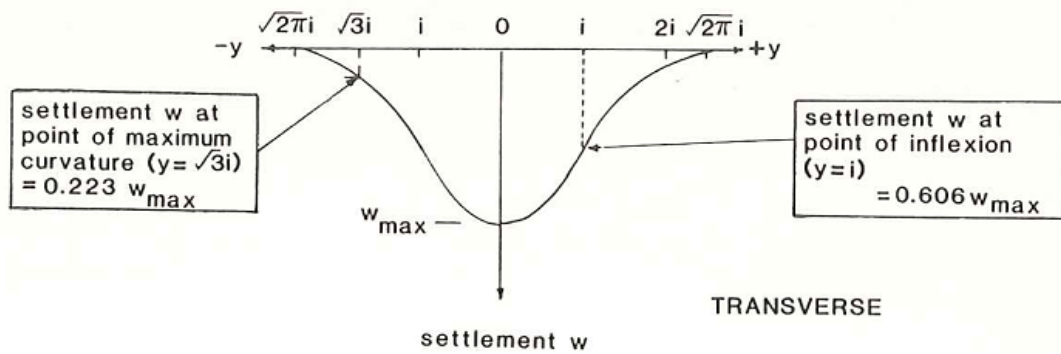
$$s = s_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)$$

όπου  $s$ : η επιφανειακή καθίζηση σε οριζόντια απόσταση  $y$  από τον άξονα της σήραγγας

$s_{\max}$ : η μέγιστη καθίζηση της διατομής (που εμφανίζεται στον άξονα της σήραγγας)

$y$ : η απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

$i$ : το σημείο καμπής της κατανομής



**Σχήμα 1.2.:** Κατανομή της επιφανειακής καθίζησης σε εγκάρσια τομή

Σύμφωνα με τους Attewell, Yeates και Selby (1986), εμπειρικά έχει αποδειχτεί ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει εφαρμογή για πολλά εδάφη και για κάθε μέθοδο διάνοιξης. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να μην είναι επαρκής σε περιπτώσεις διάνοιξης σε κοκκώδη εδάφη σε συνδυασμό με λάθη στο χειρισμό του μηχανήματος διάνοιξης.

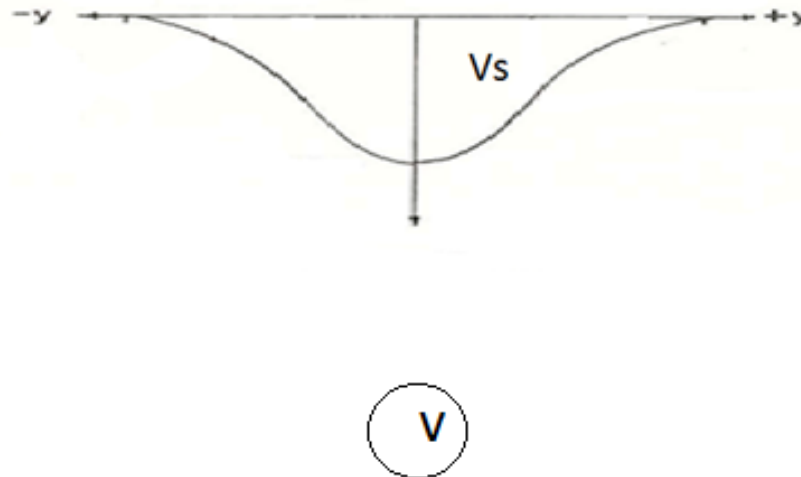
Η παραπάνω προσέγγιση ισχύει για διατομές μακριά από το μέτωπο της σήραγγας, όπου θεωρούμε ότι έχουν διαμορφωθεί οι τελικές παραμορφώσεις του εδάφους.

Ο όγκος εδαφικής απώλειας στην επιφάνεια του εδάφους ανά μονάδα μήκους της σήραγγας υποθέτοντας κατανομή Gauss δίνεται από τη σχέση:

$$Vs = \int_{-\infty}^{+\infty} s \, dy = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \, dy = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot s_{\max}$$



Επίσης, ορίζεται η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (της επιφάνειας του εδάφους)  $V_s$  (%) ως ο λόγος του εμβαδού εδαφικής απώλειας στην επιφάνεια του εδάφους ( $V_s$ ) προς το εμβαδό της αρχικής διατομής της σήραγγας ( $V$ ).



**Σχήμα 1.3.:** Προσδιορισμός της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου  $V_s$  (%)

### Εκτίμηση θέσης σημείου καμπής

Με την εκτίμηση της θέσης του σημείου καμπής έχουν ασχοληθεί αρκετοί μελετητές:

Ο Peck (1969) παρουσίασε τη σχέση:  $i=0,2*(d+z_0)$

όπου  $d$ : διάμετρος σήραγγας

$z_0$ : βάθος άξονα της σήραγγας

Οι Clough και Schmidt (1981) παρουσίασαν τη σχέση:

$$\frac{i}{D} = 0,5 \left(\frac{H}{D}\right)^{0,8}$$

όπου  $D$ : διάμετρος της σήραγγας

$H$ : βάθος άξονα της σήραγγας

Οι Oteo και Sagaseta (1982) λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα από ελαστικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{i}{R} = 1,05 \left( \frac{H}{D} \right) - 0,42$$

Οι O'Reilly και New (1982) μετά από παρατηρήσεις σε πραγματικές εκσκαφές πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις:

$$i = 0,43 * z_0 + 1,1 \quad \text{για συνεκτικά εδάφη} \quad (3 \leq z_0 \leq 34)$$

$$i = 0,28 * z_0 - 0,1 \quad \text{για κοκκώδη εδάφη} \quad (6 \leq z_0 \leq 10)$$

Ο Burland (2001) αναφέρει ότι έχει αποδειχτεί ότι η θέση του σημείου καμπής συνδέεται με το βάθος της σήραγγας  $z_0$  με τη γραμμική σχέση:

$$i = K * z_0$$

και για την παράμετρο  $K$  προτείνει τις εξής τιμές:

0,2-0,3 για τα κοκκώδη εδάφη

0,4-0,5 για σφιχτές αργίλους

0,4-0,7 για μαλακές αργίλους

## **B. Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων επιφάνειας σε εγκάρσια τομή**

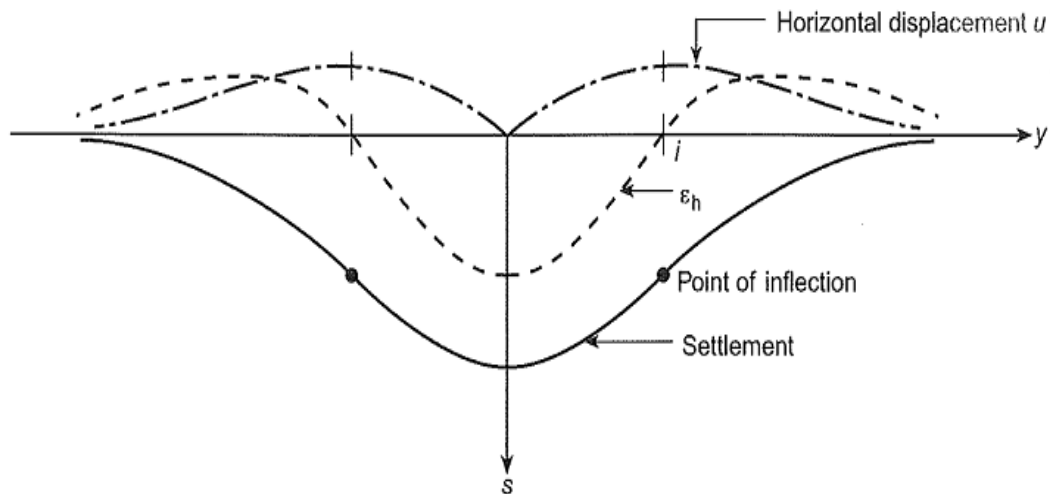
Σύμφωνα με τον Burland (2001), παρόλο που είναι λίγες οι μετρήσεις οριζόντιων μετακινήσεων που έχουν γίνει σε υφιστάμενες σήραγγες, τα δεδομένα που υπάρχουν επιβεβαιώνουν την παραδοχή που έγινε από τους O'Reilly και New (1982), σύμφωνα με την οποία, τα διανύσματα των μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους, έχουν διεύθυνση προς τον άξονα της σήραγγας:

$$u = \frac{s * y}{z_0}$$

όπου  $s$ : καθίζηση επιφάνειας

$y$ : απόσταση από άξονα σήραγγας

$z_0$ : βάθος άξονα σήραγγας



**Σχήμα 1.4.:** Εγκάρσια κατανομή καθιζήσεων, οριζόντιων μετακινήσεων και παραμορφώσεων της επιφάνειας

Όπως φαίνεται στο σχήμα, στην περιοχή  $i > y > -i$ , οι οριζόντιες παραμορφώσεις είναι θλιπτικές, στην περιοχή  $i < y < -i$ , οι οριζόντιες παραμορφώσεις είναι εφελκυστικές, ενώ στα σημεία καμπής, οι οριζόντιες παραμορφώσεις είναι μηδενικές και οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μέγιστες.

## Γ. Παράγοντες επιρροής των εδαφικών μετακινήσεων

Μελετητές κατέγραψαν μετρήσεις εδαφικών μετακινήσεων οφειλόμενες σε σήραγγες που διανοίχτηκαν και κατέληξαν σε εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των μετακινήσεων και συντελεστών που λαμβάνουν υπόψη εδαφικά χαρακτηριστικά και συνθήκες εκσκαφής και υποστήριξης.

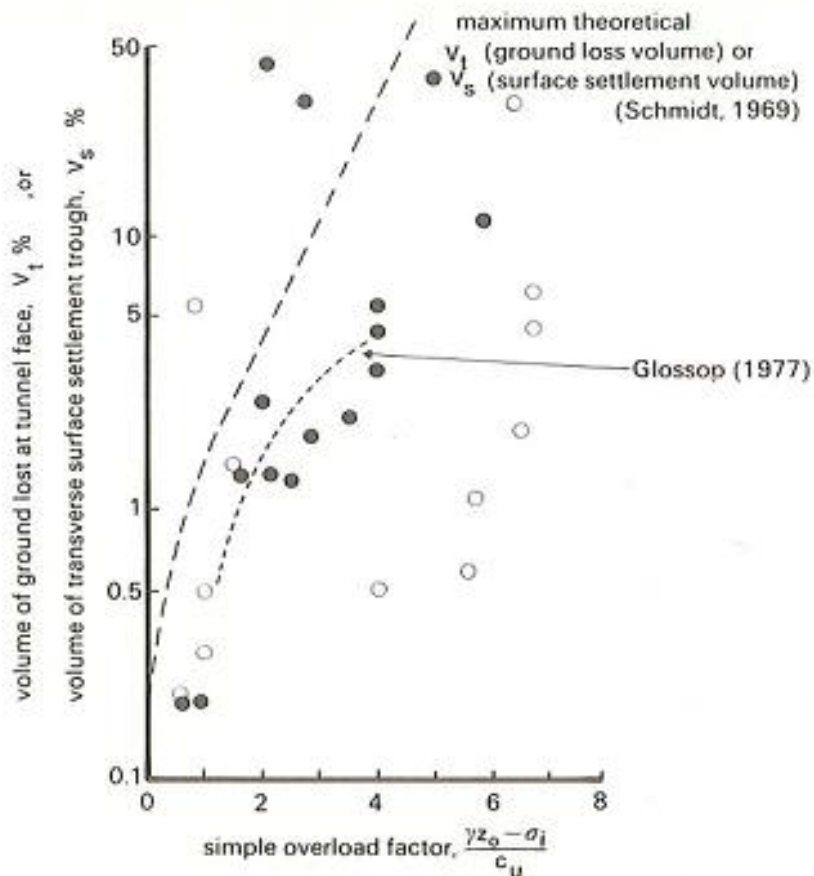
## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗΣ OFS

Οι Attewell, Yeates, Selby (1986), βασιζόμενοι σε μελέτες των Peck (1969) και Schmidt (1974) υποστηρίζουν ότι η εκτίμηση των σχετικών μεγεθών των εδαφικών απωλειών της διατομής ( $V_t$ ) και της επιφάνειας του εδάφους ( $V_s$ ) όσον αφορά τα συνεκτικά εδάφη είναι ικανοποιητική, αν χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor OFS):

$$OFS = \frac{(\gamma * z_0 - \sigma_i)}{c_u}$$

- όπου  $\gamma$ : ειδικό βάρος εδάφους
- $z_0$ : βάθος άξονα της σήραγγας
- $\sigma_i$ : εσωτερική πίεση υποστήριξης
- $C_u$ : αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδάφους

Επίσης, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από μελέτες των Schmidt (1969) και Attewell και Yeates (1984):



**Σχήμα 1.5.:** Εκτίμηση των σχετικών μεγεθών των εδαφικών απωλειών της διατομής ( $V_t$ ) και της επιφάνειας του εδάφους ( $V_s$ ) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης. Οι άσπροι κύκλοι είναι από τα δεδομένα που συνέλεξε ο Schmidt (1969) και οι μαύροι κύκλοι από τα δεδομένα των Attewell και Yeates (1984)

Ο Mitchell (1983) βασιζόμενος σε μελέτες των Peck (1969) και Schmidt (1974) με δεδομένα τις παρατηρήσεις από υφιστάμενες σήραγγες καταλήγει στη σχέση:

$$V_t \approx \frac{C_u}{E_u} \exp\left(\frac{\gamma * z_0 - \sigma_i}{2 C_u}\right)$$

όπου  $E_u$ : το μέτρο ελαστικότητας σε αστράγγιστες συνθήκες

Ο Glossop πρότεινε για την εκτίμηση της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους στα συνεκτικά εδάφη τη σχέση:

$V_s (\%) = 1,33 \cdot (OFS) - 1,4$  για  $1,5 \leq OFS \leq 4$  που είναι συνήθεις τιμές για σήραγγες σε συνεκτικά εδάφη.

## **ΑΠΟΜΕΙΩΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\Psi$**

Οι Sagasetta και Oteo (1974) και Oteo και Moya (1979) πραγματοποίησαν ελαστικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία θεωρώντας σήραγγα χωρίς επένδυση και έδαφος με ελαστική συμπεριφορά και στη συνέχεια εφάρμοσαν στις εδαφικές μετακινήσεις έναν απομειωτικό συντελεστή  $\Psi$ . Ο απομειωτικός συντελεστής  $\Psi$  προσδιορίστηκε βάσει αποτελεσμάτων από παρατηρήσεις σε πραγματικές περιπτώσεις σηράγγων και ποικίλλει ανάλογα με τη δυσκαμψία της επένδυσης, το ρυθμό διάνοιξης, το χρόνο τοποθέτησης της επένδυσης. Για καλές συνθήκες διάνοιξης (υψηλός ρυθμός διάνοιξης, με ασπίδα ή έγκαιρη τοποθέτηση της επένδυσης) με υψηλό βαθμό ελέγχου της εδαφικής παραμόρφωσης το  $\Psi$  λαμβάνεται 0,4-0,5. Αντίθετα, σε περιπτώσεις λιγότερο προσεκτικής διάνοιξης ή ύπαρξης παύσεων στη διάρκεια της εκσκαφής, το  $\Psi$  μπορεί να φτάσει τη μονάδα.

Η μέθοδος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σκληρά εδάφη. Σε μαλακά εδάφη, ξεπεράστηκε γρήγορα το ελαστικό όριο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων. Στην πραγματικότητα όμως οι πλαστικές παραμορφώσεις θα περιοριστούν από την επένδυση, επομένως τελικά η παραμόρφωση του εδάφους θα παραμείνει στην ελαστική περιοχή ή τουλάχιστον οι πλαστικές παραμορφώσεις θα είναι περιορισμένες. Άρα, η παραδοχή που έγινε αρχικά για ελαστική συμπεριφορά του εδάφους είναι αποδεκτή.

### 1.3. Απόκριση κατασκευών

#### A. Ορισμοί μετακινήσεων της θεμελίωσης

Για τον προσδιορισμό της επίπτωσης των μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους στις κατασκευές, οι Burland και Wroth (1974), πρότειναν κάποιους ορισμούς μετακινήσεων της θεμελίωσης των κτιρίων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως:

(α) στροφή  $\theta$  (rotation/slope): η αλλαγή στην κλίση της γραμμής που ενώνει 2 σημεία αναφοράς της θεμελίωσης

(β) γωνιακή παραμόρφωση  $\alpha$  (angular strain): είναι θετική για την περιοχή κάμψης και αρνητική για την περιοχή κύρτωσης

(γ) σχετική μετατόπιση  $\Delta$  (relative deflection): είναι η μετατόπιση ενός σημείου της θεμελίωσης σε σχέση με τη γραμμή που συνδέει 2 σημεία αναφοράς, για τη σύμβαση προσήμου ισχύει ό,τι και για τη γωνιακή παραμόρφωση

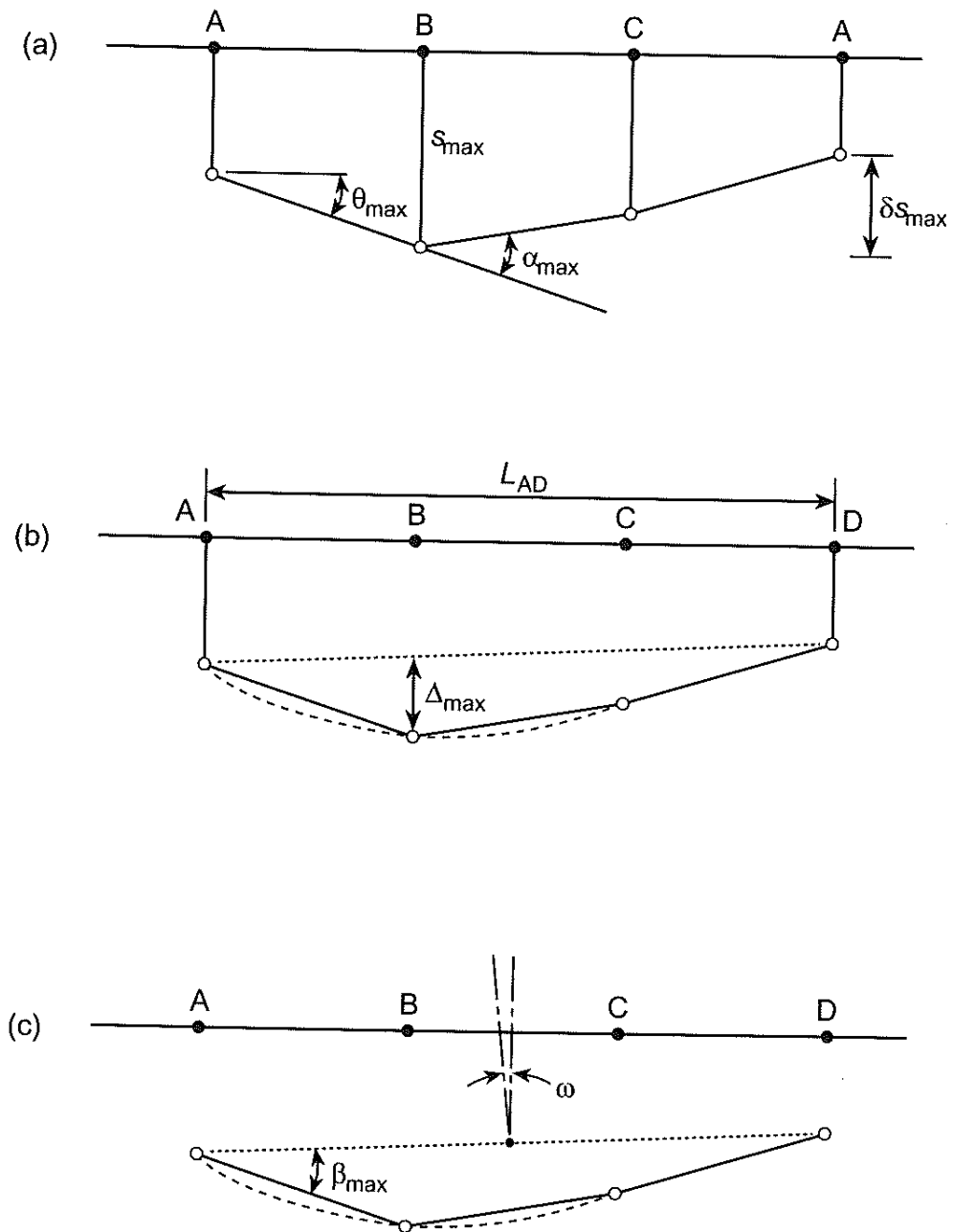
(δ) λόγος σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$  (deflection ratio-sagging ratio/hogging ratio), όπου  $L$  είναι η απόσταση μεταξύ 2 σημείων αναφοράς, για τη σύμβαση προσήμου ισχύει ό,τι και για τη γωνιακή παραμόρφωση

(ε) απόκλιση θεμελίωσης  $\omega$  (tilt): περιγράφει τη στροφή της κατασκευής ή ενός μεγάλου μέρους της, ως στερεού σώματος

(στ) σχετική στροφή  $\beta$  (relative rotation/angular distortion): η στροφή της ευθείας που ενώνει 2 σημεία από τη γραμμή που συνδέει 2 σημεία αναφοράς

(ζ) μέση οριζόντια παραμόρφωση  $\epsilon_h$  (average horizontal strain): η αλλαγή του μήκους  $\delta L$  σε σχέση με το μήκος  $L$

(η) διαφορική καθίζηση  $\delta s$  (differential settlement)



**Σχήμα 1.6.:** Προσδιορισμός μετακινήσεων θεμελίωσης

(a) καθίζηση  $s$ , διαφορική καθίζηση  $\delta s$ , στροφή  $\theta$ , γωνιακή παραμόρφωση  $\alpha$

(b) σχετική μετατόπιση  $\Delta$

(c) απόκλιση θεμελίωσης  $\omega$ , σχετική στροφή  $\beta$

## B. Κατηγοριοποίηση βλαβών στις κατασκευές

Οι Burland et al (1977) πρότειναν το διαχωρισμό των βλαβών σε 6 κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση έγινε με βάση μελέτες των Jennings και Kerrich (1962), UK National Coal Board (1975), MacLeod και Littlejohn (1974), και βασίζεται στις ορατές βλάβες. Η κατάταξη αναφέρεται σε πλινθοδομές, ξύλινες κατασκευές και λιθοδομές.

Category of damage	Normal degree of severity	Description of typical damage (ease of repair is in bold type) <i>Note: Crack width is only one factor in assessing category of damage and should not be used on its own as a direct measure of it.</i>
0	Negligible	Hairline cracks less than about 0.1 mm wide
1	Very slight	<b>Fine cracks that are easily treated during normal decoration.</b> Damage generally restricted to internal wall finishes. Close inspection may reveal some cracks in external brickwork or masonry. Typical crack widths up to 1 mm
2	Slight	<b>Cracks easily filled. Redecoration probably required. Recurrent cracks can be masked by suitable linings.</b> Cracks may be visible externally and <b>some repointing may be required to ensure weather-tightness.</b> Doors and windows may stick slightly. Typical crack widths up to 5 mm.
3	Moderate	<b>The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Repointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced.</b> Doors and windows sticking. Service pipes may fracture. Weather-tightness often impaired. Typical crack widths are 5–15 mm or several > 3 mm.
4	Severe	<b>Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows.</b> Windows and door frames distorted, floor sloping noticeably <sup>1</sup> . Walls leaning <sup>1</sup> or bulging noticeably, some loss of bearing in beams. Service pipes disrupted. Typical crack widths are 15–25 mm, but also depends on the number of cracks.
5	Very severe	<b>This requires a major repair job involving partial or complete rebuilding.</b> Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken with distortion. Danger of instability. Typical crack widths are greater than 25 mm, but depends on the number of cracks.

(1) Σημείωση: Τοπική παρέκκλιση της κλίσης από την οριζόντιο ή την κατακόρυφη πάνω από 1/100 θα είναι ορατή. Συνολικές παρεκκλίσεις που υπερβαίνουν κλίση 1/150 είναι ανεπιθύμητες

**Πίνακας 1.1.:** Κατηγοριοποίηση ορατών βλαβών σε τοίχους και ειδικότερα σε πλινθοδομές, ξύλινες κατασκευές και λιθοδομές από Burland et al (1977)



## Γ. Στάδια εκτίμησης βλαβών στις υπερκείμενες κατασκευές

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της διάνοιξης της σήραγγας στις υπερκείμενες κατασκευές, ακολουθούνται 3 στάδια ελέγχου.

Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο, καθορίζονται από τις προδιαγραφές του έργου όρια για τη μέγιστη στρόφη  $\theta$  και τη μέγιστη καθίζηση  $s$  των στοιχείων της θεμελίωσης. Στη συνέχεια εκτιμώνται βάσει εμπειρικών μεθόδων οι μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους και ελέγχεται η υπέρβαση των ορίων που καθορίστηκαν. Σε αυτό το στάδιο αμελείται η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής και γίνεται η θεώρηση για συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Αν ικανοποιείται ο 1<sup>ος</sup> έλεγχος, ο οποίος είναι συντηρητικός, στο 2<sup>ο</sup> στάδιο γίνεται μια πιο λεπτομερής ανάλυση στην οποία λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της κάθε κατασκευής. Για την εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων γίνεται χρήση και σε αυτό το στάδιο των εμπειρικών μεθόδων. Σε περίπτωση που προκύπτει υψηλός βαθμός κινδύνου για τις υπερκείμενες κατασκευές, ακολουθείται 3<sup>ο</sup> στάδιο ελέγχου, όπου οι εδαφικές μετακινήσεις υπολογίζονται βάσει αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή των χαρακτηριστικών των υπερκείμενων κατασκευών είναι η μέθοδος της ισοδύναμης δοκού.

### Μέθοδος ισοδύναμης δοκού

Σύμφωνα με τη μέθοδο των Burland και Wroth (1974), το κτίριο προσομοιώνεται με ελαστική δοκό ύψους  $H$  και μήκους  $L$  (διάσταση εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας). Ακολουθώντας τη μελέτη των Polshin και Tokar (1957), οι Burland και Wroth (1974) υποστήριξαν ότι η εφελκυστική παραμόρφωση θα μπορούσε να είναι καθοριστική παράμετρος για την εμφάνιση ρωγμών. Αξιοποίησαν τα αποτελέσματα από τεστ σε τοιχοποιίες που διεξήχθησαν από το UK Building Research Establishment, οι οποίες έδειξαν ότι για ένα συγκεκριμένο υλικό, η εμφάνιση ορατής ρηγματώσεως είναι συνδεδεμένη με μία συγκεκριμένη τιμή εφελκυστικής παραμόρφωσης. Έτσι, εισήγαγαν την έννοια “κρίσιμη εφελκυστική παραμόρφωση”  $\epsilon_{crit}$ , για την οποία υποστήριξαν τα εξής:

- Οι μέσες τιμές των  $\epsilon_{crit}$  στις οποίες εμφανίζεται η ρηγμάτωση, είναι παρόμοιες για μια ποικιλία πλινθοδομής και ξύλινων κατασκευών και είναι μεταξύ 0,05-0,1%, ενώ για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα οι τιμές είναι χαμηλότερες: 0,03-0,05%
- Οι παραπάνω τιμές είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις τοπικές τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων που αντιστοιχούν σε εφελκυστική αστοχία

Μεταγενέστερα, οι Burland et al (1977), αντικατέστησαν την έννοια της “κρίσιμης εφελκυστικής παραμόρφωσης”  $\epsilon_{crit}$  με την έννοια της “οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης”  $\epsilon_{lim}$ , που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος που λαμβάνει υπόψη διαφορετικά υλικά και όρια επισκευασιμότητας.

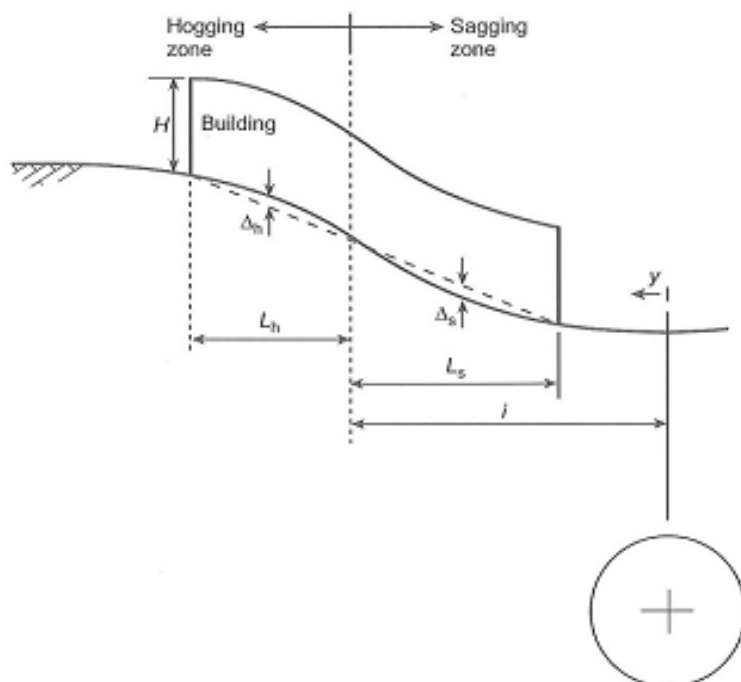
Οι Boscardin και Cording (1989), μετά από καταγραφές βλαβών οφειλόμενες σε εκσκαφές, για διαφορετικούς τύπους κτιρίων, έδειξαν ότι οι κατηγορίες που περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να συσχετιστούν με την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση  $\epsilon_{lim}$ .

Κατηγορία ορατών βλαβών	Συνήθης βαθμός κινδύνου	Οριακή εφελκυστική παραμόρφωση $\epsilon_{lim}$ (%)
0	Αμελητέος	0-0,05
1	Πολύ μικρός	0,05-0,075
2	Μικρός	0,075-0,15
3	Μέτριος	0,15-0,3
4 έως 5	Σοβαρός έως πολύ σοβαρός	>0,3

(\*) Σημείωση: Οι Boscardin και Cording περιέγραψαν τη βλάβη της κατηγορίας 3 ως “moderate to severe”, αλλά από τις περιπτώσεις που κατέγραψαν, καμία από όσες δημιουργούν εφελκυστικές παραμορφώσεις μέσα σε αυτό το εύρος, δεν οδηγεί σε σοβαρή βλάβη. Επομένως, δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι εφελκυστικές παραμορφώσεις μέχρι 0,3% οδηγούν σε σοβαρές βλάβες

**Πίνακας 1.2.:** Σχέση μεταξύ κατηγορίας βλαβών και οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\epsilon_{lim}$  σύμφωνα με τους Boscardin και Cording (1989)

Σύμφωνα με τη θεωρία που εισήγαγαν οι Burland και Wroth (1974), το κτίριο προσομοιώνεται με μια ορθογώνια δοκό μήκους  $L$  και ύψους  $H$  και το ζητούμενο είναι να βρεθεί η τιμή του λόγου σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$ , για την οποία εμφανίζεται ρηγματώση. Ο λόγος  $\Delta/L$ , μπορεί να είναι θετικός ή αρνητικός, ανάλογα αν το κτίριο βρίσκεται σε συνθήκες κάμψης ή κύρτωσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που το κτίριο βρίσκεται τμηματικά σε συνθήκες κάμψης και κύρτωσης τα μεγέθη λαμβάνονται όπως φαίνεται στο σχήμα:

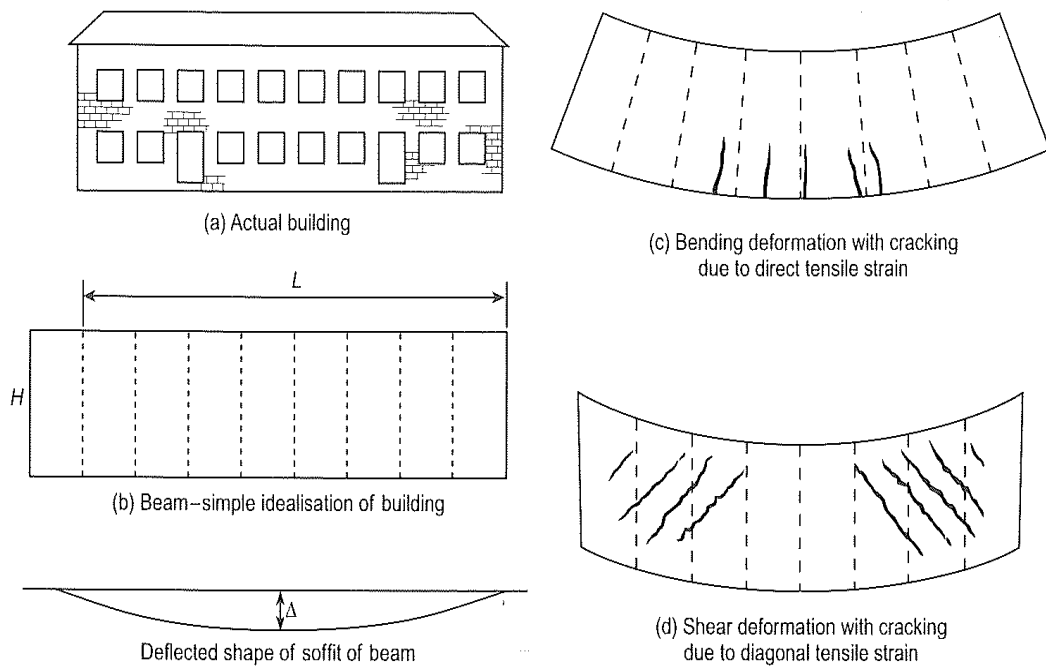


**Σχήμα 1.7.:** Παραμόρφωση ισοδύναμης δοκού σε συνθήκες κάμψης και κύρτωσης

Σε ό,τι αφορά την παραμορφωμένη μορφή της δοκού, υποθέτουμε 2 ακραίες μορφές:

- ανάπτυξη ρωγμών λόγω κάμψης με τον ουδέτερο άξονα στο μέσο της δοκού και εφελκυστική παραμόρφωση  $\epsilon_{bmax}$
- ανάπτυξη λοξών υπό γωνία  $45^\circ$  ρωγμών λόγω διάτμησης και εφελκυστική παραμόρφωση  $\epsilon_{dmax}$

Κατά την παραμόρφωση της δοκού, θα παρατηρηθούν και οι 2 αυτές ακραίες μορφές, επομένως πρέπει να βρεθεί ποια από τις 2 θα εμφανιστεί πρώτη για τη συγκεκριμένη περίπτωση κτιρίου που μελετάμε, για να καθορισθεί το  $\epsilon_{lim}$ .



**Σχήμα 1.8.:** Ρηγμάτωση της ισοδύναμης δοκού

- (a) Κτίριο
- (b) Ισοδύναμη δοκός
- (c) Ρηγμάτωση λόγω κάμψης
- (d) Ρηγμάτωση λόγω διάτμησης

Έχουν δοθεί από τους Burland et al(1977) οι σχέσεις που συνδέουν το λόγο σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$  με τις τιμές της εφελκυστικής παραμόρφωσης που προκύπτουν από τις 2 ακραίες μορφές για φόρτιση της δοκού με κεντρικό φορτίο:

$$\frac{\Delta}{L} = \left( \frac{L}{12t} + \frac{3I}{2tLH} \cdot \frac{E}{G} \right) \epsilon_{b\max}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left( 1 + \frac{HL^2}{18I} \cdot \frac{G}{E} \right) \epsilon_{d\max}$$

- όπου
- L: μήκος ισοδύναμης δοκού
  - t: απόσταση του ουδέτερου άξονα από το εφελκυσμένο άκρο της ισοδύναμης δοκού (H/2 για συνθήκες κάμψης και H για συνθήκες κύρτωσης)
  - I: ροπή αδράνειας

H: ύψος ισοδύναμης δοκού

E: μέτρο ελαστικότητας

G: μέτρο διάτμησης

Παρόμοιες εκφράσεις έχουν δοθεί για φόρτιση με κατανεμημένο φορτίο και υπολογισμό παραμορφώσεων στα τέταρτα του μήκους της δοκού από τις οποίες προκύπτει, σύμφωνα με τον Burland, ότι είναι μεγαλύτερη η επιρροή του λόγου  $\Delta/L$  παρά της κατανομής της φόρτισης, για την ανάπτυξη των παραμορφώσεων.

## Επιρροή της οριζόντιας παραμόρφωσης

Η διάνοιξη σήραγγας έχει αποτέλεσμα την ανάπτυξη κατακόρυφων και οριζόντιων παραμορφώσεων. Η επιρροή των κατακόρυφων παραμορφώσεων στην παραμόρφωση του κτιρίου, εκφράζεται όπως είδαμε συναρτήσει του λόγου  $\Delta/L$ . Οι Boscardin και Cording (1989), ενσωμάτωσαν την οριζόντια παραμόρφωση του εδάφους  $\epsilon_h$  στην ανάλυση των Burland και Wroth. Επομένως, οι συνολικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη δοκό είναι:

- η εφελκυστική στη κάτω ίνα

$$\epsilon_{br} = \epsilon_{bmax} + \epsilon_h$$

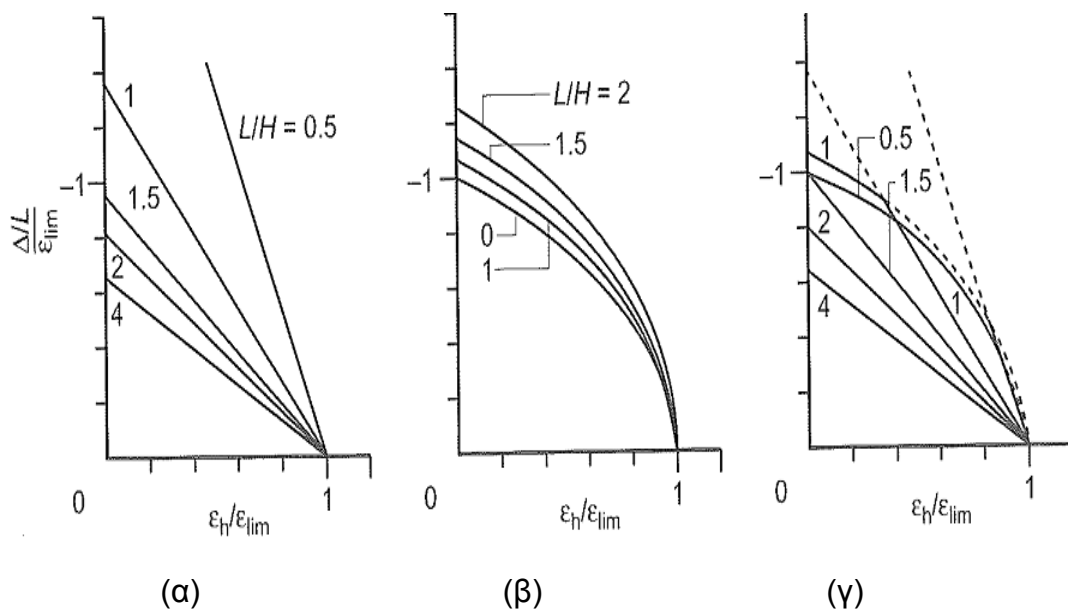
- η διαγώνια εφελκυστική στη ζώνη διάτμησης

$$\epsilon_{dr} = \epsilon_h \left( \frac{1-\nu}{2} \right) + \sqrt{[\epsilon h^2 \left( \frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \epsilon^2 dmax]}$$

όπου  $\nu$ : ο λόγος του Poisson

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων φαίνεται γραφικά στο σχήμα 1.9. απ' όπου σύμφωνα με τον Burland προκύπτουν τα εξής:

- στην περίπτωση της παραμόρφωσης της δοκού λόγω κάμψης μόνο, ο λόγος  $\Delta/L$  μειώνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η οριζόντια παραμόρφωση  $\varepsilon_h$  για συγκεκριμένο λόγο  $L/H$
- στην περίπτωση της παραμόρφωσης της δοκού λόγω διάτμησης μόνο, ο λόγος  $\Delta/L$  μειώνεται μη γραμμικά όσο αυξάνεται η οριζόντια παραμόρφωση  $\varepsilon_h$ , ενώ φαίνεται ότι ο λόγος  $\Delta/L$  δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στην αλλαγή του λόγου  $L/H$  για  $0 < L/H < 1,5$
- στην περίπτωση της συνδυασμένης παραμόρφωσης λόγω κάμψης και διάτμησης, για  $L/H > 1,5$ , η παραμόρφωση ελέγχεται από τις παραμορφώσεις λόγω κάμψης, ενώ για μικρότερες τιμές του λόγου  $L/H$ , όσο αυξάνεται η οριζόντια παραμόρφωση, η παραμόρφωση που ελέγχει την παραμόρφωση ολόκληρης της δοκού αλλάζει από διατμητική σε καμπτική



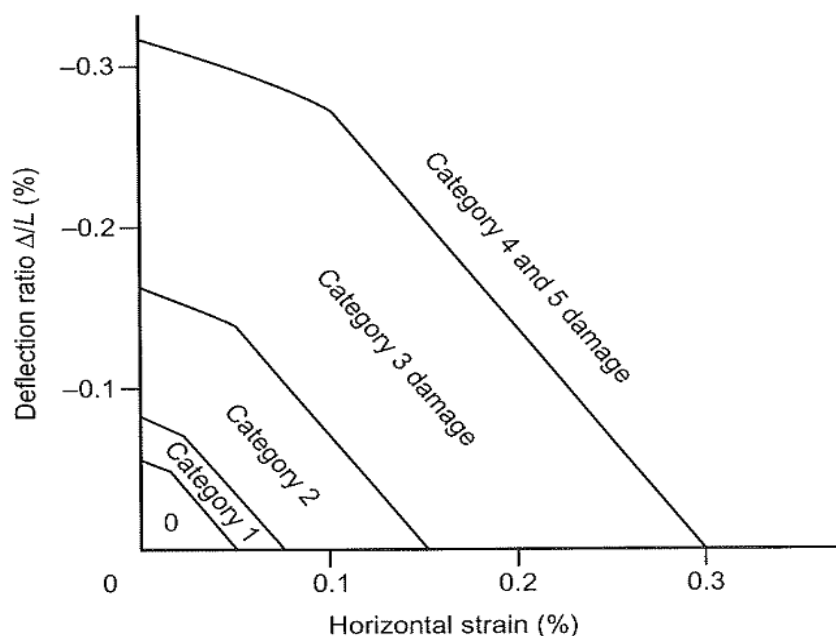
**Σχήμα 1.9.:** Επιρροή της οριζόντιας παραμόρφωσης στο λόγο  $\Delta/L\varepsilon_{lim}$

(α) για καθαρή κάμψη

(β) για καθαρή διάτμηση

(γ) για συνδυασμό των 2 παραπάνω

Ο Burland βασιζόμενος στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την περίπτωση της συνδυασμένης παραμόρφωσης και με χρήση του πίνακα με τις κατηγορίες βλαβών, δημιούργησε ένα νέο διάγραμμα αλληλεπίδρασης του  $\Delta/L$ , για συγκεκριμένη τιμή του λόγου  $L/H$ . Ενδεικτικά φαίνεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για  $L/H=1$ :

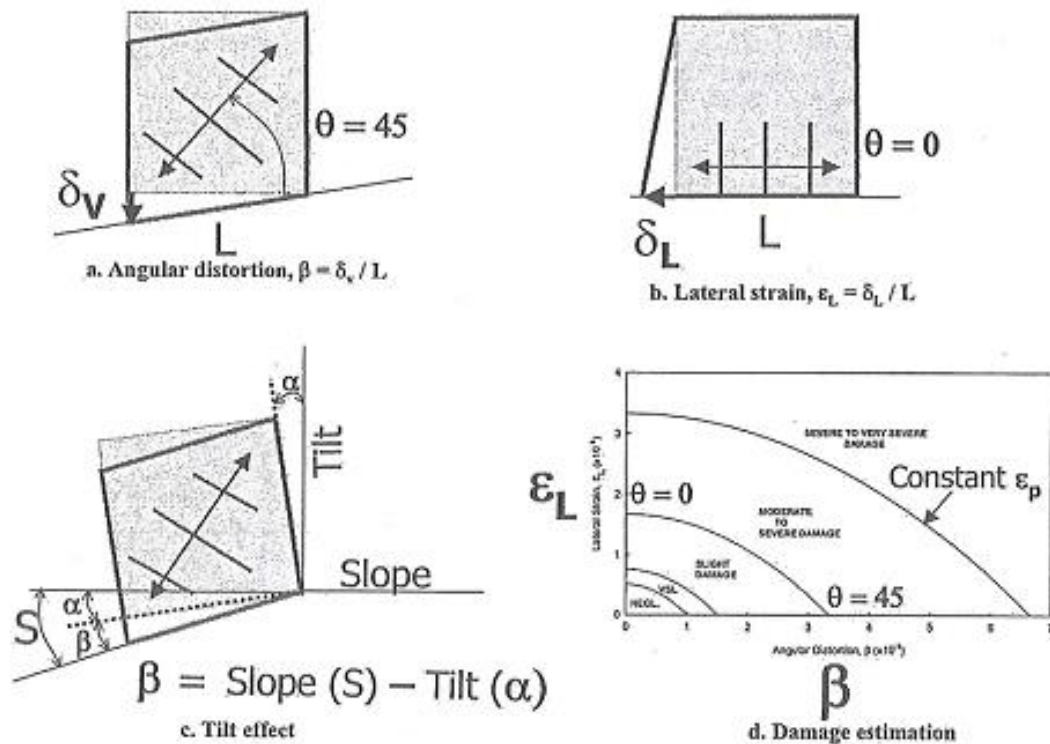


**Σχήμα 1.10.:** Κατηγορία βλαβών συναρτήσει  $\Delta/L$  και  $\epsilon_h$  για τιμή του λόγου  $L/H=1$

Η διαδικασία για την κατηγοριοποίηση της διακινδύνευσης βάσει της θεωρίας των Burland και Wroth περιλαμβάνει τα εξής:

- προσομοίωση του προβλήματος και εκτίμηση των μετακινήσεων της θεμελίωσης και συγκεκριμένα του λόγου σχετικής μετατόπισης των θεμελίων
- υπολογισμός των εφελκυστικών παραμορφώσεων  $\epsilon_{bmax}$  και  $\epsilon_{dmax}$  από τις σχέσεις συναρτήσει του λόγου  $\Delta/L$
- υπολογισμός των συνολικών εφελκυστικών παραμορφώσεων  $\epsilon_{br}$  και  $\epsilon_{dr}$  λόγω της επιρροής της οριζόντιας παραμόρφωσης
- εύρεση δυσμενέστερης μορφής παραμόρφωσης και κατηγοριοποίηση

Οι Boscardin και Cording (1989) ανέπτυξαν ένα κριτήριο βλαβών βασιζόμενοι στη θεωρία των παραμορφώσεων και το οποίο είναι ανεξάρτητο των λόγων  $L/H$ ,  $E/G$  και της θέσης του ουδέτερου άξονα. Το κριτήριο παρουσιάζει το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της σχετικής στροφής  $\beta$  με την οριζόντια παραμόρφωση  $\epsilon_h$ .



**Σχήμα 1.11.:** Κριτήριο βλαβών των Boscardin και Cording (1989)

Μεταγενέστερα, θεωρήθηκε ότι η μέθοδος που ακολουθείται, με χρήση των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης, βάσει της μεθόδου της ισοδύναμης δοκού, είναι συντηρητική, αφού στηρίζεται στην υπόθεση ότι το κτίριο είναι εύκαμπτο και ακολουθεί πλήρως την εδαφική παραμόρφωση ελεύθερου πεδίου. Επομένως, αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε πιο δαπανηρό σχεδιασμό.



## Προσέγγιση βάσει της σχετικής δυσκαμψίας (Relative stiffness approach)

Οι Potts και Addenbrooke (1997) πραγματοποίησαν μια παραμετρική ανάλυση για να μελετήσουν την επιρροή της δυσκαμψίας της κατασκευής στις παραμορφώσεις που οφείλονται στην κατασκευή σήραγγας. Η μελέτη βασίστηκε σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιήθηκε μη γραμμικό ελαστικό-πλαστικό εδαφικό προσομοίωμα. Το κτίριο προσομοιώθηκε με ελαστική δοκό με αξονική δυσκαμψία  $EA$  και καμπτική δυσκαμψία  $EI$ , θεωρήθηκε αβαρές και η διεπιφάνεια εδάφους-κτιρίου τραχεία. Έγιναν αναλύσεις για διάφορες τιμές γεωμετρίας (διαφορετικά πλάτη  $B$ ), αξονικής και καμπτικής δυσκαμψίας του κτιρίου, μέτρου ελαστικότητας του εδάφους, εκκεντρότητας σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας και για 2 διαφορετικά βάθη σήραγγας. Για το συσχετισμό της δυσκαμψίας εδάφους-κατασκευής εισήγαγαν τη σχετική αξονική και σχετική καμπτική δυσκαμψία:

- σχετική αξονική δυσκαμψία (relative axial stiffness)

$$a^* = \frac{EA}{E_S * \left(\frac{B}{2}\right)} \quad (\text{αδιάστατο})$$

- σχετική καμπτική δυσκαμψία (relative bending stiffness)

$$\rho^* = \frac{EI}{E_S * \left(\frac{B}{2}\right)^4} \quad (1/\text{μέτρο μήκους})$$

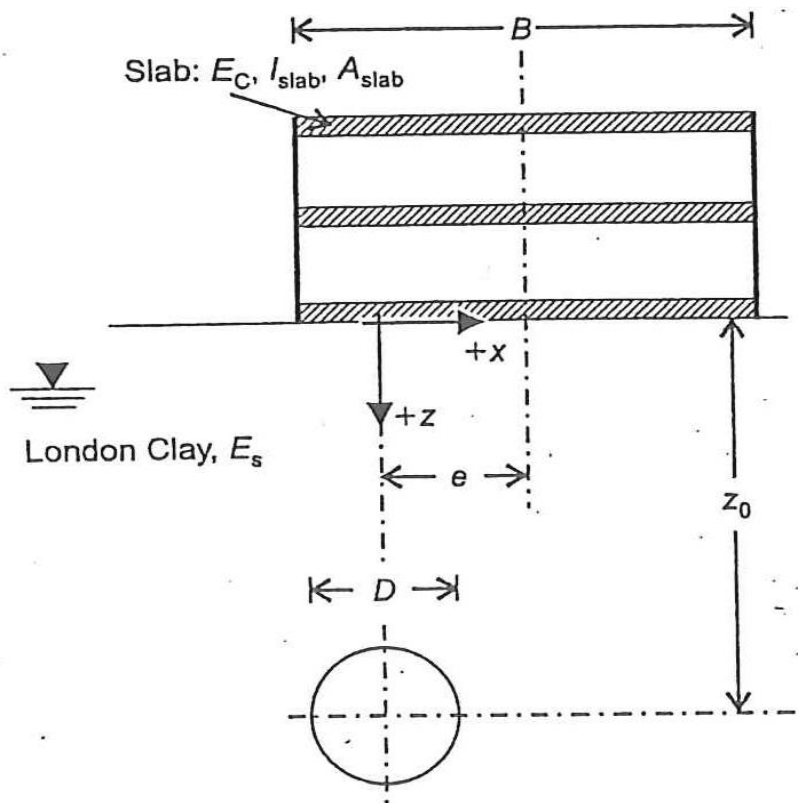
όπου  $E$ : μέτρο ελαστικότητας κτιρίου

$A$ : εμβαδό κτιρίου εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας

$E_S$ : μέτρο ελαστικότητας εδάφους

$B$ : πλάτος κτιρίου (στη διεύθυνση εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας)

$I$ : ροπή αδράνειας κτιρίου



**Σχήμα 1.12.:** Εγκάρσια τομή προσομοιώματος

Κατά τις αναλύσεις μετρήθηκαν ο λόγος σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$  (deflection ratio DR) και η μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση  $\varepsilon_h$  που αναπτύχθηκε. Οι μετρήσεις αυτές συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες για συνθήκες ελεύθερου πεδίου με τους παρακάτω συντελεστές τροποποίησης (modification factors):

$$M^{DR_{sag}} = \frac{DR_{sag}}{DR_{GF} sag}$$

$$M^{DR_{hog}} = \frac{DR_{hog}}{DR_{GF} hog}$$

$$M^{\varepsilon_{hc}} = \frac{\varepsilon_{hc}}{\varepsilon_{GF} hc}$$

$$M^{\varepsilon_{ht}} = \frac{\varepsilon_{ht}}{\varepsilon_{GF} ht}$$

όπου  $DR_{sag}$ : λόγος σχετικής μετατόπισης σε συνθήκες κάμψης

$DR_{sag}^{GF}$ : λόγος σχετικής μετατόπισης σε συνθήκες κάμψης για συνθήκες ελεύθερου πεδίου

$DR_{hog}$ : λόγος σχετικής μετατόπισης σε συνθήκες κύρτωσης

$DR_{hog}^{GF}$ : λόγος σχετικής μετατόπισης σε συνθήκες κύρτωσης για συνθήκες ελεύθερου πεδίου

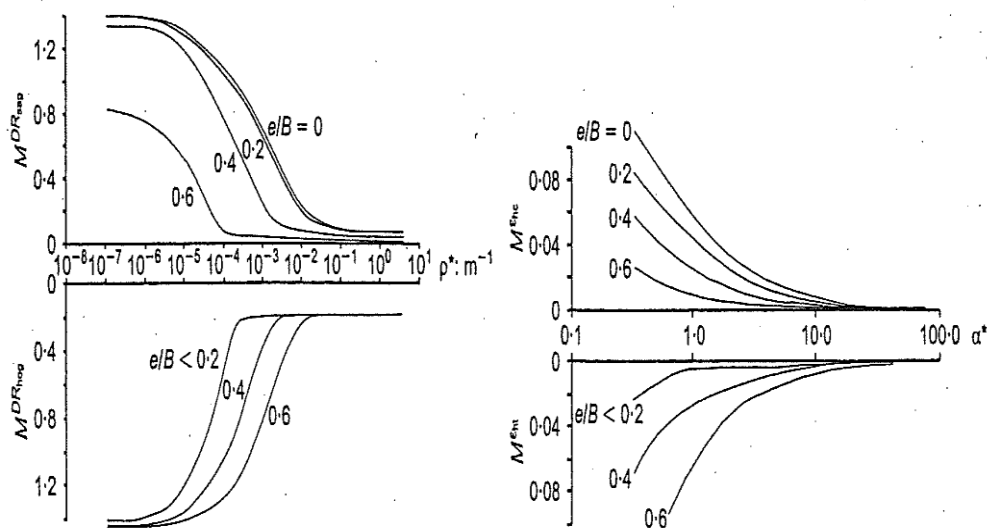
$\epsilon_{hc}$ : θλιπτική οριζόντια παραμόρφωση

$\epsilon_{hc}^{GF}$ : θλιπτική οριζόντια παραμόρφωση σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου

$\epsilon_{ht}$ : εφελκυστική οριζόντια παραμόρφωση

$\epsilon_{ht}^{GF}$ : εφελκυστική οριζόντια παραμόρφωση σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου

Τα αποτελέσματα των Potts και Addenbrooke για τις διάφορες τιμές των συντελεστών τροποποίησης φαίνονται γραφικά στο σχήμα 1.13.



**Σχήμα 1.13.:** Συντελεστές τροποποίησης συναρτήσει των σχετικών δυσκαμψιών

Σύμφωνα με την προσέγγιση βάσει της σχετικής δυσκαμψίας, αρχικά υπολογίζονται για συνθήκες ελεύθερου πεδίου οι κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους στη θέση των υπερκείμενων κατασκευών, αλλά και τα σχετικά μεγέθη δυσκαμψίας κατασκευής-εδάφους. Στη συνέχεια, με τα παραπάνω δεδομένα και για τις τιμές της εκκεντρότητας  $e$  από τον άξονα της σήραγγας και του πλάτος  $B$  της κάθε κατασκευής, προκύπτουν από τα διαγράμματα οι συντελεστές τροποποίησης. Από τις σχέσεις των συντελεστών τροποποίησης, υπολογίζουμε τις τιμές των

κατακόρυφων μετακινήσεων και οριζόντιων παραμορφώσεων που προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκαμψία της κατασκευής. Τέλος, από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης οριζόντιας παραμόρφωσης-κατακόρυφης μετακίνησης, γίνεται εκτίμηση της κατηγορίας βλαβών.

Μεταγενέστερα, ο Franzius (2004), πραγματοποίησε παραμετρικές αναλύσεις για να εκτιμήσει τη συμβολή στην παραμόρφωση των κατασκευών κάποιων επιπλέον παραγόντων:

- του βάρους του κτιρίου
- της φύσης της διεπιφάνειας εδάφους-κατασκευής
- των διαστάσεων του κτιρίου
- του βάθους της σήραγγας

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν τα εξής:

- η επιρροή του πλάτους  $B$  του κτιρίου (στη διεύθυνση εγκάρσια του άξονα της σήραγγας) στις κατακόρυφες παραμορφώσεις, υπερεκτιμάται από τον ορισμό των Potts, Addenbrooke της σχετικής καμπτικής δυσκαμψίας  $\rho^*$ , όπου το  $B$  είναι υψωμένο στην 4<sup>η</sup>
- η επιρροή του βάθους της σήραγγας  $z_0$  στην κατακόρυφη παραμόρφωση, υποεκτιμάται από τον ορισμό του  $\rho^*$ , όπου το  $z_0$  εμφανίζεται μόνο στο μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, το οποίο λαμβάνεται με την τιμή που έχει στο μισό του βάθους της σήραγγας. Ενώ, η επιρροή του βάθους στην οριζόντια παραμόρφωση εκτιμάται σωστά από τον ορισμό της σχετικής αξονικής ακαμψίας  $\alpha^*$
- το μήκος του κτιρίου (στη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας), το βάρος του κτιρίου και η φύση της διεπιφάνειας εδάφους-κατασκευής δεν επηρεάζουν τα σχετικά μεγέθη ακαμψίας που όρισαν οι Potts, Addenbrooke και κατ' επέκταση και τα διαγράμματα που πρότειναν για το σχεδιασμό

Οι Franzius, Potts, Burland (2004), ενσωμάτωσαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Franzius στη μέθοδο της σχετικής δυσκαμψίας των Potts και Addenbrooke:

Όσον αφορά στην καμπτική ακαμψία, όρισαν τροποποιημένη σχετική καμπτική ακαμψία  $\rho_{\text{mod}}^* = \frac{EI}{ESz_0B^2L}$ , όπου μειώνεται η επιρροή του πλάτους B και ενσωματώνεται το βάθος  $z_0$  στη σχέση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με χρήση του  $\rho^*$  και με χρήση του  $\rho_{\text{mod}}^*$ , έδειξαν ότι το άνω όριο των καμπύλων είναι το ίδιο για τις 2 περιπτώσεις, αλλά γενικά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις για τις 2 τιμές της σχετικής ακαμψίας.

Όσον αφορά στην αξονική ακαμψία, όρισαν τροποποιημένη σχετική αξονική ακαμψία  $\alpha_{\text{mod}}^* = \frac{EA}{ESBL}$ , ενσωματώνοντας το μήκος L, ώστε να γίνει αδιάστατο το μέγεθος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με χρήση του  $\alpha^*$  και του  $\alpha_{\text{mod}}^*$ , παρατηρούνται διαφορετικά άνω όρια των καμπυλών.

Συμπερασματικά, οι Franzius, Potts, Burland (2004), καταλήγουν ότι η θεωρία των Potts, Addenbrooke, είναι εφαρμόσιμη για ένα μεγάλο εύρος τιμών των παραμέτρων που αφορούν το κτίριο και την κατασκευή της σήραγγας, παρ' όλα αυτά η ενσωμάτωση του μήκους L, ώστε να γίνει αδιάστατη η σχετική αξονική ακαμψία, αλλά και τα νέα πάνω όρια που εισήγαγαν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό.

Εναλλακτικά της χρήσης της μεθόδου της ισοδύναμης δοκού, ο έλεγχος των μετακινήσεων της θεμελίωσης μπορεί να γίνει συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$  και της γωνιακής στροφής  $\theta$  που προκύπτουν από τις εμπειρικές μεθόδους ή τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία με τα παρακάτω κριτήρια που ανέπτυξαν διάφοροι μελετητές:

Τύπος κατασκευής	Τύπος ζημιάς	Επιτρεπόμενα όρια			
		Επιτρεπόμενες τιμές γωνιακής στροφής $\theta$			
		Skempton και Mc Donald (1956)	Meyerhof (1947)	Polshin και Tokar (1957)	Bjerrum (1963)
Κτίρια με σκελετό και οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	Βλάβη στο φέροντα οργανισμό	1/150	1/250	1/150	1/150
	Ρηγματώσεις στους τοίχους	1/300 (συνιστάται και 1/500)	1/500	1/500	1/500
		Επιτρεπόμενες τιμές του λόγου σχετικής μετατόπισης $\Delta/L$			
		Meyerhof (1947)	Polshin και Tokar (1957)	Burland και Wroth (1974)	
Μη οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	Ρωγμές λόγω κοίλης παραμόρφωσης του τοίχου (συνθήκες κάμψης)	1/2500	$L/H^*=0,3$ $\Delta/L=1/3333$ έως 1/2500	$L/H=1, \Delta/L=1/2500$ $L/H=5, \Delta/L=1/1250$	
	Ρωγμές λόγω κυρτής παραμόρφωσης του τοίχου (συνθήκες κύρτωσης)			$L/H=1, \Delta/L=1/2500$ $L/H=5, \Delta/L=1/1250$	

(\*)  $L/H$ : ο λόγος του μήκους προς το ύψος του τοίχου

**Πίνακας 1.3.:** Σύνοψη επιτρεπόμενων τιμών της γωνιακής στροφής  $\theta$  και του λόγου σχετικής μετατόπισης  $\Delta/L$  κατά Tomlinson (1980)

## **2. Διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάνοιξη με TBM**

### **2.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και χαρακτηριστικά προσομοίωσης**

Για την πραγματοποίηση των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 7.2. Το πρόγραμμα προσομοιώνει αποτελεσματικά τη μη γραμμική, χρονικά αναπτυσσόμενη, ανισοτροπική συμπεριφορά εδαφών και βραχών. Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης των κατασκευών αλλά και της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει 3 στάδια λειτουργίας:

- Input
- Calculations
- Output

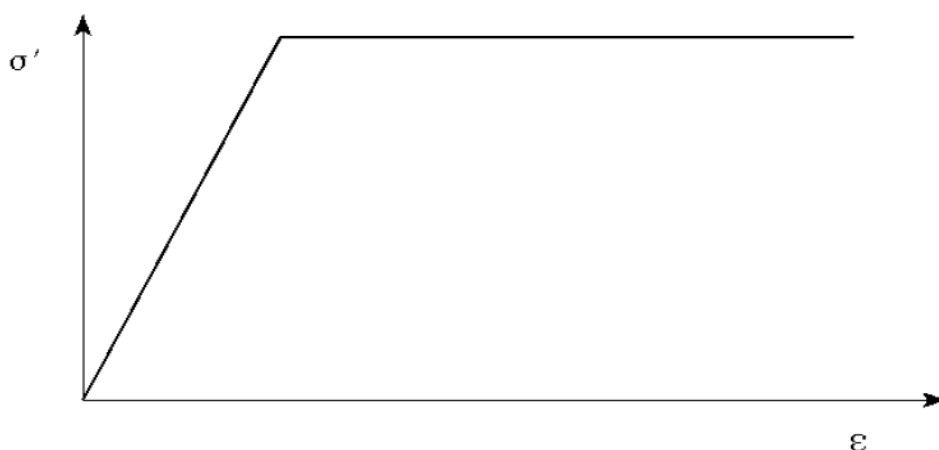
Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο, εισάγεται η γεωμετρία και τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των υλικών που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία θεμελίωσης και υποστήριξης, οι συνοριακές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά διακριτοποίησης του χώρου, οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των πεπερασμένων στοιχείων και η πύκνωση του καννάβου και τέλος καθορίζονται οι αρχικές συνθήκες όσον αφορά στην υπόγεια ροή και στο τασικό πεδίο. Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο, καθορίζονται τα βήματα που θα ακολουθηθούν για την αναπαράσταση της διαδικασίας της γεωτεχνικής εφαρμογής που θα προσομοιωθεί. Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, παρουσιάζονται η παραμορφωμένη μορφή του προσομοιώματος που προκύπτει μετά την επίλυση της κάθε φάσης και οι τιμές των τάσεων, παραμορφώσεων και μετακινήσεων.

## A. Εισαγωγή δεδομένων

### Έδαφος

Το έδαφος που προσομοιώθηκε είναι εμβαδού 40\*25 m, η ανάλυση έγινε σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και η διακριτοποίηση του χώρου με 15-κομβά στοιχεία. Σε ό,τι αφορά τις συνοριακές συνθήκες, δεσμεύτηκαν η οριζόντια μετακίνηση των πλάγιων συνόρων και οι 2 μετακινήσεις (κατακόρυφη και οριζόντια) του χαμηλότερου οριζόντιου συνόρου.

Το έδαφος στο οποίο διανοίγεται η σήραγγα, θεωρούμε ότι ακολουθεί το εδαφικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Το προσομοίωμα Mohr-Coulomb περιγράφει υλικό με ελαστική-ιδεωδώς πλαστική συμπεριφορά:



**Σχήμα 2.1.:** Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ελαστικού-ιδεωδώς πλαστικού υλικού

Το συγκεκριμένο προσομοίωμα περιγράφεται από 3 παραμέτρους: τις 2 παραμέτρους του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb: τη γωνία τριβής  $\phi$  και τη συνοχή  $c$  και μια 3<sup>η</sup> παράμετρο λόγω της πλαστικότητας: τη γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ . Όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής, το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και ακολουθεί το νόμο του Hook για ισοτροπική γραμμική ελαστικότητα με παραμέτρους: το μέτρο ελαστικότητας του Young  $E$  και το λόγο Poisson  $\nu$ .



Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές για τις 5 παραμέτρους:

Μέτρο ελαστικότητας E (KN/m <sup>2</sup> )	Λόγος Poisson ν	Γωνία τριβής φ (°)	Συνοχή c (KN/m <sup>2</sup> )	Γωνία διασταλτικότητας ψ (°)
παράμετρος υπό εξέταση	0,2	35	παράμετρος υπό εξέταση	0

**Πίνακας 2.1.:** Παράμετροι εδαφικού καταστατικού προσομοιώματος

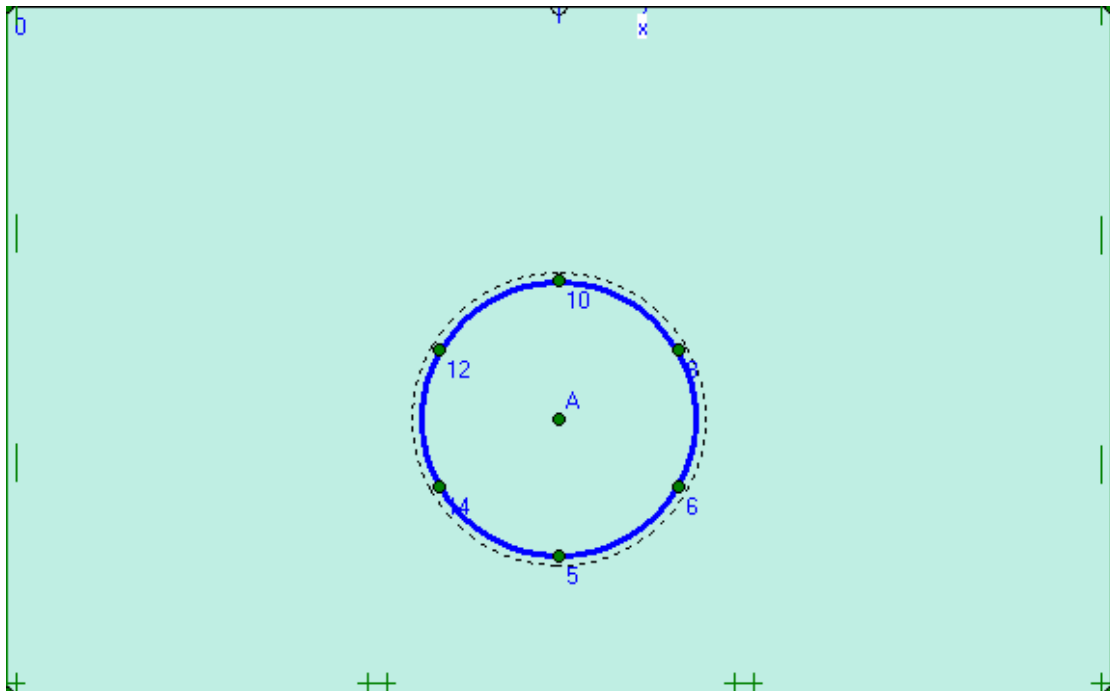
Επίσης, για το έδαφος θεωρήθηκε ειδικό βάρος  $\gamma=23\text{KN/m}^3$ , ενώ στις διεπιφάνειες καθορίστηκε απομειωμένη αντοχή στο 67% της συνολικής.

## Σήραγγα

Ο άξονας της σήραγγας τοποθετήθηκε σε βάθος 15 μέτρων, ενώ επιλέχθηκε να προσομοιωθεί σήραγγα κυκλικού σχήματος και ακτίνας 5 μέτρων. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται παραμετρική ανάλυση με χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine). Για την προσομοίωση του βαθμού σύγκλισης-αποτόνωσης της διατομής του ανοίγματος, εισάγεται στα δεδομένα της σήραγγας η παράμετρος του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου (contraction), η οποία αποτελεί παράμετρο υπό εξέταση. Σε ό,τι αφορά την επένδυση της σήραγγας, η προσομοίωση της επένδυσης έγινε με ελαστικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας  $E=25\text{ GPa}$ . Η διάμετρος του επένδυσης είναι ακόμα μία παράμετρος της οποίας η επιρροή θα μελετηθεί.

## Αρχικές συνθήκες

Στην ανάλυση έγινε η υπόθεση ότι η σήραγγα βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, επομένως δεν υπάρχει ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων. Ενώ, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων  $K$  αποτελεί παράμετρο υπό εξέταση.



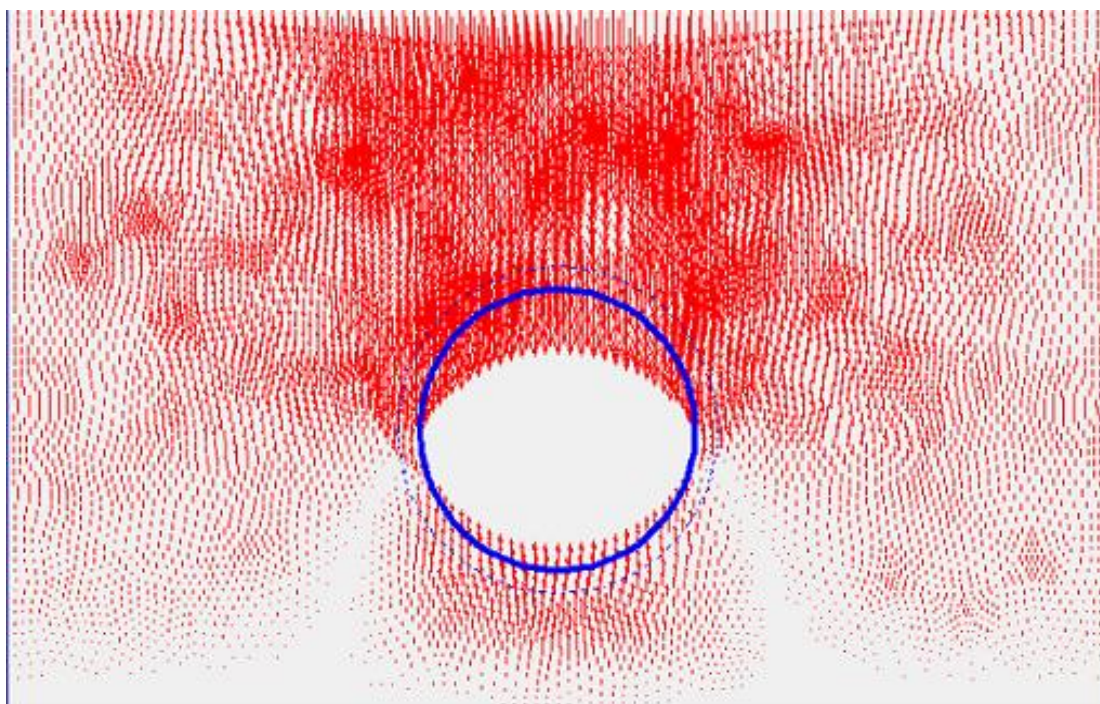
Σχήμα 2.2.: Προσομοίωση εδάφους και δακτυλίου υποστήριξης

## B. Φάσεις επίλυσης

Η αρχική φάση (Φάση "0"), επιλύεται κατά την εισαγωγή των αρχικών συνθηκών, όπου υπολογίζονται οι γεωστατικές τάσεις. Στην 1<sup>η</sup> φάση, αφαιρείται το έδαφος στο εσωτερικό της σήραγγας και ενεργοποιείται η υποστήριξη και στη 2<sup>η</sup> φάση, εφαρμόζεται η μείωση του εμβαδού της διατομής με τη χρήση ενός πολλαπλασιαστή (Σ-MconrA).

Ενδεικτικά, φαίνονται στο σχήμα 2.3. οι κατακόρυφες μετακινήσεις και η μείωση της διατομής στην ανάλυση για λόγο ανηγμένης απώλειας όγκου 1% πάχος επένδυσης 30 cm και για έδαφος με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέτρο ελαστικότητας 25 MPa
- Συνοχή 30 kPa
- Συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5



**Σχήμα 2.3.:** Αποτελέσματα επίλυσης: κατακόρυφες μετακινήσεις και μείωση διατομής σήραγγας

## 2.2. Παραμετρικές αναλύσεις

Οι παράμετροι για τις οποίες μελετήθηκε η επιρροή τους στις καθιζήσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάνοιξη μιας αβαθούς σήραγγας είναι ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων, το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, η συνοχή του εδάφους, το πάχος της επένδυσης της σήραγγας, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων και ο λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου της. Οι αναλύσεις έγιναν για τις εξής τιμές των παραμέτρων:

Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Συνοχή c (kPa)	Πάχος επένδυσης d (cm)	Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K	Λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου (*) (contraction) (%)
25	20	15	0,2	0,3
50	30	30	0,5	0,7
100	60	40	0,8	1
				1,5

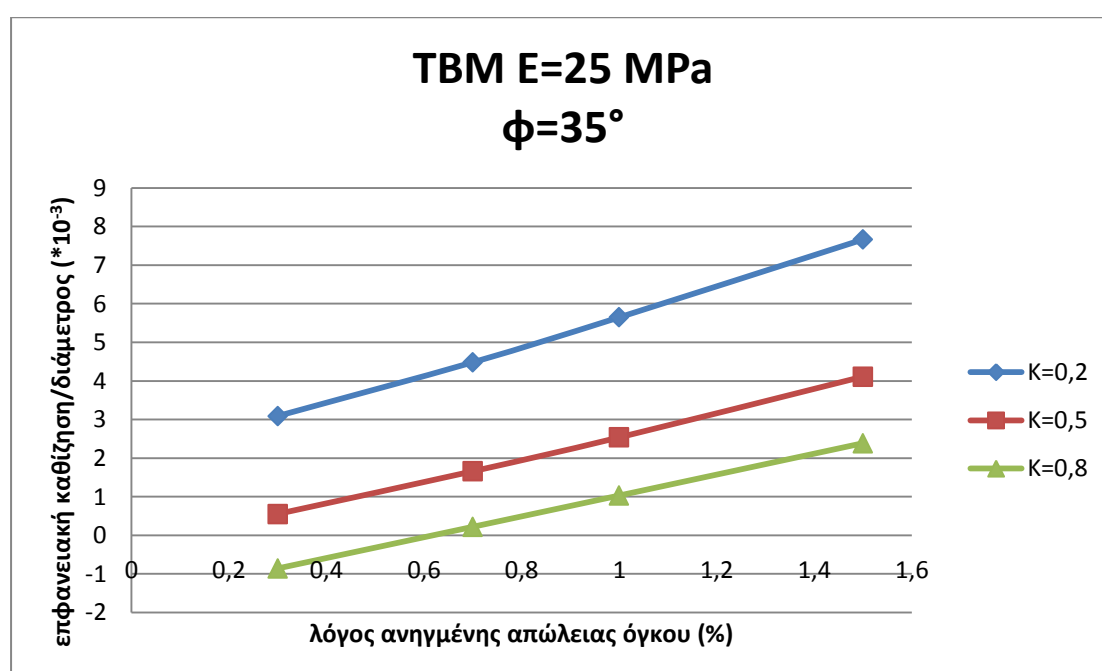
**Πίνακας 2.2.:** Παράμετροι υπό εξέταση

(\*)Σημείωση: αφορά τη διατομή της σήραγγας

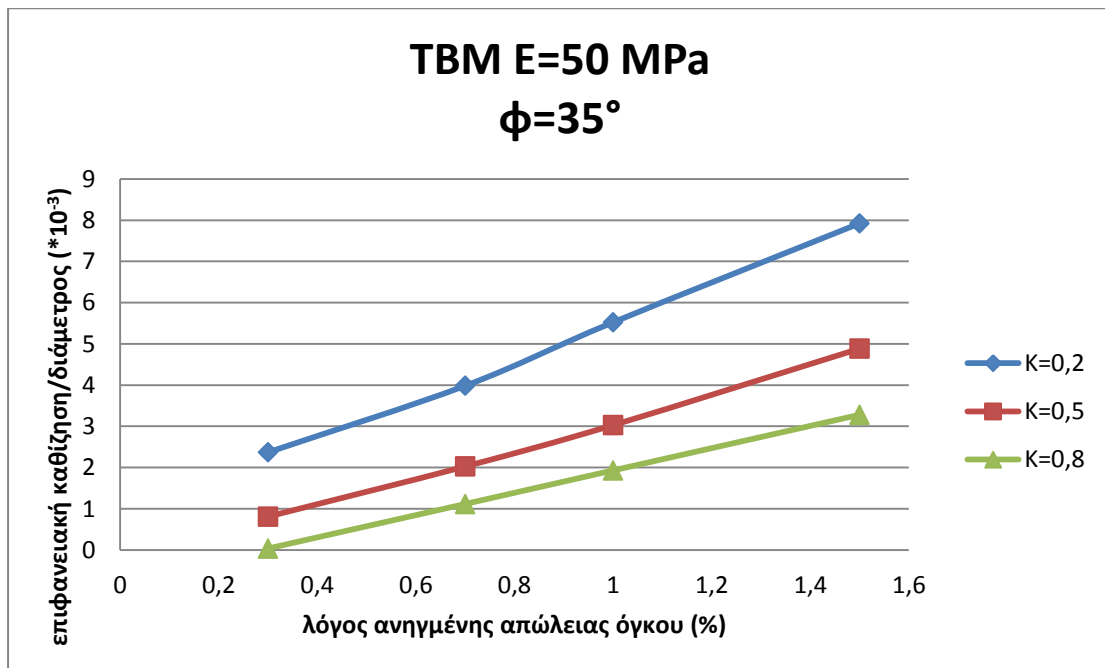
## 2.2.1. Επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $K$ , έγιναν αναλύσεις με τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, της συνοχής του εδάφους και του πάχους της επένδυσης.

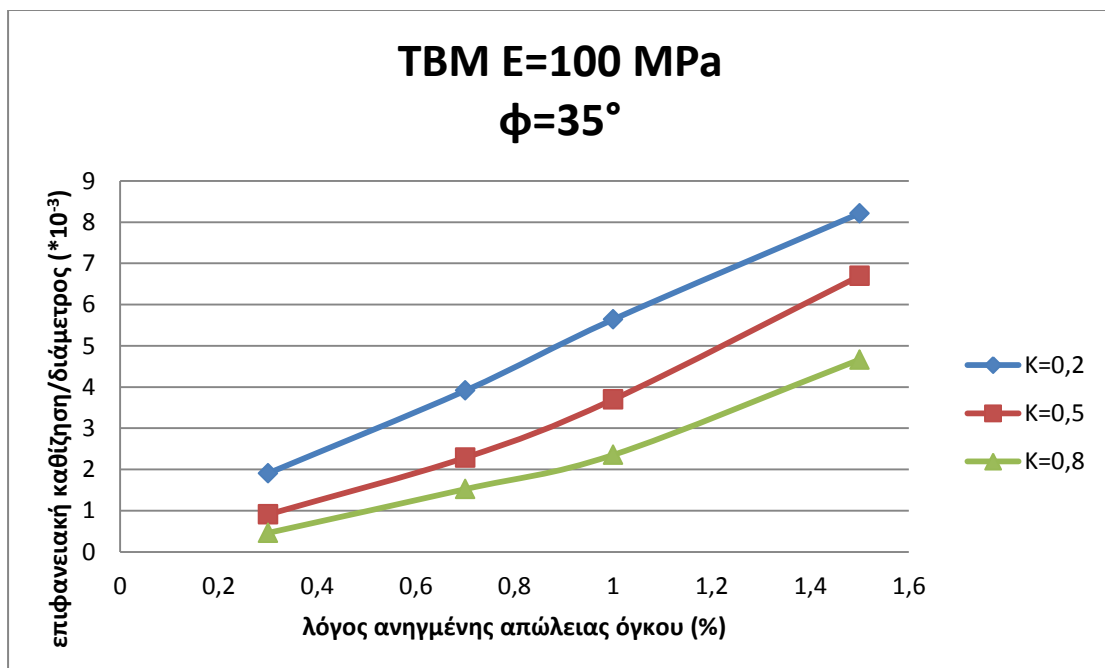
Οι αναλύσεις για τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας έγιναν με παραμέτρους διατμητικής αντοχής: γωνία τριβής  $35^\circ$  και συνοχή 30 kPa και για πάχος της επένδυσης 30 cm.



**Σχήμα 2.3.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 25 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

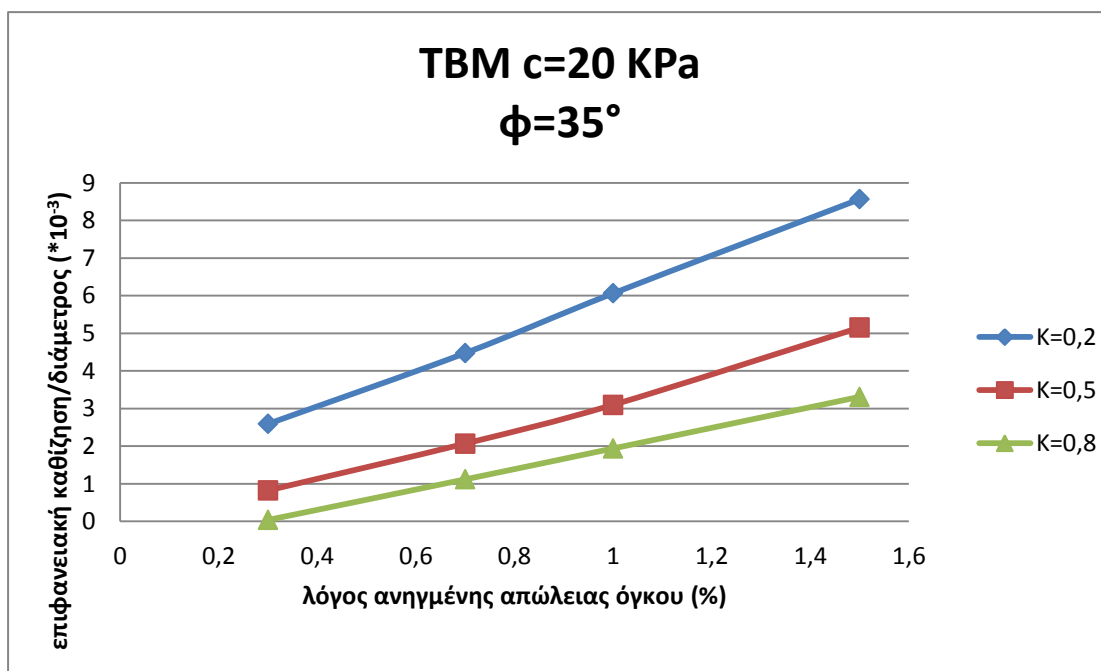


**Σχήμα 2.4.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 50 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

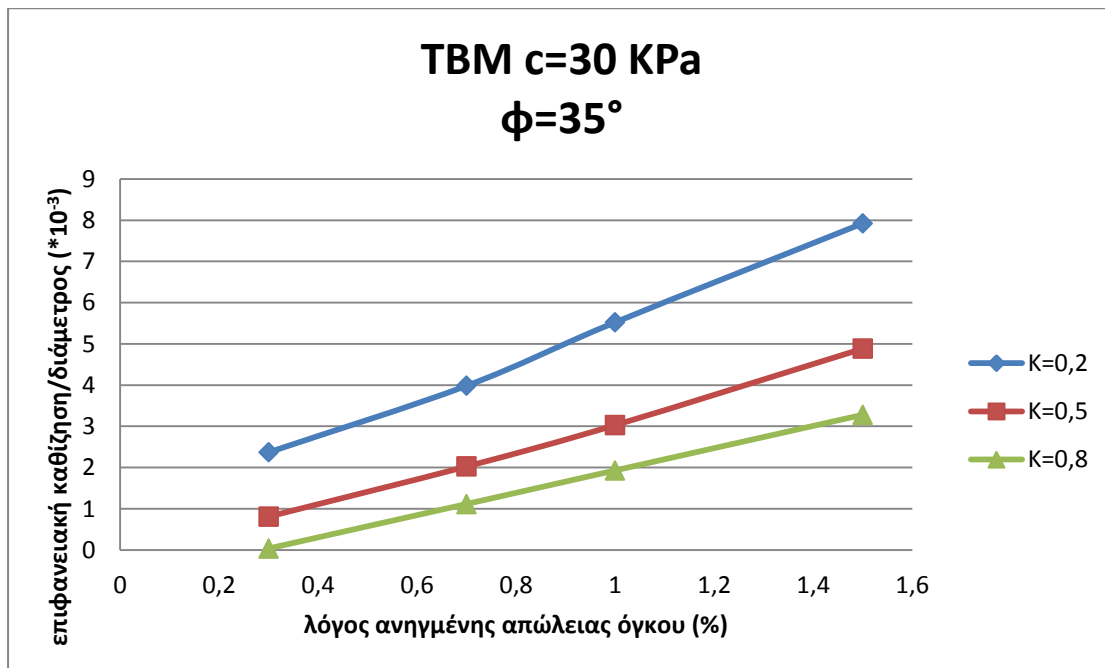


**Σχήμα 2.5.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 25 MPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

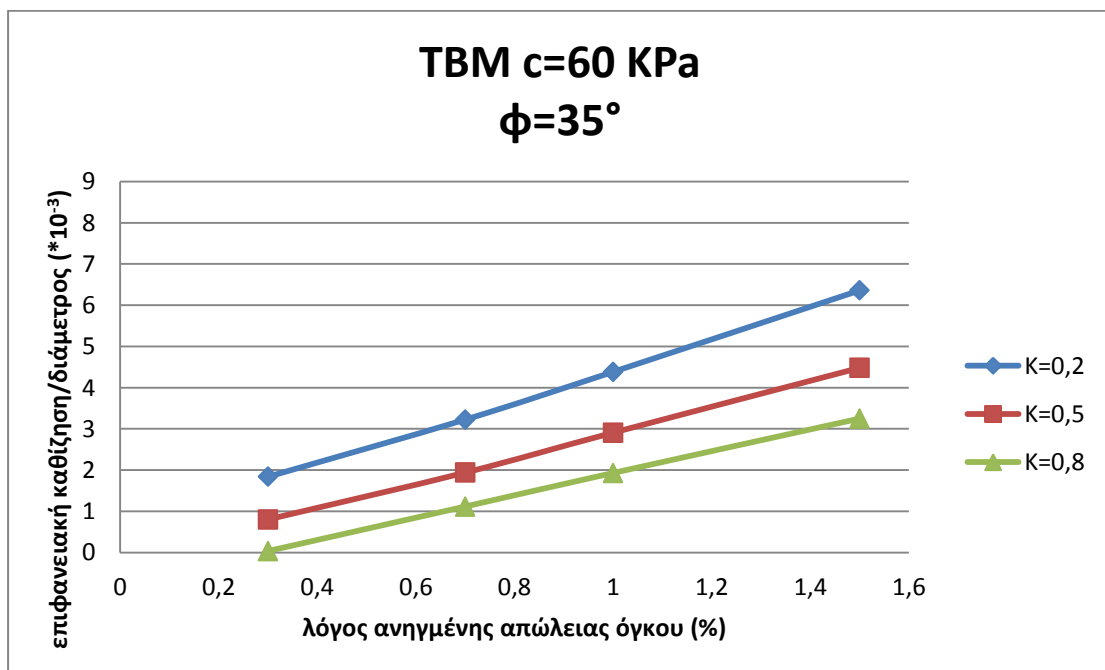
Οι αναλύσεις για τις διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους έγιναν προσομοιώνοντας έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 50 MPa, συνοχή 30 kPa και για πάχος της επένδυσης 30 cm.



**Σχήμα 2.6.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 20 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

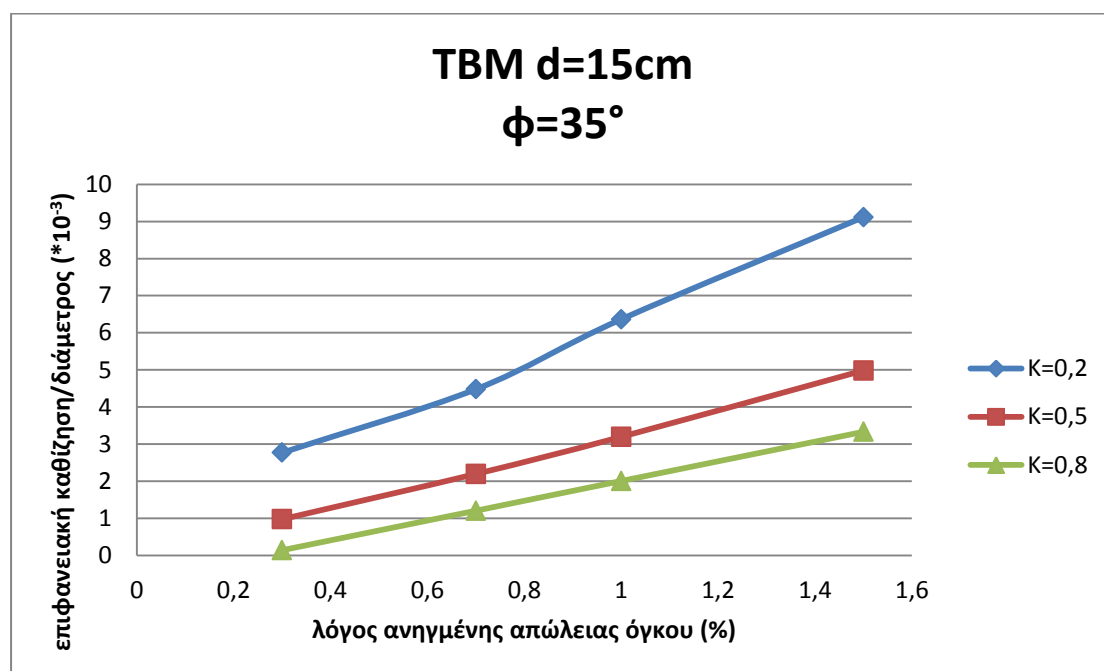


**Σχήμα 2.7.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 30 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων



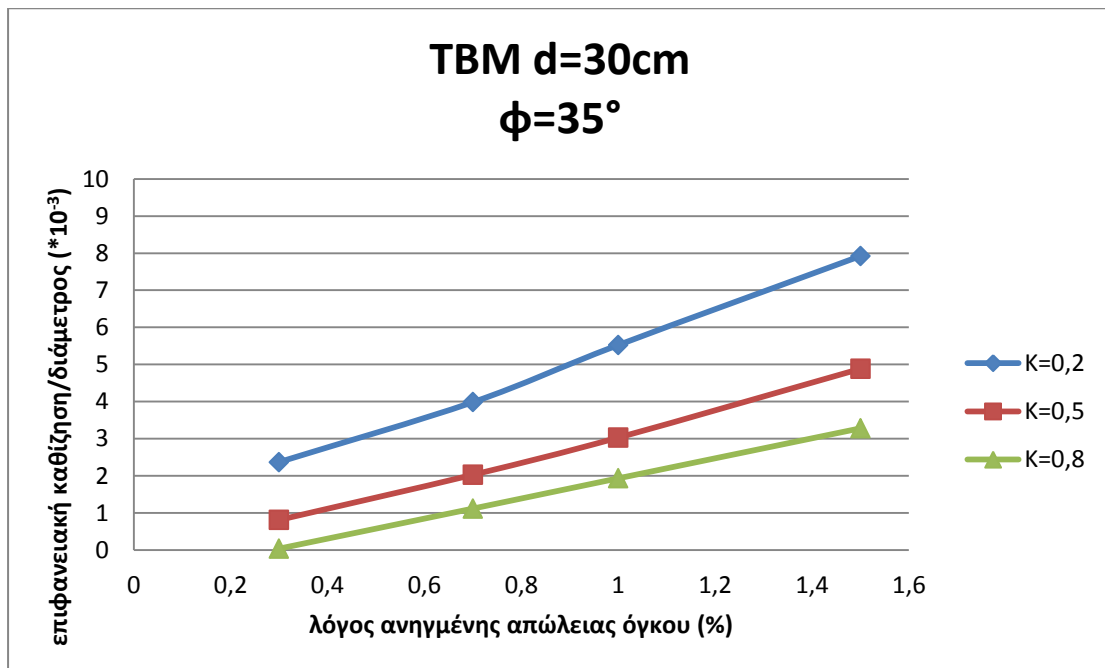
**Σχήμα 2.8.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM σε έδαφος με συνοχή 60 kPa και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

Οι αναλύσεις για τις διάφορες τιμές του πάχους επένδυσης έγιναν προσομοιώνοντας έδαφος με μέτρο ελαστικότητας 50 MPa και παραμέτρους διατμητικής αντοχής: γωνία τριβής 35° και συνοχή 30 kPa.

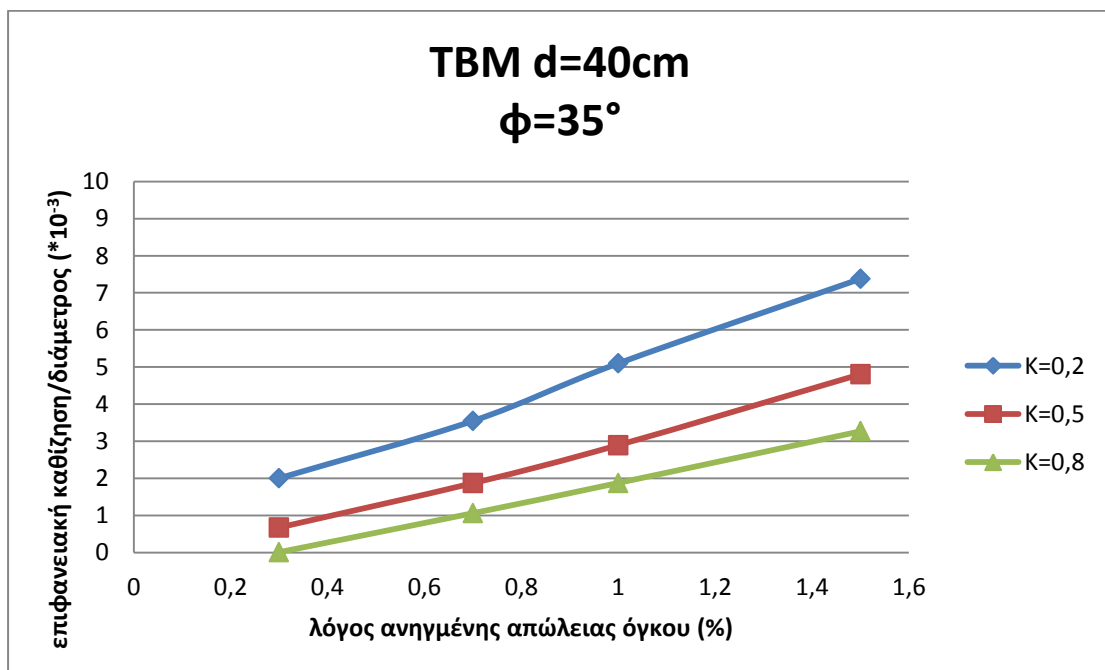


**Σχήμα 2.9.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 15 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων





**Σχήμα 2.10.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 30 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων



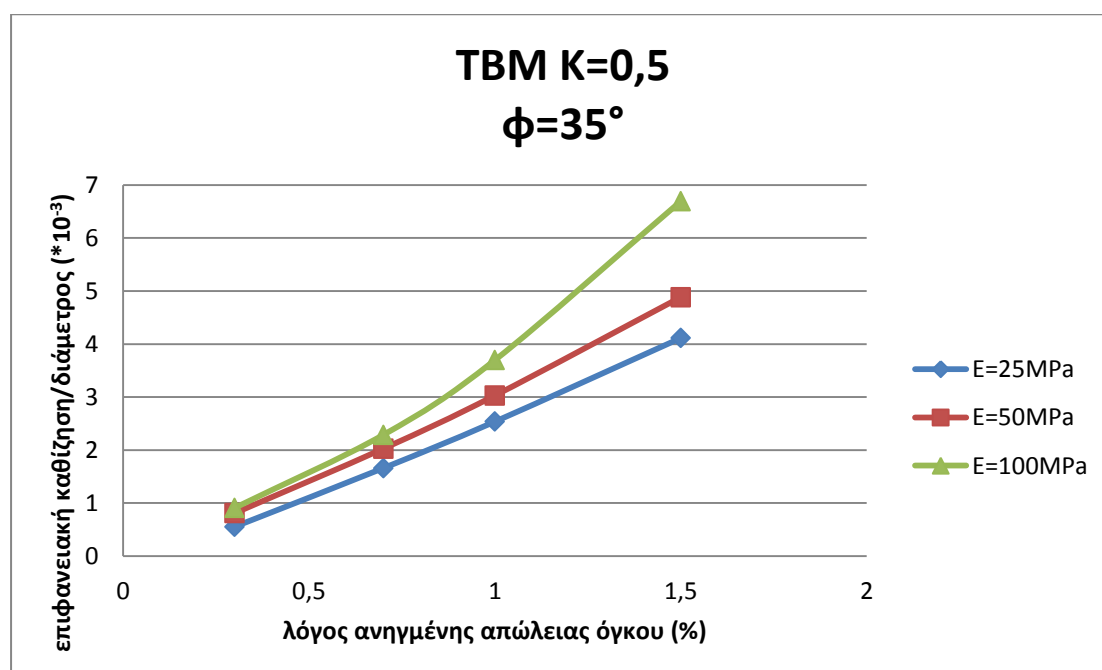
**Σχήμα 2.11.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM και πάχος επένδυσης 40 cm και για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

Για τις παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, της συνοχής του εδάφους και του πάχους επένδυσης προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα:

Αυξανόμενου του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων, προκύπτουν μικρότερες καθιζήσεις. Επίσης, αυξανόμενου του λόγου ανηγμένης απώλειας, η ποσοστιαία μείωση των καθιζήσεων λόγω μεταβολής του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων μικραίνει, δηλαδή για μικρούς λόγους ανηγμένης απώλειας όγκου οι ποσοστιαίες μειώσεις των καθιζήσεων είναι μεγάλες.

## 2.2.2. Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους

Για την εξέταση της επιρροής του μέτρου ελαστικότητας, θα γίνει σύγκριση των καθιζήσεων που προκύπτουν για μία μέση τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $K=0,5$ , για παραμέτρους διατμητικής αντοχής: γωνία τριβής  $35^\circ$  και συνοχή 30 kPa και για πάχος της επένδυσης 30 cm.



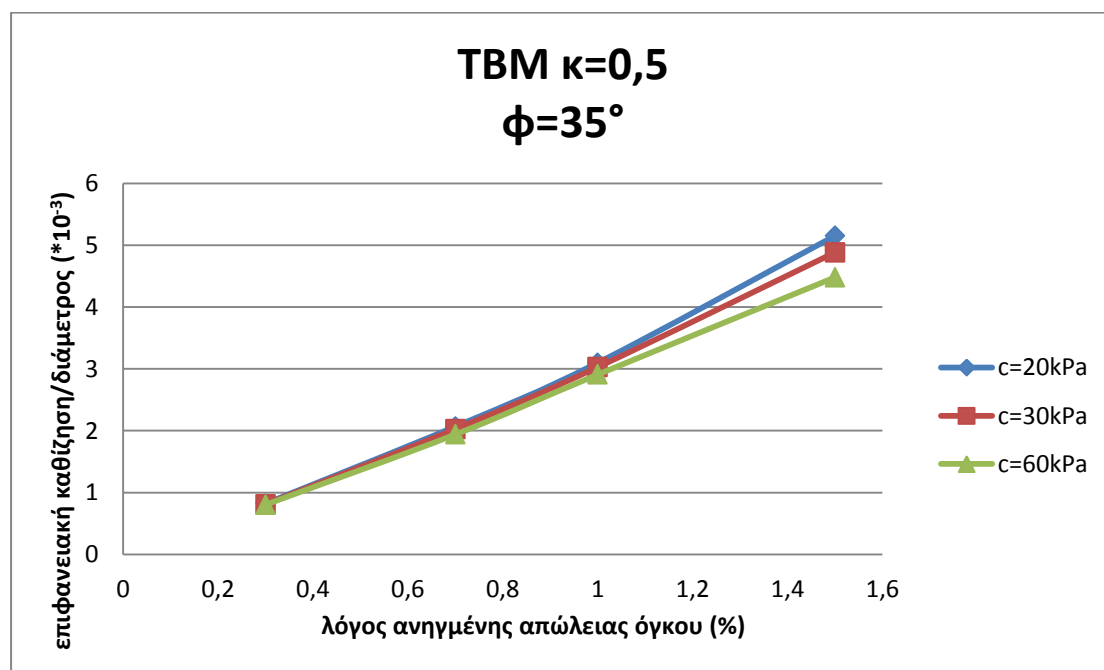
**Σχήμα 2.12.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθιζήσεως συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5

Από την παραμετρική ανάλυση, αναμέναμε τη μείωση των προκαλούμενων καθιζήσεων με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Παρ'

όλα αυτά, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, αυτό δεν συμβαίνει, αντίθετα παρατηρείται η αύξηση των καθιζήσεων αυξανόμενου του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους. Όμως η ποσοστιαία αύξηση των καθιζήσεων για τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας δεν φαίνεται να ακολουθεί κάποια αύξηση ή μείωση συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου, επομένως θεωρούμε ότι τελικά η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας είναι αμελητέα.

### 2.2.3. Επιρροή της συνοχής του εδάφους

Η επίδραση της συνοχής του εδάφους στη δημιουργία των επιφανειακών καθιζήσεων διερευνήθηκε για τις μέσες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων ( $K=0,5$ ), του μέτρου ελαστικότητας ( $E=50$  MPa) και του πάχους της επένδυσης ( $d=30$  cm). Η γωνία τριβής του εδάφους είναι  $35^\circ$ .



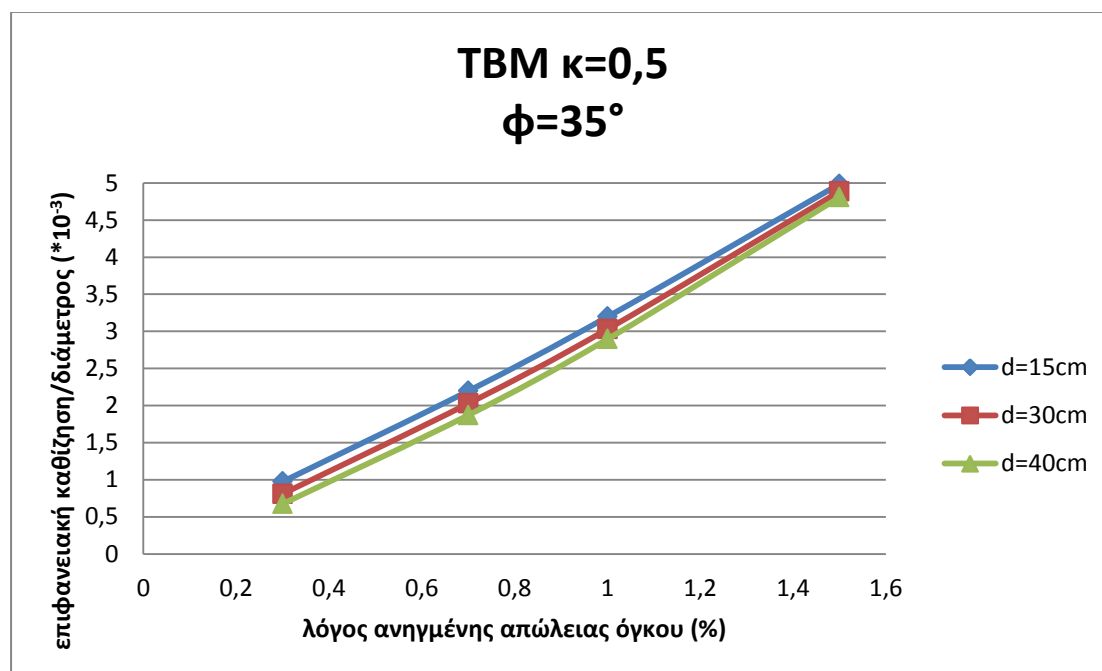
**Σχήμα 2.13.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, στους μικρότερους λόγους μείωσης του εμβαδού της διατομής (0,3, 0,7, 1), η ποσοστιαία μείωση των καθιζήσεων αυξανόμενης της συνοχής είναι της τάξης του 1-4% και φτάνει το

8% για τιμή του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου 1,5%. Άρα, η επιρροή της συνοχής είναι πολύ μικρή έως αμελητέα. Αυτό το συμπέρασμα είναι λογικό καθώς κατά τη διάνοιξη σήραγγας με TBM, καθοριστική παράμετρος για τη διαμόρφωση των καθιζήσεων είναι ο λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου (contraction). Η συνοχή του εδάφους εφόσον το έδαφος είναι μακριά από την αστοχία δεν επηρεάζει καθοριστικά τις εδαφικές μετακινήσεις.

## 2.2.4. Επιρροή του πάχους της επένδυσης

Στην παραμετρική ανάλυση με υπό εξέταση παράμετρο το πάχος της επένδυσης, προσομοιώθηκε έδαφος με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $K=0,5$ , μέτρο ελαστικότητας  $E=50$  MPa, συνοχή 30 kPa και γωνία τριβής  $35^\circ$ .



**Σχήμα 2.14.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου για διάνοιξη με TBM για διάφορες τιμές του πάχους της επένδυσης και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ποσοστιαία μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων αυξανόμενου του πάχους της επένδυσης 17% για τιμή του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου 0,3, 8% για τιμή του λόγου

ανηγμένης απώλειας 0,7, 5% για λόγο ανηγμένης απώλειας 1% και 2% για λόγο ανηγμένης απώλειας 1,5%. Επομένως το πάχος της επένδυσης ασκεί επιρροή για τους μικρότερους λόγους ανηγμένης απώλειας.

### 3. Διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάνοιξη με NATM

#### 3.1. Χαρακτηριστικά προσομοίωσης

##### A. Εισαγωγή δεδομένων

###### Έδαφος

Η ανάλυση με τη μέθοδο της νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM), έγινε προσομοιώνοντας έδαφος με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά όπως στις αναλύσεις που προηγήθηκαν με τη μέθοδο TBM:

εμβαδό	εδafικό καταστατικό προσομοίωμα
40*25 m <sup>2</sup>	Mohr-Coulomb

ειδικό βάρος	λόγος Poisson	συντελεστής αντοχής διεπιφάνειας
23kN/m <sup>2</sup>	0,2	67%

Πίνακας 3.1.: Εδαφικά χαρακτηριστικά

###### Σήραγγα

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το βάθος της σήραγγας που προσομοιώθηκε παραμένουν ίδια:

βάθος άξονα σήραγγας	σχήμα	διάμετρος
-15m	κυκλικό	10m

Πίνακας 3.2.: Χαρακτηριστικά σήραγγας

Οι αναλύσεις σε αυτό το κεφάλαιο γίνονται για διάνοιξη με τη νέα Αυστριακή μέθοδο (NATM). Με τη μέθοδο NATM, η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας ακολουθείται από την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια ή μόνο με αγκύρια. Ακολούθως τοποθετείται η τελική επένδυση. Για την προσομοίωση της αποτόνωσης των αρχικών τάσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα, πριν την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, χρησιμοποιείται ο βαθμός αποτόνωσης  $\lambda$ , που εισάγεται στο 2<sup>ο</sup> στάδιο (Calculations). Ο βαθμός αποτόνωσης  $\lambda$  εκφράζει την ισοδύναμη απομείωση των αρχικών πιέσεων (χαλάρωση) της βραχώμαζας στην περιοχή της σήραγγας και ορίζεται ως εξής:

$$\lambda = 1 - p_i / p_0$$

όπου  $p_i$ : ισοδύναμη εσωτερική πίεση

$p_0$ : αρχική γεωστατική πίεση

Η υποστήριξη προσομοιάστηκε με δακτύλιο από ελαστικό υλικό μέτρου ελαστικότητας 25 GPa, ενώ το πάχος του αποτελεί υπό εξέταση παράμετρο.

### **Αρχικές συνθήκες**

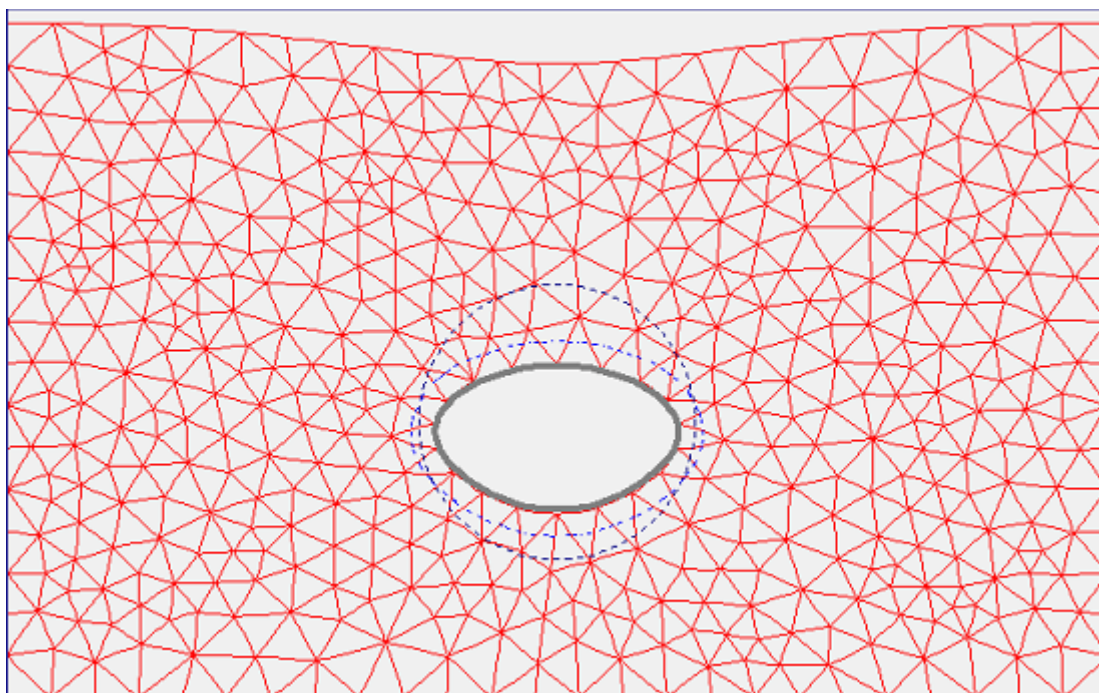
Στην ανάλυση έγινε υπόθεση ότι η σήραγγα βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων  $K$  αποτελεί παράμετρο υπό εξέταση.

### **B. Φάσεις επίλυσης**

Η αρχική (Φάση "0"), επιλύεται κατά την εισαγωγή των αρχικών συνθηκών, όπου υπολογίζονται οι γεωστατικές τάσεις. Στην 1<sup>η</sup> φάση, αφαιρείται το έδαφος στο εσωτερικό της σήραγγας και εφαρμόζεται ο βαθμός αποτόνωσης μέσω ενός συντελεστή ("SM-stage"), ο οποίος στην αρχική φάση έχει μηδενική τιμή και σε αυτή τη φάση λαμβάνει την τιμή του βαθμού αποτόνωσης  $\lambda$ . Στη 2<sup>η</sup> φάση, ενεργοποιείται η επένδυση.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η παραμόρφωση της διατομής στο τέλος της 1<sup>ης</sup> φάσης, όταν έχει εφαρμοστεί ο συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda$  στην ανάλυση για με  $\lambda=0,5$ , πάχος επένδυσης 30 cm και για έδαφος με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέτρο ελαστικότητας 100 MPa
- Συνοχή 30 kPa
- Συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5



**Σχήμα 3.1.:** Αποτελέσματα επίλυσης της 1<sup>ης</sup> φάσης για διάνοιξη με NATM

### 3.2. Παραμετρικές αναλύσεις

Οι υπό εξέταση παράμετροι και οι τιμές τους είναι οι εξής:

Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Συνοχή c (kPa)	Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K	βαθμός αποτόνωσης $\lambda$
25	20	0,2	0,3
50	30	0,5	0,5
100	60	0,8	0,7

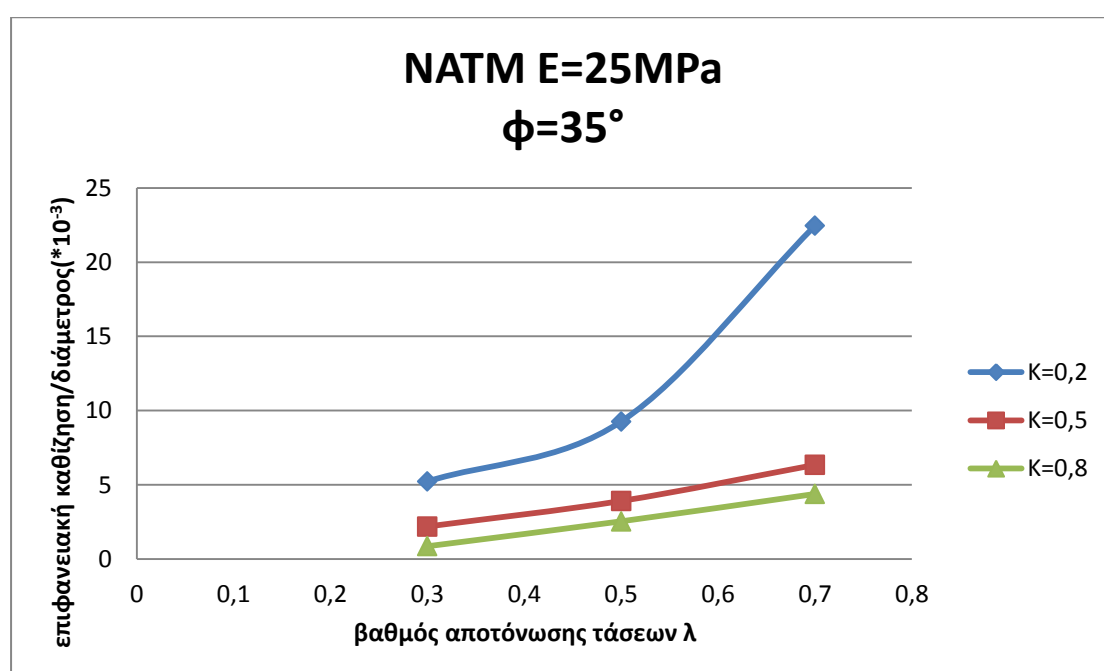
**Πίνακας 3.3.:** Παράμετροι υπό εξέταση



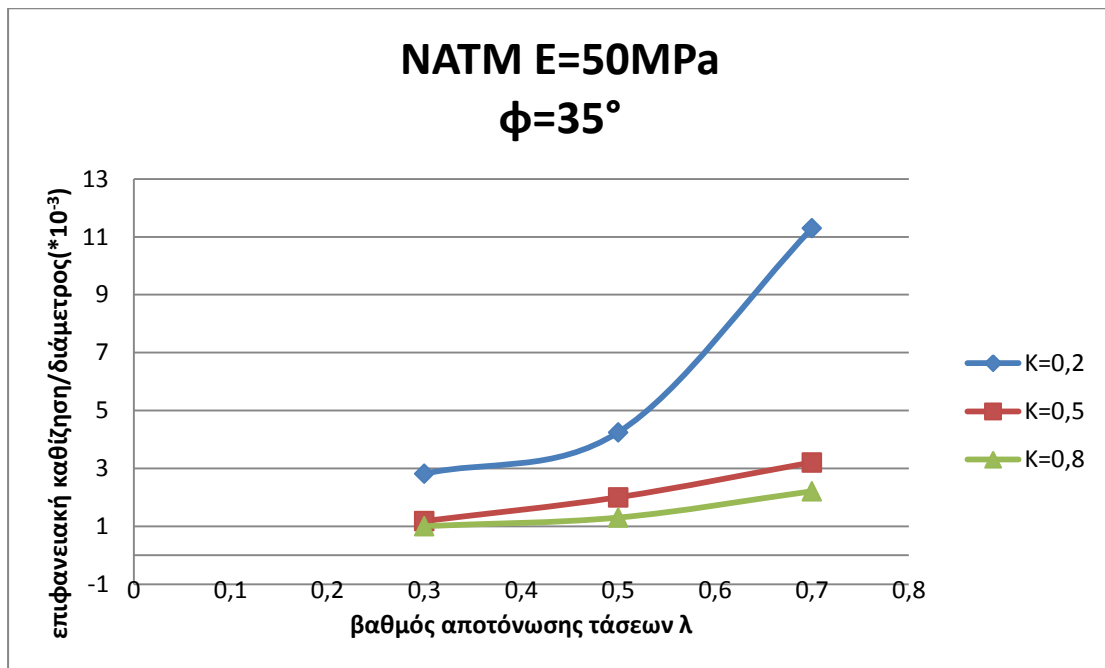
### 3.2.1. Επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

Εξετάστηκε η επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και με τη μέθοδο διάνοιξης NATM. Έγιναν αναλύσεις για τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής του εδάφους.

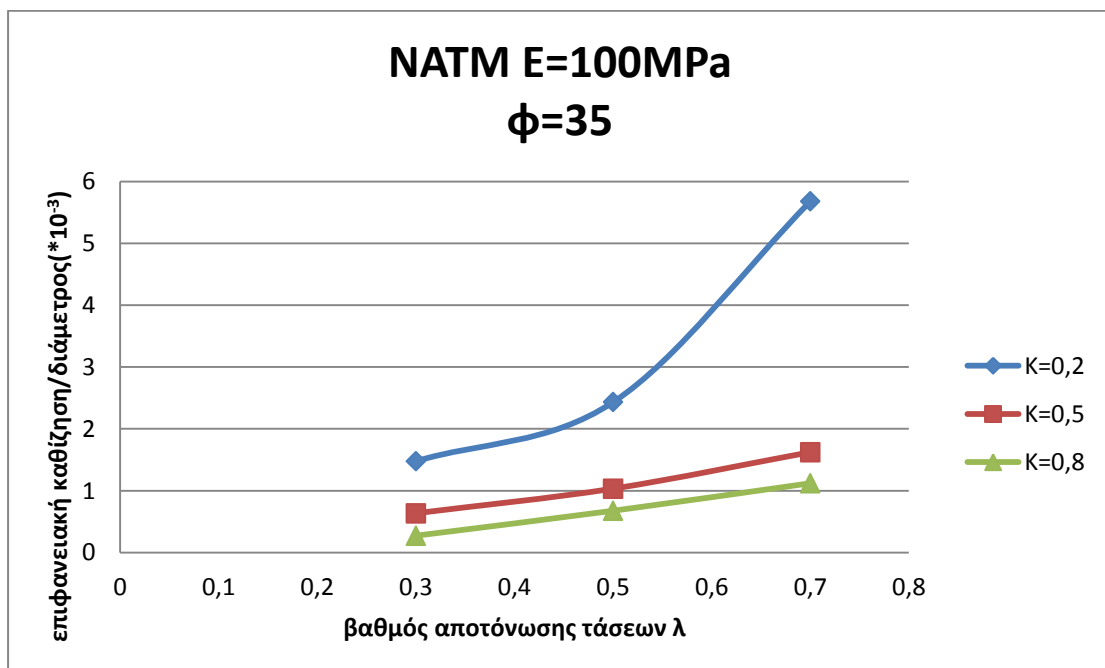
Οι παρακάτω αναλύσεις για τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας έγιναν για έδαφος με συνοχή 30kPa και γωνία τριβής 35° και για πάχος της επένδυσης 30cm.



**Σχήμα 3.2.:**Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 25MPa



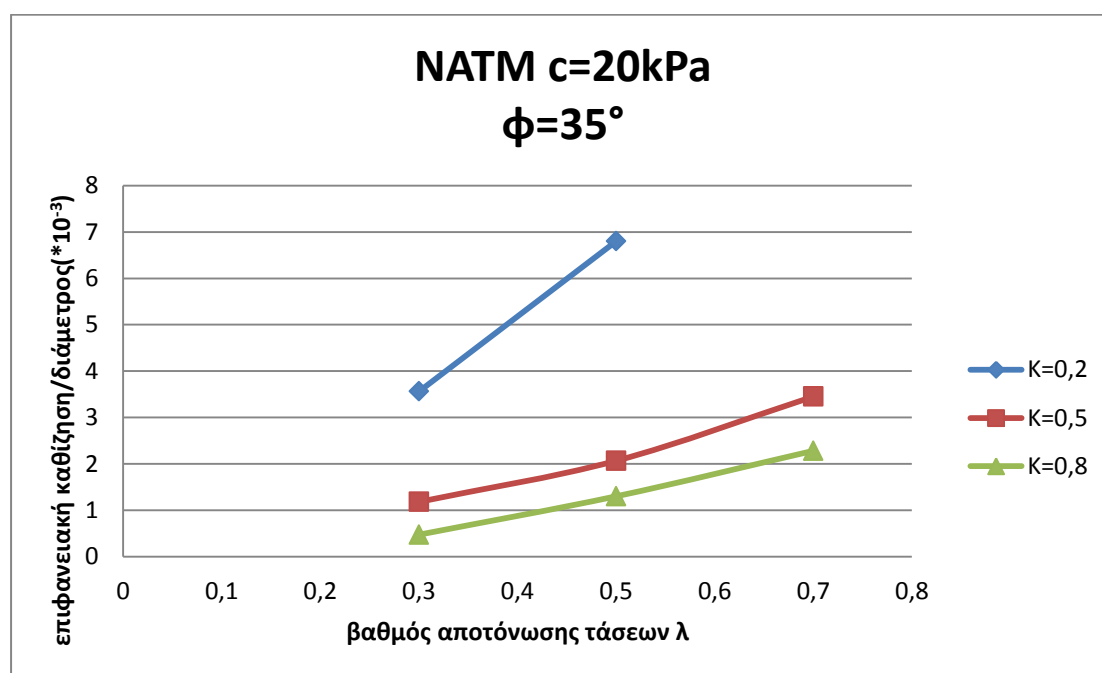
**Σχήμα 3.3.:**Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 50MPa



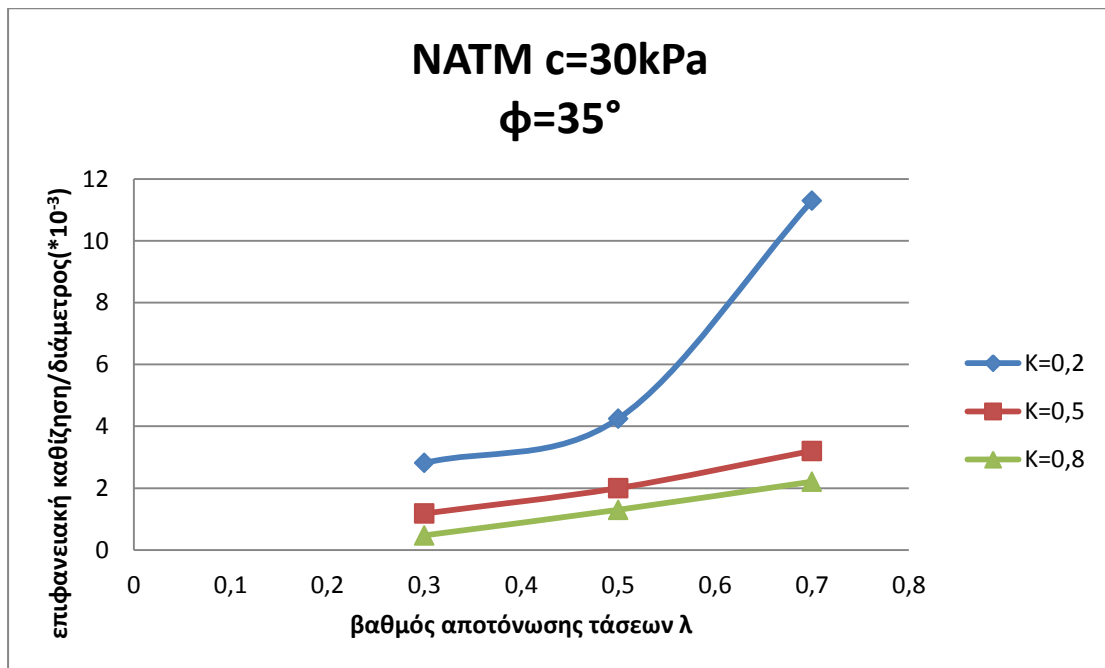
**Σχήμα 3.4.:**Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και μέτρο ελαστικότητας εδάφους 100MPa

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι αυξανόμενου του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων μειώνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις. Δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης με την επιρροή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων στις επιφανειακές καθιζήσεις. Μία μέτρηση που ξεχωρίζει είναι για βαθμό αποτόνωσης 0,7 και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,2. Η ποσοστιαία αύξηση της επιφανειακής καθίζησης για τις παραπάνω τιμές από τη μέτρηση για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5 και βαθμό αποτόνωσης 0,7 είναι περίπου 70% και για τις 3 τιμές του μέτρου ελαστικότητας.

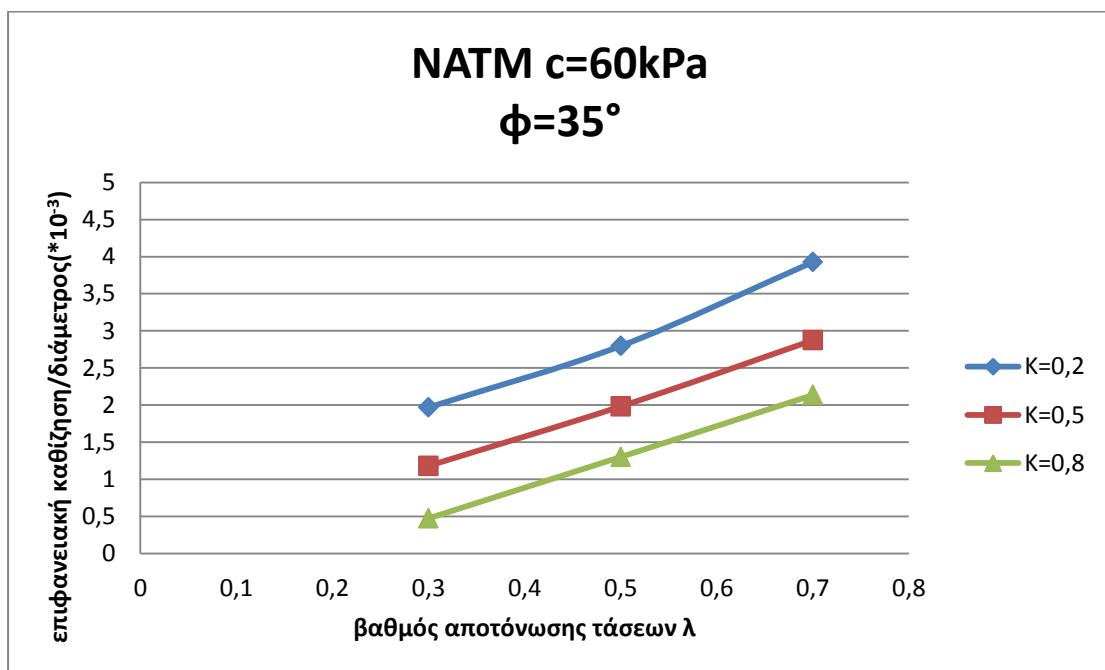
Στις επόμενες αναλύσεις μεταβάλλεται η συνοχή του εδάφους. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε 50MPa και το πάχος της επένδυσης 30cm. Η γωνία τριβής του εδάφους είναι 35°.



**Σχήμα 3.5.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 20 kPa



**Σχήμα 3.6.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 30 kPa

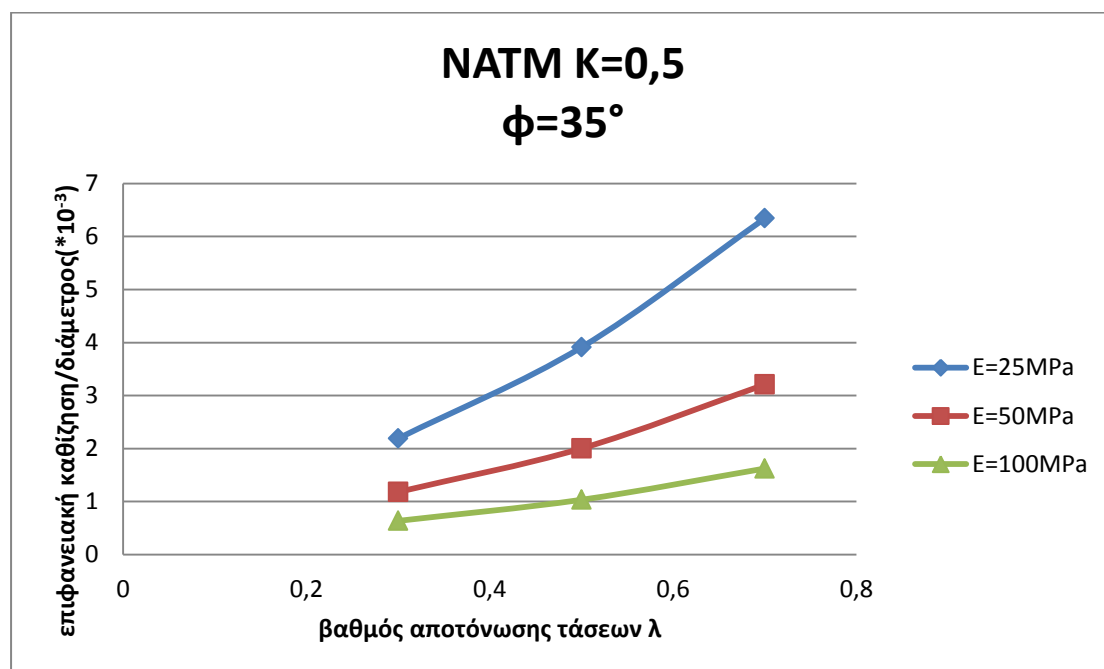


**Σχήμα 3.7.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάνοιξη με NATM για διάφορες τιμές του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και συνοχή του εδάφους 60 kPa

Οι αναλύσεις δείχνουν μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων αυξανόμενου του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων.

### 3.2.2. Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους

Οι αναλύσεις για τις διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας έγιναν με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $\kappa=0,5$ , συνοχή 30 kPa και πάχος επένδυσης 30 cm.

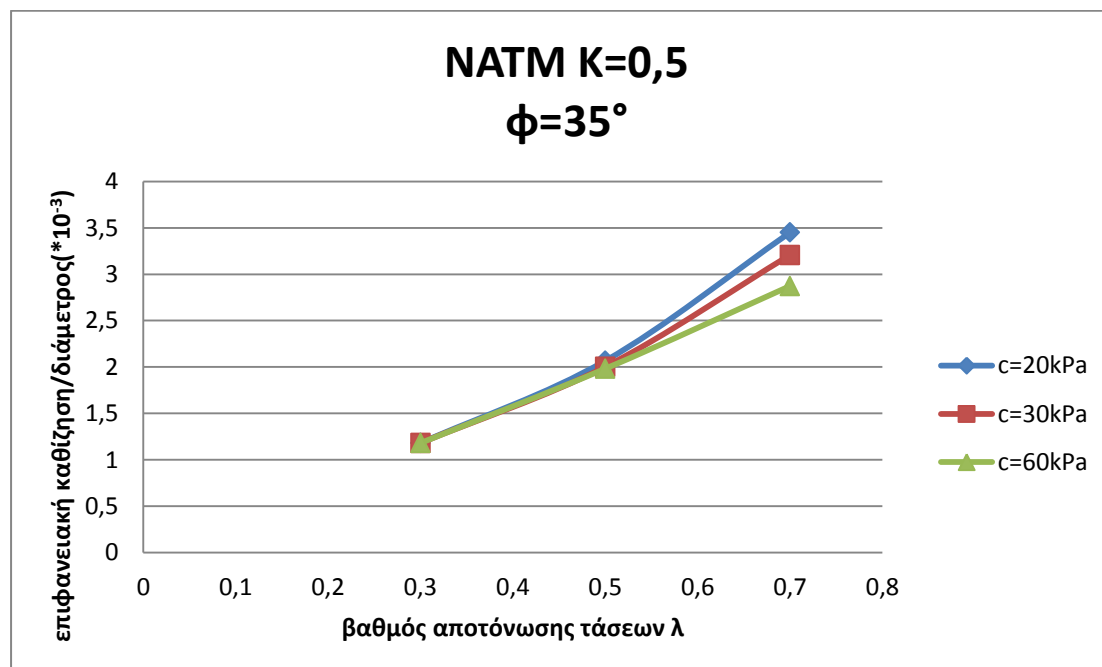


**Σχήμα 3.8.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους για διάνοιξη με NATM και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5

Από τη σύγκριση των αναλύσεων για τα διάφορα E προκύπτει η αναμενόμενη μείωση των καθιζήσεων αυξανόμενου του μέτρου ελαστικότητας. Η ποσοστιαία μείωση είναι της τάξης του 46-49%. Επομένως είναι εμφανής η σημαντική επιρροή του μέτρου ελαστικότητας στη διαμόρφωση των καθιζήσεων επιφάνειας για διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο NATM.

### 3.2.3. Επιρροή της συνοχής του εδάφους

Για την εξέταση της επιρροής της συνοχής, έγιναν αναλύσεις με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $\kappa=0,5$ , μέτρο ελαστικότητας 50MPa και πάχος επένδυσης 30cm.



**Σχήμα 3.9.:** Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης τάσεων για διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους για διάνοιξη με NATM και συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις διάφορες τιμές της συνοχής του εδάφους δείχνουν ταύτιση των καμπύλων για βαθμό αποτόνωσης 0,3, ποσοστιαία μείωση της καθίζησης αυξανομένης της συνοχής 1-3% για βαθμό αποτόνωσης 0,5 και 7-10% για βαθμό αποτόνωσης 0,7.

## 4. Τριδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις

### 4.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και χαρακτηριστικά προσομοίωσης

Για την τριδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Plaxis 3D, το οποίο δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης στις 3 διαστάσεις της παραμόρφωσης και της ευστάθειας για πληθώρα γεωτεχνικών εφαρμογών με αναπαράσταση σύνθετων γεωτεχνικών κατασκευών και κατασκευαστικών διαδικασιών. Όπως και στη διδιάστατη ανάλυση, το πρόγραμμα Plaxis 3D περιλαμβάνει 3 στάδια λειτουργίας.

- Input
- Calculations
- Output

Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο, εισάγεται η γεωμετρία του προσομοιώματος, τα χαρακτηριστικά διακριτοποίησης του χώρου και οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδάφους και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του γεωτεχνικού προβλήματος. Επίσης, καθορίζονται οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο, η δυνατότητα της κατασκευής σε στάδια ("Staged construction") προσφέρει μια ρεαλιστική προσομοίωση των διαδικασιών κατασκευής και εκσκαφής ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας εδαφικούς όγκους και κατασκευαστικά εργαλεία. Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις μετά από κάθε φάση κατασκευής.

## A. Εισαγωγή δεδομένων

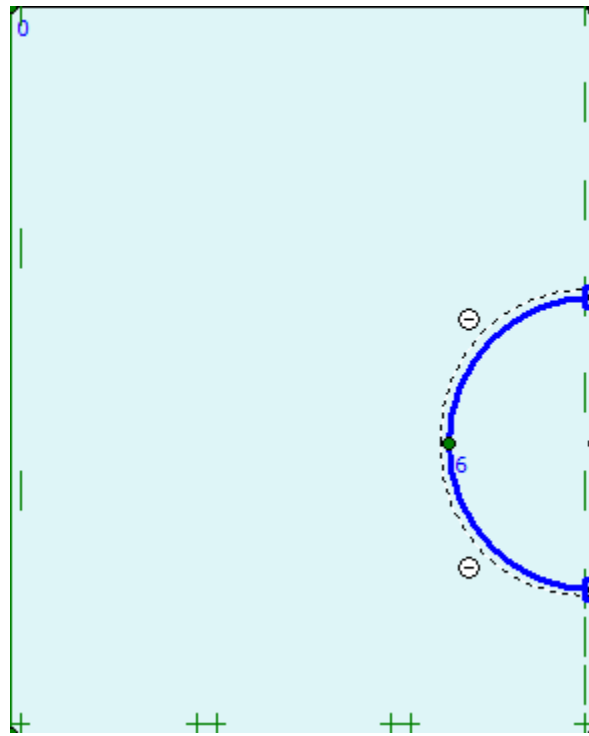
### Έδαφος

Το προσομοίωμα περιλαμβάνει τριδιάστατες παράλληλες λωρίδες. Αρχικά, εισάγουμε τα χαρακτηριστικά στις 2 διαστάσεις (στη διατομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας). Για οικονομία του χρόνου της υπολογιστικής διαδικασίας και λόγω του συμμετρικού σχήματος της σήραγγας, έγινε επίλυση του μισού προσομοιώματος. Έτσι, το έδαφος εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας είναι εμβαδού 25\*20m και τα στοιχεία του καννάβου 15-κομβά. Σε κάθε επίπεδο εγκάρσια του άξονα της σήραγγας, επιτρέπεται η κατακόρυφη κύλιση των πλάγιων συνόρων και δεσμεύεται η οριζόντια μετακίνησή τους, ενώ δεσμεύονται και οι μετακινήσεις του χαμηλότερου οριζόντιου συνόρου. Έγινε προσομοίωση εδάφους με ειδικό βάρος  $23 \text{ kN/m}^3$ , μέτρο ελαστικότητας 25 MPa, λόγο Poisson 0,2, γωνία τριβής  $35^\circ$ , συνοχή 30 kPa, μηδενική γωνία διαστολικότητας και συμπεριφορά σύμφωνα με το εδαφικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Για τις διεπιφάνειες λήφθηκε αντοχή του εδάφους απομειωμένη στο 67% της συνολικής. Στην τρίτη διάσταση (παράλληλα στον άξονα της σήραγγας), το έδαφος προσομοιάστηκε με 44 παράλληλες λωρίδες πάχους 1,5m, επομένως προσομοιάστηκαν συνολικά 66 m μήκους εδάφους.

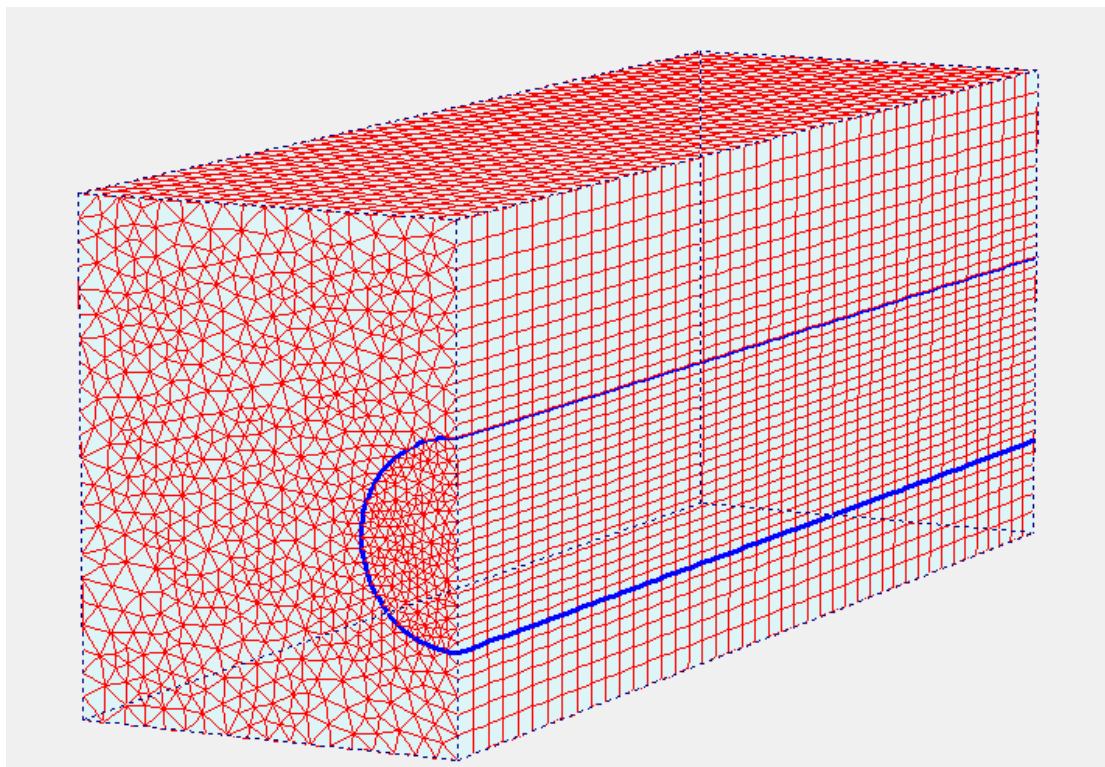
### Σήραγγα

Όπως και στις διδιάστατες αναλύσεις που παρουσιάστηκαν, ο άξονας της συμμετρικής σήραγγας κυκλικού σχήματος ακτίνας 5m, τοποθετήθηκε σε βάθος 15m. Όσον αφορά τη μέθοδο διάνοιξης, προσομοιάστηκε η εκσκαφή του εδάφους με TBM, με την εξής απλούστευση: δεν προκαθορίστηκε λόγος ανηγμένης απώλειας όγκου στη διατομή (contraction), αλλά επιτράπηκε η αποτόνωση των πιέσεων έως ότου τοποθετηθεί η επένδυση. Έτσι, κάθε λωρίδα έμεινε ανυποστήριχτη μετά την εκσκαφή της, μέχρι την εκσκαφή της επόμενης λωρίδας, όταν και υποστηρίζεται. Επιλέχθηκε η τοποθέτηση επένδυσης ελαστικού υλικού μέτρου ελαστικότητας 25 GPa, ενώ έγιναν αναλύσεις για 2 πάχη ( $d=15 \text{ cm}$  και  $d=40 \text{ cm}$ ).





**Σχήμα 4.1.:** Προσομοίωση τριδιάστατου προβλήματος σε τομή εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας



**Σχήμα 4.2.:** Προοπτική απεικόνιση τριδιάστατου προβλήματος

## Αρχικές συνθήκες

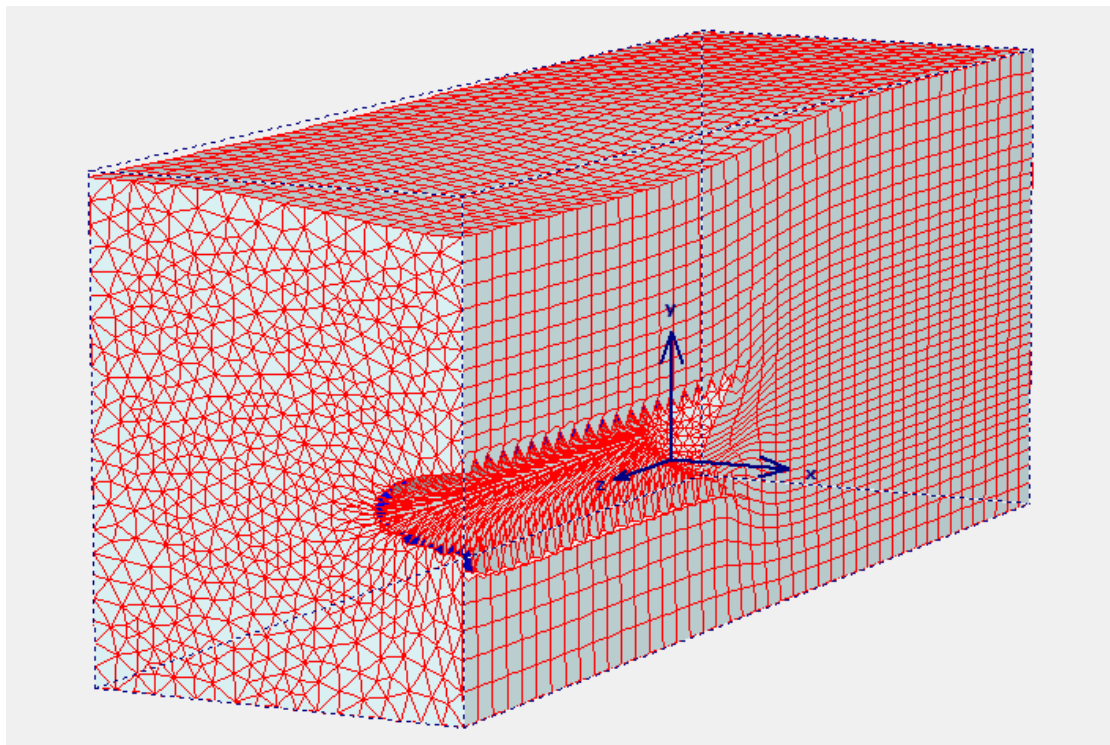
Σε ό,τι αφορά τις αρχικές συνθήκες, έγινε υπόθεση ότι η σήραγγα βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ οι αρχικές γεωστατικές τάσεις υπολογίστηκαν με συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων 0,5.

## B. Φάσεις επίλυσης

Για την πιο σωστή προσομοίωση του προβλήματος και την αναπαράσταση ενός αμετακίνητου πλευρικού συνόρου, δεν έγινε διάνοιξη στο σύνολο των 66m μήκους εδάφους (44 λωρίδες), αλλά μόνο στα 51m (34 λωρίδες), ώστε οι 10 παράλληλες λωρίδες που δεν διανοίχτηκαν να εμποδίζουν την περαιτέρω οριζόντια μετακίνηση, η οποία στην πραγματικότητα δεν υπάρχει, αφού το έδαφος συνεχίζεται στη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας πριν την αρχή της και μετά το τέλος της.

Όπως και στη διδιάστατη ανάλυση, στην αρχική φάση (Φάση "0"), γίνεται ο υπολογισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων. Για την προσομοίωση της κατά τμήματα εκσκαφής και τοποθέτησης υποστήριξης, η επίλυση έγινε σε 35 φάσεις. Σε κάθε διαδοχική φάση, γίνεται η απενεργοποίηση του εδάφους στο επίπεδο που διανοίγεται και η ενεργοποίηση της υποστήριξης στο προηγούμενο επίπεδο που έχει διανοιχτεί στη φάση που προηγήθηκε.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3., η παραμορφωμένη μορφή του προσομοιώματος μετά την επίλυση της φάσης 20, όταν έχουν διανοιχτεί 30m μήκους εδάφους και υποστηριχτεί τα 28,5 m:

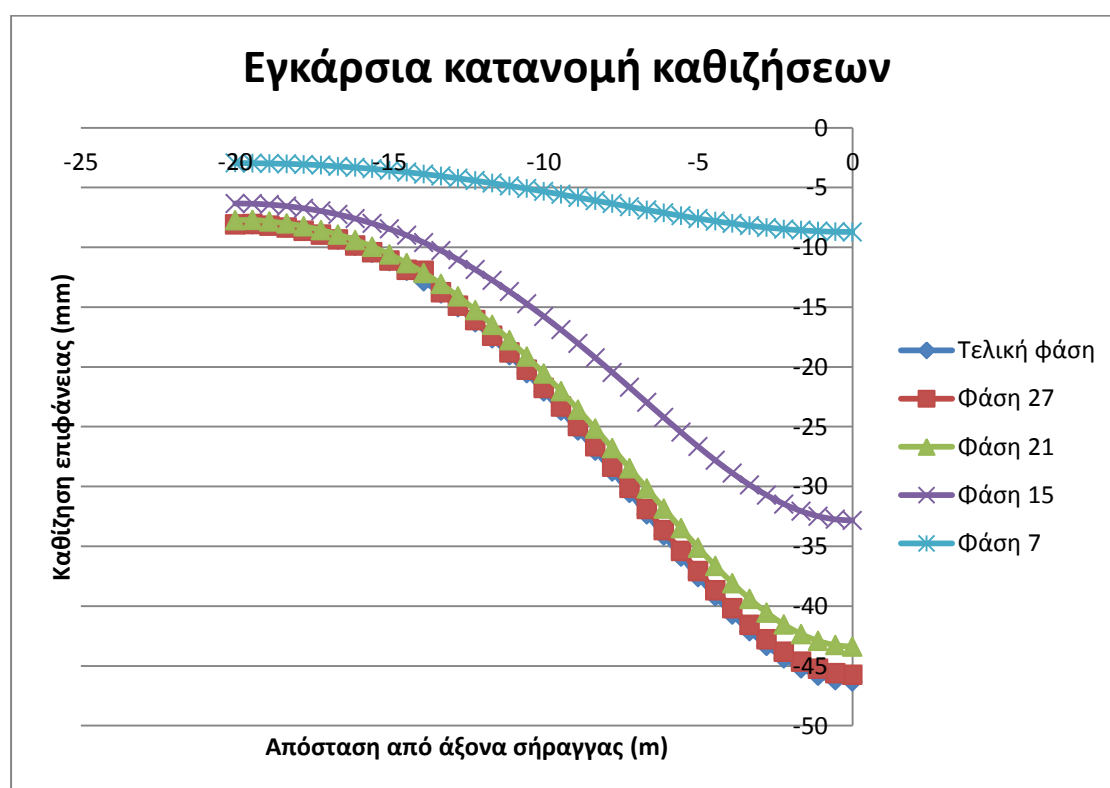


**Σχήμα 4.3.:** Παραμορφωμένη μορφή του προσομοιώματος μετά την επίλυση της φάσης 20 της διάνοιξης

## 4.2. Ανάλυση με πάχος επένδυσης 15 cm

### A. Κατανομή καθιζήσεων σε εγκάρσια τομή

Για την παρακολούθηση της κατανομής των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους εγκάρσια του άξονα της σήραγγας, ορίστηκε διατομή παρακολούθησης στο επίπεδο N (στα 21m από την αρχή της σήραγγας). Παρακάτω φαίνονται οι καθιζήσεις της διατομής παρακολούθησης στην τελική φάση (Φάση 35), στη φάση όπου έχει τοποθετηθεί η υποστήριξη στο μήκος της σήραγγας μέχρι τη διατομή παρακολούθησης (Φάση 15) και σε κάποιες ενδιάμεσες φάσεις.



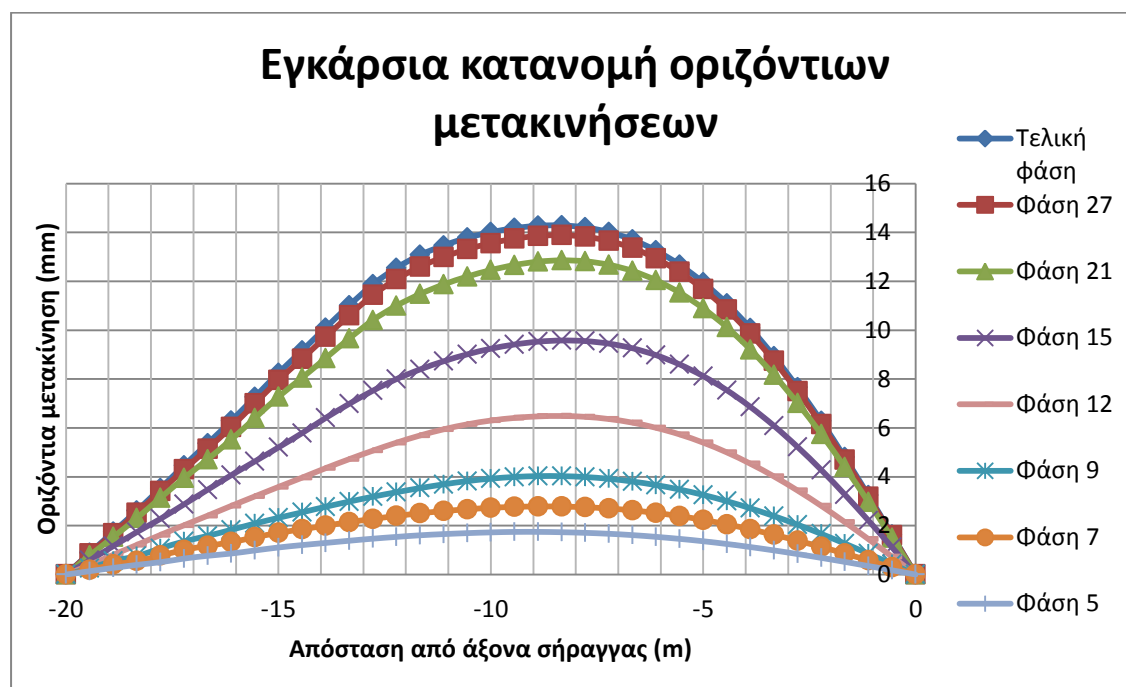
**Σχήμα 4.4.:** Κατανομή καθιζήσεων επιφάνειας εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 15 cm

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η επιφανειακή καθίζηση στη διατομή παρακολούθησης στη θέση του άξονα της σήραγγας στη φάση 15, όταν και υποστηρίζεται η συγκεκριμένη διατομή ( $s=32,839$ ) αποτελεί το 71% της τελικής καθίζησης (φάση 35) ( $s=46,324$ ). Αυτό δείχνει

την ταχεία ανάπτυξη των καθιζήσεων που οφείλεται στις μικρές τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής: της συνοχής (30kPa) και της γωνίας τριβής (35°).

## Β. Εκτίμηση σημείου καμπής εγκάρσιας κατανομής επιφανειακών καθιζήσεων

Μία σημαντική παράμετρος της εγκάρσιας κατανομής των καθιζήσεων, αποτελεί η θέση του σημείου καμπής  $i$ . Η εκτίμηση της έγινε βάσει της κατανομής των οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους και συγκεκριμένα του σημείου στο οποίο αυτές μεγιστοποιούνται σε κάθε φάση:



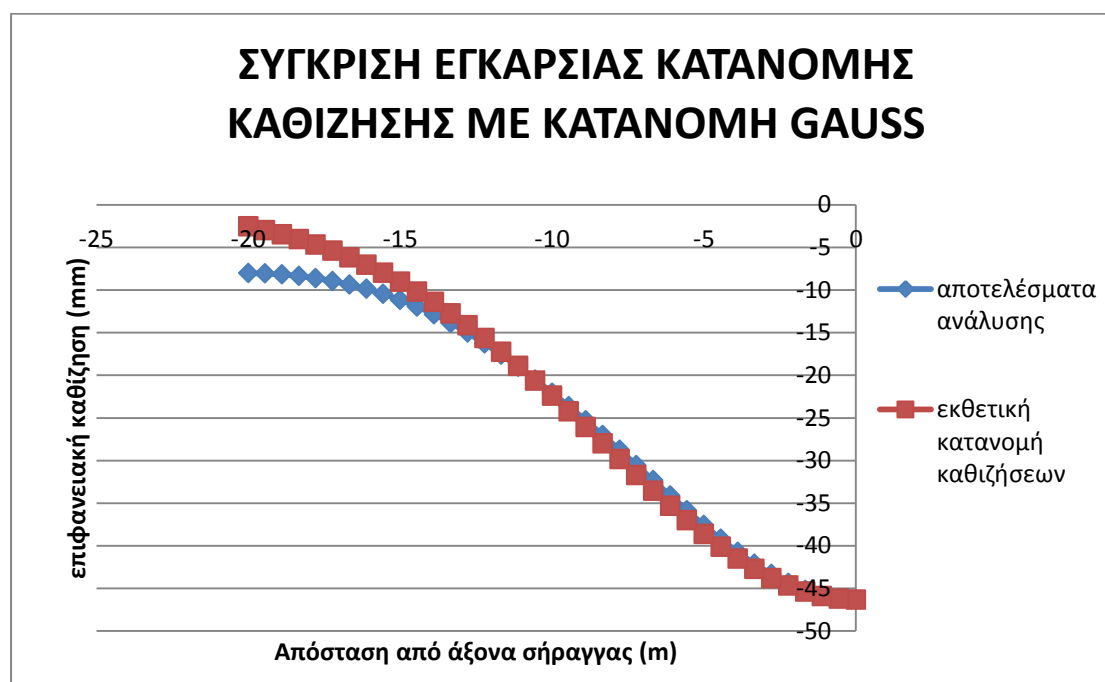
**Σχήμα 4.5.:** Κατανομή οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 15cm

Από τις κατανομές των οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων προκύπτει μεγιστοποίησή τους για τις αρχικές φάσεις 5,7 και 9 στα 8,9 m από τον άξονα της σήραγγας και για τις επόμενες φάσεις 12, 15, 21, 27 και 35 στα 8,3 m. Επομένως, το σημείο καμπής των επιφανειακών καθιζήσεων πλησιάζει ελάχιστα τον άξονα της σήραγγας όσο προχωράει το μέτωπο. Επομένως, το σημείο καμπής της εγκάρσιας κατανομής των επιφανειακών καθιζήσεων στη

διατομή παρακολούθησης παραμένει το ίδιο όταν το μέτωπο βρίσκεται στη διατομή παρακολούθησης (φάση 15) και όταν βρίσκεται στην τελευταία διατομή που διανοίγεται (τελική φάση). Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη παρατήρηση που ήδη έχει γίνει σχετικά με την ταχεία ανάπτυξη των καθιζήσεων, η οποία οφείλεται στη μικρή διατμητική αντοχή του εδάφους.

## Γ. Σύγκριση εγκάρσιας κατανομής με κατανομή Gauss

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, έχει γίνει αποδεκτή η προσέγγιση της εγκάρσιας κατανομής των καθιζήσεων με την καμπύλη της κατανομής Gauss. Παρακάτω σχεδιάζεται η εκθετική κατανομή για τις μετρήσεις της επιφανειακής καθίζησης της διατομής παρακολούθησης για θέση του σημείου καμπής  $i=8,3$  m. Επίσης σχεδιάζεται η εγκάρσια κατανομή των καθιζήσεων  $s$  της διατομής παρακολούθησης.



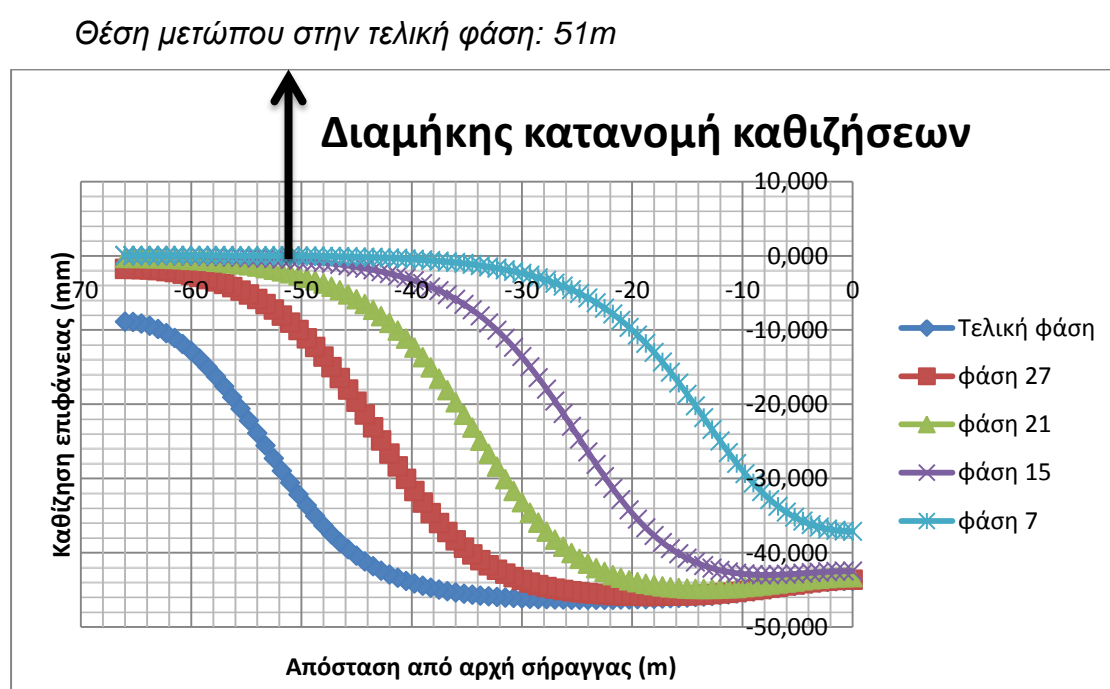
**Σχήμα 4.6.:** Κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή βάσει των αποτελεσμάτων της τριδιάστατης ανάλυσης και κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων της διατομής ακολουθώντας τον εκθετικό νόμο

Στο σχήμα φαίνεται ότι οι δύο κατανομές έχουν παρόμοια μορφή και οι τιμές τους σε κάθε σημείο της διατομής δεν διαφέρουν πάνω από 20%.

Επομένως, η υπόθεση για προσέγγιση της εγκάρσιας κατανομής των καθιζήσεων με την κατανομή Gauss επαληθεύεται.

#### Δ. Κατανομή καθιζήσεων σε διαμήκη τομή

Τα αποτελέσματα για τις επιφανειακές καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας σε διάφορες φάσεις της ανάλυσης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



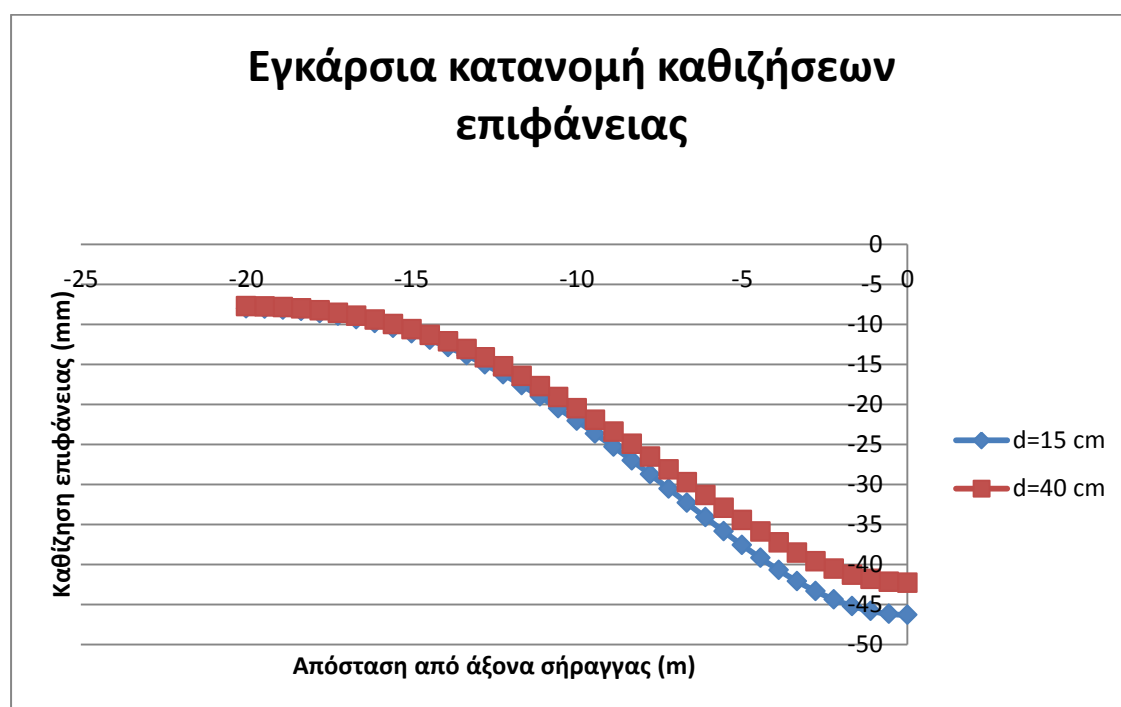
**Σχήμα 4.7.:** Κατανομή καθιζήσεων επιφάνειας εδάφους σε διαμήκη τομή σε διάφορες φάσεις κατασκευής σήραγγας με πάχος επένδυσης 40 cm

Στην τελική φάση (φάση 35), η καθίζηση στη θέση του μετώπου (στα 51m μήκος από την αρχή) ( $s=30,591\text{mm}$ ) αποτελεί το 70% της καθιζήσεως που έγινε στην αρχή της σήραγγας ( $s=43,789\text{mm}$ ), όπου θεωρούμε ότι οι εδαφικές μετακινήσεις έχουν πάρει την τελική τους τιμή. Το μεγάλο ποσοστό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που έχει ήδη εξαχθεί από τις παραπάνω αναλύσεις, ότι δηλαδή οι καθιζήσεις πραγματοποιούνται με γρήγορους ρυθμούς, λόγω της μικρής σχετικά διατμητικής αντοχής του εδάφους.

### 4.3. Ανάλυση με πάχος επένδυσης 40 cm

#### A. Σύγκριση εγκάρσιας κατανομής καθιζήσεων για τα 2 πάχη της επένδυσης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με προσομοίωση εδάφους με τα ίδια χαρακτηριστικά και σήραγγας με διαφορετικά πάχη υποστήριξης: 15 cm και 40 cm.



**Σχήμα 4.8.:** Κατανομή τελικών καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm

Οι 2 καμπύλες συγκλίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον άξονα της σήραγγας, ενώ η μέγιστη διαφορά των τιμών των 2 αναλύσεων παρουσιάζεται στη θέση του άξονα της σήραγγας. Στο συγκεκριμένο σημείο, φαίνεται ότι η τοποθέτηση επένδυσης μεγαλύτερου πάχους ( $d=40$  cm) έχει αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρότερων καθιζήσεων κατά 4mm, σε σχέση με υποστήριξη της σήραγγας με πάχος δακτυλίου 15 cm, δηλαδή οδηγεί σε μείωση των καθιζήσεων κατά 9%.



Παρακάτω παρουσιάζονται οι τελικές επιφανειακές καθιζήσεις και οι τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας στη διατομή παρακολούθησης για τα 2 διαφορετικά πάχη της επένδυσης:

<b>Πάχος επένδυσης (cm)</b>	15	40
<b>Επιφανειακή καθίζηση (mm)</b>	46,324	42,194
<b>Κατακόρυφη μετακίνηση στέψης (mm)</b>	57,765	50,299

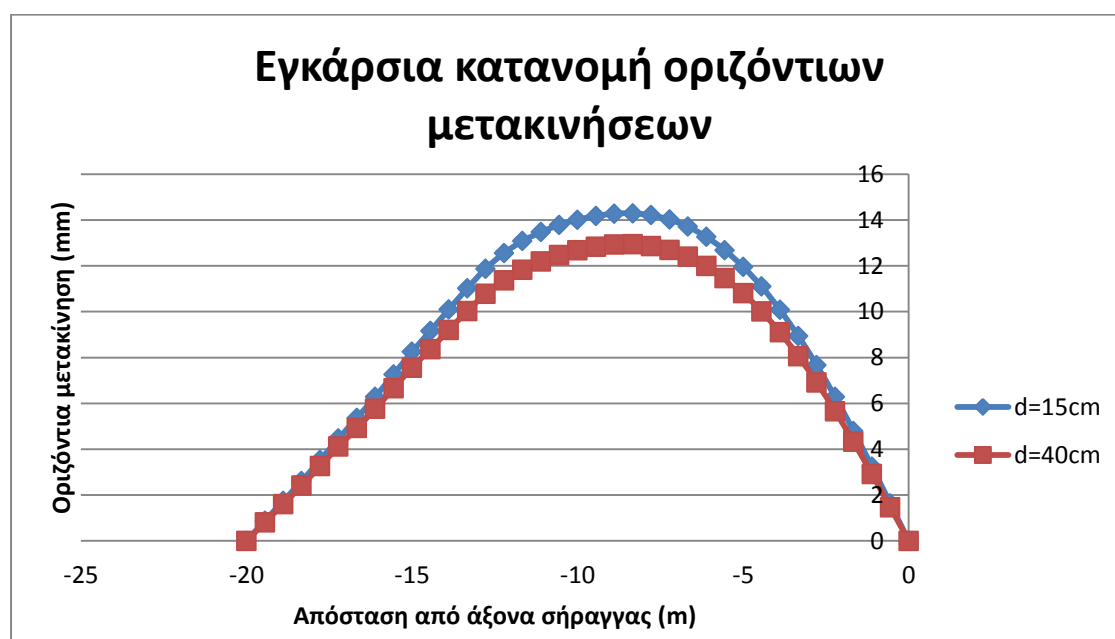
**Πίνακας 4.1.:** Τελικές κατακόρυφες μετακινήσεις επιφάνειας του εδάφους και στέψης της σήραγγας στη διατομή παρακολούθησης για πάχη της επένδυσης 15 και 40 cm

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται ότι η αύξηση του πάχους της επένδυσης περιορίζει κατά 7,5 mm την κατακόρυφη μετακίνηση της στέψης της σήραγγας, που μεταφράζεται σε ποσοστιαία μείωση 13%.

Τέλος, οι παραπάνω υψηλές τιμές των μετακινήσεων που προκύπτουν από την τριδιάστατη ανάλυση πιθανώς οφείλονται στις δυσμενείς συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας και συγκεκριμένα σε εδαφικά χαρακτηριστικά και στη διαδικασία εκσκαφής-υποστήριξης. Όσον αφορά τα εδαφικά χαρακτηριστικά, το μέτρο ελαστικότητας (25 MPa) είναι χαμηλό και όσον αφορά την κατασκευαστική διαδικασία το γεγονός ότι αφήσαμε ανυποστήριχτη κάθε λωρίδα μετά την εκσκαφή της (μήκους εδάφους 1,5m), μέχρι τη διάνοιξη της επόμενης λωρίδας, συνετέλεσαν στη δημιουργία μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων.

## Β. Σύγκριση θέσης σημείου καμπής για τα 2 πάχη της επένδυσης

Προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή του πάχους της επένδυσης στη θέση του σημείου καμπής, παρακάτω γίνεται σύγκριση των κατανομών των οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας σε εγκάρσια τομή, στη διατομή παρακολούθησης, στην τελική φάση για τα 2 πάχη επένδυσης που εξετάστηκαν:



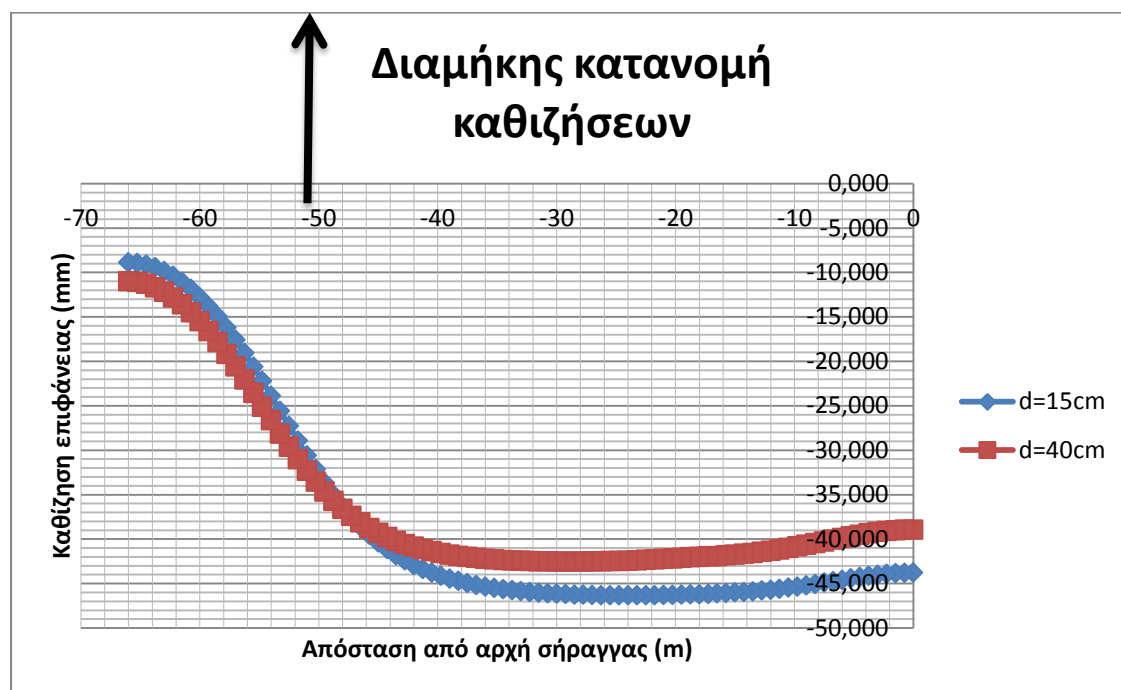
**Σχήμα 4.9.:** Κατανομή τελικών οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους της διατομής παρακολούθησης σε εγκάρσια τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm

Η θέση του σημείου καμπής της εγκάρσιας κατανομής των τελικών επιφανειακών καθιζήσεων για πάχος επένδυσης 40 cm προκύπτει στα 8,3 m από τον άξονα της σήραγγας. Άρα, η αύξηση του πάχους της υποστήριξης δεν μετέβαλε τη θέση του σημείου καμπής. Η διαφορά των τιμών των 2 κατανομών είναι μέγιστη στο σημείο καμπής της διατομής, όπου η ποσοστιαία μείωση των μετακινήσεων λόγω της αύξησης του πάχους επένδυσης προκύπτει 9,5 %.

## Γ. Σύγκριση διαμήκου κατανομής επιφανειακών καθιζήσεων για τα 2 πάχη της επένδυσης

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των κατανομών των επιφανειακών καθιζήσεων της τελικής φάσης σε διαμήκη τομή, για κατασκευή σήραγγας με πάχη επένδυσης 15 και 40 cm.

Θέση μετώπου στην τελική φάση: 51 m



**Σχήμα 4.10.:** Κατανομή τελικών καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους σε διαμήκη τομή για πάχη επένδυσης της σήραγγας 15 και 40 cm

Τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων για τα 2 διαφορετικά πάχη επένδυσης δείχνουν μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις για κατασκευή σήραγγας με πάχος επένδυσης  $d=15$  cm από την αρχή της μέχρι τα 48 m μήκος κατά μήκος του άξονά της. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των 2 κατανομών προκύπτει στην αρχή της σήραγγας, όπου η ποσοστιαία μείωση της επιφανειακής καθίζησης λόγω της αύξησης του πάχους του δακτυλίου υποστήριξης είναι 11%. Στα επόμενα 4 m που διανοίχτηκαν (συνολικά διανοίχτηκαν 51 m), τα οποία είναι πολύ κοντά στο μέτωπο, οι κατανομές συγκλίνουν μεταξύ τους.

## 5. Συμπεράσματα

### 5.1. Συμπεράσματα διδιάστατων αναλύσεων

#### A. Συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο διάνοιξης

- Η μέθοδος NATM δίνει γενικά μεγαλύτερες τιμές επιφανειακών καθιζήσεων απ' ό τι η μέθοδος TBM
- Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου μείωσης εμβαδού διατομής (contraction), αυξάνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις
- Για μεγαλύτερες τιμές του βαθμού αποτόνωσης αυξάνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις

#### B. Συμπεράσματα σχετικά με το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων

- Αυξανόμενου του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων, προκύπτουν μικρότερες καθιζήσεις
- Για τη μέθοδο TBM, αυξανόμενου του λόγου ανηγμένης απώλειας, η ποσοστιαία μείωση των καθιζήσεων λόγω μεταβολής του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων μικραίνει

#### Γ. Συμπεράσματα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

- Για επίλυση με τη μέθοδο TBM, φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζει την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων
- Για επίλυση με τη μέθοδο NATM, παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζει την ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων, καθώς για μεγαλύτερες τιμές του E προκύπτουν μικρότερες καθιζήσεις

#### Δ. Συμπεράσματα σχετικά με τη συνοχή του εδάφους

- Για επίλυση με τη μέθοδο TBM, η συνοχή του εδάφους επηρεάζει τη δημιουργία καθιζήσεων για τιμή του λόγου ανηγμένης απώλειας όγκου 1,5%

- Για επίλυση με τη μέθοδο NATM, η συνοχή του εδάφους επηρεάζει τις καθιζήσεις για τιμή του βαθμού αποτόνωσης 0,7

## **Ε. Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος της επένδυσης**

- Για διάνοιξη με τη μέθοδο TBM, το πάχος της επένδυσης επηρεάζει τις καθιζήσεις για τιμές του λόγου ανηγμένης απώλειας 0,3 και 0,7.

## **5.2. Συμπεράσματα τριδιάστατων αναλύσεων**

- Επαληθεύεται η υπόθεση για προσέγγιση της εγκάρσιας κατανομής των επιφανειακών καθιζήσεων με την κατανομή που ακολουθεί τον εκθετικό νόμο
- Μεταβολή του πάχους επένδυσης επηρεάζει περισσότερο τις μέγιστες τιμές των κατανομών των επιφανειακών καθιζήσεων

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- Μ.Καβαδάς (2005) Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων Έκδοση Ε.Μ.Π.
- P.B. Attewell, J. Yeates, A.R.Selby (1986) Soil movements induced by tunneling, Blackie
- J.B.Burland, J.R.Standing, F.M.Jardine (2001) Building response to tunnelling Case studies from the Jubilee Line Extension, London (Thomas Telford Publishing)
- J.N.Franzius, D.M.Potts, J.B.Burland (2006) The response of surface structures to tunnel construction, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering 159 Issue GEI
- Lee (1992) Prediction of subsidence above shield driven tunnels in cohesive soils Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, London,pp. Balkema Rotterdam
- Moorak Son, Edward J.Cording (2005) Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering