



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧ.ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ
ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ »

από

Μαρία-Γαρυφαλλιά Ξανθούλη

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κος Βασίλης Παπαδόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλές φορές είναι αναγκαία η διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον όπου τα υπερκείμενα είναι χαμηλά. Υπό αυτές τις συνθήκες ο περιορισμός των μετακινήσεων που θα εκδηλωθούν είναι αναγκαίος, προκειμένου να διασφαλιστεί η αισθητική, η λειτουργικότητα αλλά και η στατική επάρκεια των αναδομών και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των μετακινήσεων αυτών.

Σε αυτή τη διπλωματική μελετάται η επίδραση που έχει η μεταβολή διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων (τρόπος διάνοιξης της σήραγγας, μέτρο ελαστικότητας, πάχος επένδυσης σκυροδέματος, πάχος υπερκείμενων εδαφών, συμπεριφορά εδάφους) στην επιφανειακή καθίζηση.

Από τις αναλύσεις αρχικά διαπιστώθηκε πως η μέθοδος NATM δίνει μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τη διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής. Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας δίνει επίσης μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ ενώ αντίθετα μεγαλύτερο πάχος επένδυσης σκυροδέματος δίνει μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$. Επίσης, το πάχος των υπερκείμενων εδαφών δεν επιδρά μονοσήμαντα στην επιφανειακή καθίζηση καθώς εξαρτάται και από το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K_0 . Τέλος, σχετικά με τη συμπεριφορά του εδάφους, όσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας τόσο αυξάνονται οι τιμές της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης.

ABSTRACT

In urban environments where the overburdens are low it is often necessary to excavate tunnels. Under these conditions, it is necessary to restrict the displacements that will take place, in order to preserve the aesthetics, the functionality as well as the static sufficiency of the structures. It is therefore essential to determine these displacements.

This thesis examines the impact on the surface displacements that results from changes in various critical parameters (way of excavation of the tunnel, degree of elasticity, thickness of investment of concrete, thickness of overburden, ground behavior).

Analyses show that the NATM method gives higher values of surface subsidence compared to those that result from excavation with a TBM machine. Increase of degree of elasticity also results to higher values of surface subsidence. On the contrary greater thickness of investment of concrete gives lower values. Also, the overburden does not affect surface subsidence unilaterally, as it also depends on K_0 . Finally, concerning ground behavior, it was found that the lower the quality of the rock mass, the greater the levels of surface subsidence.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ως συντάκτρια της παρούσας μελέτης, αν και φέρω τη συνολική ευθύνη του περιεχομένου της, οφείλω ευγνωμοσύνη στον Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Βασίλη Παπαδόπουλο ο οποίος αποδέχτηκε την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η συγκεκριμένη μελέτη εύχομαι να αποτελέσει άξιο αντίκρισμα στην εμπιστοσύνη που μου έδειξε, επιτρέποντάς μου να αναλάβω τη μελέτη του εν λόγω θέματος. Το αποτέλεσμα δε θα μπορούσε να ήταν το ίδιο χωρίς την εντατική και συνεχή καθοδήγηση του, σε κάθε στάδιο εκτέλεσης της εργαστηριακής διαδικασίας και συγγραφής της εργασίας με συνεχείς επικοινωνητικές παρεμβάσεις.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XIV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	XV
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	I
1.1 Κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων	1
1.1.1 Εδαφικές παραμορφώσεις/μετατοπίσεις κατά τη διάνοιξη σήραγγας	1
1.1.2 Παραμορφώσεις στις υπερκείμενες κατασκευές κατά τη διάνοιξη σήραγγας	2
1.1.3 Εμπειρικά κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων	3
1.2 Κριτήρια οριακών εφελκυστικών παραμορφώσεων.....	6
1.3 Βλάβες στις ανωδομές κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας.....	12
1.4 Εκτίμηση επιφανειακών εδαφικών μετακινήσεων	15
1.4.1 Μέθοδοι εκτίμησης εδαφικών μετακινήσεων	15
1.4.2 Εμπειρικός προσδιορισμός εδαφικών μετακινήσεων	16
2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	
ΑΒΑΘΟΥΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (ΜΕΡΟΣ Α΄).....	25
2.1 Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D V8.2.....	25
2.2 Γεωμετρικό μοντέλο – παραμετρικές αναλύσεις	25
2.3 Παραμετρικές αναλύσεις.....	26
2.3.1 Παράμετρος: Μέθοδος διάνοιξης σήραγγας (NATM & BORED).....	26
2.3.2 Παράμετρος: Μέτρο ελαστικότητας	36
2.3.3 Παράμετρος: Πάχος επένδυσης σκυροδέματος	47
2.3.4 Παράμετρος: Πάχος υπερκείμενων	56
2.3.5 Παράμετρος: Συμπεριφορά εδάφους	61
3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	
ΑΒΑΘΟΥΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (ΜΕΡΟΣ Β΄).....	69
3.1 Επιρροή της μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας	69
3.2 Συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας.....	76
4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
4.1 Συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας	77
4.2 Συμπεράσματα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας	77
4.3 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος επένδυσης σκυροδέματος	78
4.4 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος των υπερκείμενων εδαφών	78
4.5 Συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς του εδάφους	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	80

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μετακινήσεις στις ανωδομές, Burland, Broms, De Mello (1977) και Wahls (1981)	3
Σχήμα 1.2: Όρια διαφορικών καθιζήσεων και γωνιακών στροφών, Navfac.....	5
Σχήμα 1.3: Προσομοίωμα κτιρίου, Burland & Worth (1974).....	7
Σχήμα 1.4: Παραμόρφωση κτιρίου, Mair et al (1996).....	8
Σχήμα 1.5: Θέση ουδέτερης γραμμής (άξονα) ανάλογα με τη μορφή των κοίλων.....	8
Σχήμα 1.6: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{iim}$ συναρτήσει του L/H με βάση το λόγο E/G.....	10
Σχήμα 1.7: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{iim}$ συναρτήσει του $\varepsilon_h/\varepsilon_{iim}$ με βάση το λόγο L/H όταν E/G=2.60, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης.....	11
Σχήμα 1.8: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{iim}$ συναρτήσει του $\varepsilon_h/\varepsilon_{iim}$ με βάση το λόγο L/H όταν E/G=2.60, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω καθαρής διάτμησης	11
Σχήμα 1.9: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{iim}$ συναρτήσει του $\varepsilon_h/\varepsilon_{iim}$ με βάση το λόγο L/H όταν E/G=2.60, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω κάμψης και διάτμησης.....	12
Σχήμα 1.10: Συσχέτιση οριζόντιας παραμόρφωσης ε_h με το λόγο σχετικής μετατόπισης ανάλογα με τη κατηγορία βλαβών όταν L/H=1.0 και επικρατούν συνθήκες κύρτωσης.....	13
Σχήμα 1.11: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων.....	17
Σχήμα 1.12: Προοπτική απεικόνιση	17
Σχήμα 1.13: Εδαφικές απώλειες όγκου	18
Σχήμα 1.14: Εδαφικές απώλειες όγκου	19
Σχήμα 1.15: Σημείο καμπής	20
Σχήμα 1.16: Mair et al. (1996),	22
Σχήμα 1.17: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω υπόγειων εκσκαφών, Mair et al.(1996).....	23
Σχήμα 1.18: Κατανομή καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, Attewell & Woodman (1982).....	23
Σχήμα 2.1: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και ελαστική συμπεριφορά εδάφους. ..	27
Σχήμα 2.2: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\sigma_{cm}/P_0=0.50$	28

Σχήμα 2.3: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\sigma_{cm}/P_0=0.25$	28
Σχήμα 2.4: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.4$	29
Σχήμα 2.5: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.6$	29
Σχήμα 2.6: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.8$	30
Σχήμα 2.7: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και ελαστική συμπεριφορά εδάφους.....	31
Σχήμα 2.8: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $\sigma_{cm}/P_0=0.50$	32
Σχήμα 2.9: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $\sigma_{cm}/P_0=0.25$	32
Σχήμα 2.10: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.25\%$	33
Σχήμα 2.11: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$	33
Σχήμα 2.12: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=1\%$	34
Σχήμα 2.13: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	38
Σχήμα 2.14: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	38
Σχήμα 2.15: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	39
Σχήμα 2.16: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	39

Σχήμα 2.17: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	40
Σχήμα 2.18: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	40
Σχήμα 2.19: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	41
Σχήμα 2.20: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	41
Σχήμα 2.21: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	42
Σχήμα 2.22: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_S/V	43
Σχήμα 2.23: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_S/V	44
Σχήμα 2.24: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_S/V	44
Σχήμα 2.25: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.25\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	45
Σχήμα 2.26: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.	45

Σχήμα 2.27: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	46
Σχήμα 2.28: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	48
Σχήμα 2.29: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	49
Σχήμα 2.30: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	49
Σχήμα 2.31: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	50
Σχήμα 2.32: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	50
Σχήμα 2.33: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.....	51
Σχήμα 2.34: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	51
Σχήμα 2.35: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	52
Σχήμα 2.36: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	52

Σχήμα 2.37: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V	53
Σχήμα 2.38: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V	53
Σχήμα 2.39: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V	54
Σχήμα 2.40: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	54
Σχήμα 2.41: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	55
Σχήμα 2.42: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.....	55
Σχήμα 2.43: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	58
Σχήμα 2.44: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	58
Σχήμα 2.45: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	59
Σχήμα 2.46: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	59

Σχήμα 2.47: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	60
Σχήμα 2.48: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_S/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.....	60
Σχήμα 2.49: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=10\text{MPa}$ & $V_S/V=0.25\%$	62
Σχήμα 2.50: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=10\text{MPa}$ & $V_S/V=0.50\%$	63
Σχήμα 2.51: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=10\text{MPa}$ & $V_S/V=1\%$	63
Σχήμα 2.52: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_S/V=0.25\%$	64
Σχήμα 2.53: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_S/V=0.50\%$	64
Σχήμα 2.54: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_S/V=1\%$	65
Σχήμα 2.55: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10\text{m}$ & $V_S/V=0.25\%$	65
Σχήμα 2.56: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10\text{m}$ & $V_S/V=0.50\%$	66
Σχήμα 2.57: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10\text{m}$ & $V_S/V=1\%$	66

Σχήμα 2.58: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.40\text{m}$ & $V_S/V=0.25\%$	67
Σχήμα 2.59: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.40\text{m}$ & $V_S/V=0.50\%$	67
Σχήμα 2.60: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.40\text{m}$ & $V_S/V=1\%$	68
Σχήμα 3.1: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.4$ & $V_S/V=0.25\%$	70
Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.6$ & $V_S/V=0.50\%$	71
Σχήμα 3.3: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.8$ & $V_S/V=1\%$	71
Σχήμα 3.4: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.4$ & $V_S/V=0.25\%$	72
Σχήμα 3.5: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.6$ & $V_S/V=0.50\%$	72
Σχήμα 3.6: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.8$ & $V_S/V=1\%$	73
Σχήμα 3.7: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.4$ & $V_S/V=0.25\%$	73
Σχήμα 3.8: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.6$ & $V_S/V=0.50\%$	74
Σχήμα 3.9: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.8$ & $V_S/V=1\%$	74
Σχήμα 3.10: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM.....	75
Σχήμα 3.11: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM.....	75

Σχήμα 3.12: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM..... 76

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Ορισμός στοιχείων μετακινήσεων	2
Πίνακας 1.2: Κριτήριο επιτρεπόμενων καθιζήσεων και γωνιακής στροφής, Skempton & Mac Donald (1956)	4
Πίνακας 1.3: Επιτρεπόμενη γωνιακή στροφή ανάλογα με το τύπο της κατασκευής, Bjerrum (1963)	5
Πίνακας 1.4: Επιτρεπόμενες οριακές τιμές γωνιακής παραμόρφωσης και λόγου σχετικής μετατόπισης, Tomlinson (1980).....	6
Πίνακας 1.5: Κατηγορίες βλαβών με βάση την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την τυπική βλάβη ή την ευκολία επισκευής	14
Πίνακας 2.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για διάνοιξη με μέθοδο NATM & TBM.....	26
Πίνακας 2.2: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας.....	37
Πίνακας 2.3: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του πάχους επένδυσης σκυροδέματος.....	47
Πίνακας 2.4: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του πάχους των υπερκείμενων εδαφών	57
Πίνακας 2.5: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους	61
Πίνακας 3.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για διάνοιξη με μέθοδο NATM & TBM.....	69

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $K_0=0.50$ & $\lambda=0.4$	30
Εικόνα 2.1: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.80$ & $\lambda=0.8$	31
Εικόνα 2.3: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για ελαστική συμπεριφορά, $K_0=0.80$ & $V_s/V=0.25\%$	34
Εικόνα 2.4: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για ελαστική συμπεριφορά, $K_0=0.80$ & $V_s/V=0.50\%$	35
Εικόνα 2.5: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.50$ & $V_s/V=0.50\%$...	42
Εικόνα 2.6: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.50$ & $V_s/V=0.50\%$...	43

Κατάλογος συμβόλων

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ	
Σύμβολο	Ερμηνεία
θ	Στροφή
ω	Απόκλιση
β	Σχετική στροφή
Δ	Σχετική μετατόπιση
α	Γωνιακή παραμόρφωση
ν	Λόγος Poisson
ε_h	Μέση οριζόντια παραμόρφωση
ε_{lim}	Οριακή εφελκυστική παραμόρφωση
ε_{bmax}	Μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης
ε_{dmax}	Μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής διάτμησης
ε_{br}	Συνολική εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης
ε_{dr}	Συνολική εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής διάτμησης
ΛΑΤΙΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ	
Σύμβολο	Ερμηνεία
$s (u_y)$	Καθίζηση
s_h	Οριζόντια μετακίνηση
δs	Διαφορική καθίζηση
H	Ύψος ανωδομής (Κεφάλαιο 1) Ύψος υπερκείμενων εδαφών (Κεφάλαια 2-4)
L	Άνοιγμα κτιρίου
E	Μέτρο ελαστικότητας
G	Μέτρο διάτμησης
D	Διάμετρος σήραγγας
d	Πάχος επένδυσης σκυροδέματος
I	Ροπή αδράνειας
t	Μέγιστη απόσταση ουδέτερου άξονα από ακραία ίνα
y	Οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας
i	Η θέση του σημείου καμπής
V	Ιδεατό εμβαδό διατομής
V_s	Απώλεια εδαφικού όγκου
V_i	Σχετική απώλεια εδαφικού όγκου
N	Συντελεστής υπερφόρτισης
ρ_0	Αρχικό εντατικό πεδίο
ρ_i	Πίεση υποστήριξης
σ_{cm}	Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη
K_0	Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας σε αστικό περιβάλλον προκαλούνται εδαφικές μετακινήσεις λόγω της απώλειας του εδαφικού όγκου. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα κριτήρια που έχουν αναπτυχθεί για τις επιτρεπόμενες καθιζήσεις που εκδηλώνονται κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας και στις βλάβες που αυτές μπορούν να προκαλέσουν καθώς και στις μεθόδους εκτίμησης των μετακινήσεων.

1.1 Κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων

Στις παραγράφους που ακολουθούν, προσδιορίζονται οι διάφορες παραμορφώσεις/μετατοπίσεις που εκδηλώνονται με τη διάνοιξη μιας σήραγγας τόσο στο έδαφος όσο και στις ανωδομές ενώ αναφέρονται και τα εμπειρικά κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων.

1.1.1 Εδαφικές παραμορφώσεις/μετατοπίσεις κατά τη διάνοιξη σήραγγας

Ενώ οι μετακινήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας είναι σχεδόν αδύνατο να αποφευχθούν, μπορούν με κατάλληλο σχεδιασμό να περιοριστούν ώστε να μην υπερβαίνουν τα ανεκτά όρια. Ο κατάλληλος σχεδιασμός αφορά κυρίως στην επιλογή κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης και υποστήριξης εφ' όσον έχουν ληφθεί υπ' όψη οι επί τόπου εδαφικές συνθήκες.

Αναλυτικότερα, η απώλεια εδαφικού υλικού κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας μπορεί να οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Παραμορφώσεις στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας:
Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται στο μέτωπο της σήραγγας εξαρτώνται από την αντοχή του εδάφους στη φάση της αυτουποστήριξης και στη φάση της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.
- Ακτινικές μετατοπίσεις
Οι μετατοπίσεις αυτές παρουσιάζονται όταν η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής και οφείλονται στην υπερεκσκαφή μεταξύ του κελύφους του μηχανήματος και του εδαφικού υλικού γύρω από αυτό.
- Μετατοπίσεις λόγω κενού χώρου
Οι μετατοπίσεις αυτές παρουσιάζονται κατά τις εργασίες πλήρωσης του κενού χώρου μεταξύ των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας και του εδάφους που την περιβάλλει.

- Μετατοπίσεις λόγω αστοχιών του εδάφους
Οι μετατοπίσεις αυτές παρουσιάζονται όταν τα μέτρα σταθεροποίησης είναι ανεπαρκή και όταν αλλάζουν σημαντικά οι εδαφικές συνθήκες.

1.1.2 Παραμορφώσεις στις υπερκείμενες κατασκευές κατά τη διάνοιξη σήραγγας

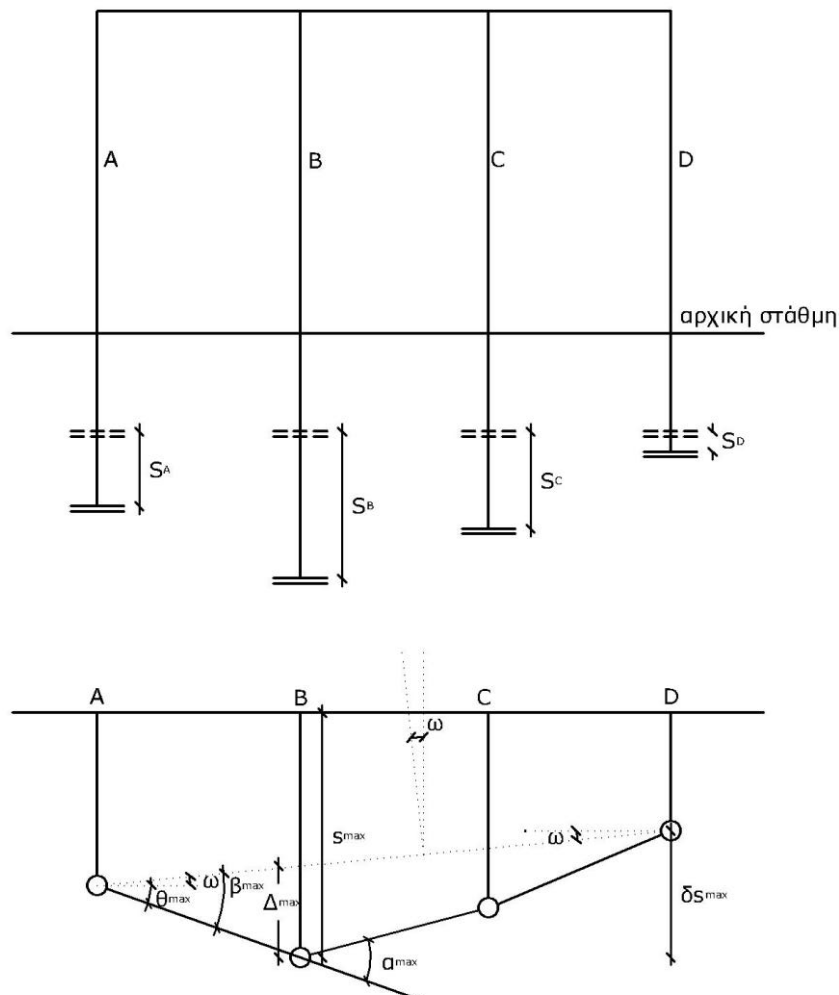
Κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας οι υπερκείμενες κατασκευές μπορούν να υποστούν βλάβες και αυτές κυρίως οφείλονται στις μετατοπίσεις των θεμελιώσεων. Ο Πίνακας 1.1 δίνει ορισμούς βασικών στοιχείων όταν εξετάζεται η επίδραση της διάνοιξης της σήραγγας στις υπερκείμενες κατασκευές.

Πίνακας 1.1: Ορισμός στοιχείων μετακινήσεων

σύμβολο	Ορισμός	Επεξήγηση
s	Καθίζηση	Η ολική κατακόρυφη μετακίνηση
δs	Διαφορική καθίζηση	Η διαφορά της καθίζησης μεταξύ δύο σημείων
θ	Στροφή	Η αλλαγή της κλίσης της γραμμής που συνδέει δύο σημεία της θεμελίωσης
ω	Απόκλιση	Η στροφή της θεμελίωσης ως στερεό σώμα
β	Σχετική στροφή	Η διαφορά κλίσεως της ευθείας που ενώνει δύο σημεία της θεμελίωσης σχετικά με την ευθεία των άκρων ($\beta = \theta \pm \omega$)
Δ	Σχετική μετατόπιση	Η μετατόπιση με αναφορά προς μια ευθεία που συνδέει τα δύο ακραία σημεία της θεμελίωσης
L	Συνολικό μήκος	Το μήκος της θεμελίωσης
Δ / L	Λόγος σχετικής μετατόπισης	Η καμπυλότητα της ιδεατής καμπύλης που συνδέει τις καθιζήσεις των σημείων κατά μήκος μιας θεμελίωσης
α	Γωνιακή παραμόρφωση	Η γωνία της ευθείας που συνδέει δύο σημεία της θεμελίωσης
ϵ_h	Μέση οριζόντια παραμόρφωση	Η μεταβολή δL ενός οριζόντιου μήκους της θεμελίωσης

Αξίζει να σημειωθεί πως σε μια κατασκευή η διαφορική καθίζηση είναι αυτή που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες και όχι η καθεαυτή καθίζηση ακόμα και αν ξεπερνάει κάποια ανεκτή τιμή ενώ ως επιτρεπόμενη ορίζεται η τιμή εκείνη για την οποία εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του κτιρίου.

Οι Burland, Broms, De Mello (1977) και Wahls (1981) όρισαν σχηματικά τα μεγέθη των μετατοπίσεων της θεμελίωσης μια οικοδομής όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Μετακινήσεις στις ανωδομές, Burland, Broms, De Mello (1977) και Wahls (1981)

1.1.3 Εμπειρικά κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων

Για να αποφευχθούν οι βλάβες που μπορούν να επιδράσουν στην αισθητική, στη λειτουργικότητα ή ακόμα και στην ευστάθεια μιας κατασκευής έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες να εκφραστούν κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων με τους Terzaghi (1948) & Peck (1967) να διαπιστώνουν πως κτίρια θεμελιωμένα σε κοκκώδεις σχηματισμούς μπορούν να ανεχτούν διαφορικές καθιζήσεις της τάξεως των 20mm. Δεδομένου ότι οι διαφορικές καθιζήσεις είναι το πολύ το 75% των ολικών καθιζήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για συνήθη κτίρια που θεμελιώνονται με μεμονωμένα πέδιλα η μέγιστη ανεκτή καθίζηση είναι τα 25mm, ενώ για κτίρια που θεμελιώνονται με γενική κοιτόστρωση η μέγιστη ανεκτή καθίζηση είναι τα 50mm.

Οι Skempton & Mac Donald (1956) κατέληξαν σε ένα κριτήριο επιτρεπόμενων καθιζήσεων το οποίο έχει εφαρμογή κυρίως σε πλαισιωτές κατασκευές. Συγκεκριμένα, διατύπωσαν κριτήρια για τα μεγέθη της γωνιακής στροφής (θ), της μέγιστης καθίζησης (s_{max}) και της μέγιστης διαφορικής καθίζησης (δs_{max}) τα οποία συσχέτισαν με το έδαφος έδρασης και τον τύπο της θεμελίωσης (Πίνακας 1.2).

Σημειώνεται πως η παραμόρφωση ενός φορέα εξαρτάται αρχικά από τις φορτίσεις που δέχεται και επιπροσθέτως από τις καθιζήσεις.

Πίνακας 1.2: Κριτήριο επιτρεπόμενων καθιζήσεων και γωνιακής στροφής, Skempton & Mac Donald (1956)

Κριτήριο	Μεμονωμένα πέδιλα	Γενικές κοιτοστρώσεις
Γωνιακή στροφή θ	1/300	1/300
Μέγιστη καθίζηση s_{max}		
• άργιλοι	3 in (~75mm)	3-5 in (~75-125mm)
• άμμοι	2 in (~50mm)	2-3 in (~50-75mm)
Μέγιστη διαφορική καθίζηση δs_{max}		
• άργιλοι	1 ^{3/4} in (~45mm)	
• άμμοι	1 ^{1/4} in (~32mm)	

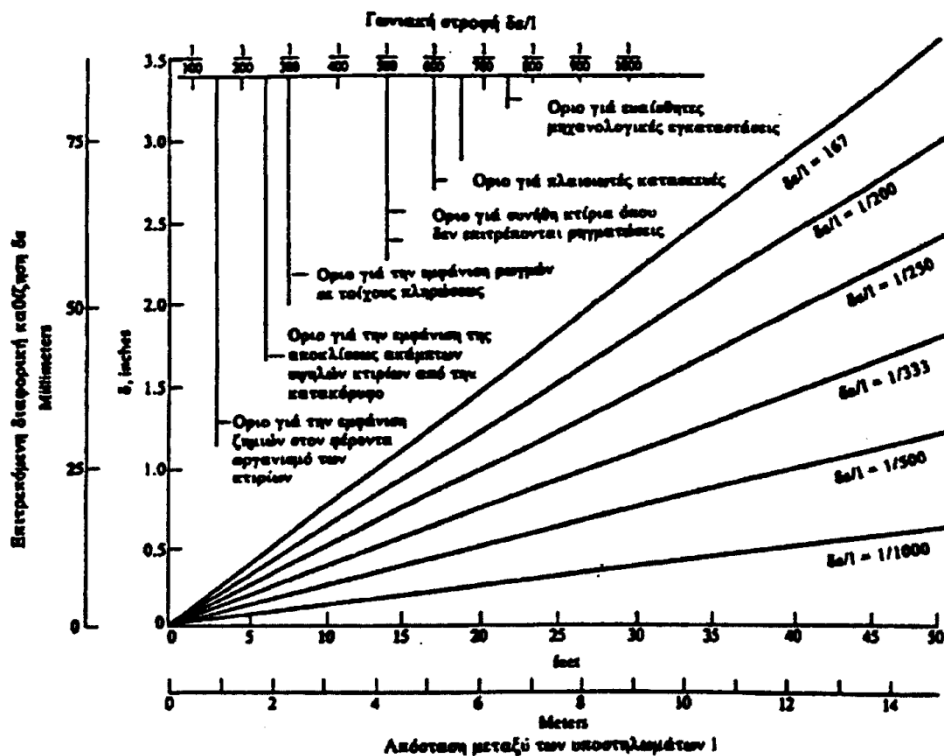
Προκειμένου ο οργανισμός να μην εμφανίσει βλάβη, η γωνιακή στροφή (θ) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/150, ενώ αν επιθυμείται να εξασφαλιστεί το κτίριο έναντι όποιων μικρορωγματώσεων στους τοίχους πλήρωσης το ανεκτό όριο για τη γωνιακή στροφή είναι 1/500.

Ο Bjerrum (1963) στο κριτήριο που κατέληξε οριοθέτησε την επιτρεπόμενη γωνιακή στροφή (θ) για διάφορους τύπους κατασκευών (Πίνακας 1.3) και πρότεινε η διαφορική καθίζηση (δs) σε αργίλους να κυμαίνεται στο 0.3-0.5 της μέγιστης καθίζησης (s_{max}), δηλ. $\delta s = (0.3-0.5)s_{max}$, ενώ σε άμμους να κυμαίνεται στο 0.5-1.0 της μέγιστης καθίζησης (s_{max}), δηλ. $\delta s = (0.5-1.0)s_{max}$.

Πίνακας 1.3: Επιτρεπόμενη γωνιακή στροφή ανάλογα με το τύπο της κατασκευής, Bjergum (1963)

Είδος κατασκευής	Επιτρεπόμενη γωνιακή στροφή θ
Ευαίσθητες μηχανολογικές εγκαταστάσεις	1/750
Πλαισιωτές κατασκευές	1/600
Συνήθη κτίρια, όπου δε γίνονται ανεκτές οι ρηγματώσεις σε τοίχους πλήρωσης	1/500
Συνήθη κτίρια, για τα οποία επιτρέπονται μικρορηγματώσεις σε τοίχους πλήρωσης	1/300
Άκαμπτα κτίρια, με επιτρεπόμενη απόκλιση από την κατακόρυφο	1/250
Όριο για το οποίο είναι δυνατόν να παρουσιασθούν ζημιές στο φέροντα οργανισμό	1/150
Εύκαμπτες πλινθοδομές με $H/L < 1/4$, άνευ ρηγματώσεως	1/150

Ο Navfac έδωσε ένα διάγραμμα (Σχήμα 1.2) με το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί η διαφορική καθίζηση και η γωνιακή στροφή των θεμελιώσεων των κατασκευών για διαφορετικά όρια λειτουργικότητας.



Σχήμα 1.2: Όρια διαφορικών καθιζήσεων και γωνιακών στροφών, Navfac

Σε μια προσπάθεια να ομαδοποιηθούν τα διάφορα κριτήρια ο Tomlinson (1980) κατέληξε στον Πίνακα 1.4 ο οποίος παρουσιάζει τα επιτρεπόμενα όρια γωνιακής στροφής (θ) και σχετικής μετατόπισης (Δ/L) για κατασκευές με σκελετό και οπλισμένες ή άοπλες φέρουσες τοιχοποιίες.

Πίνακας 1.4: Επιτρεπόμενες οριακές τιμές γωνιακής παραμόρφωσης και λόγου σχετικής μετατόπισης, Tomlinson (1980)

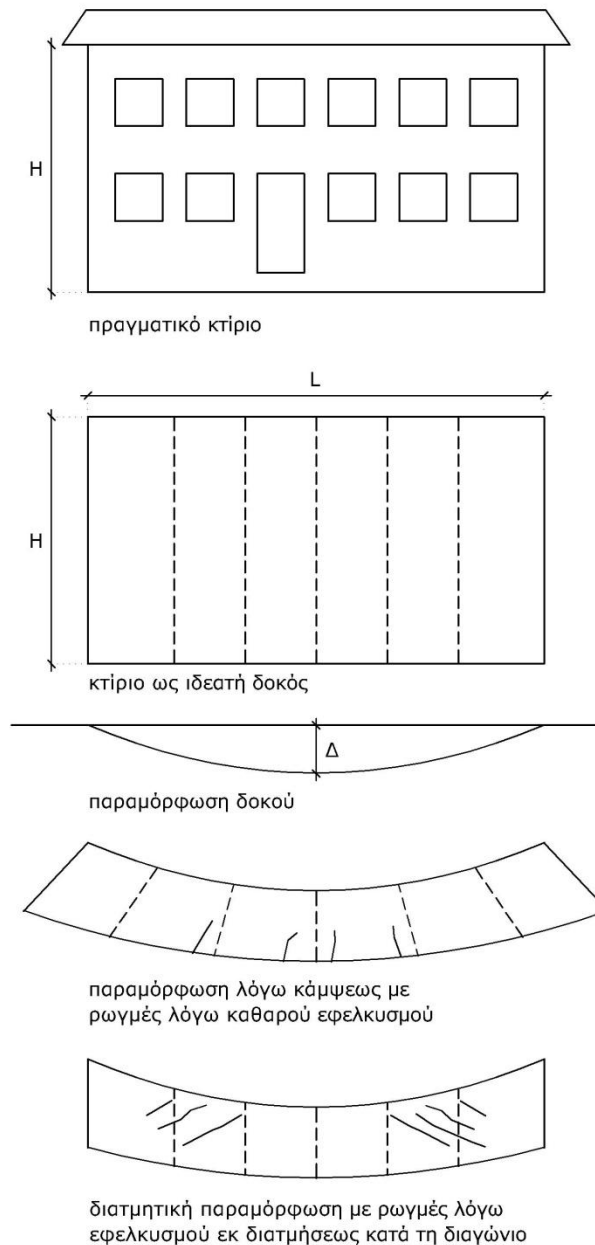
Τύπος κατασκευής	Τύπος ζημιάς	Επιτρεπόμενα όρια				
		Επιτρεπόμενες τιμές γωνιακής στροφής θ				
		Skempton & Mc Donald (1956)	Meyerof (1947)	Polshin & Tokar (1957)	Bjerrum (1963)	
Κτίρια με σκελετό και οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	Βλάβη στον φέροντα οργανισμό	1/150	1/250	1/150	1/150	
	Ρηγματώσεις στους τοίχους	1/300 (συνιστάται 1/500)	1/500	1/500	1/500	
		Επιτρεπόμενες τιμές λόγου σχετικής μετατόπισης Δ/L				
		Meyerof (1947)	Polshin & Tokar (1957)	Burland & Worth (1974)		
Μη οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	Ρωγμές λόγω κοίλης παραμόρφωσης του τοίχου (συνθήκες κάμψης)	1/2500	L/H*=0.3 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, $\Delta/L=1/5000$	
					L/H=5, $\Delta/L=1/1250$	

*L/H είναι ο λόγος του μήκους προς το ύψος του κτιρίου

Αξίζει να σημειωθεί πως σύγχρονες απόψεις αποδέχονται τα παραπάνω όρια αλλά στη θέση της γωνιακής στροφής(θ) θέτουν τη σχετική στροφή (β).

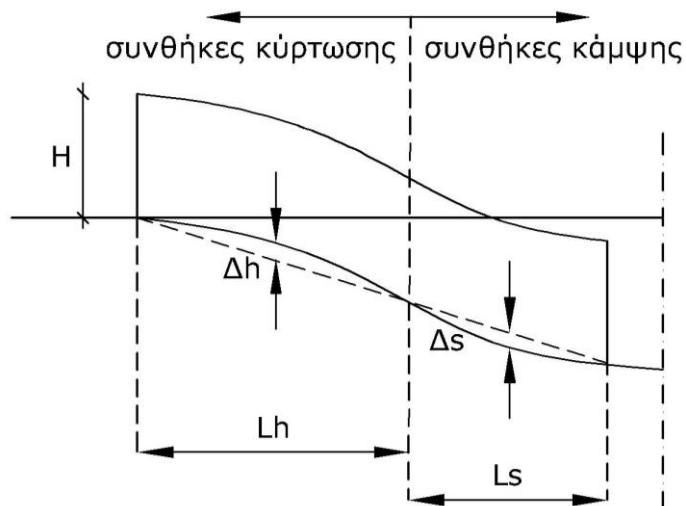
1.2 Κριτήρια οριακών εφελκυστικών παραμορφώσεων

Οι Burland & Worth (1974), των οποίων η μέθοδος έχει επικρατήσει, θεωρούν πως το κτίριο συμπεριφέρεται ως μία ιδεατή δοκός ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 1.3) και με βάση αυτό το προσομοίωμα εξετάζονται οι επιδράσεις των εδαφικών μετακινήσεων λόγω της διάνοιξης σήραγγας στις υπερκείμενες κατασκευές.



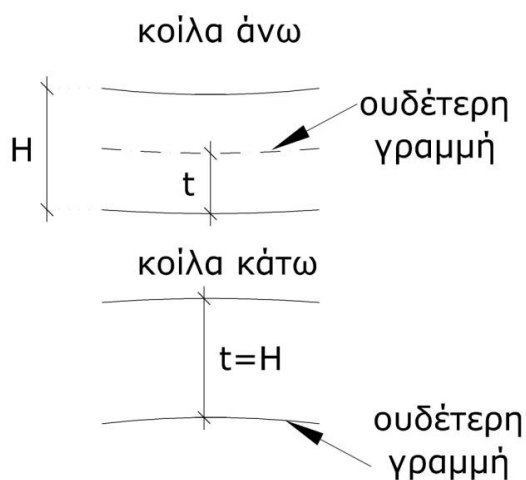
Σχήμα 1.3: Προσομοίωμα κτιρίου, Burland & Worth (1974)

Συγκεκριμένα, η δοκός έχει θεωρητικό ύψος H ίσο με το ύψος του κτιρίου από τη στάθμη θεμελίωσης και μήκος L ίσο με το άνοιγμα του κτιρίου, συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά και έχει διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας. Αναλόγως τη θέση του κτιρίου, μπορεί ένα τμήμα του να βρίσκεται σε περιοχή κάμψης και ένα τμήμα του σε περιοχή κύρτωσης ενώ σε περίπτωση που τμήμα του κτιρίου βρίσκεται εκτός της καμπύλης των καθιζήσεων τότε το αντίστοιχο τμήμα δε περιλαμβάνεται στο προσομοίωμα (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Παραμόρφωση κτιρίου, Mair et al (1996)

Επίσης, οι Burland & Worth (1974) θεωρούν πως όταν η καμπύλη των καθιζήσεων έχει τα κοίλα κάτω ο ουδέτερος άξονας της δοκού ταυτίζεται με την κατώτερη ίνα, ενώ όταν η καμπύλη των καθιζήσεων έχει τα κοίλα άνω ο ουδέτερος άξονας της δοκού βρίσκεται στο μέσο του ύψους της. Στη πρώτη περίπτωση οι καθιζήσεις στα άκρα είναι μεγαλύτερες από ότι στο μέσο ενώ στη δεύτερη περίπτωση το αντίθετο (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Θέση ουδέτερης γραμμής (άξονα) ανάλογα με τη μορφή των κοίλων

Αναφορικά με το μηχανισμό ρηγμάτωσης, οι Burland & Worth (1974) και οι Polshin & Tokar (1975) διαπίστωσαν πως υπάρχει μία κρίσιμη τιμή εφελκυστικής παραμόρφωσης ϵ_{crit} ή όπως καθιέρωσαν οι Burland et al.(1977) μια οριακή τιμή εφελκυστικής παραμόρφωσης ϵ_{lim} , υπέρβαση της οποίας οδηγεί σε ρηγμάτωση. Για το λόγο αυτό ήταν αναγκαίος ο προσδιορισμός της κρίσιμης αυτής τιμής καθώς και του τρόπου παραμόρφωσης της δοκού. Η δοκός διαπιστώθηκε πως μπορεί να καταπονηθεί σε εφελκυσμό λόγω καθαρής κάμψης όπου η μέγιστη εφελκυστική

παραμόρφωση παρατηρείται στην εξωτερική ίνα της δοκού και λόγω καθαρής διατμήσεως όπου η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση παρατηρείται στη διαγώνιο της δοκού.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω οι Burland, Broms και De Mello (1977) κατέληξαν στις σχέσεις 1.1 & 1.2 προκειμένου να συσχετίσουν το λόγο της σχετικής μετατόπισης Δ/L με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού H, L και τις ελαστικές ιδιότητες E, G συναρτήσει πάντα των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων σε περίπτωση καθαρής κάμψης ε_{bmax} και καθαρού εφελκυσμού ε_{dmax} .

- Εφελκυστική παραμόρφωση λόγω κάμψης

$$\frac{\Delta}{L} = \left[\frac{L}{12t} + \frac{3EI}{2 \cdot t \cdot L \cdot H \cdot G} \right] \varepsilon_{bmax} \quad (1.1)$$

- Εφελκυστική παραμόρφωση λόγω διάτμησης

$$\frac{\Delta}{L} = \left[1 + \frac{H \cdot L^2 \cdot G}{18 EI} \right] \varepsilon_{dmax} \quad (1.2)$$

Όπου: $L =$ άνοιγμα κτιρίου στην περιοχή κάμψης/κύρτωσης

$$t = \frac{H}{2} \text{ (συνθήκες κάμψης)} \quad \& \quad t = H \text{ (συνθήκες κύρτωσης)}$$

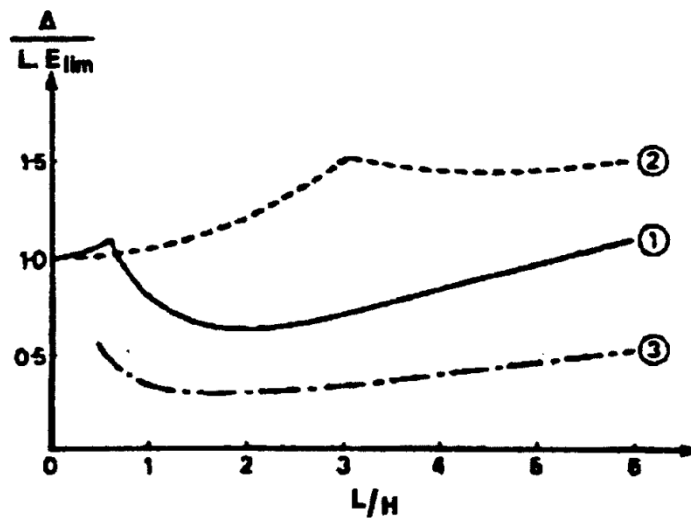
$$\frac{E}{G} = 2(1 + \nu) \quad \text{ή } 12.5 \text{ για σκυρόδεμα} / 2.5 \text{ για λιθόδμητο}$$

$$I = \frac{H^3}{12} \text{ (συνθήκες κάμψης)} \quad \& \quad I = \frac{H^3}{3} \text{ (συνθήκες κύρτωσης)}$$

Από εφαρμογή των παραπάνω διαπιστώθηκε πως ο λόγος Δ/L είναι που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις και όχι τόσο το φορτίο του κτιρίου ενώ παρατηρήθηκε πως αυτές εμφανίζονται κυρίως στο μέσο και στα $L/4$ του μήκους της δοκού με αυτές λόγω κύρτωσης να είναι σημαντικότερες αυτών λόγω κάμψης.

Από επεξεργασία των δύο παραπάνω σχέσεων, και συγκεκριμένα με αντικατάσταση των οριακών τιμών εφελκυστικής παραμόρφωσης ε_{bmax} & ε_{dmax} , μπορούμε να έχουμε την οριακή τιμή του λόγου σχετικής μετατόπισης $(\Delta/L)_{lim}$ η οποία και είναι η μικρότερη από τις δύο που προκύπτουν.

Για διαφορετικές τιμές του λόγου E/G , με τη καθεμιά να αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό τύπο κατασκευής, δίνονται στο Σχήμα 1.6 οι καμπύλες που συσχετίζουν το λόγο $\frac{\Delta}{L \varepsilon_{lim}}$ με το λόγο L/H και αφορούν συνθήκες κάμψης ή κύρτωσης.



- ① $E/G = 2.5$, ουδ. άξ. στο μέσον, παραμορφώσεις εκ κάμψως
- - - ② $E/G = 12.5$, ουδ. άξ. στο μέσον, παραμορφώσεις εκ διατμήσεως
- · - ③ $E/G = 0.5$, ουδ. άξ. στο κάτω άκρο, συνθήκες κύρτωσης

Σχήμα 1.6: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\epsilon_{lim}$ συναρτήσει του L/H με βάση το λόγο E/G

Εκτός όμως από τις μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις ϵ_{bmax} & ϵ_{dmax} παρουσιάζονται και οριζόντιες παραμορφώσεις ϵ_h σε συνθήκες κύρτωσης και γι' αυτό πρέπει να συνυπολογίζονται καθώς έτσι προκύπτει η μέγιστη συνολική παραμόρφωση. Για το λόγο αυτό οι Boscardin & Cording (1989) κατέληξαν στις ακόλουθες σχέσεις 1.3 & 1.4:

- Συνολική εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης

$$\epsilon_{br} = \epsilon_{bmax} + \epsilon_h \quad (1.3)$$

- Συνολική εφελκυστική παραμόρφωση λόγω καθαρής διάτμησης

$$\epsilon_{dr} = \epsilon_h \left(\frac{1-\nu}{2} \right) + \sqrt{\epsilon_h^2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \epsilon_{dmax}^2} \quad (1.4)$$

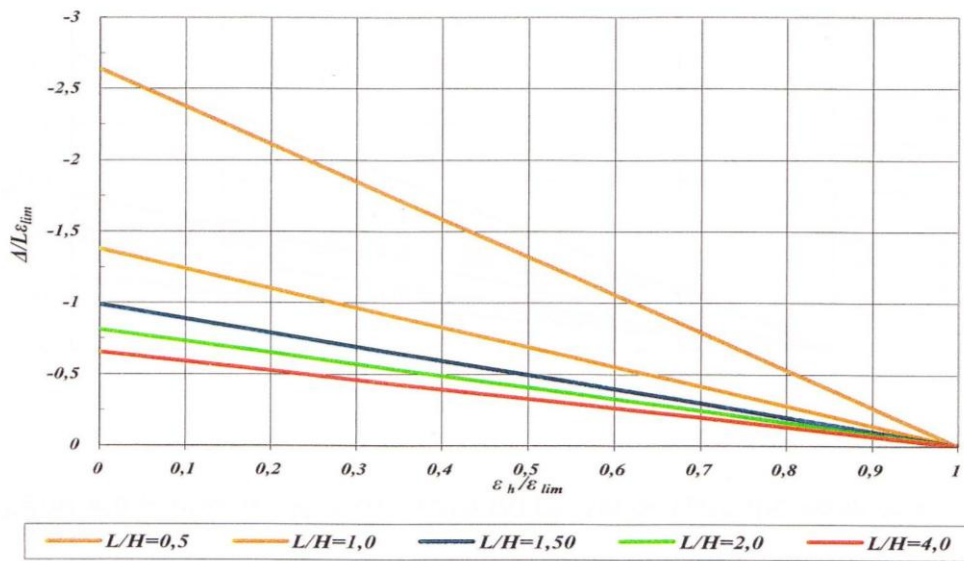
Στα Σχήματα 1.7-1.8 δίνεται η επιρροή του λόγου $\frac{\epsilon_h}{\epsilon_{lim}}$ στο λόγο $\frac{\Delta}{L\epsilon_{lim}}$ για διαφορετικές τιμές του λόγου L/H και για παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης και διάτμησης αντίστοιχα όταν για τη δοκό ισχύει $E/G=2.60$ και $\nu=0.30$ και επικρατούν συνθήκες κύρτωσης. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα για συνδυασμό παραμόρφωσης λόγω καθαρής κάμψης και διάτμησης. Στις ακόλουθες σχέσεις 1.5 - 1.6 δίνονται οι σχετικές μαθηματικές σχέσεις.

- καθαρή κάμψη

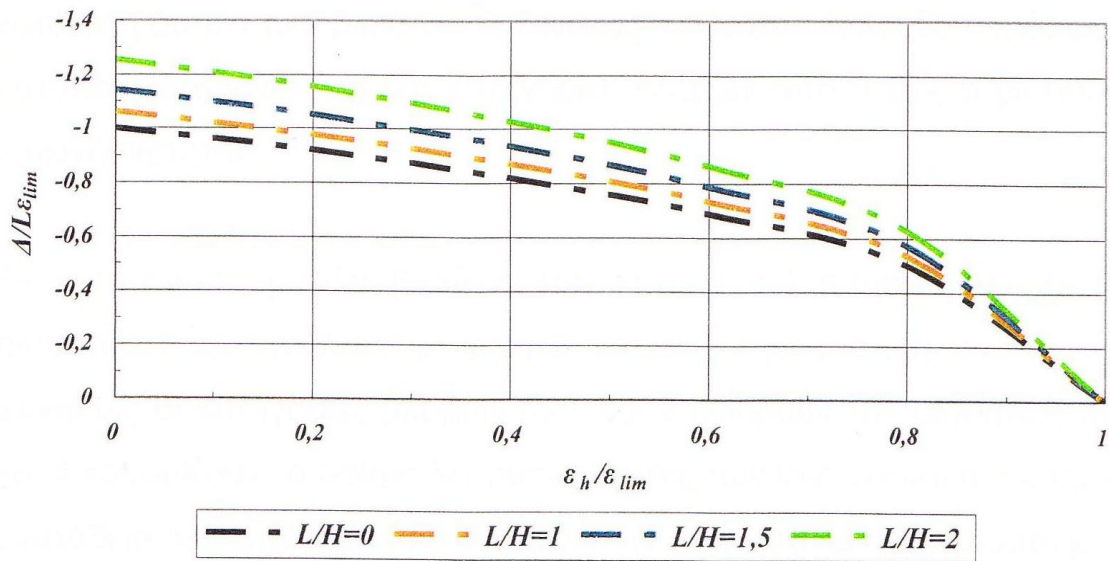
$$\frac{\Delta}{L \varepsilon_{lim}} = \left(1 - \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{lim}}\right) \left(\frac{L}{12H} + \frac{1.30H}{L}\right) \quad (1.5)$$

- καθαρή διάτμηση

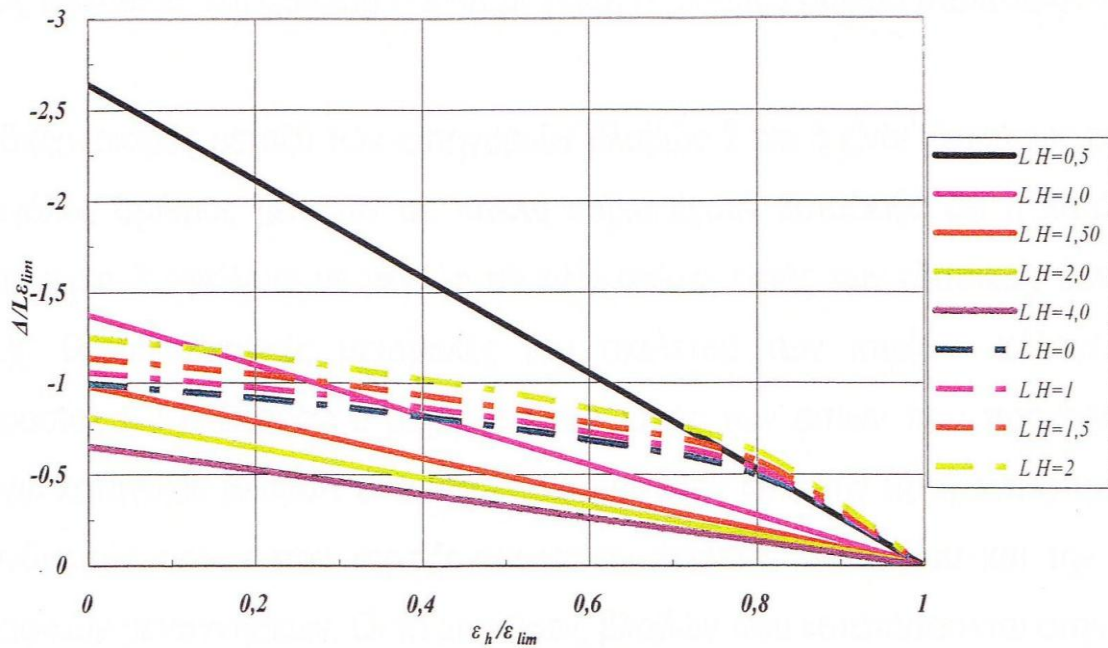
$$\frac{\Delta}{L \varepsilon_{lim}} = \sqrt{1 - 0.70 \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{lim}} - 0.30 \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{lim}}\right)^2} \left(1 + 0.064 \left(\frac{L}{H}\right)^2\right) \quad (1.6)$$



Σχήμα 1.7: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{lim}$ συναρτήσει του $\varepsilon_h/\varepsilon_{lim}$ με βάση το λόγο L/H όταν $E/G=2.60$, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω καθαρής κάμψης



Σχήμα 1.8: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\varepsilon_{lim}$ συναρτήσει του $\varepsilon_h/\varepsilon_{lim}$ με βάση το λόγο L/H όταν $E/G=2.60$, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω καθαρής διάτμησης



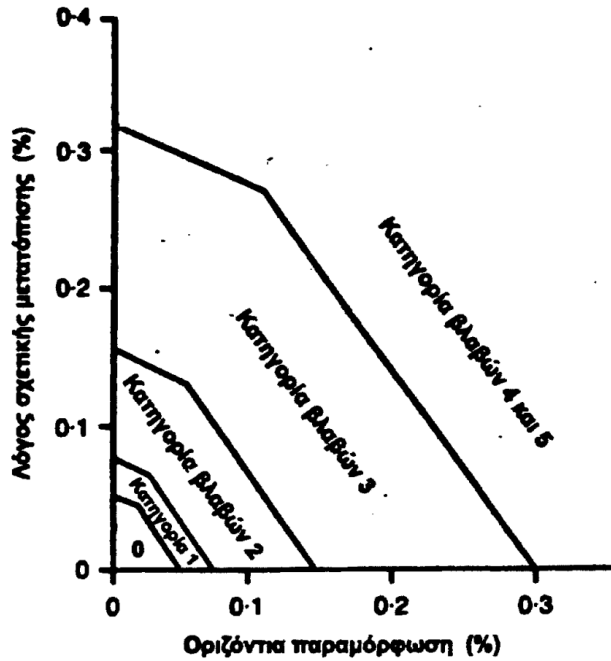
Σχήμα 1.9: Μεταβολή του λόγου $\Delta/L\epsilon_{lim}$ συναρτήσει του $\epsilon_h/\epsilon_{lim}$ με βάση το λόγο L/H όταν $E/G=2.60$, $\nu=0.30$, επικρατούν συνθήκες κύρτωσης και υπάρχει παραμόρφωση λόγω κάμψης και διάτμησης

1.3 Βλάβες στις ανωδομές κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας πραγματοποιούνται επιφανειακές καθιζήσεις οι οποίες είναι καίριας σημασίας καθώς μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα υπερκείμενα κτίρια μικρότερης ή μεγαλύτερης σημασίας. Ως αποτέλεσμα, οι Boscardin & Cording (1989) αξιοποιώντας πληθώρα παρατηρήσεων οριοθέτησαν την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.5 ο οποίος και δίνει την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση για έξι διαφορετικές βαθμίδες επικινδυνότητας καθώς και το σχετικό είδος βλαβών με την ευκολία επισκευής.

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα εργασιών που είχαν γίνει στο παρελθόν οι Burland et al. (1977) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως οι κατηγορίες βλαβών 0,1&2 αφορούν στην αισθητική του κτιρίου, οι κατηγορίες 3 &4 αφορούν στη λειτουργικότητα και η κατηγορία 5 αφορά στην ευστάθεια και τη στατικότητα του κτιρίου.

Ο Burland (1995) βασιζόμενος στα στοιχεία του Πίνακα 1.5. συσχέτισε την οριζόντια παραμόρφωση ϵ_h με το λόγο σχετικής μετατόπισης ανάλογα με τη κατηγορία βλαβών για $L/H=1.0$ και συνθήκες κύρτωσης (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Συσχέτιση οριζόντιας παραμόρφωσης e_h με το λόγο σχετικής μετατόπισης ανάλογα με τη κατηγορία βλαβών όταν $L/H=1.0$ και επικρατούν συνθήκες κύρτωσης.

Οι Potts & Addenbrooke (1997) εξέτασαν την επίδραση της ακαμψίας των υπερκείμενων κατασκευών και διαπίστωσαν πως αυτή επιδρά σημαντικά στις εδαφικές μετακινήσεις που σημειώνονται ενώ μειώνονται σημαντικά και οι επιφανειακές καθιζήσεις σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

Πίνακας 1.5: Κατηγορίες βλαβών με βάση την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την τυπική βλάβη ή την ευκολία επισκευής

Κατηγορία ορατών βλαβών	Συνήθης βαθμός κινδύνου	Οριακή εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{lim} (%)	Περιγραφή τυπικής βλάβης* / Ευκολία επισκευής
0	Αμελητέος	0-0.05	Τριχοειδείς ρωγμές μικρότερες του 0.1 mm περίπου
1	Πολύ μικρός	0.05-0.075	Λεπτές ρωγμές οι οποίες ευκόλως αντιμετωπίζονται με βάψιμο. Η βλάβη περιορίζεται γενικώς στα "τελειώματα" εσωτερικής τοιχοποιίας. Επιθεώρηση από κοντινή απόσταση είναι δυνατόν να αποκαλύψει μερικές ρωγμές σε εξωτερικά τούβλα ή εξωτερική τοιχοποιία. Τυπικά εύρη ρωγμών έως 1mm.
2	Μικρός	0.075	Ρωγμές ευκόλως πληρούμενες. Συνήθως απαιτείται βάψιμο. Επαναδιανοιχθείσες ρωγμές είναι δυνατόν να καλυφθούν με κατάλληλα υλικά. Οι ρωγμές είναι ορατές εξωτερικά και μπορεί να απαιτηθεί καθαρισμός και πλήρωση για λόγους υδατοστεγανότητας. Πόρτες και παράθυρα μπορεί να παρουσιάσουν μικρή δυσκολία σε άνοιγμα/κλείσιμο. Τυπικά εύρη ρωγμών έως 5mm.
3	Μέτριος	0.15-0.30	Οι ρωγμές απαιτούν μερική αποκάλυψη (άνοιγμα) και μπορεί να επιδιορθωθούν από εξειδικευμένους τεχνίτες. Καθαρισμός των εξωτερικών τούβλων και πιθανός μικρός αριθμός τούβλων θα πρέπει να αντικατασταθεί. Πόρτες και παράθυρα δεν ανοιγοκλείνουν. Οι σωληνώσεις μπορεί να σπάσουν. Η υδατοστεγανότητα συνήθως έχει τρωθεί. Τυπικά εύρη ρωγμών μεταξύ 5mm και 15 mm. Μερικές φορές οι ανωτέρω βλάβες μπορούν να παρουσιαστούν και για ρωγμές εύρους 3mm.
4	Σοβαρός	>0.3	Εκτεταμένες εργασίες επανακατασκευής, συμπεριλαμβανομένων αντικατάστασης τμημάτων τοιχοποιίας κυρίως επάνω από πόρτες και παράθυρα. Πόρτες και παράθυρα παραμορφώνονται και το δάπεδο παρουσιάζει σημαντική κλίση [†] . Οι τοίχοι αποκλίνουν σημαντικά από τη κατακόρυφο ή εμφανίζουν φουσκώματα, μερική απώλεια στήριξης των δοκών. Σπάσιμο σωληνώσεων. Τυπικά εύρη ρωγμών μεταξύ 15mm και 25mm, αλλά εξαρτάται επίσης και από το πλήθος των ρωγμών.
5	Πολύ σοβαρός		Απαιτούνται σημαντικές επιδιορθώσεις συμπεριλαμβανομένης μερικής ή πλήρους επανακατασκευής. Οι δοκοί έχουν απωλέσει τις στηρίξεις τους, οι τοίχοι παρουσιάζουν σημαντική κλίση και χρειάζονται υποστήριξη. Τα παράθυρα έχουν σπάσει λόγω παραμόρφωσης. Κίνδυνος αστάθειας. Τυπικά εύρη ρωγμών μεγαλύτερα των 25mm, αλλά εξαρτάται και από το πλήθος των ρωγμών.

* Το εύρος της ρωγμής είναι ένας μόνο από τους παράγοντες για την εκτίμηση της κατηγορίας βλάβης και δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται σαν μοναδικό κριτήριο.

† Τοπικές αποκλίσεις της κλίσης ως προς την οριζόντιο ή την κατακόρυφο μεγαλύτερες του 1/100 είναι συνήθως εύκολα ορατές. Συνολικές αποκλίσεις μεγαλύτερες του 1/150 είναι ανεπιθύμητες.

1.4 Εκτίμηση επιφανειακών εδαφικών μετακινήσεων

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι διάφορες μέθοδοι εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων και παρουσιάζονται αναλυτικά οι εμπειρικοί τρόποι προσδιορισμού αυτών.

1.4.1 Μέθοδοι εκτίμησης εδαφικών μετακινήσεων

Οι βασικότερες μέθοδοι εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων δε λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους, υπό συνθήκες δηλαδή ελεύθερου πεδίου, και μπορούν να ενταχθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Αναλυτικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε κλειστές αναλυτικές λύσεις οι οποίες σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τις εδαφικές συνθήκες μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμες. Ο Sagazeta (1981) και οι Verruijt & Brooker (1996) ασχολήθηκαν με αυτές τις μεθόδους με τον πρώτο να παρουσιάζει μια κλειστή, αναλυτική, ελαστική λύση για τον υπολογισμό των εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διάνοιξη μια σήραγγας σε αστράγγιστες συνθήκες (μηδενική μεταβολή όγκου) και για λόγο Poisson $\nu=0.5$, ενώ οι Verruijt & Brooker παρουσίασαν μια κλειστή ελαστική λύση για εδάφη με διαφορετικούς λόγους Poisson.

- Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη σε θέματα που αφορούν εκτιμήσεις εδαφικών μετακινήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές που διαπιστώνουν ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τις πραγματικές μετρήσεις. Ωστόσο ο Guhn (1993) επισημαίνει πως η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων με αυτή τη μέθοδο δίνει συντηρητικά αποτελέσματα καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος και μικρό βάθος σε σχέση με τη καμπύλη της εμπειρικής μεθόδου. Οι Mayor & Taylor (1997) επισήμαναν πως τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζονται από το αρχικό εντατικό πεδίο και γι' αυτό είναι σημαντικό να εκτιμηθεί σωστά ο συντελεστής ωθήσεων γαιών (K), ενώ επηρεάζονται και από το βαθμό αποτόνωσης των τάσεων.

- Εμπειρικές-ημιεμπειρικές μέθοδοι

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι μετακινήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας έχουν αναπτυχθεί κατά το παρελθόν διάφορες εμπειρικές-

ημιεμπειρικές μέθοδοι με ικανοποιητικές προσεγγίσεις και για τις οποίες γίνεται αναφορά στην επόμενη ενότητα.

1.4.2 Εμπειρικός προσδιορισμός εδαφικών μετακινήσεων

Οι μετακινήσεις που εκδηλώνονται με τη διάνοιξη μιας σήραγγας έχουν οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα οι οποίες αρχικά πρέπει να εκτιμηθούν και κατόπιν να διερευνηθεί η επίδραση τους στις υπερκείμενες κατασκευές. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται οι εμπειρικοί τρόποι προσδιορισμού τους καθώς επίσης γίνεται αναφορά και σε άλλου είδους μετακινήσεις που εμφανίζονται.

1.4.2.1 Κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις κάθετα στον άξονα της σήραγγας

Όπως αναφέρθηκε οι εμπειρικές μέθοδοι έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου πρέπει να εκτιμηθεί η κατακόρυφη μετακίνηση (καθίζηση) κάθετα στον άξονα της σήραγγας με επικρατέστερη αυτή των Martos (1958), Peck (1969), Schmidt (1969), Clough & Schmidt (1981) Attewell & Yeates (1984). Ύστερα από στατιστική επεξεργασία μεγάλου πλήθους επί τόπου μετρήσεων των καθιζήσεων σε διάφορα έργα που καλύπτουν μεγάλο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών κατέληξαν σε μια μαθηματική έκφραση της κατανομής των καθιζήσεων (s) η οποία ακολουθεί τον εκθετικό νόμο όπως δείχνει η εξίσωση 1.7 ενώ η μορφή της είναι αυτή της καμπύλης Gauss και φαίνεται στο Σχήμα 1.11.

$$s = s_{max} \cdot e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (1.7)$$

Όπου:

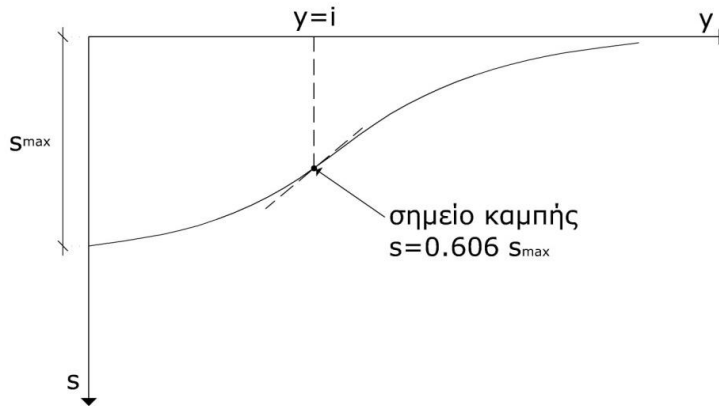
s : η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους σε οριζόντια απόσταση y από τον άξονα της σήραγγας

s_{max} : η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους που παρουσιάζεται στη θέση του άξονα της σήραγγας ($y=0$)

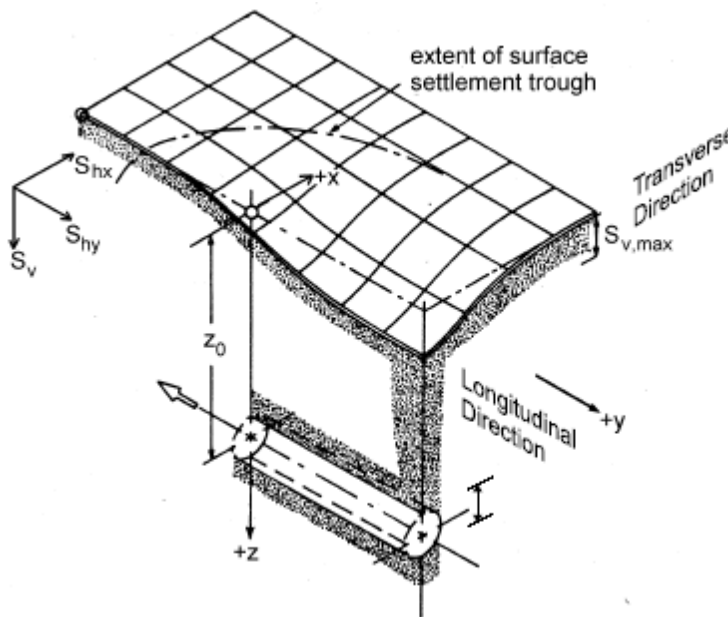
y : η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

i : η θέση του σημείου καμπής - τυπική απόκλιση καμπύλης

Στο Σχήμα 1.12 δίνεται η αντίστοιχη προοπτική απεικόνιση.



Σχήμα 1.11: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων



Σχήμα 1.12: Προοπτική απεικόνιση

Στο σημείο καμπής μεγιστοποιείται η κλίση ($\frac{ds}{dy}$) της καμπύλης η οποία και εκφράζεται από την εξίσωση 1.8 ενώ η καμπυλότητα ($\frac{d^2s}{dy^2}$) εκφράζεται από την εξίσωση 1.9

$$\frac{ds}{dy} = -s_{max} \cdot \frac{y}{i^2} \cdot e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (1.8)$$

$$\frac{d^2s}{dy^2} = \frac{s_{max}}{i^2} \cdot \left[\frac{y}{i^2} - 1 \right] \cdot e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (1.9)$$

Ο όγκος που περικλείεται από την καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων δίνει την απώλεια του εδαφικού όγκου ανά μονάδα μήκους της σήραγγας (V_s) και υπολογίζεται από την εξίσωση 1.10

$$V_s = i \cdot \sqrt{2\pi} \cdot s_{max} \quad (1.10)$$

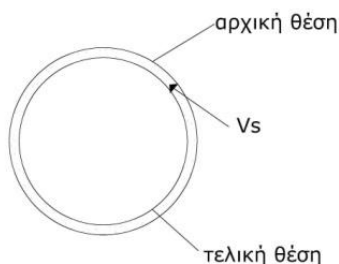
Αν εκφράσουμε τη μέγιστη καθίζηση (s_{\max}) συναρτήσει της απώλειας του εδαφικού όγκου (V_s) όπως φαίνεται στην εξίσωση 1.11 η κλίση ($\frac{ds}{dy}$) και η καμπυλότητα ($\frac{d^2s}{dy^2}$) θα έχουν αντίστοιχα τη μορφή των εξισώσεων 1.12-1.13.

$$s_{\max} = \frac{V_s}{i \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (1.11)$$

$$\frac{ds}{dy} = -\frac{V_s}{i^3 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot y \cdot e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \quad (1.12)$$

$$\frac{d^2s}{dy^2} = \frac{V_s}{i^3 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \left[\frac{y}{i^2} - 1 \right] \cdot e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \quad (1.13)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά την εκσκαφή μια σήραγγας προκαλούνται εδαφικές μετακινήσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια εδαφικού όγκου (V_s) όπου σε συνθήκες ισόογκης παραμόρφωσης έχει τιμή ίση με τον όγκο του γεωυλικού που περικλείεται μεταξύ των θέσεων μηδενικής και τελικής παραμόρφωσης των τοιχωμάτων της σήραγγας (Σχήμα 1.13).

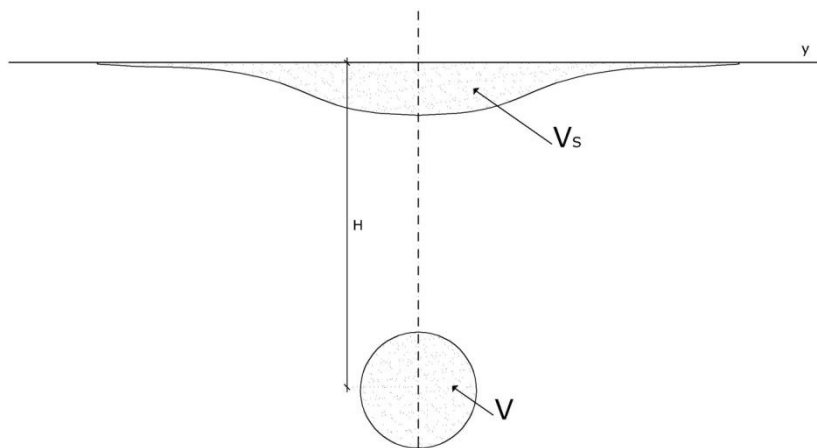


Σχήμα 1.13: Εδαφικές απώλειες όγκου

Οπότε, ως σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (V_i) ορίζεται ο λόγος της απώλειας εδαφικού όγκου (V_s) προς το ιδεατό εμβαδόν της διατομής της σήραγγας (V), (εξίσωση 1.14) .

$$V_i = \frac{V_s}{V} \% \quad (1.14)$$

Στο Σχήμα 1.14 δίνεται η σχετική απεικόνιση



Σχήμα 1.14: Εδαφικές απώλειες όγκου

Ο Peck (1969) όρισε τον συντελεστή υπερφόρτισης (N) όπως δίνεται στην εξίσωση 1.15

$$N = \frac{2(P_0 - P_i)}{\sigma_{cm}} \quad (1.15)$$

Όπου:

p_0 : το αρχικό εντατικό πεδίο στο βάθος του άξονα της σήραγγας, $P_0 = \gamma \cdot H$

p_i : η πίεση στο εσωτερικό της σήραγγας λόγω των μέτρων υποστήριξης

σ_{cm} : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του εδαφικού υλικού που περιβάλλει τη σήραγγα σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb $\sigma_{cm} = 2c \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$

Οι Clough & Schmidt (1981) έδωσαν ένα διάγραμμα το οποίο δίνει τη σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (V_i) συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτισης (N) ενώ κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (V_i) μπορεί να υπολογιστεί και από τις εξισώσεις 1.16 & 1.17 ανάλογα με την επιμέλεια στην κατασκευή.

- Προσεκτική κατασκευή σήραγγας

$$\frac{V_s}{V} = 0.002 \cdot e^{N-1} \quad (1.16)$$

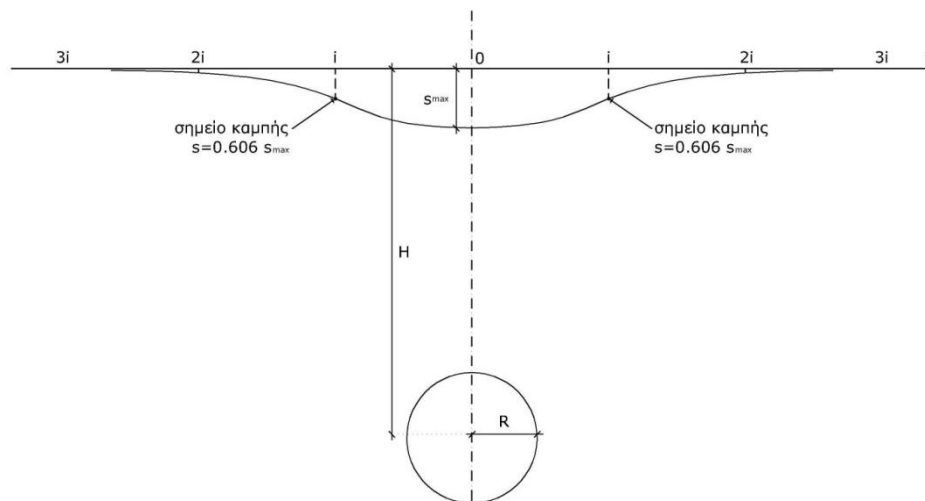
- Συνήθη επιμέλεια στην κατασκευή σήραγγας

$$\frac{V_s}{V} = 0.004 \cdot e^{N-1} \quad (1.17)$$

Ο Mair (1998) μεταξύ άλλων επισήμανε πως η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (V_i) επηρεάζεται σημαντικά και αντιστρόφως ανάλογα από το λόγο H/D, δηλαδή, από το ύψος των υπερκειμένων και τη διάμετρο της σήραγγας. Σε χαμηλά λοιπόν

υπερκείμενα αναμένεται μεγάλη σχετική απώλεια εδαφικού υλικού (V_i) και ως αποτέλεσμα δεν αναπτύσσεται η τοξωτή λειτουργία (φαινόμενο θόλου).

Η παράμετρος i όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι η τυπική απόκλιση της καμπύλης και γραφικά είναι η οριζόντια απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα της σήραγγας (Σχήμα 1.15) και έχουν γίνει διάφορες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της.



Σχήμα 1.15: Σημείο καμπής

Οι O'Reilly & New (1982) κατέληξαν στη μορφή της εξίσωσης 1.18 για τον υπολογισμό του σημείου καμπής (i), αξιολογώντας τις μετρήσεις καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε ποικίλες εδαφικές συνθήκες, οι οποίες έδειξαν πως η τυπική απόκλιση αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει του βάθους και είναι ανεξάρτητη από τη διάμετρο και τον τρόπο διάνοιξης.

$$i = k \cdot H \quad (1.18)$$

Όπου:

k : παράμετρος η οποία εκφράζει το πλάτος της καμπύλης των καθιζήσεων

H : το βάθος του άξονα της σήραγγας

Σχετικά με τη παράμετρο k , οι Mair & Taylor (1997) συνιστούν να λαμβάνεται $k=0.5$ για αργιλικά εδάφη και $k=0.35$ για κοκκώδη εδάφη, ενώ ο Burland (2001) προτείνει $k=0.2-0.3$ για κοκκώδη εδάφη, $k=0.4-0.5$ για σιφρές αργίλους και $k=0.4-0.7$ για μαλακούς αργίλους.

Οι Clough & Schmidt (1981) προτείνουν τη σχέση που δίνεται από την εξίσωση 1.19 και ισχύει μόνο για αργίλους

$$\frac{i}{D} = 0.5 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0.8} \quad (1.19)$$

Όπου:

D: η διάμετρος της σήραγγας

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας

Οι Oteo & Sagazeta (1982) αξιολογώντας στοιχεία από τη βιβλιογραφία και αποτελέσματα αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προτείνουν την ακόλουθη γραμμική σχέση (εξίσωση 1.20)

$$\frac{i}{R} = 1.05 \cdot (H/D) - 0.42 \quad (1.20)$$

Όπου:

R: η ακτίνα της σήραγγας

D: η διάμετρος της σήραγγας

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας

Τέλος, οι Mair & Taylor (1993) αξιοποίησαν μεγάλο πλήθος επί τόπου μετρήσεων των καθιζήσεων σε διάφορες υπερκείμενες στάθμες και κυρίως σε αργιλικά εδάφη και κατέληξαν στη σχέση που δίνεται παρακάτω (εξίσωση 1.21)

$$i = \left\{ 0.175 + 0.325 \cdot \left(1 - \frac{z_s}{H} \right) \right\} \cdot H \quad (1.21)$$

Όπου:

z_s : το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους όπου εξετάζεται η κατανομή των καθιζήσεων

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας

1.4.2.2 Οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις κάθετα στον άξονα της σήραγγας

Εκτός από τις κατακόρυφες μετακινήσεις (καθιζήσεις), κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας παρουσιάζονται και οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στις υπερκείμενες κατασκευές λόγω των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η εκτίμηση των οριζόντιων μετακινήσεων.

Οι Mair et al. (1996), πρότειναν μια σχέση (εξίσωση 1.22) για τον υπολογισμό των οριζόντιων μετακινήσεων (s_h) κάνοντας την παραδοχή ότι ο φορέας των διανυσμάτων διέρχεται από το κέντρο της σήραγγας.

$$s_h = \frac{y}{H} \cdot s \quad (1.22)$$

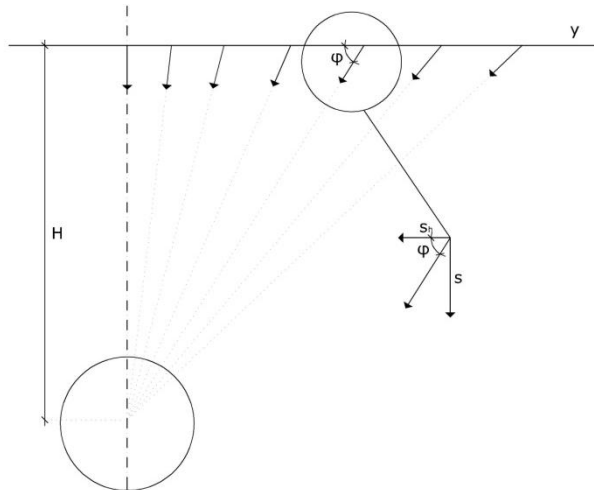
Όπου:

y : η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

H : το βάθος του άξονα της σήραγγας

s : η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους σε οριζόντια απόσταση y από τον άξονα της σήραγγας

ενώ στο Σχήμα 1.16 δίνεται και η σχετική απεικόνιση



Σχήμα 1.16: Mair et al. (1996),

Αν στη παραπάνω σχέση εκφράσουμε την καθίζηση όπως στην εξίσωση 1.7 η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή της εξίσωσης 1.23

$$s_h = \left(\frac{y}{H}\right) \cdot s_{max} \cdot e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \quad (1.23)$$

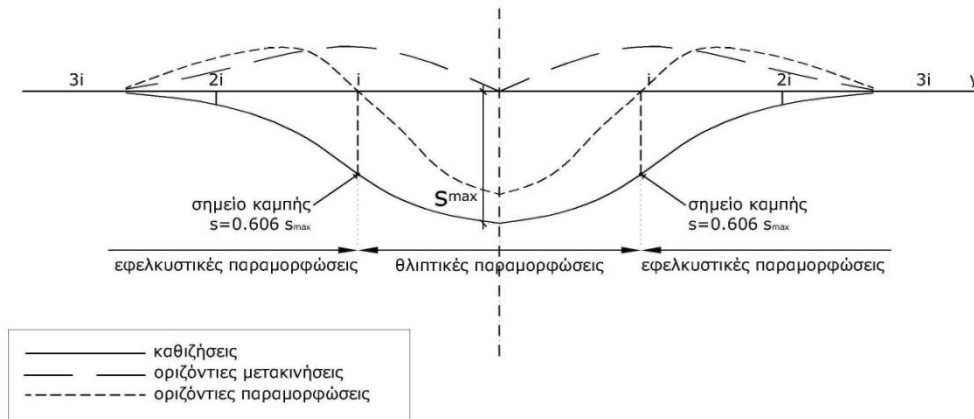
Οι οριζόντιες παραμορφώσεις (ϵ_h) προκύπτουν από παραγωγή της εξίσωσης 1.23 και υπολογίζονται από την εξίσωση 1.24

$$\epsilon_h = \frac{ds_h}{dy} = s_{max} \cdot e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \cdot \left[\frac{1}{H} - \frac{2y}{H} \cdot \frac{1}{2i^2} \right] \quad (1.24)$$

Η μέγιστη επιφανειακή οριζόντια εδαφική μετακίνηση (s_{hmax}) παρουσιάζεται στη θέση $y = \pm i$ και δίνεται από την εξίσωση 1.25 ενώ στην ίδια θέση οι οριζόντιες παραμορφώσεις (ϵ_h) μηδενίζονται.

$$s_{hmax} = 0.606 \cdot \left(\frac{i}{H}\right) \cdot s_{max} \quad (1.25)$$

Οι Mair et al. (1996) στο Σχήμα 1.17 παρουσίασαν την κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων (s), των οριζόντιων μετακινήσεων (s_h) και τις οριζόντιες παραμορφώσεις (ϵ_h). Παρατηρούμε πως οι οριζόντιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι εφελκυστικές ($\epsilon_h < 0$) για $y > i$ και $y < -i$ και θλιπτικές για ($\epsilon_h > 0$) για $-i < y < i$.

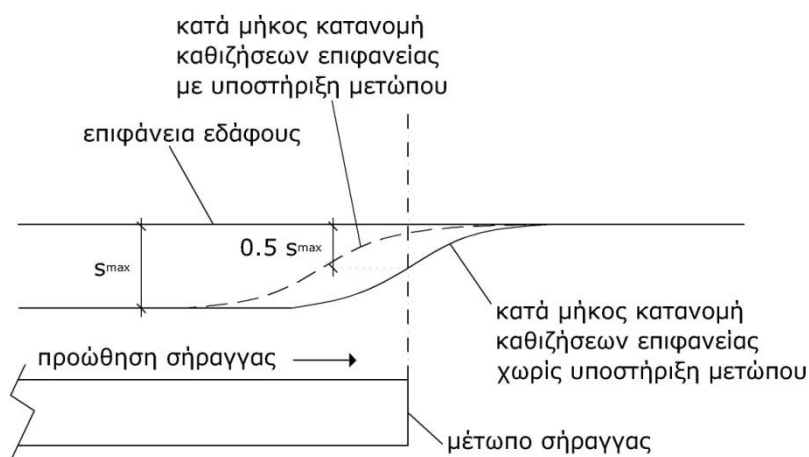


Σχήμα 1.17: Κατά πλάτος κατανομές οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων λόγω υπόγειων εκσκαφών, Mair et al.(1996)

1.4.2.3 Μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας

Οι μετακινήσεις που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες αφορούν σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας. Ωστόσο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας παρουσιάζονται και μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα.

Οι Attewell & Woodman (1982) αξιοποιώντας μετρήσεις από κατασκευές σηράγγων σε αργίλους κατέληξαν στο συμπέρασμα πως οι καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα της διάνοιξης μιας σήραγγας προσεγγίζονται ικανοποιητικά από μια συνάρτηση πιθανότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18. Αν στη θέση του μετώπου τα μέτρα υποστήριξης δεν είναι ικανοποιητικά η άμεση καθίζηση (s) λαμβάνει τιμή ίση με $0.5s_{max}$ ενώ σε αντίθετη περίπτωση είναι αισθητά μικρότερη του $0.5s_{max}$.



Σχήμα 1.18: Κατανομή καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, Attewell & Woodman (1982)

1.4.2.4 Εδαφικές μετακινήσεις μετά το πέρας της κατασκευής

Οι μετακινήσεις λόγω της διάνοιξης μιας σήραγγας δε πραγματοποιούνται μόνο κατά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο αυτή κατασκευάζεται αλλά μπορούν να

εκδηλωθούν και μετά το πέρας της κατασκευής. Η μεταβολή της κατανομής των πιέσεων πριν και μετά την κατασκευή της σήραγγας, η διαπερατότητα του εδάφους στο οποίο διανοίγεται η σήραγγα και η διαφορά αυτής σε σχέση με τη διαπερατότητα της επένδυσης είναι οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στην εμφάνιση μετακατασκευαστικών καθιζήσεων. Ειδικότερα, σε αργιλικά εδάφη όπου οι πιέσεις του νερού των πόρων μεταβάλλονται σημαντικά (αστράγγιστες συνθήκες κατά την κατασκευή και στραγγισμένες συνθήκες μετά το πέρας της κατασκευής) μπορούν να σημειωθούν μεγάλες καθιζήσεις. Οι Mair (1998) και Burland (2001) επισήμαναν πως σε μαλακές αργίλους οι μακροχρόνιες μετακινήσεις που πραγματοποιούνται έχουν σχεδόν αμελητέα οριζόντια συνιστώσα, πρόκειται δηλαδή για καθιζήσεις οι οποίες έχουν τιμές από 30% έως 90% της συνολικής καθίζησης.

2. Παραμετρικές αναλύσεις επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης αβαθούς σήραγγας (Μέρος Α')

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μια σύντομη αναφορά στο γεωτεχνικό πρόγραμμα Plaxis 2D V8.2 καθώς και στο γεωτεχνικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ενώ επίσης παρουσιάζεται μια εκτενής παραμετρική ανάλυση προκειμένου να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που επηρεάζουν ο τρόπος διάνοιξης της σήραγγας, η συμπεριφορά του εδάφους, το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος του σκυροδέματος και το ύψος των υπερκείμενων εδαφών τις επιφανειακές καθιζήσεις.

2.1 Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D V8.2

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Plaxis 2D V8.2. Πρόκειται για ένα διδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο μπορούν να γίνουν αναλύσεις για διάφορες γεωτεχνικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αυτό έχει τρία κυρίως στάδια λειτουργίας. Στο πρώτο στάδιο (Input) ορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου και οι αρχικές συνθήκες, στο δεύτερο στάδιο (calculations) προσομοιώνεται η κατασκευή του γεωτεχνικού μοντέλου όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορά διάνοιξη και υποστήριξη σήραγγας, ενώ στο τρίτο και τελευταίο στάδιο (output) εξάγονται τα αποτελέσματα από τα οποία προκύπτουν οι πληροφορίες για τις επιφανειακές καθιζήσεις.

2.2 Γεωμετρικό μοντέλο – παραμετρικές αναλύσεις

Η σήραγγα που προσομοιώνεται σε αυτή την εργασία έχει διάμετρο $D=10\text{m}$ και το έδαφος στο οποίο διανοίγεται έχει ειδικό βάρος $\gamma=24\text{ kN/m}^3$ και λόγο Poisson $\nu=0.2$. Η επένδυση που χρησιμοποιείται είναι εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μέτρο ελαστικότητας $E_b=29\text{ GPa}$, λόγο Poisson $\nu=0.15$ και ειδικό βάρος $\gamma=25\text{ kN/m}^3$.

Ως παράμετροι για τις αναλύσεις επιλέγονται ο τρόπος διάνοιξης της σήραγγας και κατ' επέκταση ο βαθμός αποτόνωσης (NATM) ή το ποσοστό της ανηγμένης απώλειας όγκου (BORED), η συμπεριφορά του εδάφους (γραμμικώς ελαστική ή γραμμικώς ελαστική-ιδεατώς πλαστική (M-C)), το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος της επένδυσης, και το ύψος των υπερκείμενων εδαφών. Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο στις παραπάνω αναλύσεις.

Από τις επιλύσεις προκύπτουν οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων u_y βάσει των οποίων ορίζεται η ανηγμένη τιμή της επιφανειακής καθίζησης $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ καθώς με τον τρόπο αυτό είναι εμφανής η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας και του ειδικού βάρους. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα που

παρουσιάζουν την ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση συναρτήσει του συντελεστού πλευρικών ωθήσεων K_0 .

2.3 Παραμετρικές αναλύσεις

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας ως παράμετροι έχουν επιλεγεί να εξετασθούν ο τρόπος με τον οποίο διανοίγεται η σήραγγα, το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος επένδυσης σκυροδέματος, το πάχος των υπερκείμενων εδαφών καθώς και η συμπεριφορά του εδάφους. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται κάθε παράμετρος και εξάγονται κάποια συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που η καθεμιά επιδρά στις επιφανειακές καθιζήσεις.

2.3.1 Παράμετρος: Μέθοδος διάνοιξης σήραγγας (NATM & BORED)

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας με τα σχετικά διαγράμματα καθώς και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα των αναλύσεων.

2.3.1.1 Επιρροή της μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση του τρόπου διάνοιξης (NATM & BORED) στην ανηγμένη καθίζηση τόσο για γραμμικώς ελαστική όσο και για γραμμικώς ελαστική - ιδεατώς πλαστική συμπεριφορά εδάφους, με ύψος υπερκείμενων $H=20\text{m}$. Για την πλαστική συμπεριφορά εδάφους η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ ενώ η τιμή της συνοχής c προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$ για τιμές του λόγου $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ 0.50 και 0.25 (Πίνακας 2.1).

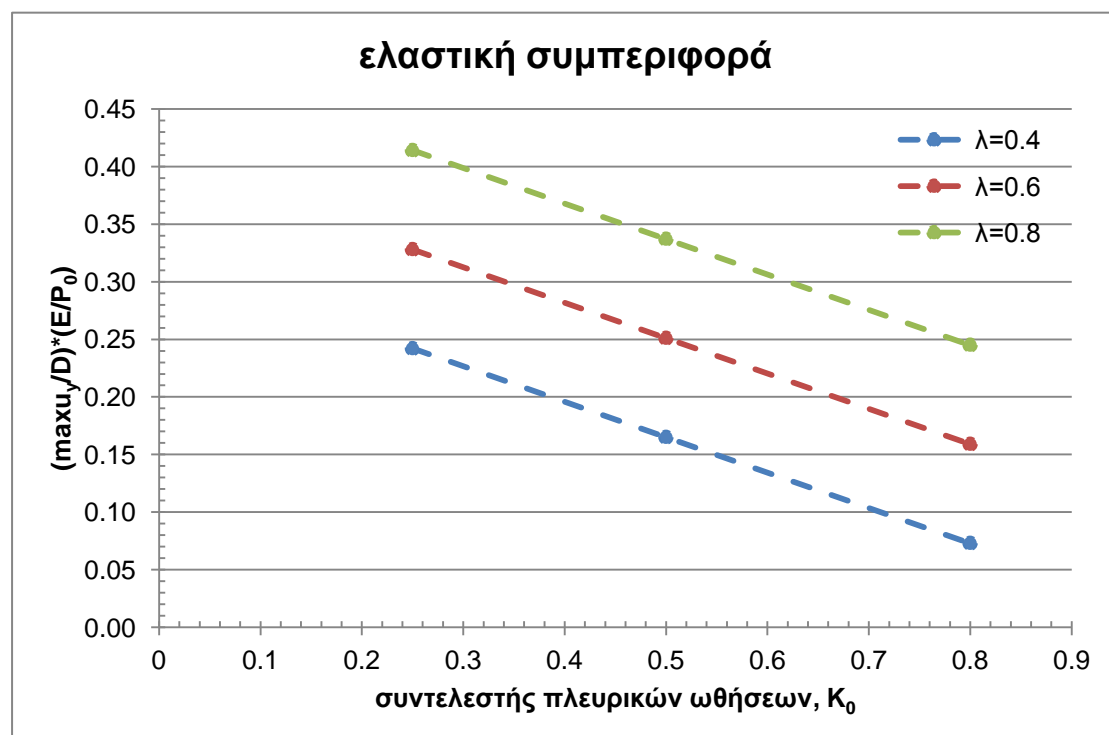
Πίνακας 2.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για διάνοιξη με μέθοδο NATM & TBM

Εδαφικές παράμετροι		
συμπεριφορά	τύπος συνθήκες	-Γραμμικώς ελαστική -Mohr-Coulomb στραγγισμένες
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	50
λόγος Poisson	ν =	0.2
γωνία τριβής	φ (°) =	35
συνοχή	c (kPa) =	31.2 & 62.5
Παράμετροι επένδυσης		
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.2

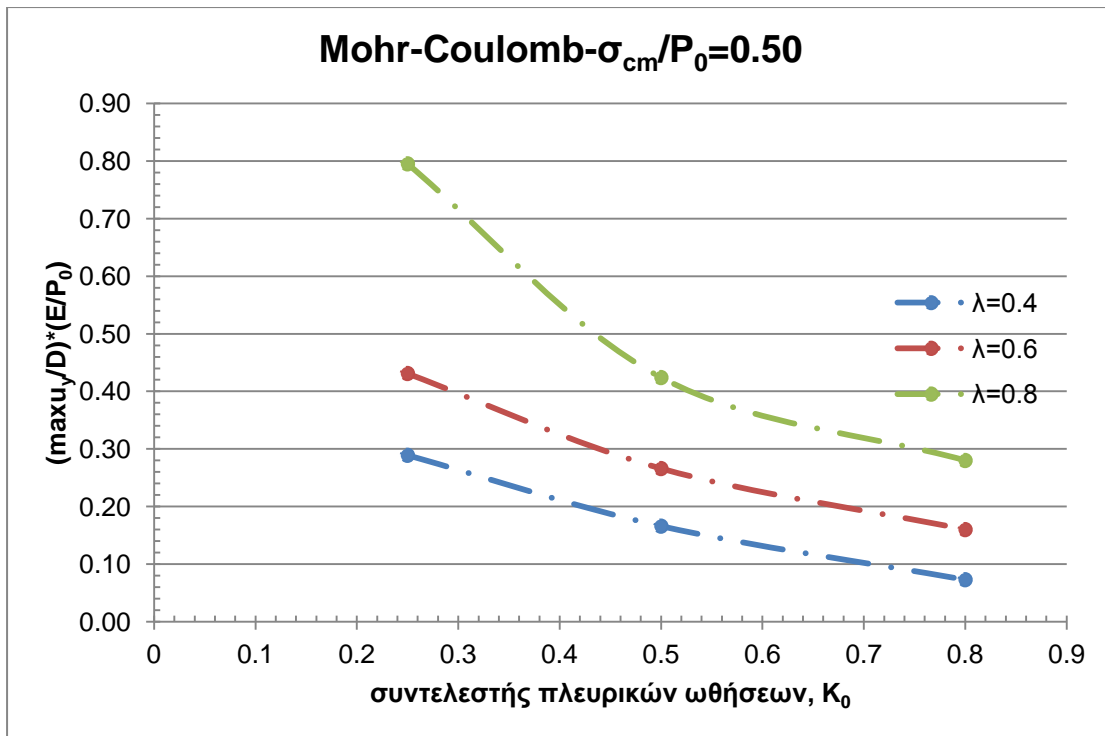
βάρος	w (kN/m/m) =	5
λόγος Poisson	ν =	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.2
δυστένεια	EA (kN/m) =	5.80E+06
δυσκαμψία	EI (kNm ² /m) =	1.9343E+04

Ως μέθοδος διάνοιξης σήραγγας εξετάζεται αρχικά η μέθοδος NATM φιλοσοφία της οποίας είναι η ενεργοποίηση (τοξωτή λειτουργία) και η αξιοποίηση της αντοχής βραχώμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα. Πρόκειται για μια μέθοδο ελεγχόμενης παραμόρφωσης του εδάφους και με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η ανάγκη “βαριάς” υποστήριξης. Ωστόσο, επισημαίνεται πως ο Kovari (1994) έχει αμφισβητήσει τον ορισμό “Μέθοδος NATM” καθώς δεν υπάρχει κάποιο εδραιωμένο θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο αυτή βασίζεται αλλά μια φιλοσοφία.

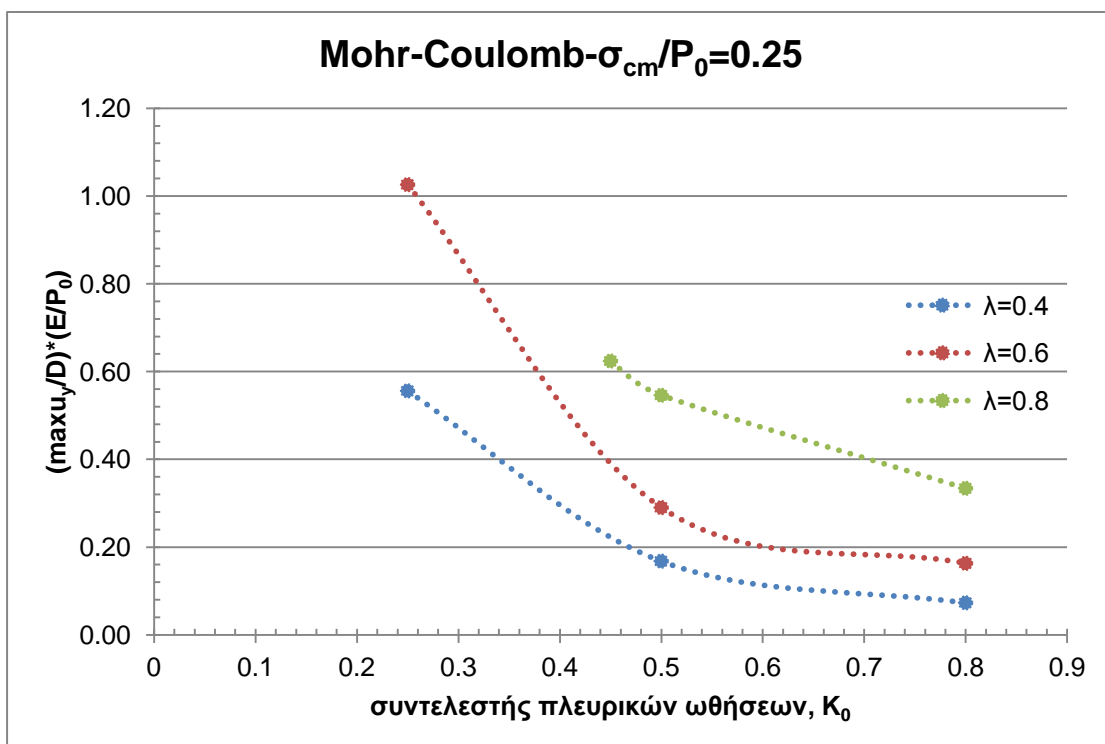
Συγκεκριμένα, για τη μέθοδο NATM όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.1-2.3 εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ (0.4-0.6-0.8) για τιμές του K_0 από 0.25-0.80.



Σχήμα 2.1: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και ελαστική συμπεριφορά εδάφους.

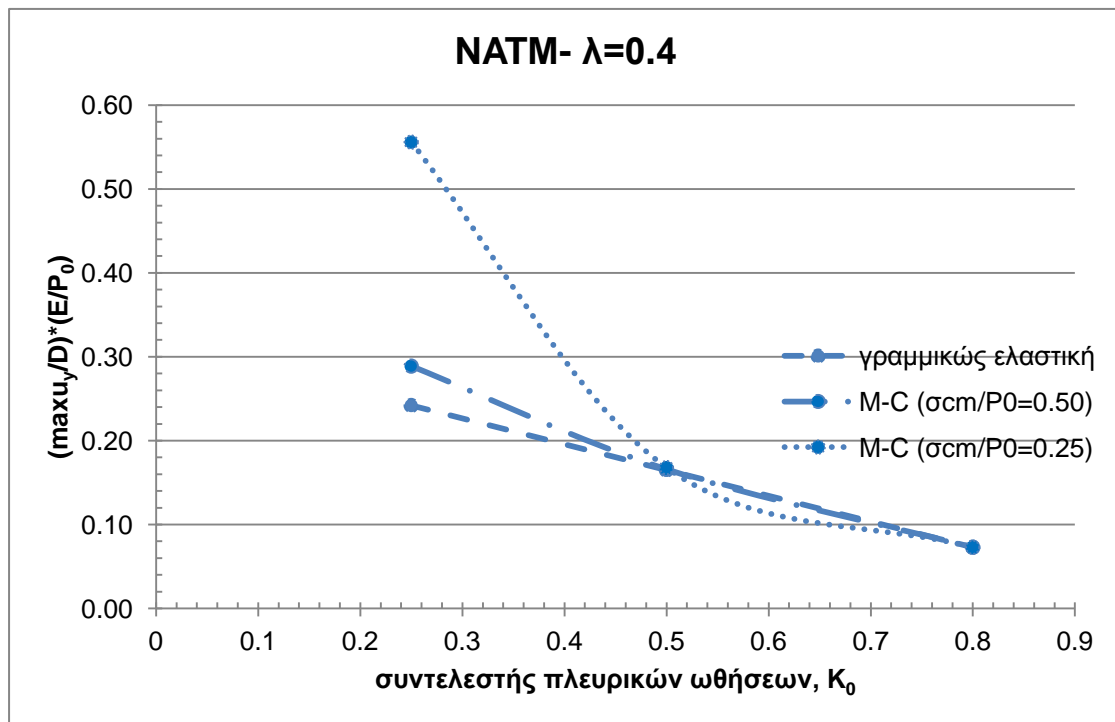


Σχήμα 2.2: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\sigma_{cm}/P_0=0.50$

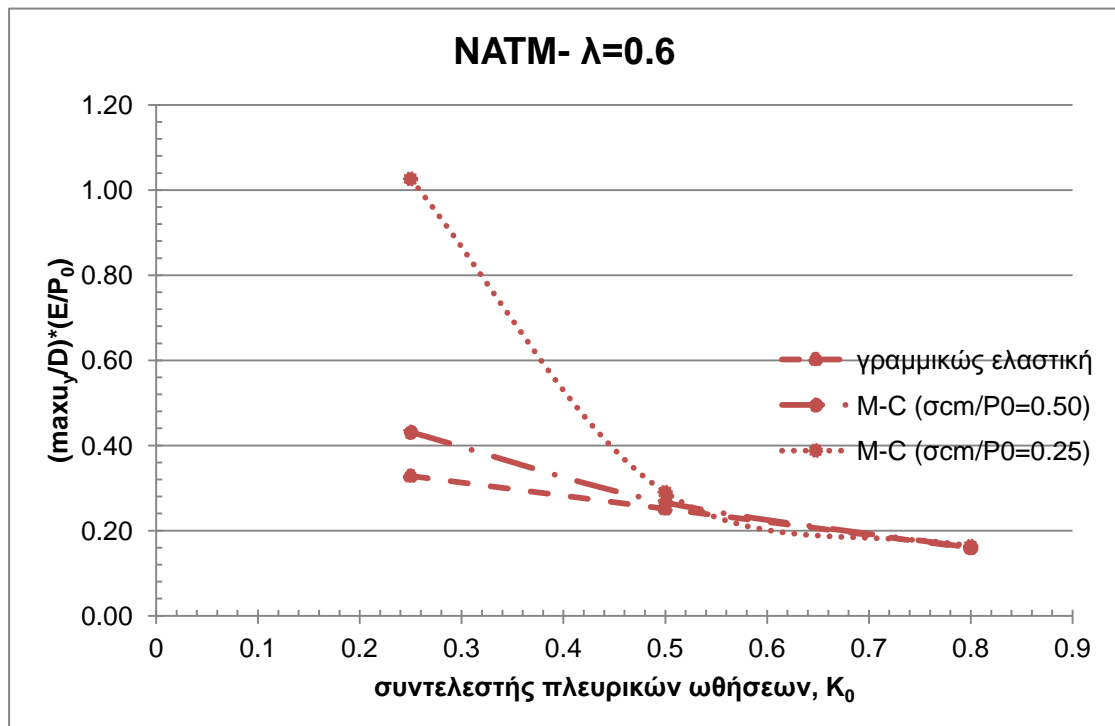


Σχήμα 2.3: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\sigma_{cm}/P_0=0.25$.

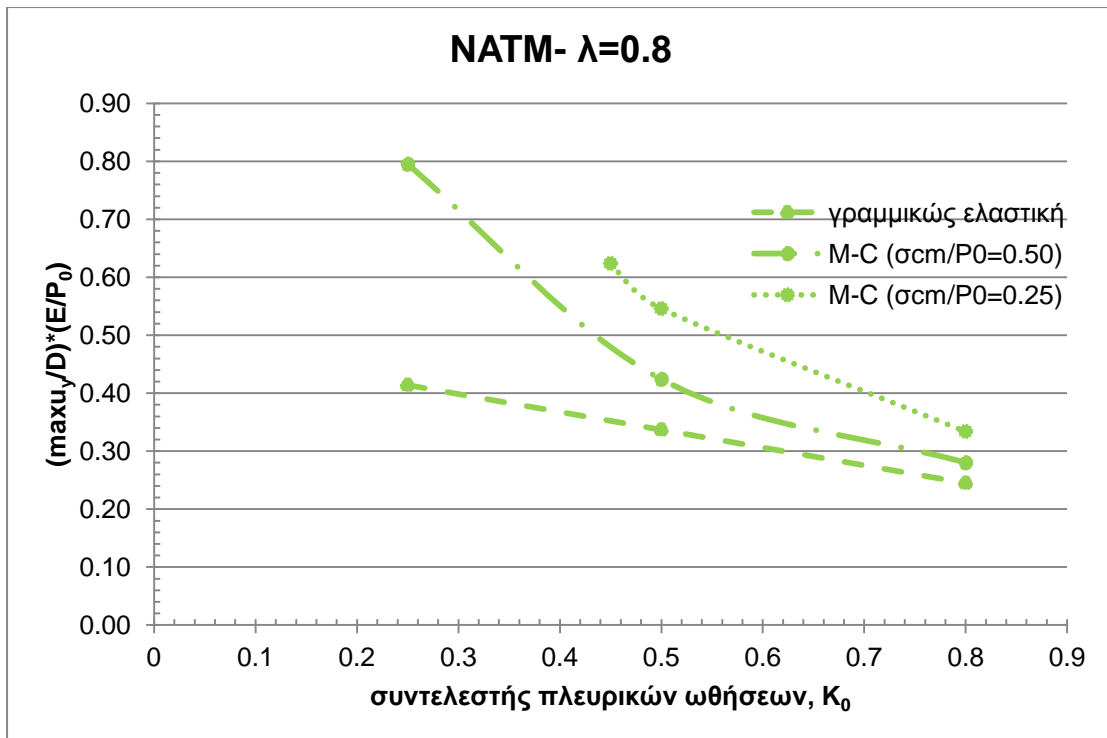
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήματα 2.4-2.6) παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και για συγκεκριμένη τιμή του βαθμού αποτόνωσης λ .



Σχήμα 2.4: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.4$.

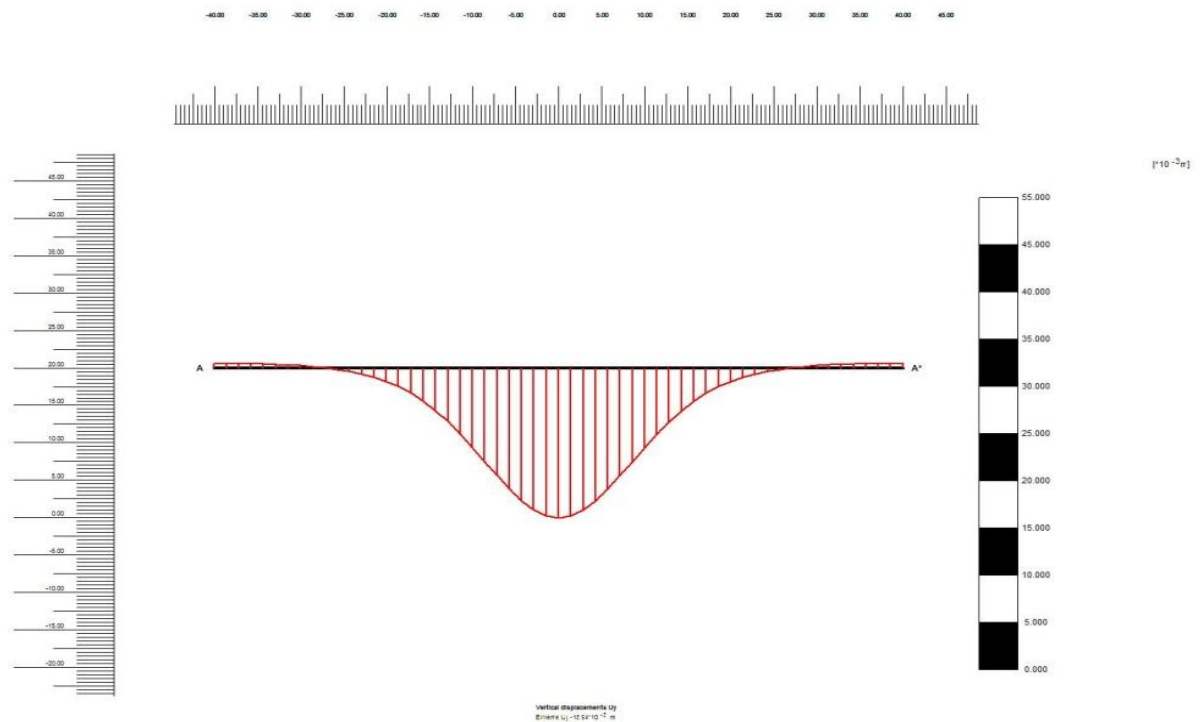


Σχήμα 2.5: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.6$.

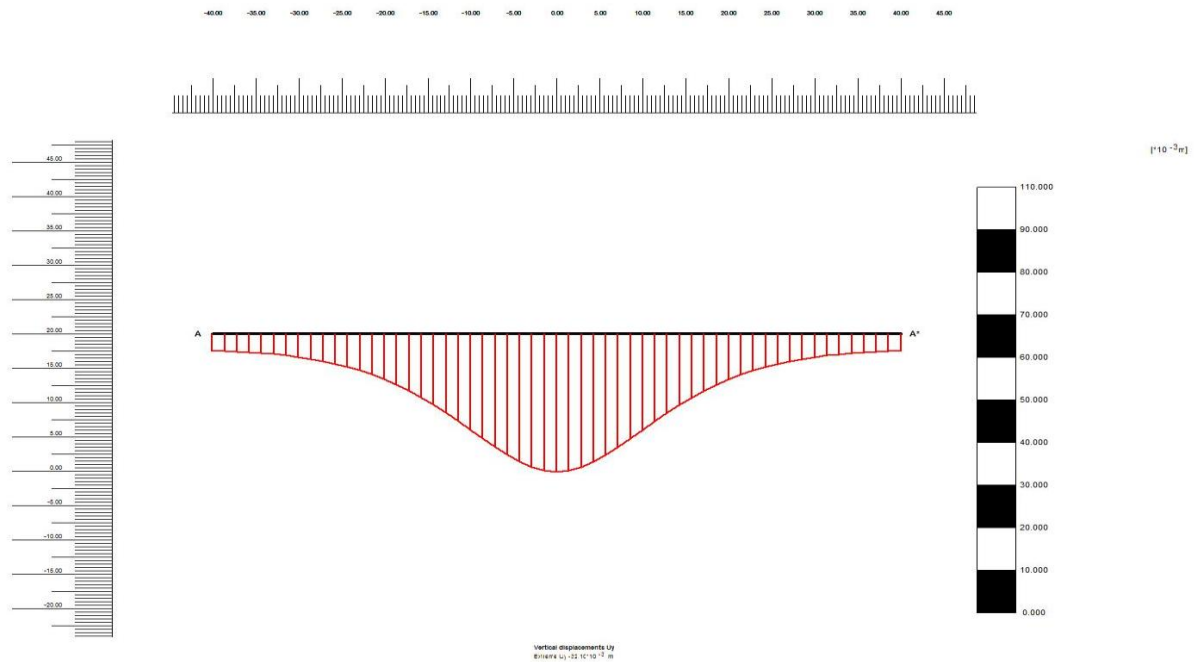


Σχήμα 2.6: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μέθοδο NATM και $\lambda=0.8$.

Για τους παραπάνω συνδυασμούς παραμέτρων η καμπύλη των καθιζήσεων έχει γενικά τη μορφή που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1, και ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες καμπύλες στις Εικόνες 2.1 & 2.2.

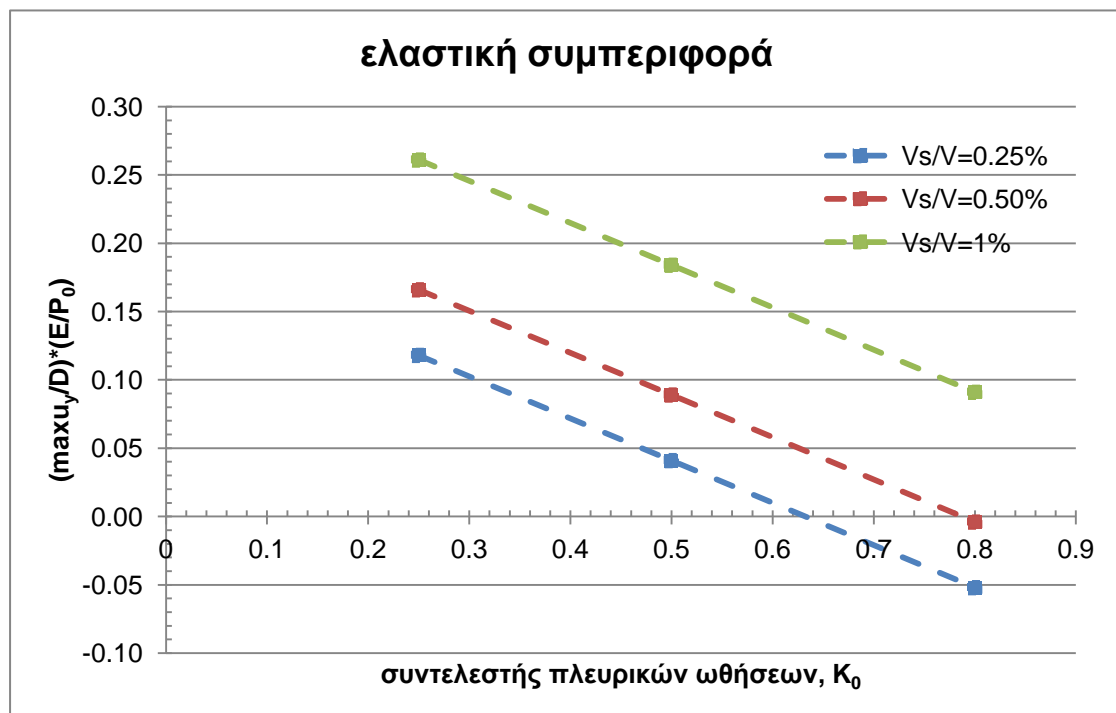


Εικόνα 2.1: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $K_0=0.50$ & $\lambda=0.4$

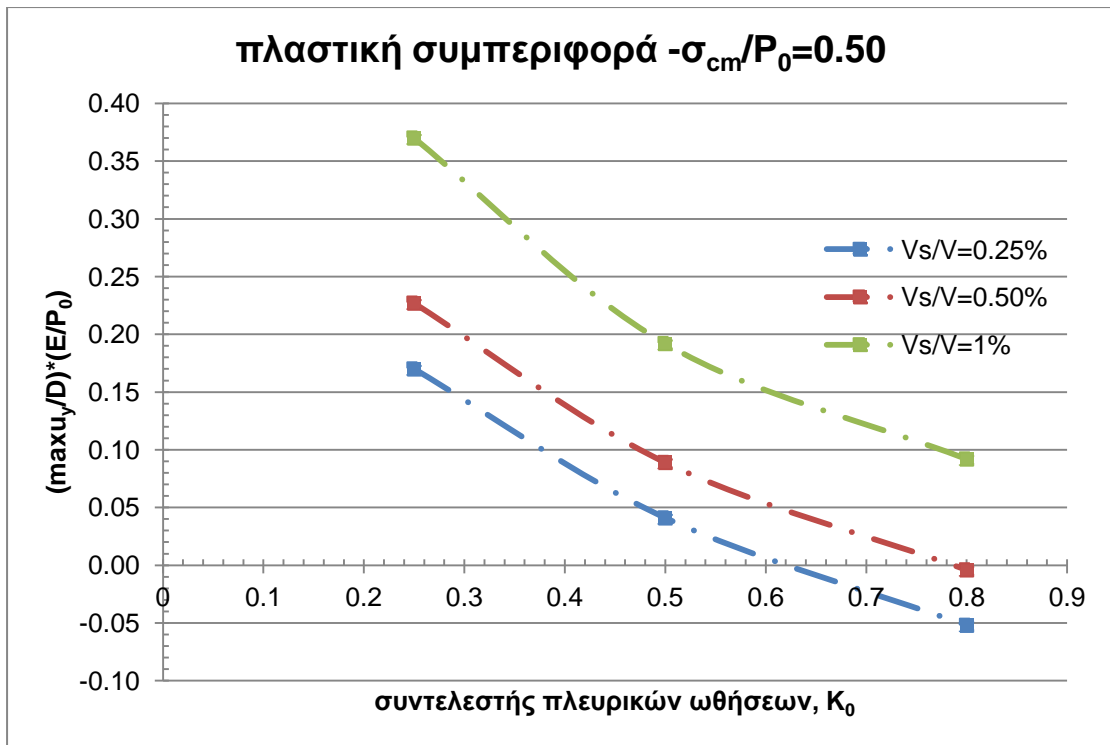


Εικόνα 2.2: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.80$ & $\lambda=0.8$

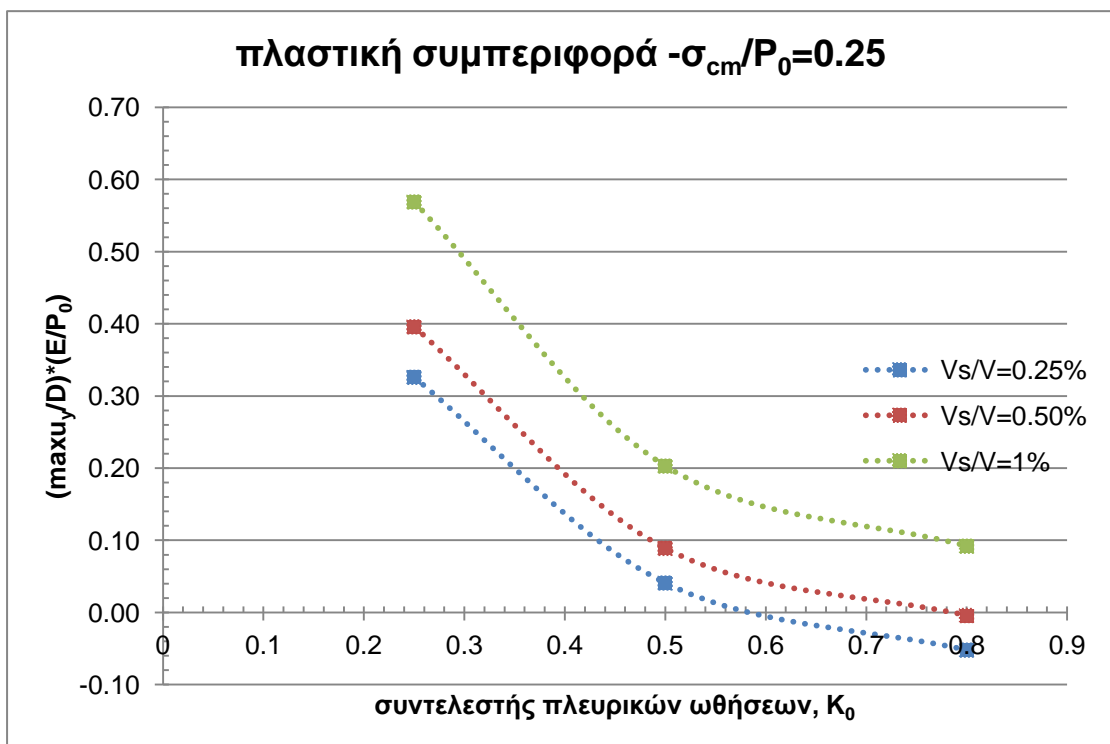
Κατόπιν, εξετάζεται η διάνοιξη με μηχάνημα TBM όπου στη περίπτωση αυτή η υποστήριξη τοποθετείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εκσκαφή. Αντίστοιχα με πριν, για διάνοιξη με μηχάνημα TBM όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.7-2.9 εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V (0.25%-0.5%-1%) για τιμές του K_0 από 0.25-0.80.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και ελαστική συμπεριφορά εδάφους.

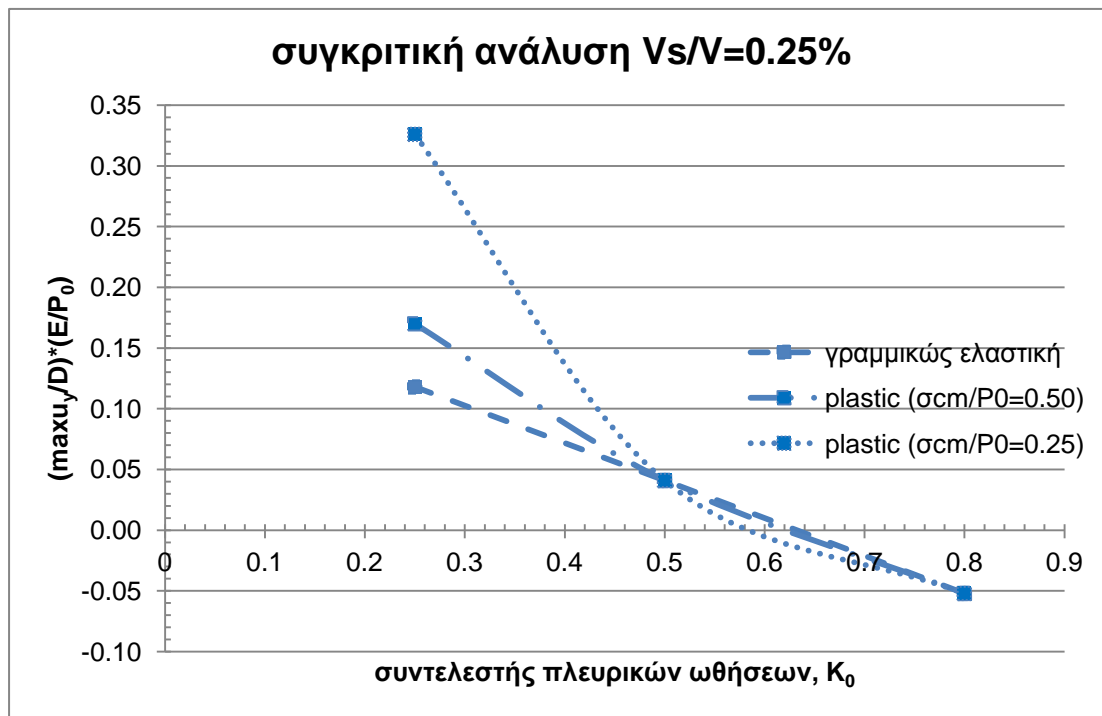


Σχήμα 2.8: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $\sigma_{cm}/P_0=0.50$.

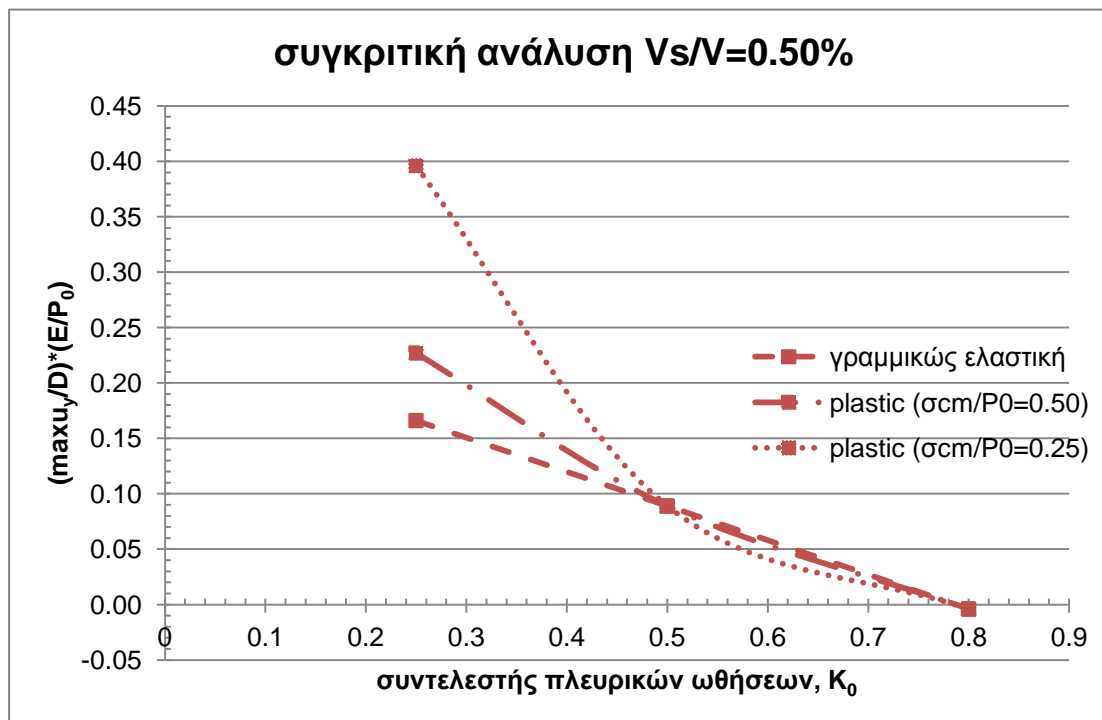


Σχήμα 2.9: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $\sigma_{cm}/P_0=0.25$.

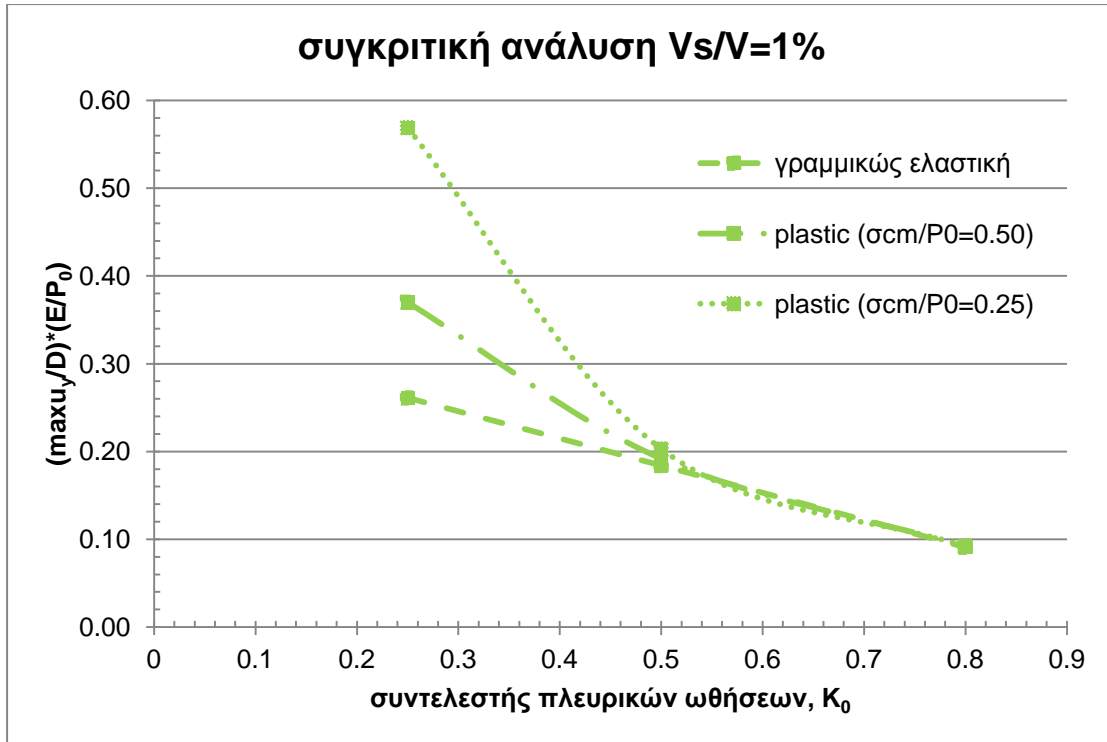
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήματα 2.10-2.12) παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και για συγκεκριμένη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου.



Σχήμα 2.10: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$.

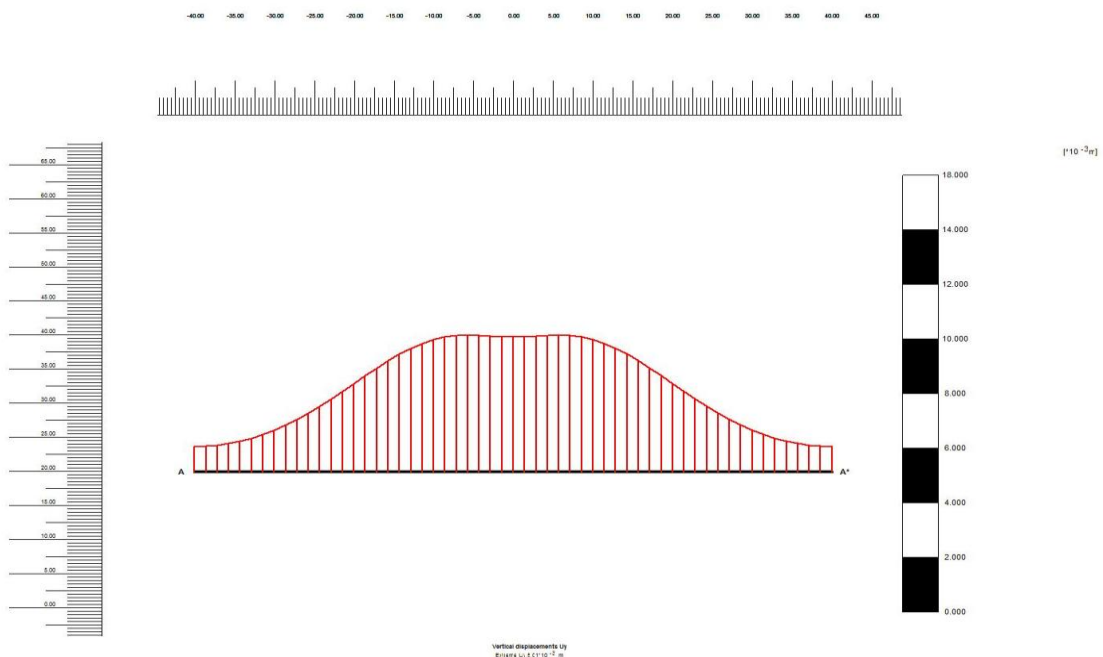


Σχήμα 2.11: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$.

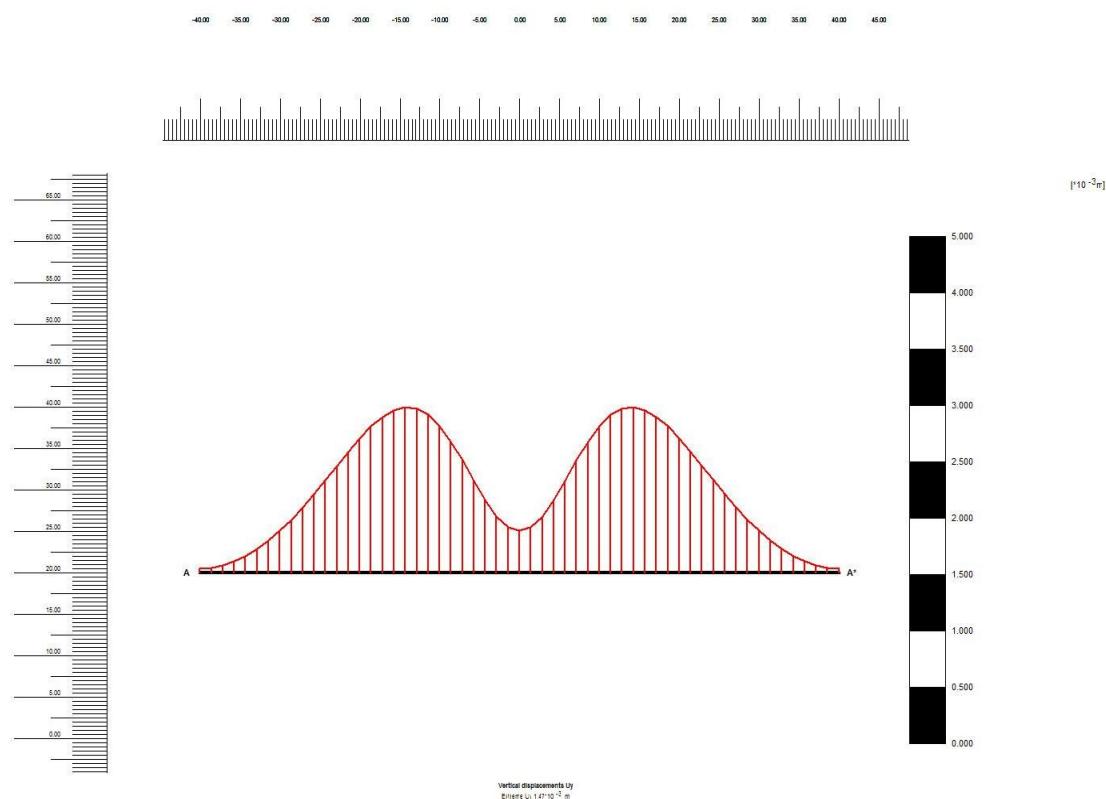


Σχήμα 2.12: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$.

Αξίζει να σημειωθεί πως για αυτούς τους συνδυασμούς παραμέτρων υπάρχουν περιπτώσεις όπου η καμπύλη των καθιζήσεων δεν είναι όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1 γιατί το έδαφος ανυψώνεται και δεν καθιζάνει. Τέτοιες περιπτώσεις παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.3 & 2.4.



Εικόνα 2.3: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για ελαστική συμπεριφορά, $K_0=0.80$ & $V_s/V=0.25\%$



Εικόνα 2.4: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για ελαστική συμπεριφορά, $K_0=0.80$ & $V_s/V=0.50\%$

2.3.1.2 Συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας

Από τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή του τρόπου διάνοιξης της σήραγγας στην ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση. Όταν η διάνοιξη γίνεται με τη μέθοδο NATM και το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά, μεγαλύτερος βαθμός αποτόνωσης δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ που τείνουν να μειωθούν όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (Σχήμα 2.1). Το ίδιο συμβαίνει και όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά – ιδεατώς πλαστικά με το ρυθμό μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ να αυξάνεται όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχομάζας και να είναι σημαντικά μεγαλύτερος για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.4) απ' ό τι σε μεγαλύτερες τιμές του K_0 (0.4-0.8) (Σχήματα 2.2-2.3).

Επιπλέον, διαπιστώνουμε πως για τιμές $\lambda=0.4$ & $\lambda=0.6$ και για τιμές $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται ενώ για το διάστημα $K_0=0.25-0.5$ η χαμηλής ποιότητας βραχομάζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης σε αντίθεση με το έδαφος που συμπεριφέρεται ελαστικά το οποίο και δίνει τις μικρότερες τιμές (Σχήματα 2.4-2.5). Για $\lambda=0.8$ η χαμηλής ποιότητας

βραχομάζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης για όλο το εύρος τιμών του K_0 σε αντίθεση με το έδαφος που συμπεριφέρεται ελαστικά το οποίο και δίνει τις μικρότερες τιμές (Σχήμα 2.6).

Όταν η διάνοιξη γίνεται με τη TBM τα παραπάνω δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα. Πιο συγκεκριμένα όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά, μεγαλύτερο ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ που τείνουν να μειωθούν όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (Σχήμα 2.7). Το ίδιο συμβαίνει και όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά – ιδεατώς πλαστικά με το ρυθμό μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ να αυξάνεται όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχομάζας και να είναι σημαντικά μεγαλύτερος για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.5) απ' ότι σε μεγαλύτερες τιμές του K_0 (0.5-0.8) (Σχήματα 2.8-2.9).

Σχετικά με την επίδραση της τιμής V_s/V , παρατηρούμε πως για $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται ενώ για το διάστημα $K_0=0.25-0.5$ η χαμηλής ποιότητας βραχομάζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης σε αντίθεση με το έδαφος που συμπεριφέρεται ελαστικά το οποίο και δίνει τις μικρότερες τιμές (Σχήματα 2.10-2.12).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω και συγκρίνοντας τους δύο τρόπους διάνοιξης διαπιστώνουμε πως σε γενικές γραμμές επιδρούν και οι δύο με αντίστοιχο τρόπο στην ανηγμένη καθίζηση με τη διαφορά πως στη περίπτωση που εξετάσαμε, όταν η διάνοιξη γίνεται με τη μέθοδο NATM οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης είναι σημαντικά μεγαλύτερες.

2.3.2 Παράμετρος: Μέτρο ελαστικότητας

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας με τα σχετικά διαγράμματα καθώς και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα των αναλύσεων.

2.3.2.1 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους

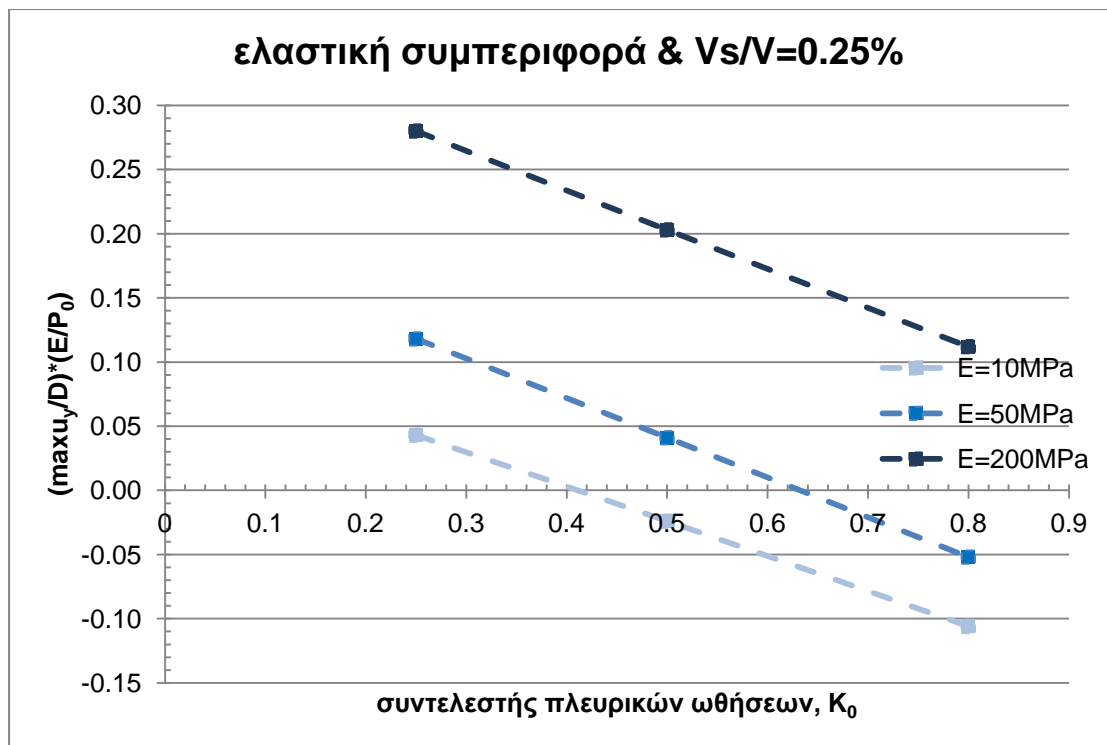
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους στην ανηγμένη καθίζηση τόσο για γραμμικώς ελαστική όσο και για γραμμικώς ελαστική - ιδεατώς πλαστική συμπεριφορά εδάφους, με ύψος υπερκείμενων $H=20m$. Για την πλαστική συμπεριφορά εδάφους, όπως και πριν, η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ ενώ η τιμή της συνοχής c προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$

όταν ο λόγος $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ λαμβάνει τιμές 0.50 και 0.25 (Πίνακας 2.2). Στην ενότητα αυτή ο τρόπος διάνοιξης της σήραγγας είναι με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής αποκλειστικά.

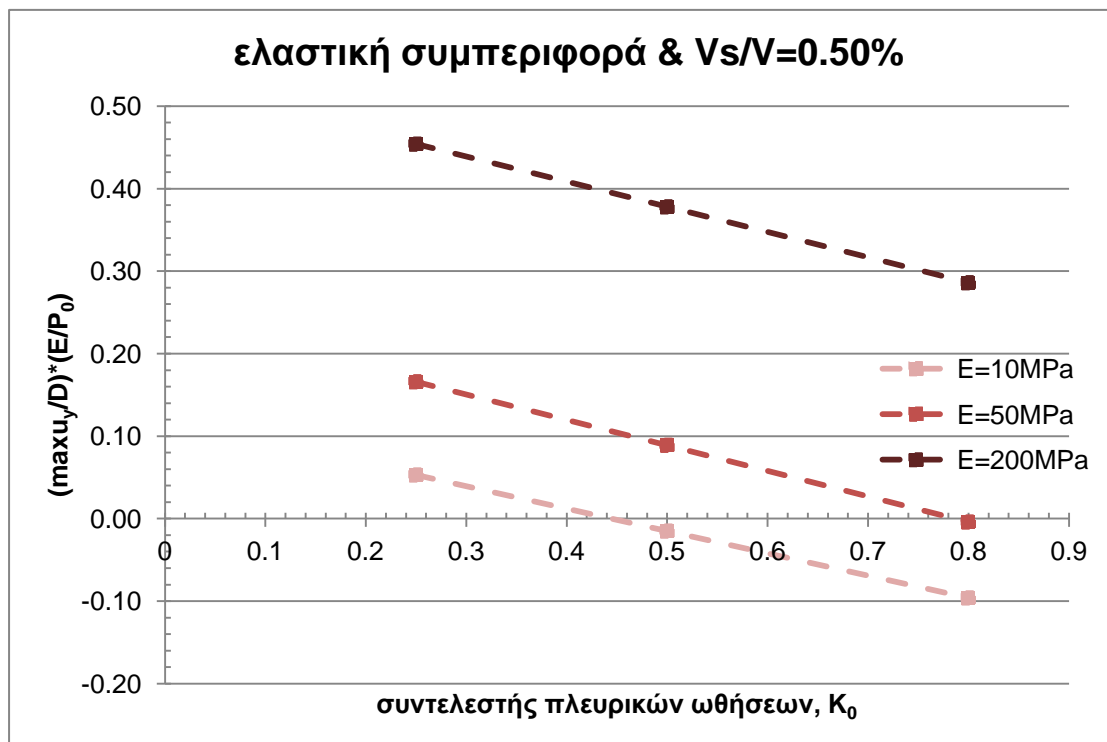
Πίνακας 2.2: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας

Εδαφικές παράμετροι		
συμπεριφορά	τύπος	-Γραμμικώς ελαστική -Mohr-Coulomb
	συνθήκες	στραγγισμένες
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	10 & 50 & 200
λόγος Poisson	ν =	0.2
γωνία τριβής	φ (°) =	35
συνοχή	c (kPa) =	31.2 & 62.5
Παράμετροι επένδυσης		
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.2
βάρος	w (kN/m/m) =	5
λόγος Poisson	ν =	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.2
δυστένεια	EA (kN/m) =	5.80E+06
δυσκαμψία	EI (kNm ² /m) =	1.9343E+04

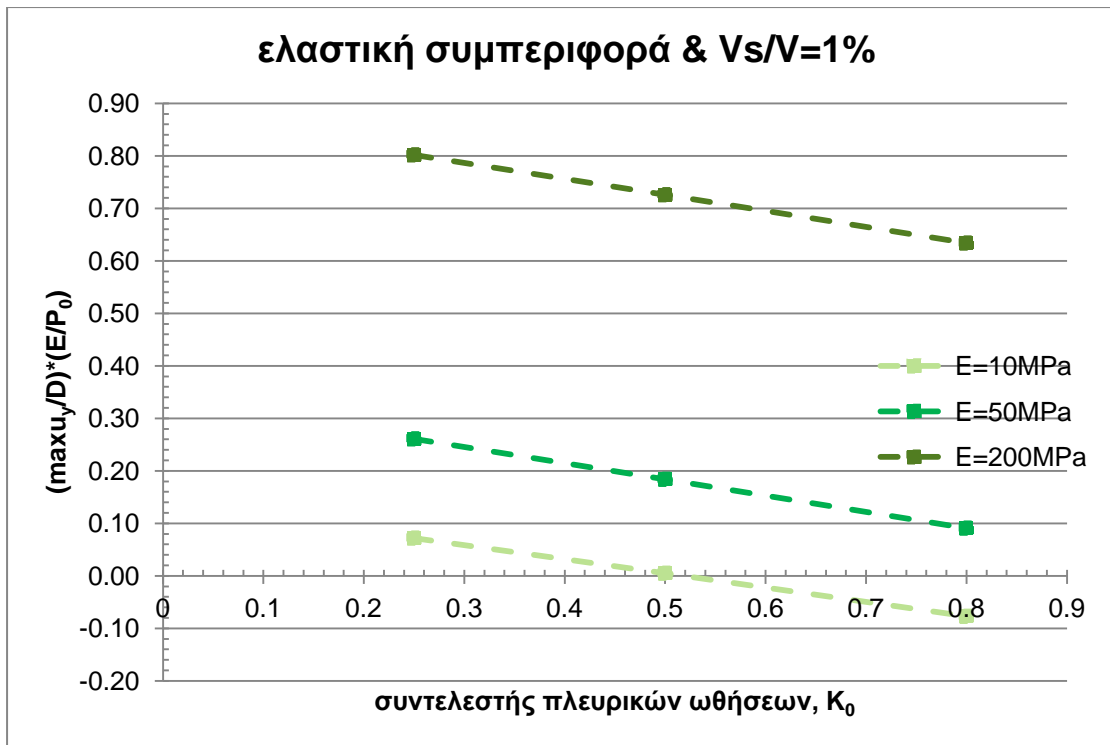
Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.13-2.15 εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας E (10 MPa - 20 MPa - 200 MPa) για τιμές του K_0 από 0.25-0.80 για την περίπτωση όπου το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά και ο συντελεστής ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V έχει τρεις διαφορετικές τιμές. Στα Σχήματα 2.16-2.18 και 2.19-2.21 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αναλύσεις για έδαφος που συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά-ιδεατώς πλαστικά με $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.50$ και $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$ αντίστοιχα. Τέλος, για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση, στα Σχήματα 2.22-2.24 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα στοιχεία των σχημάτων 2.13-2.21 με βάση τη συμπεριφορά του εδάφους ενώ στα Σχήματα 2.25-2.27 παρουσιάζονται με βάση το λόγο V_s/V .



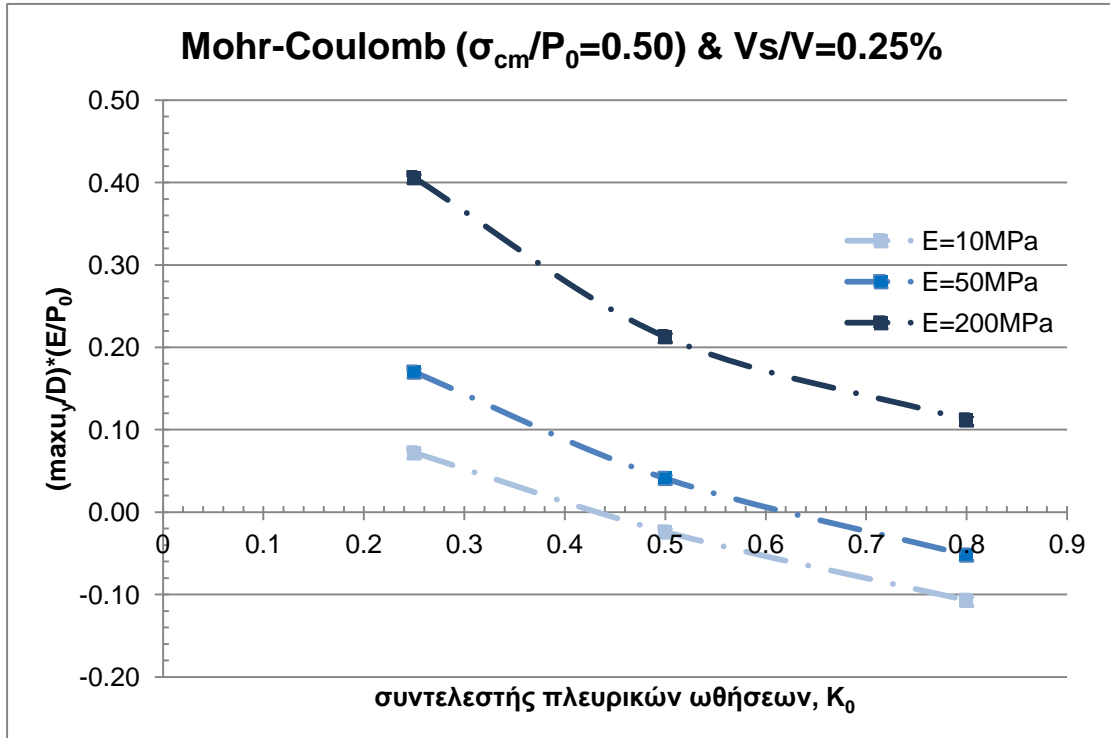
Σχήμα 2.13: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



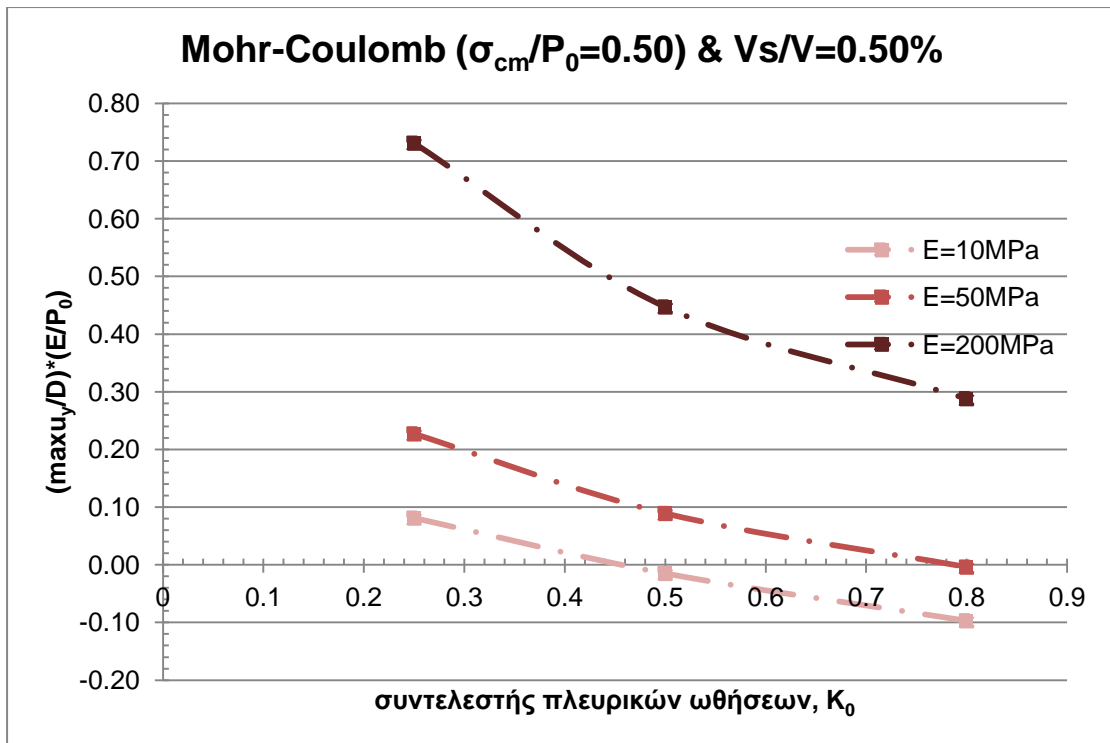
Σχήμα 2.14: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



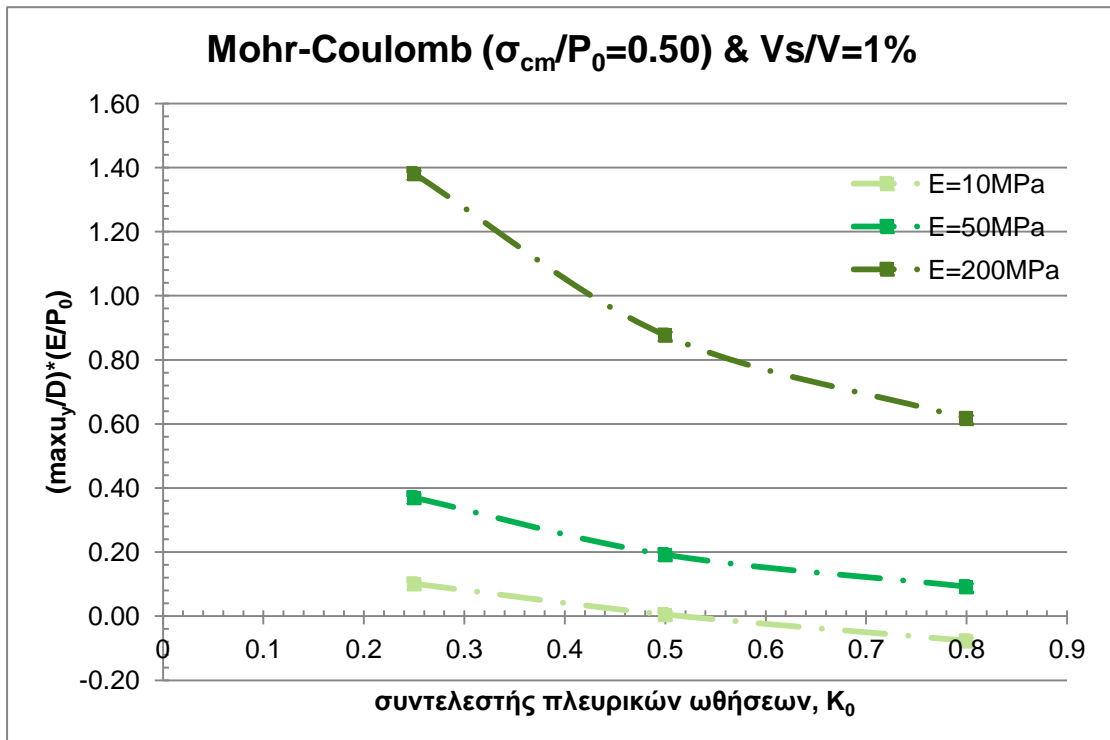
Σχήμα 2.15: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



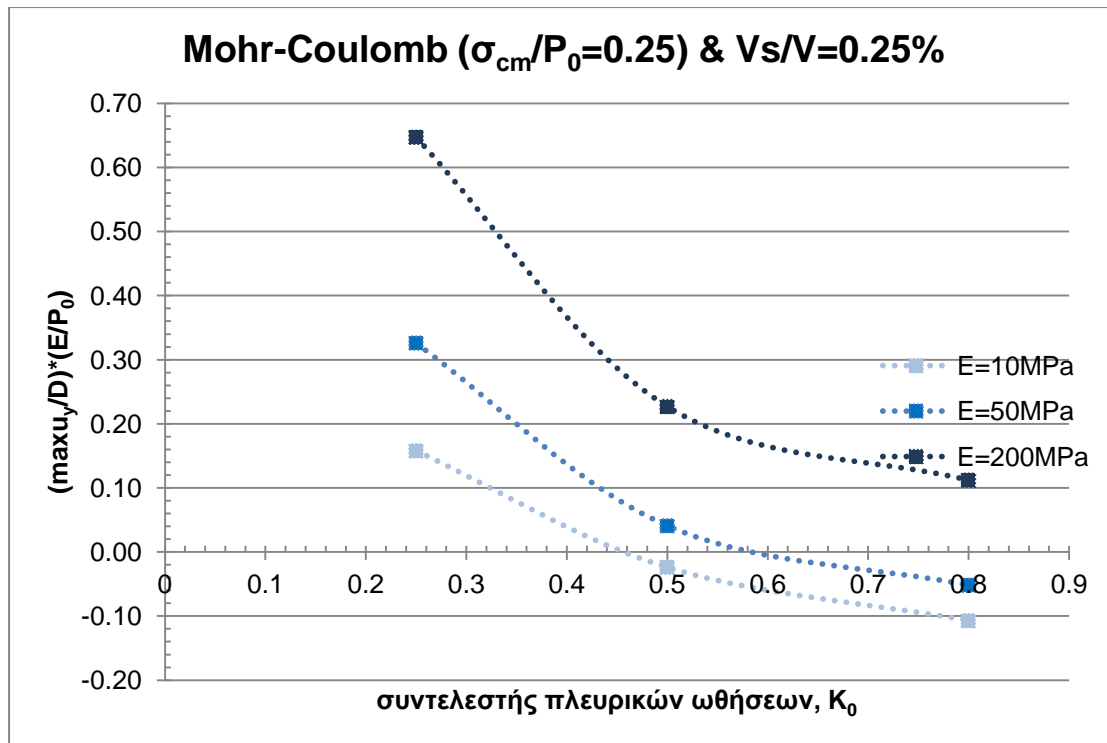
Σχήμα 2.16: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



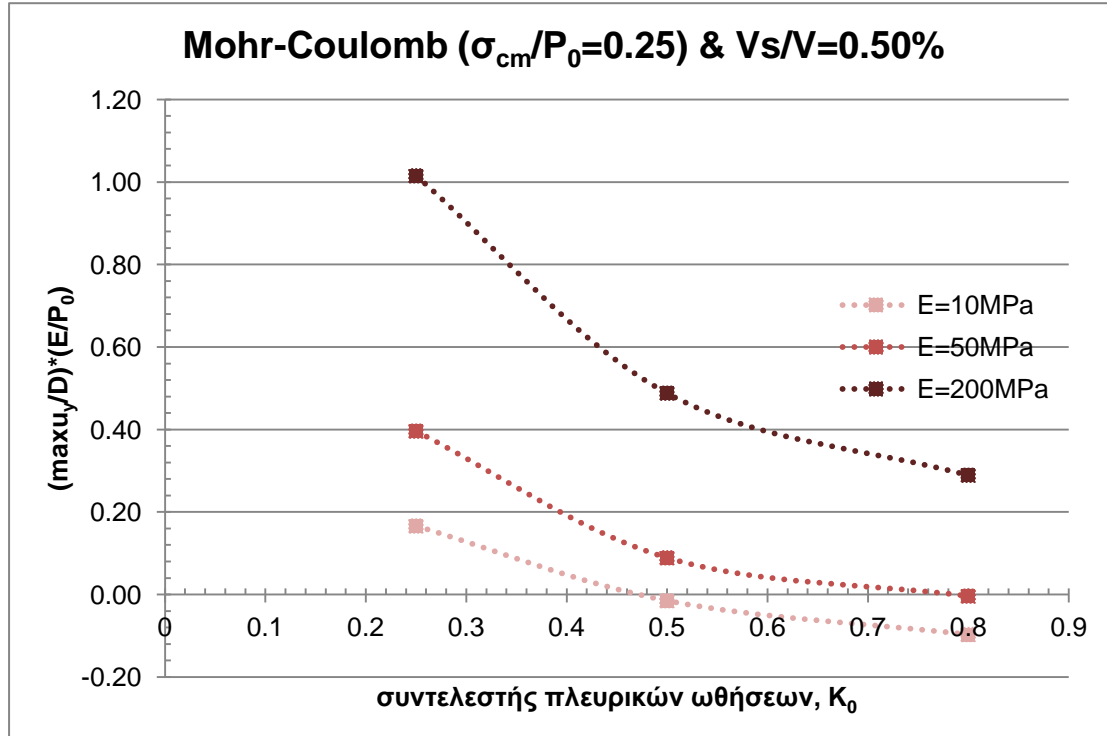
Σχήμα 2.17: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



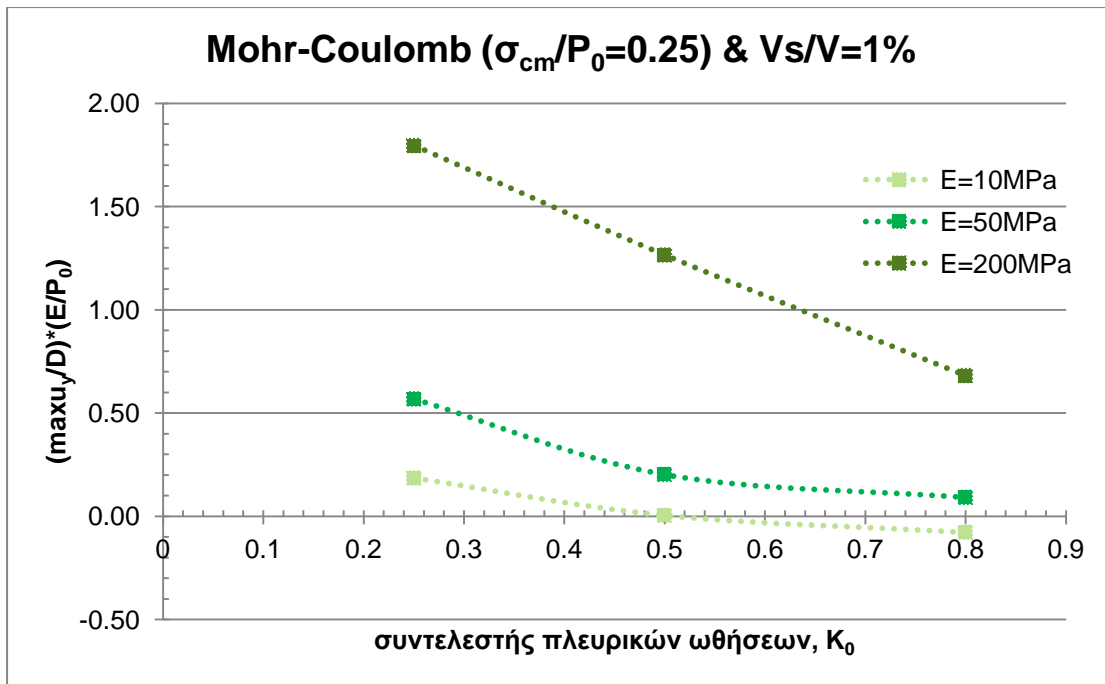
Σχήμα 2.18: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.19: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.

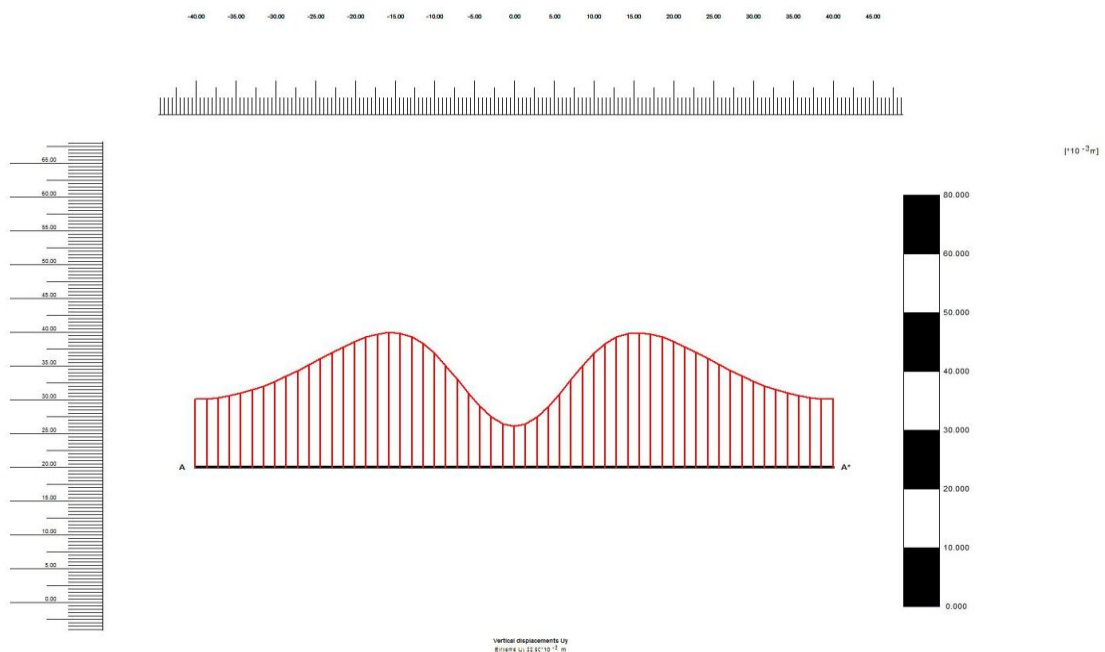


Σχήμα 2.20: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.

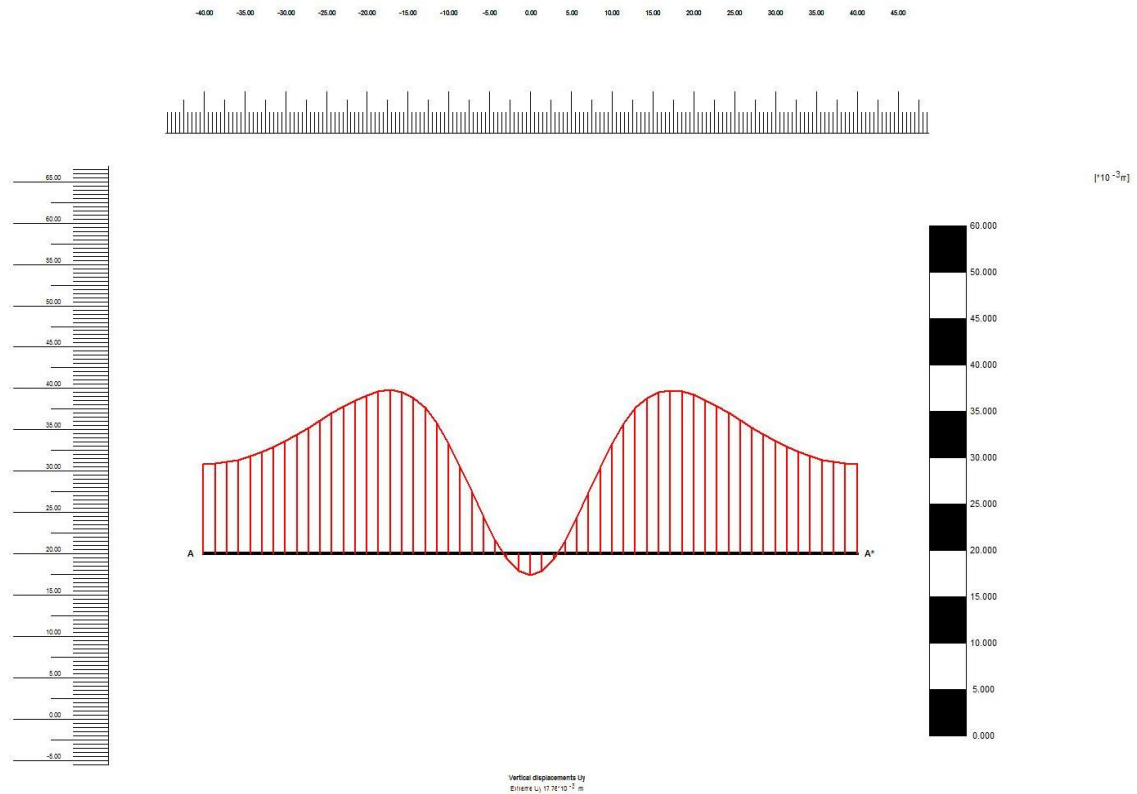


Σχήμα 2.21: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.

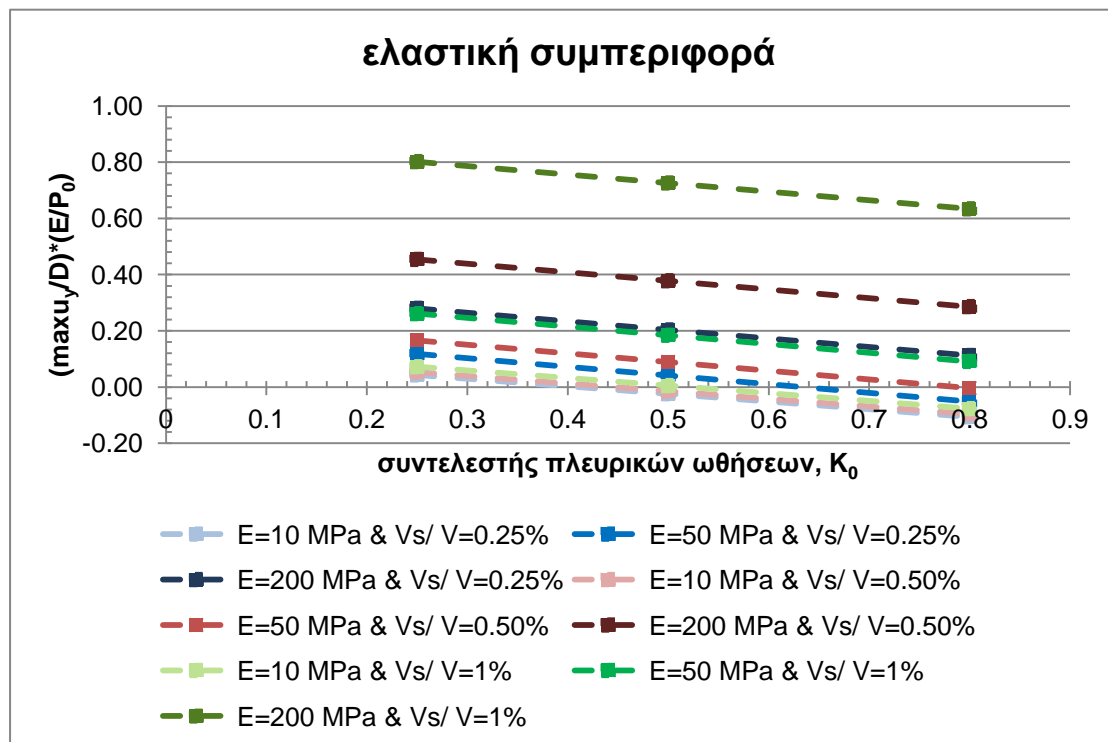
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες υπάρχουν κάποιο συνδυασμοί παραμέτρων που οδηγούν το έδαφος σε ανύψωση και όχι σε καθίζηση κατά τη διάνοιξη (Εικόνα 2.5) ή να έχει καμπύλη καθίζησης όπως στην Εικόνα 2.6.



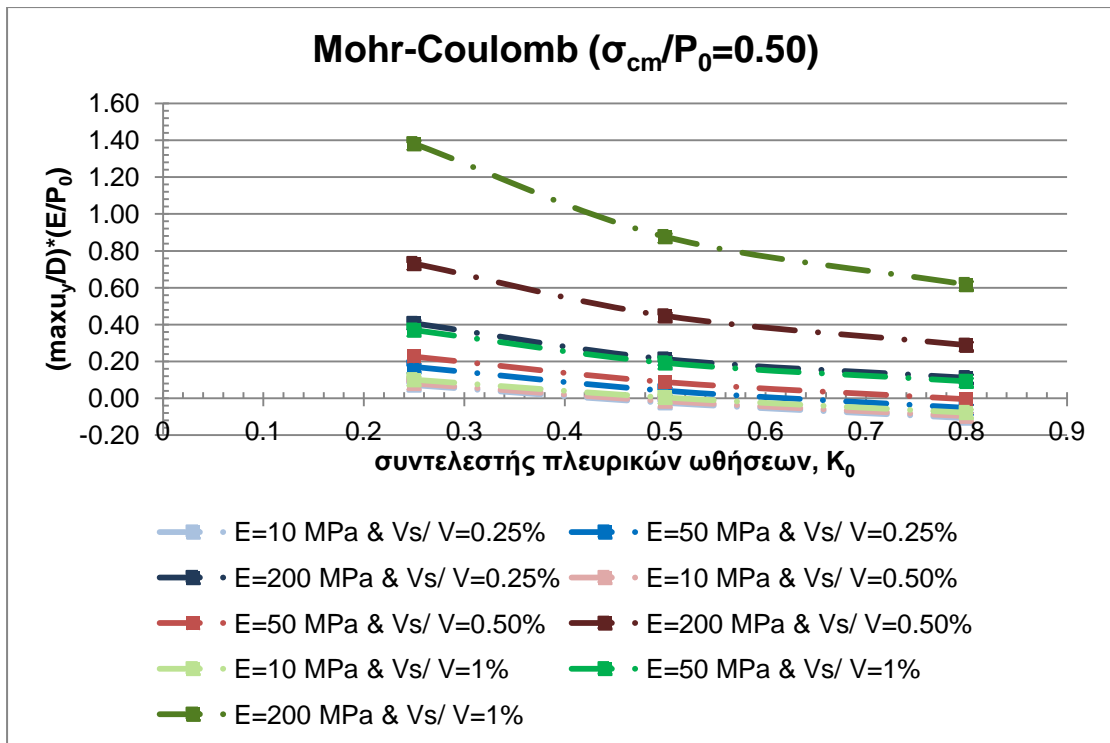
Εικόνα 2.5: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.50$ & $V_s/V=0.50\%$



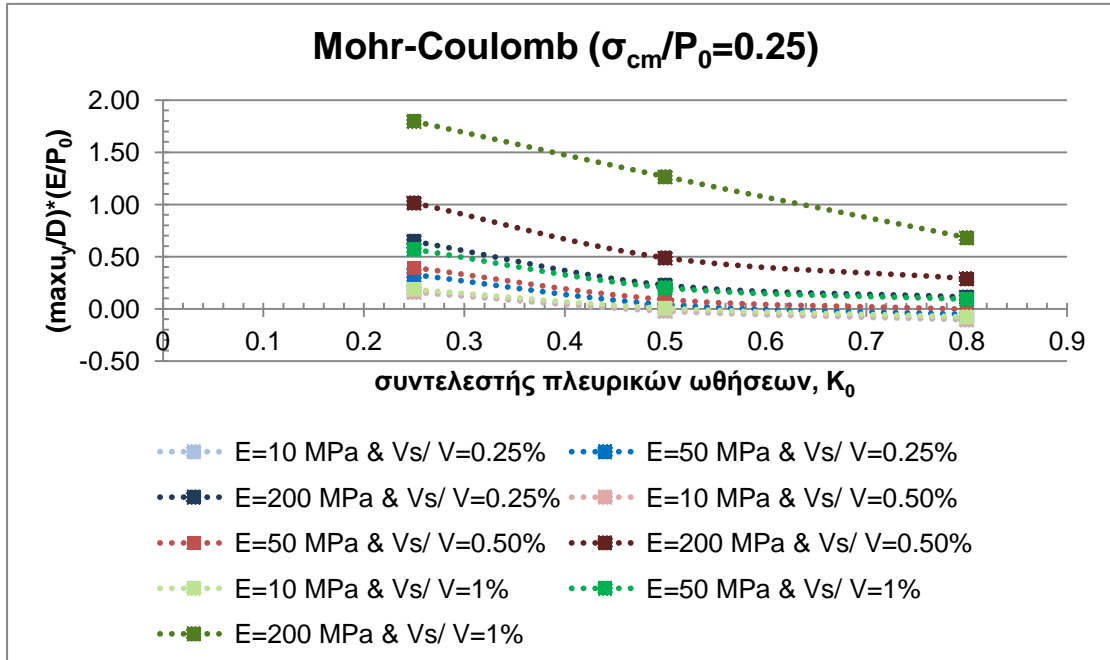
Εικόνα 2.6: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $K_0=0.50$ & $V_s/V=0.50\%$



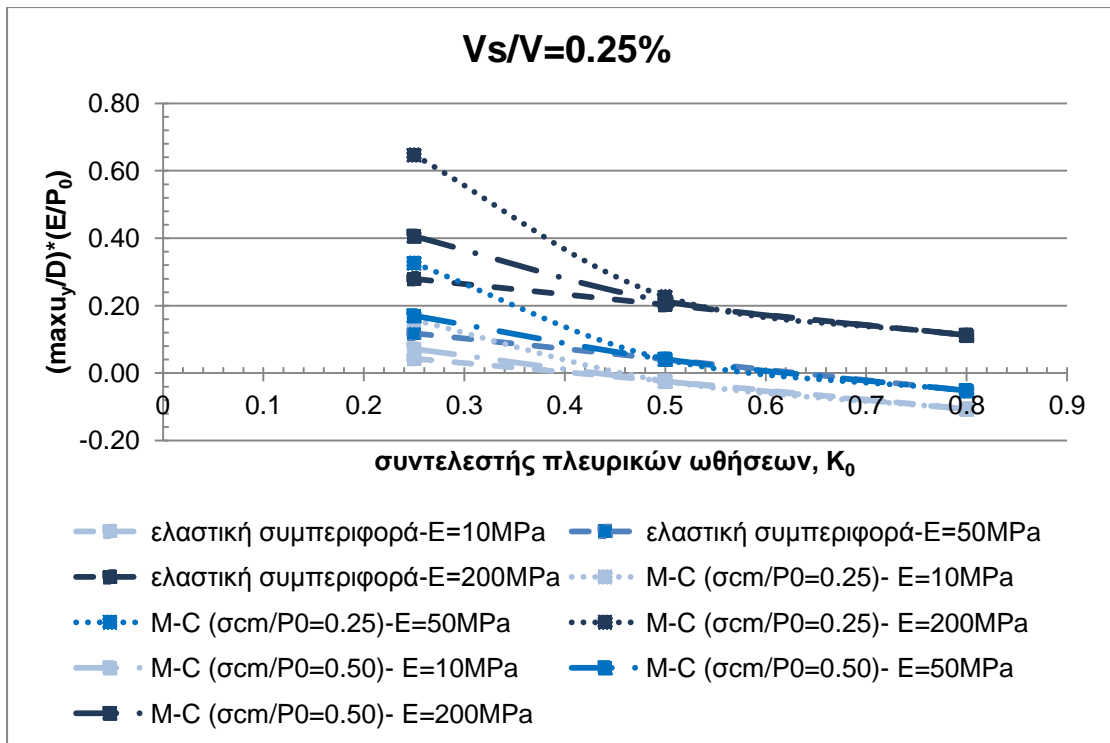
Σχήμα 2.22: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_s/V .



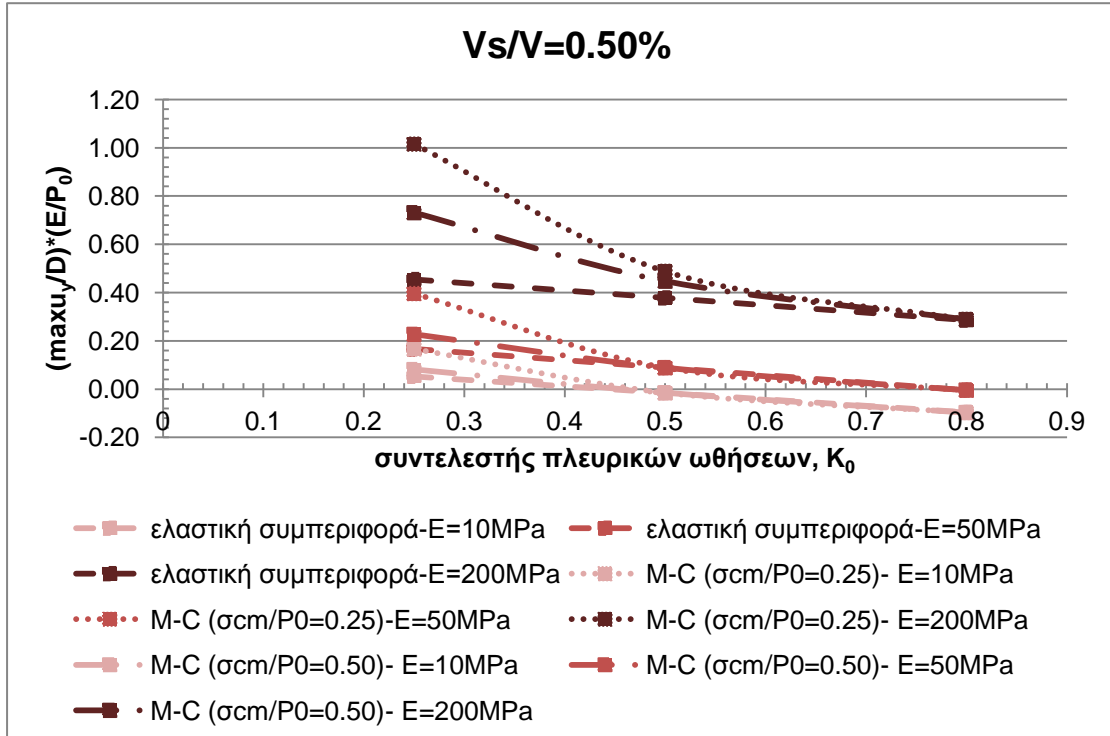
Σχήμα 2.23: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_s/V .



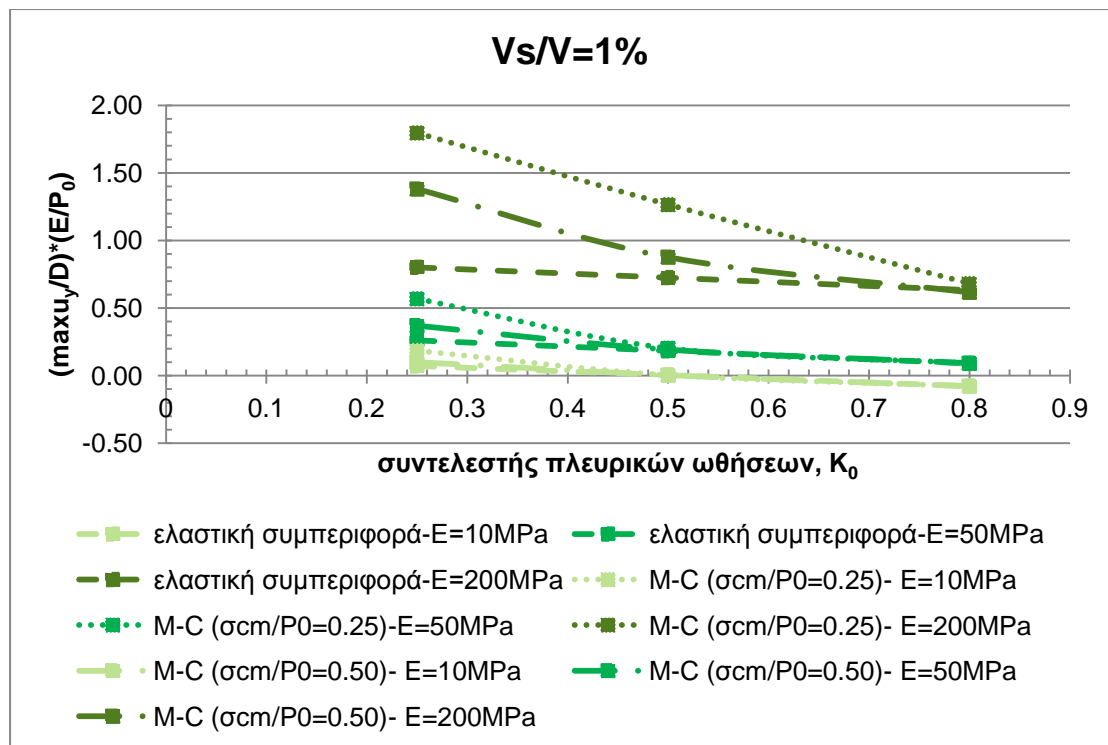
Σχήμα 2.24: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και V_s/V .



Σχήμα 2.25: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.26: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.27: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.

2.3.2.2 Συμπεράσματα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας

Τα παραπάνω διαγράμματα βοηθούν στην εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στην ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση τα οποία και αναφέρονται στη συνέχεια.

Για την περίπτωση όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά όσο αυξάνεται η τιμή του μέτρου ελαστικότητας αυξάνεται η τιμή $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ η οποία τείνει να μειωθεί όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (Σχήμα 2.13). Επίσης, η ανηγμένη καθίζηση $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερες τιμές του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου (Σχήματα 2.14-2.15). Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και για τις περιπτώσεις όπου το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά-ιδεατώς πλαστικά (Σχήματα 2.16-2.21). Ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ αυξάνεται όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας και είναι μεγαλύτερος για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.5) απ' ότι σε μεγαλύτερες τιμές του K_0 (0.5-0.8).

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2.22-2.24 και για τις τρεις περιπτώσεις συμπεριφοράς του εδάφους όταν αυτό έχει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας ($E=200$ MPa) και το ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου είναι $V_s/V = 1\%$, οι τιμές της

ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης είναι σημαντικά μεγαλύτερες απ' ότι στους άλλους συνδυασμούς.

Όπως και στη προηγούμενη ενότητα διαπιστώνεται πως για $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ και συγκεκριμένη τιμή του E , οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται (εξαιρέση αποτελεί ο συνδυασμός $E=200$ MPa & $V_s/V=1\%$) ενώ για το διάστημα $K_0=0.25-0.5$ η χαμηλής ποιότητας βραχομάζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης (Σχήματα 2.25-2.27).

2.3.3 Παράμετρος: Πάχος επένδυσης σκυροδέματος

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του πάχους επένδυσης σκυροδέματος με τα σχετικά διαγράμματα καθώς και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα των αναλύσεων.

2.3.3.1 Επιρροή του πάχους της επένδυσης σκυροδέματος

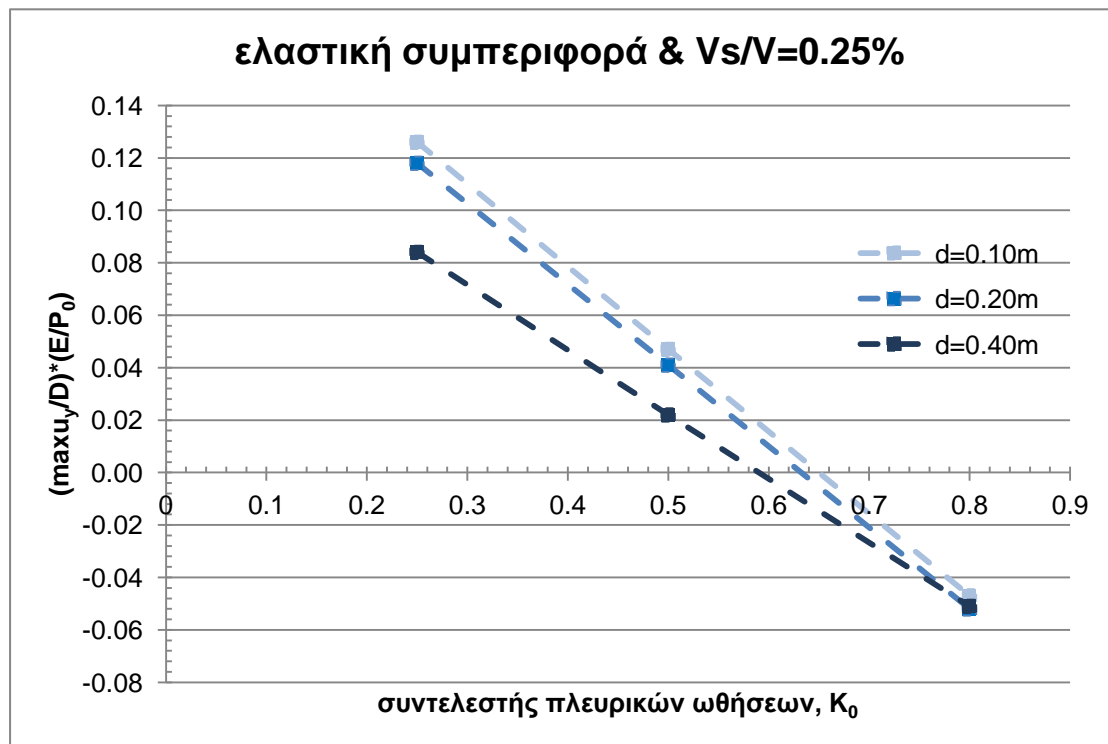
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση του πάχους τους σκυροδέματος στην ανηγμένη καθίζηση τόσο για γραμμικώς ελαστική όσο και για γραμμικώς ελαστική - ιδεατώς πλαστική συμπεριφορά εδάφους, με ύψος υπερκείμενων $H=20$ m. Για την πλαστική συμπεριφορά εδάφους όπως και πριν, η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ ενώ η τιμή της συνοχής c προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$ όταν ο λόγος $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ ισούται με 0.25 και 0.50, (Πίνακας 2.3). Στην ενότητα αυτή, όπως και στην προηγούμενη, ο τρόπος διάνοιξης της σήραγγας είναι με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής αποκλειστικά.

Πίνακας 2.3: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του πάχους επένδυσης σκυροδέματος

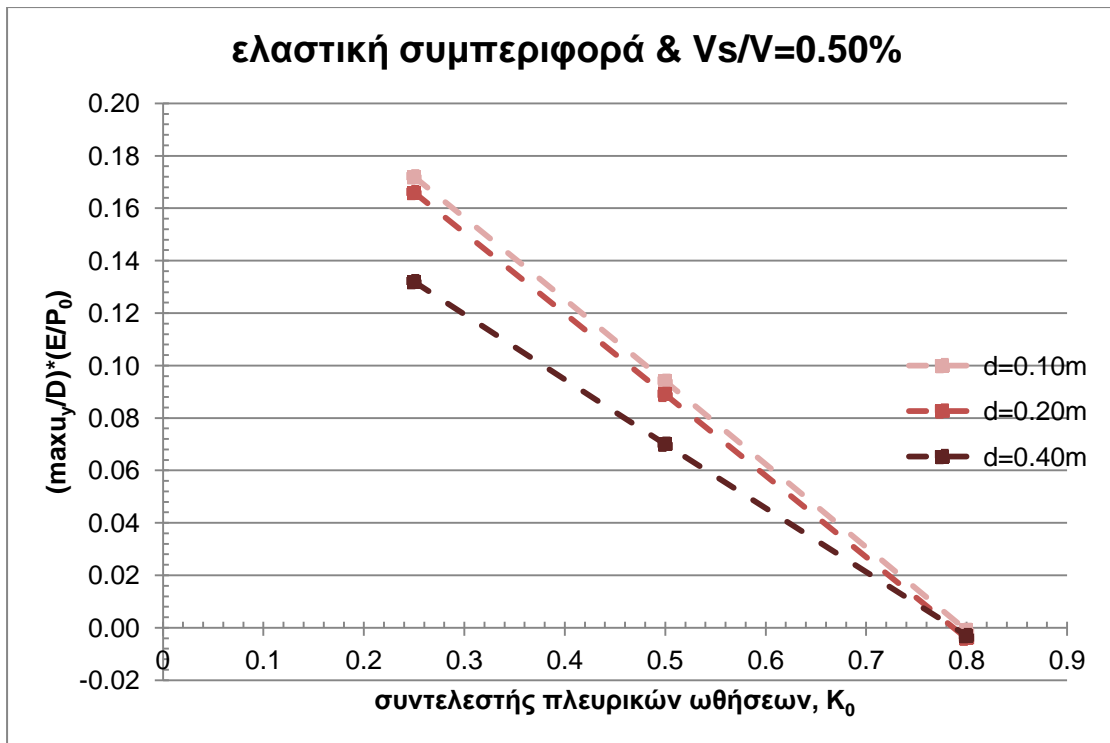
Εδαφικές παράμετροι				
συμπεριφορά	τύπος	-Γραμμικώς ελαστική -Mohr-Coulomb		
	συνθήκες	στραγγισμένες		
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24		
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	50		
λόγος Poisson	ν =	0.2		
γωνία τριβής	φ (°) =	35		
συνοχή	c (kPa) =	31.2 & 62.5		
Παράμετροι επένδυσης				
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική	ελαστική	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25	25	25
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.1	0.2	0.4
βάρος	w (kN/m/m) =	2.5	5	10

λόγος Poisson	$\nu =$	0.15	0.15	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29	29	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000083	0.000667	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.1	0.2	0.4
δυστένεια	EA (kN/m) =	2.90E+06	5.80E+06	1.16E+07
δυσκαμψία	EI (kNm ² /m) =	2.4070E+03	1.9343E+04	1.5466E+05

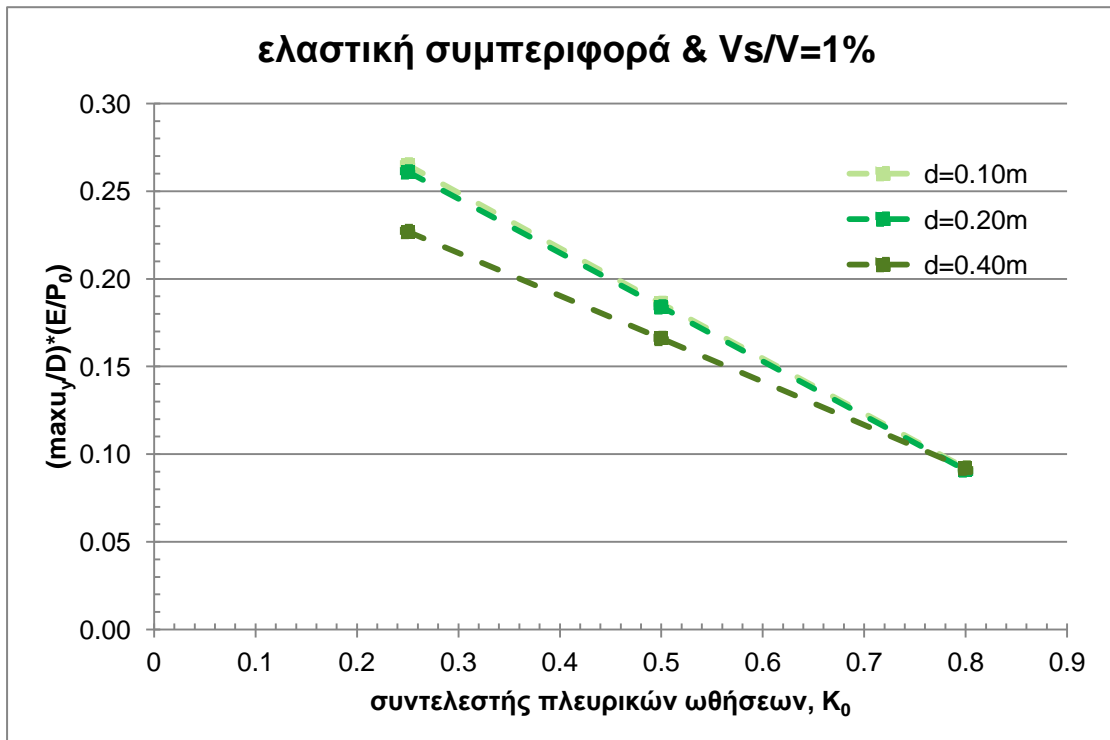
Αντίστοιχα με την προηγούμενη ενότητα, στα Σχήματα 2.28-2.30 εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του πάχους σκυροδέματος d (0.10m-0.20m-0.40m) για τιμές του K_0 από 0.25-0.80 για την περίπτωση όπου το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά και ο συντελεστής ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V έχει τρεις διαφορετικές τιμές. Στα Σχήματα 2.31-2.33 και 2.34-2.36 παρουσιάζονται οι αναλύσεις για έδαφος που συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά-ιδεατώς πλαστικά με $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.50$ και $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$ αντίστοιχα ενώ για ευκολία στη σύγκριση, στα Σχήματα 2.37-2.39 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα στοιχεία των Σχημάτων 2.28-2.36 με βάση τη συμπεριφορά του εδάφους ενώ στα Σχήματα 2.40-2.42 παρουσιάζονται με βάση το λόγο V_s/V .



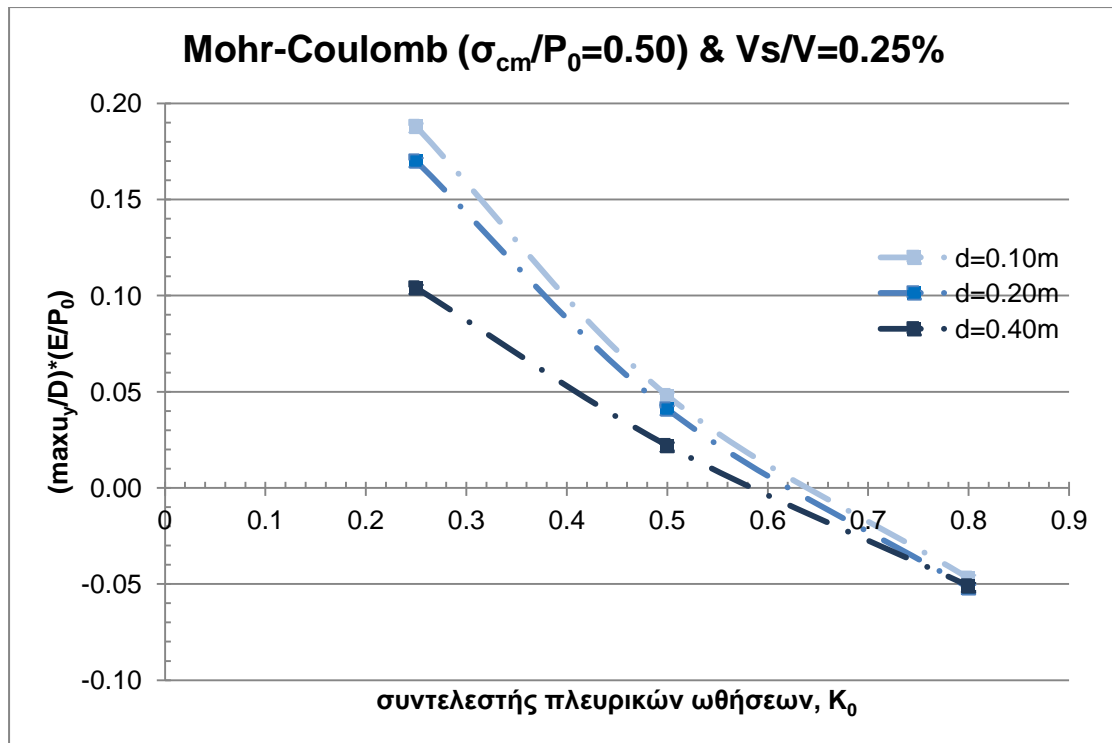
Σχήμα 2.28: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



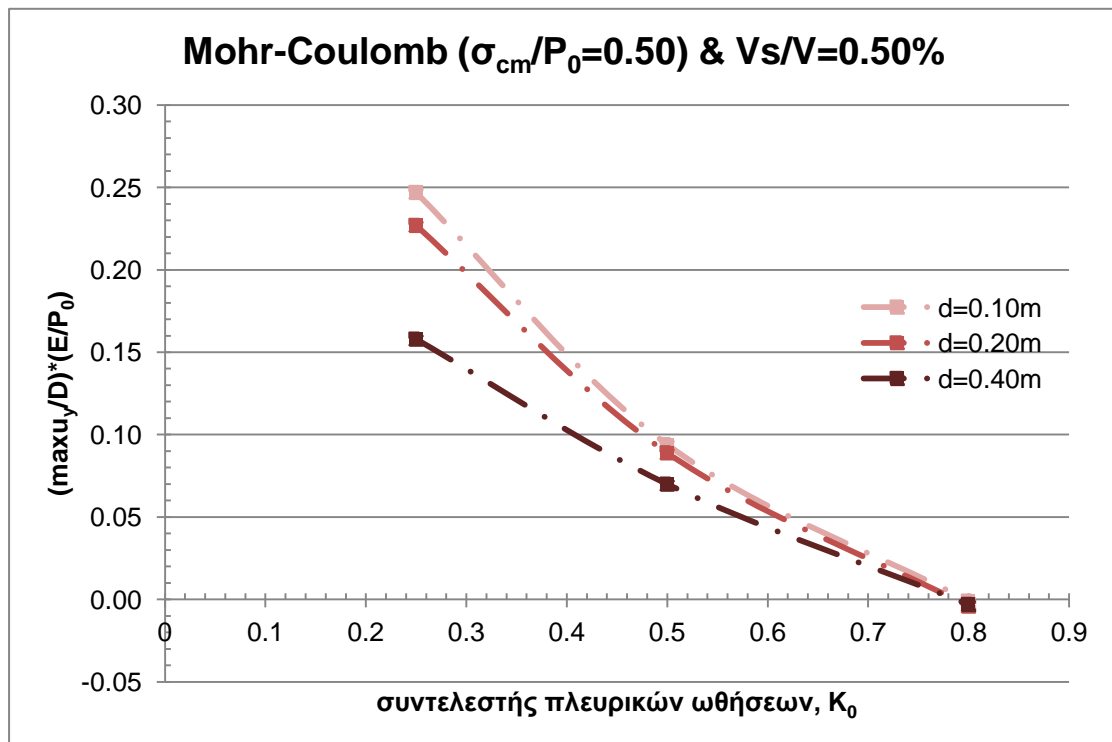
Σχήμα 2.29: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



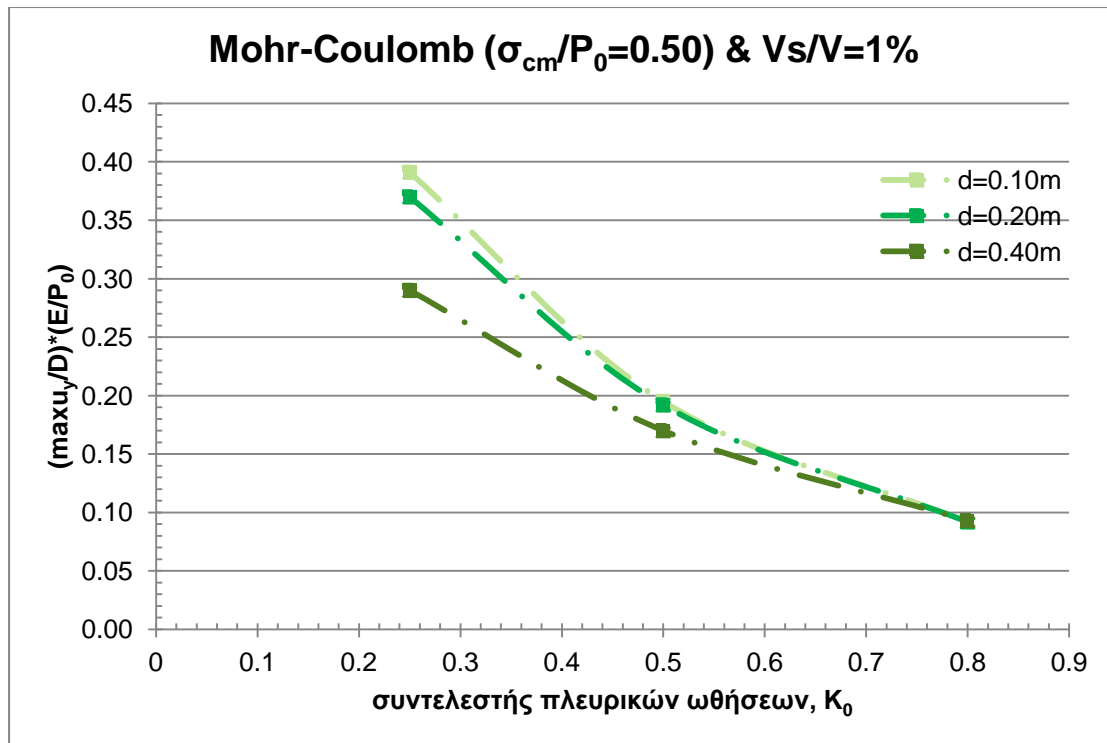
Σχήμα 2.30: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



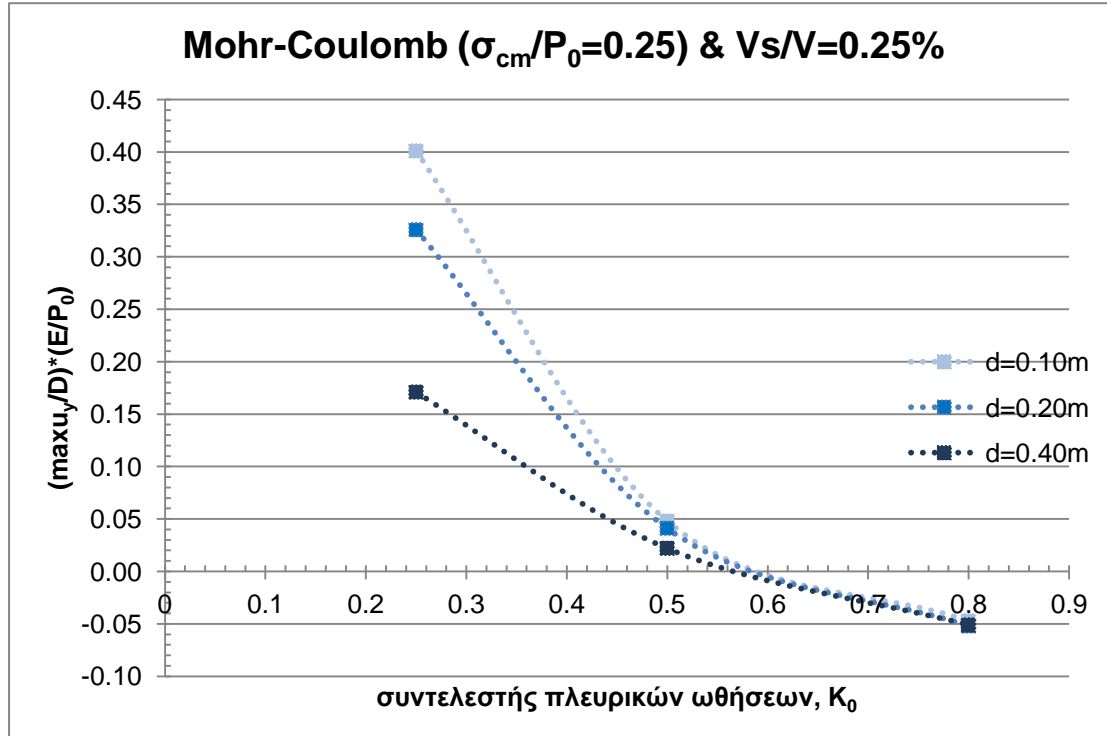
Σχήμα 2.31: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



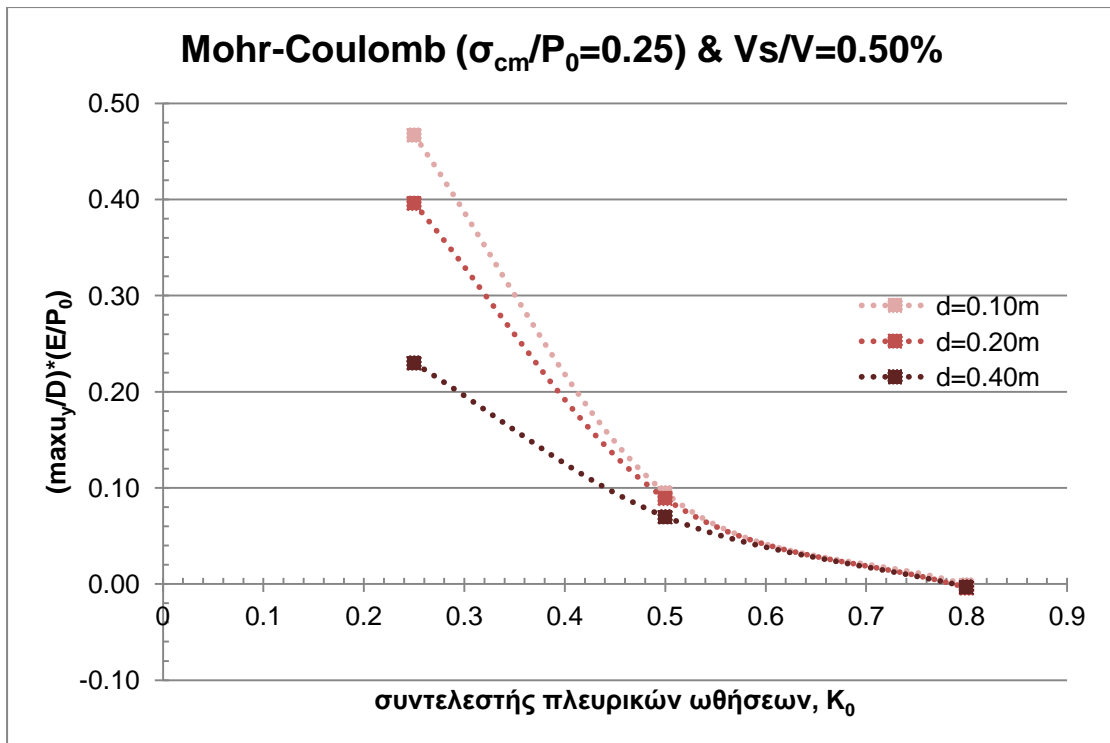
Σχήμα 2.32: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



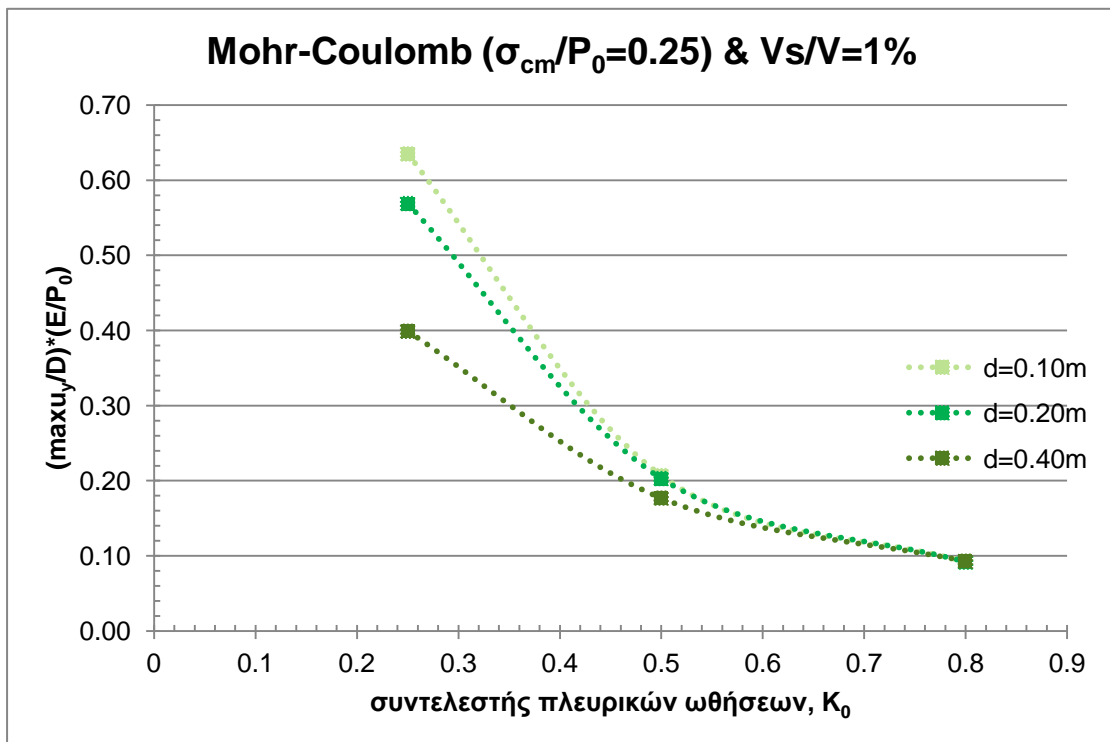
Σχήμα 2.33: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.34: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.

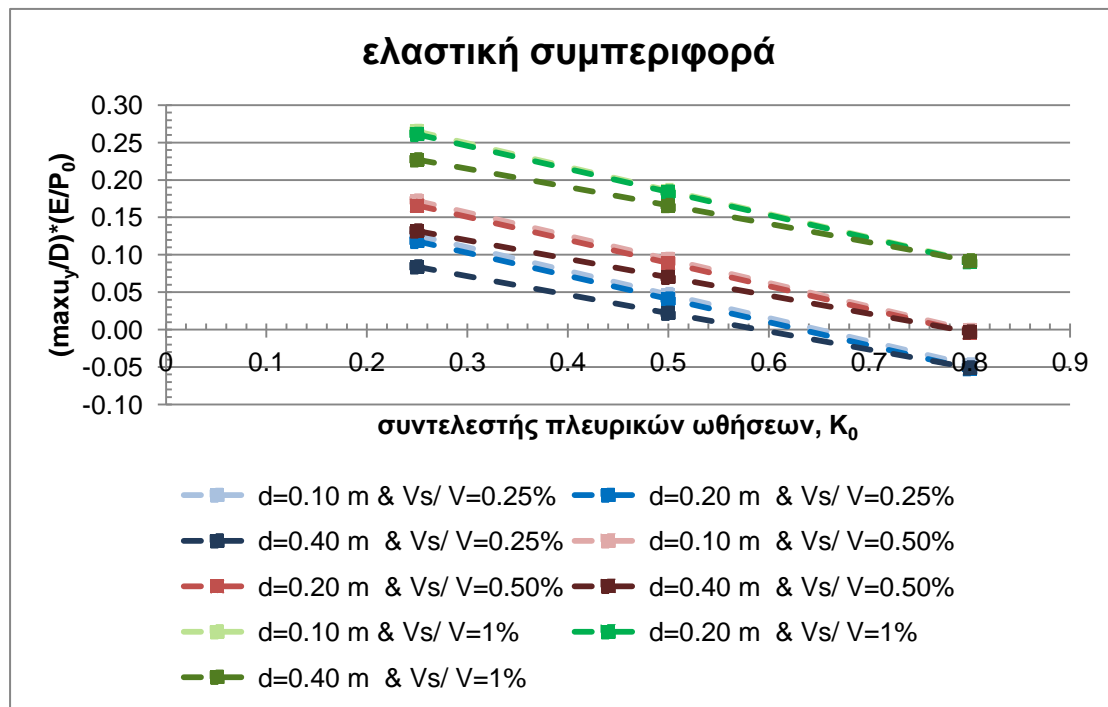


Σχήμα 2.35: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.

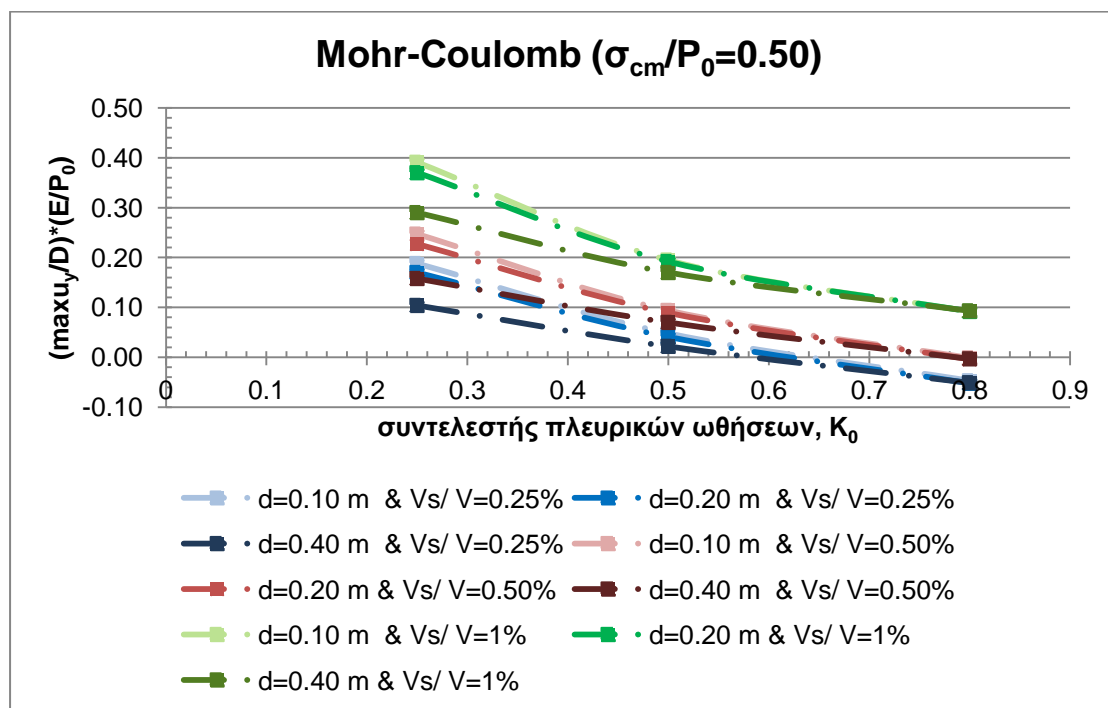


Σχήμα 2.36: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.

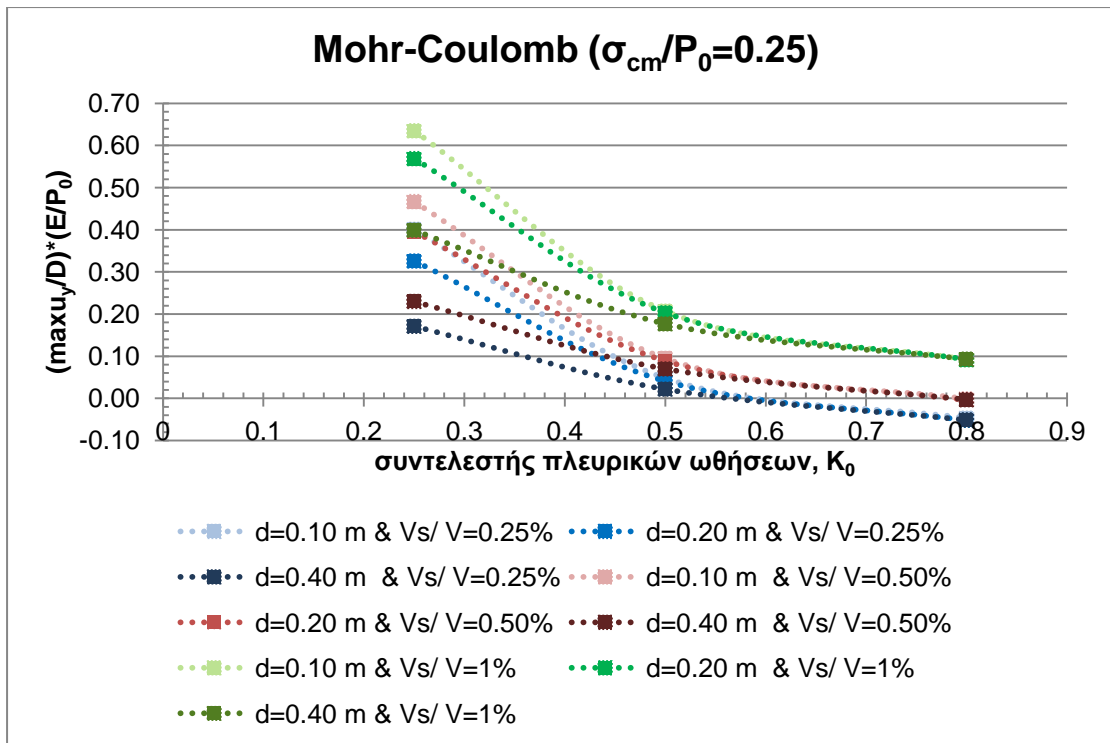
Σημειώνουμε και σε αυτή τη περίπτωση πως όλες τιμές της ανηγμένης καθίζησης είναι αρνητικές αφορούν περιπτώσεις όπου το έδαφος ανυψώνεται και δε καθιζάνει και αυτό είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί.



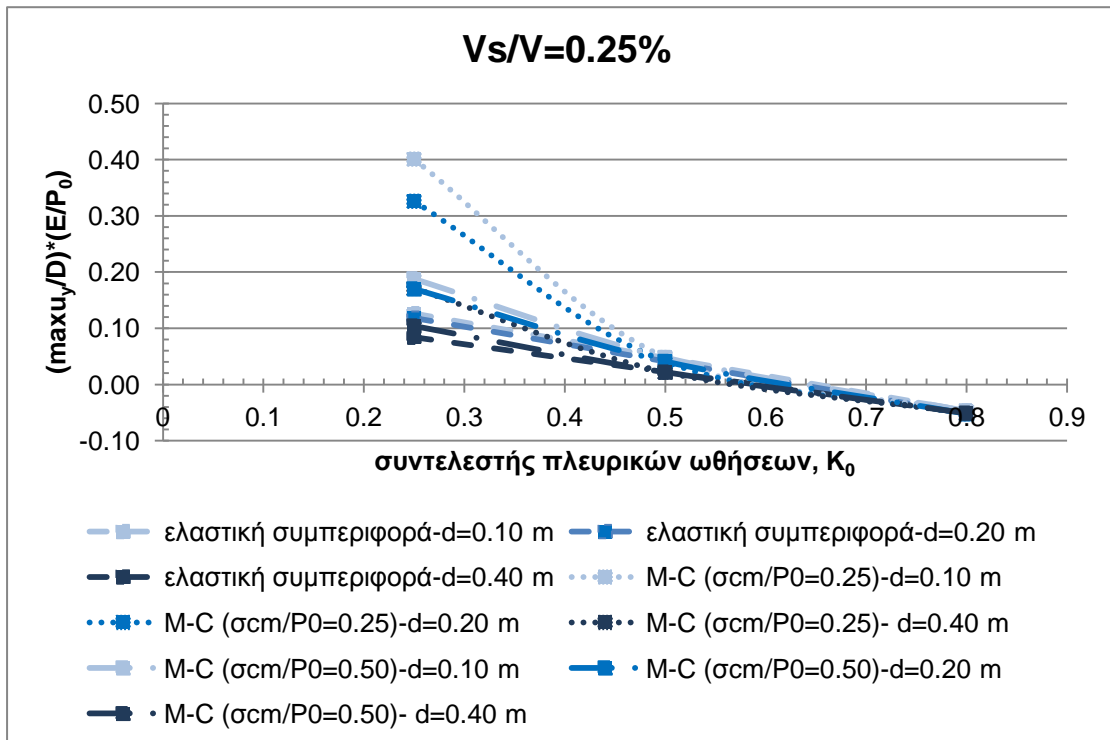
Σχήμα 2.37: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V .



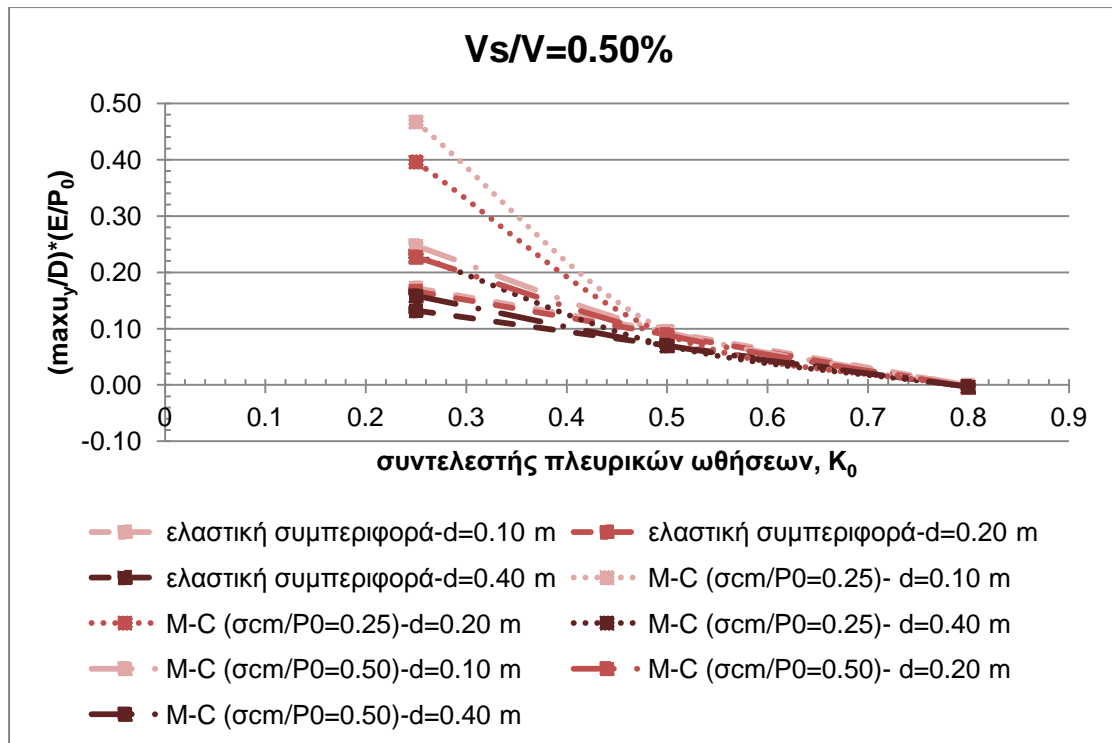
Σχήμα 2.38: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V .



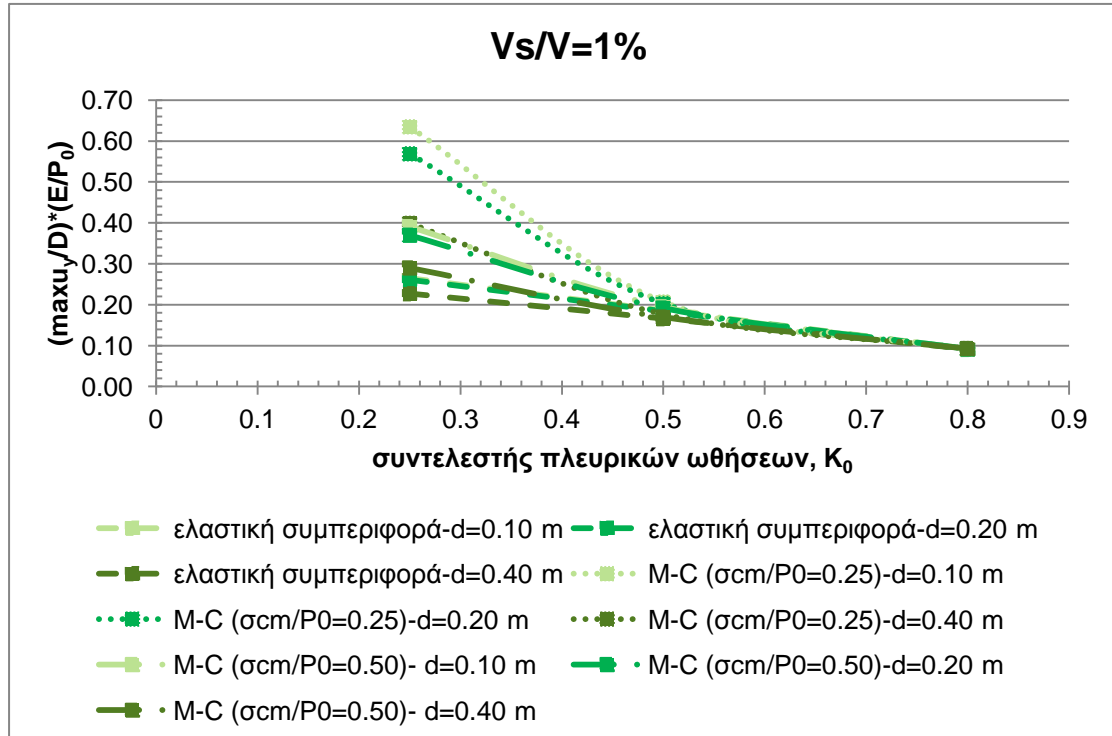
Σχήμα 2.39: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής για διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V .



Σχήμα 2.40: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



Σχήμα 2.41: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.



Σχήμα 2.42: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετική συμπεριφορά εδάφους και διαφορετικό πάχος επένδυσης σκυροδέματος.

2.3.3.2 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος της επένδυσης σκυροδέματος

Με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την ενότητα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του πάχους της επένδυσης σκυροδέματος στην ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση.

Όταν το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά, αύξηση του πάχους της επένδυσης προκαλεί μείωση της τιμής $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ η οποία και έχει φθίνουσα πορεία όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (Σχήμα 2.28). Επιπλέον, αύξηση του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου προκαλεί αύξηση των τιμών της ανηγμένης καθίζησης $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ (Σχήματα 2.29-2.30). Παρατηρούμε επίσης πως για $d=0.10\text{m}$ και $d=0.20\text{m}$ οι διαφοροποιήσεις στην τιμή της ανηγμένης καθίζησης είναι πολύ μικρές σε αντίθεση με τη περίπτωση $d=0.40\text{m}$ όπου και παρατηρείται σημαντική μείωση των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις όταν $K_0=0.8$ οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται.

Όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά-ιδεατώς πλαστικά η μεταβολή των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ είναι ανάλογη με αυτή που μόλις προαναφέρθηκε (Σχήματα 2.31-2.36). Ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ αυξάνεται όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας και είναι μεγαλύτερος για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.5) απ' ότι σε μεγαλύτερες τιμές του K_0 (0.5-0.8).

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2.37-2.39 και για τις τρεις περιπτώσεις συμπεριφοράς του εδάφους όταν τοποθετείται σκυρόδεμα με $d=0.10\text{m}$ και το ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου είναι $V_S/V = 1\%$ οι τιμές της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης είναι σημαντικά μεγαλύτερες απ' ότι στους άλλους συνδυασμούς.

Τέλος, για $V_S/V=0.25\%-1\%$, $K_0=0.5-0.8$ και συγκεκριμένη τιμή του d , οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται ενώ για το διάστημα $K_0=0.25-0.5$ η χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης (Σχήματα 2.40-2.42).

2.3.4 Παράμετρος: Πάχος υπερκειμένων

2.3.4.1 Επιρροή του πάχους των υπερκειμένων

Το πάχος των υπερκειμένων είναι μία ακόμα παράμετρος που επηρεάζει τις επιφανειακές καθιζήσεις και γι' αυτό εξετάζεται ως παράμετρος σε αυτή την ενότητα. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση του πάχους των υπερκειμένων εδαφών στην

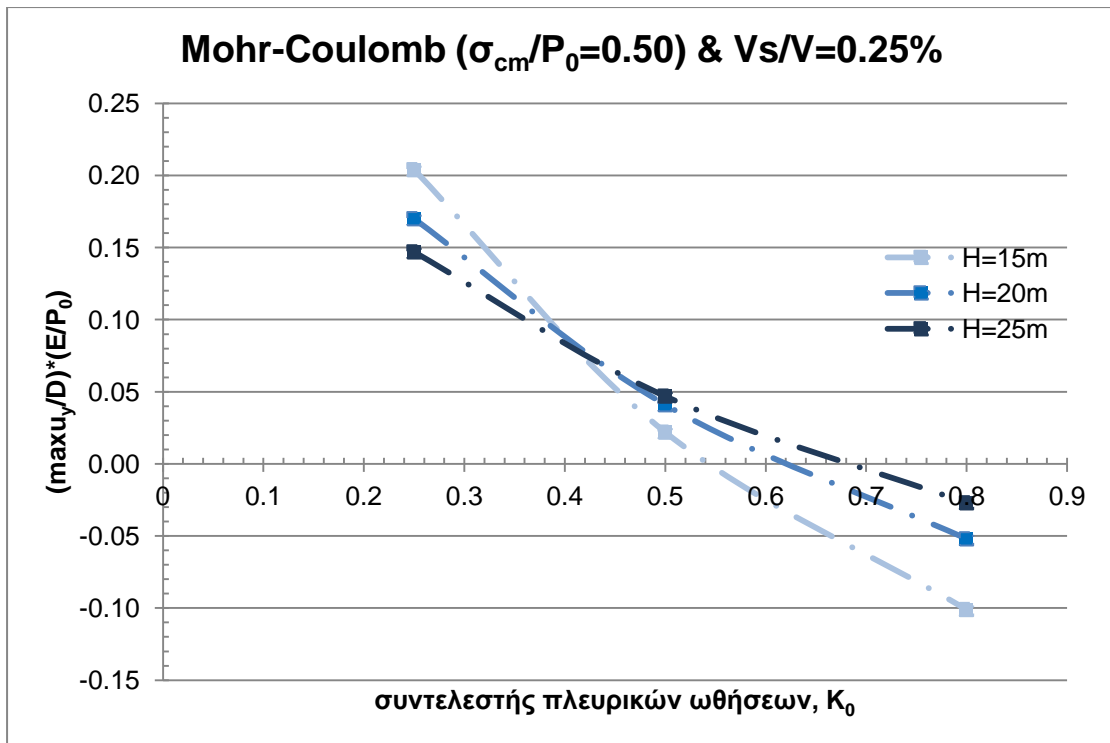
ανηγμένη καθίζηση όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά - ιδεατώς πλαστικά. Όπως και στις προηγούμενες ενότητες, η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ ενώ η τιμή της συνοχής c προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$ όταν ο λόγος $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ ισούται με 0.25 και 0.50 (Πίνακας 2.4). Επιλέγονται τρεις διαφορετικές τιμές για το πάχος των υπερκειμένων εδαφών σε τέτοια όρια ώστε να έχει φυσική σημασία η έννοια "αβαθής σήραγγα", δηλαδή $H=15\text{m}$, 20m και 25m .

Πίνακας 2.4: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση του πάχους των υπερκειμένων εδαφών

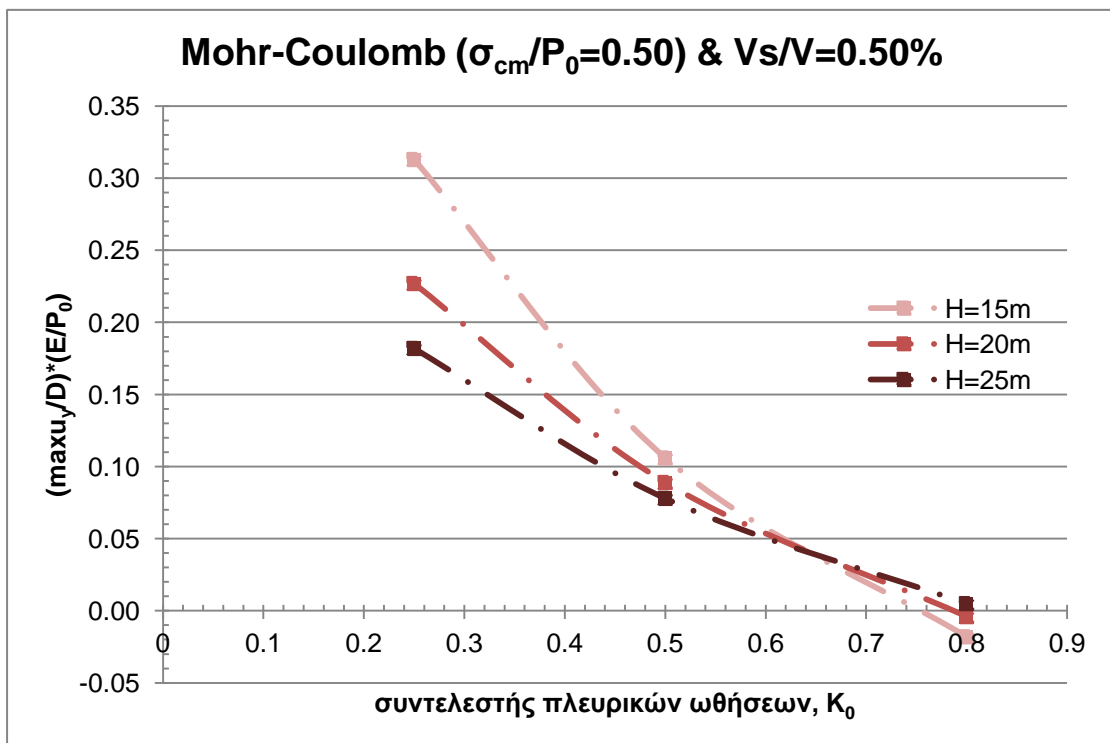
Εδαφικές παράμετροι		
συμπεριφορά	τύπος	-Mohr-Coulomb
	συνθήκες	στραγγισμένες
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	50
λόγος Poisson	ν =	0.2
γωνία τριβής	φ (°) =	35
συνοχή	c (kPa) =	Όπως προκύπτει από τους τύπους για κάθε τιμή του H
Παράμετροι επένδυσης		
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.2
βάρος	w (kN/m/m) =	5
λόγος Poisson	ν =	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.2
δυστένεια	EA (kN/m) =	5.80E+06
δυσκαμψία	EI (kNm ² /m) =	1.9343E+04

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.50$ και παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα (Σχήματα 2.43-2.45) για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V ενώ στα επόμενα διαγράμματα (Σχήματα 2.46-2.48) παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αναλύσεις για $\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$.

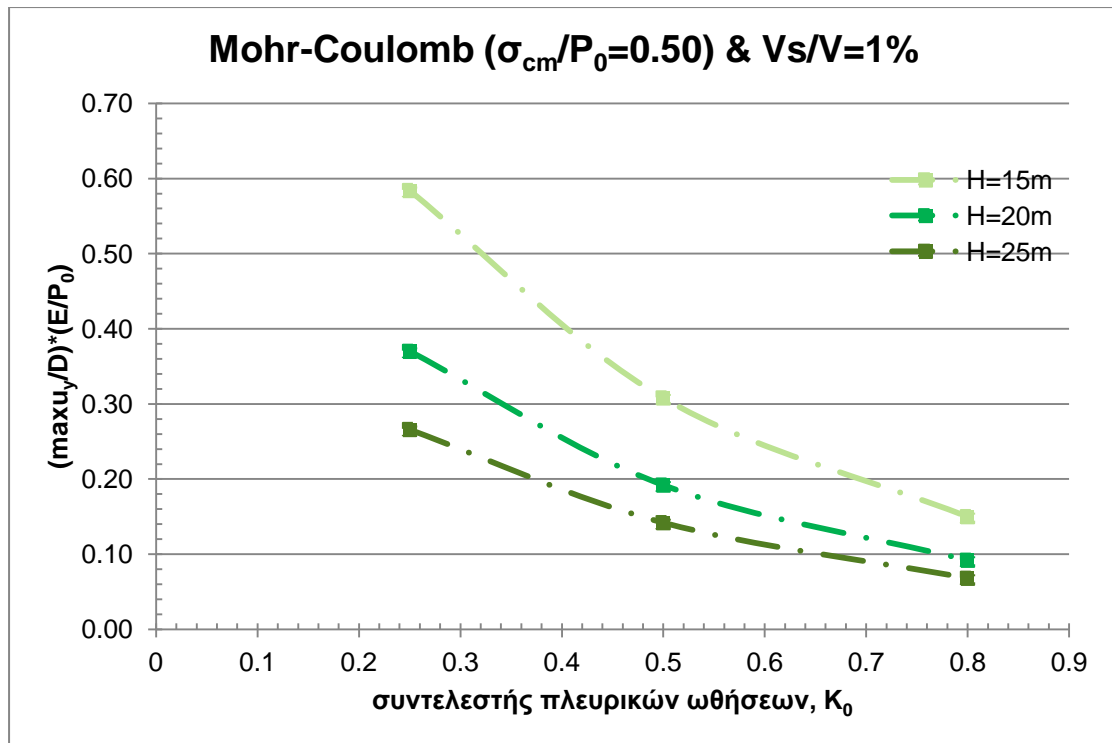
Οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης που είναι αρνητικές αφορούν περιπτώσεις όπου το έδαφος ανυψώνεται και δεν καθιζάνει και είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί.



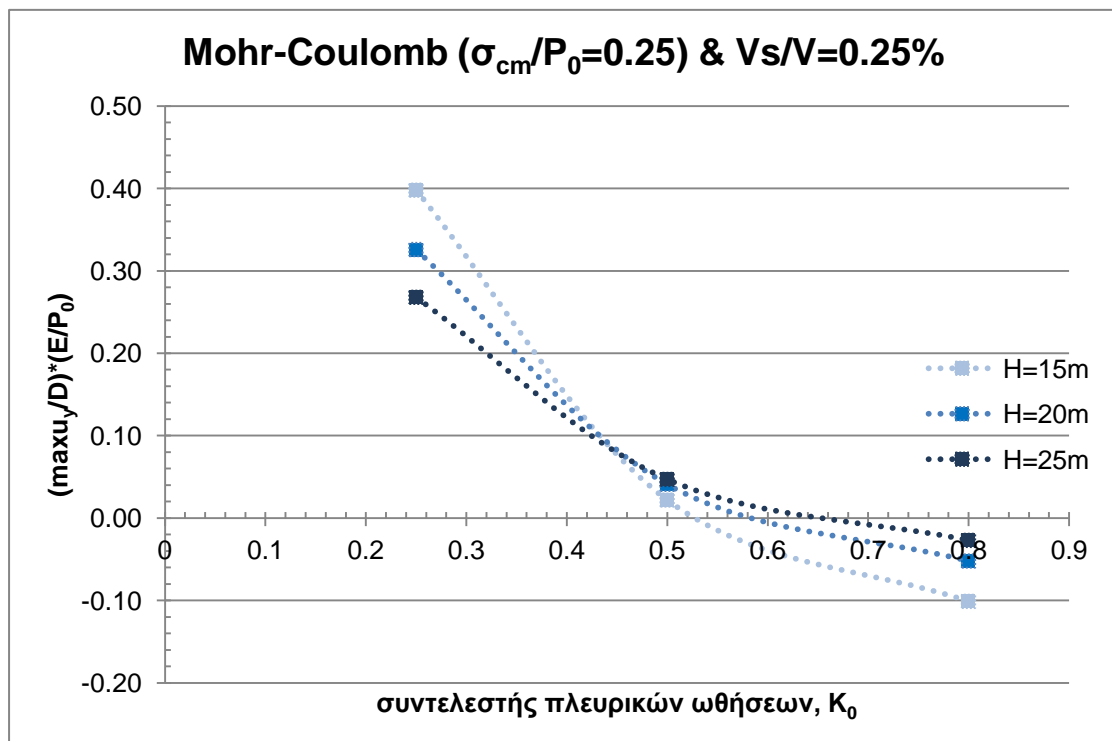
Σχήμα 2.43: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.



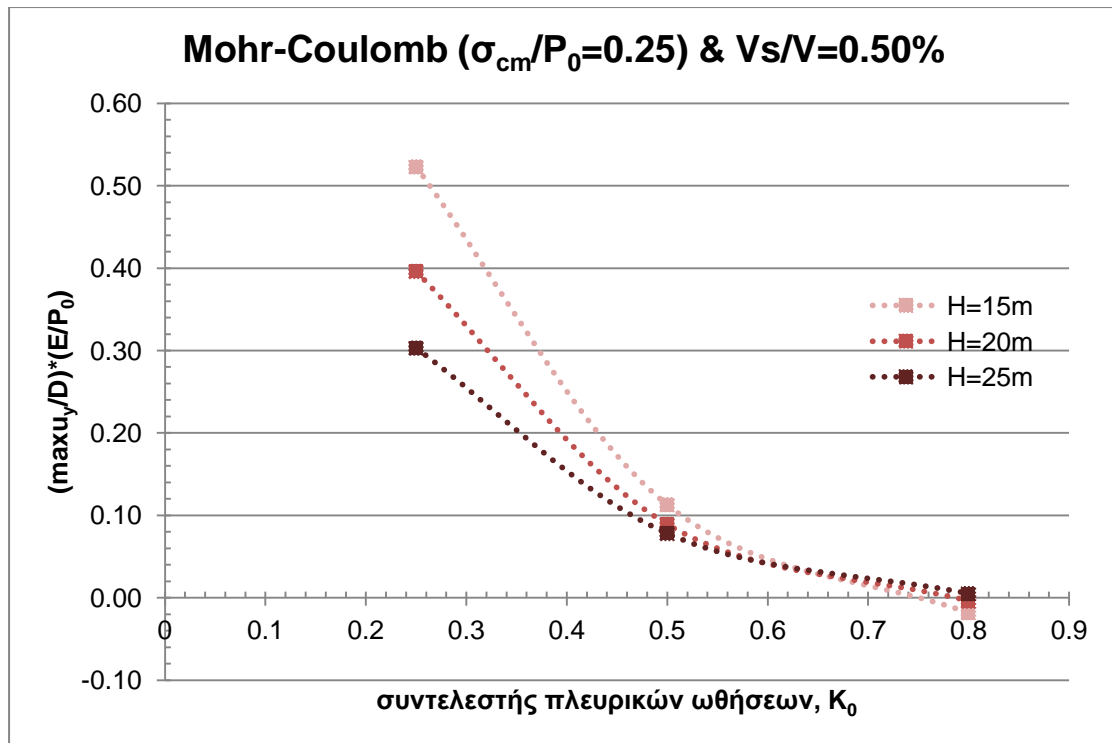
Σχήμα 2.44: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.



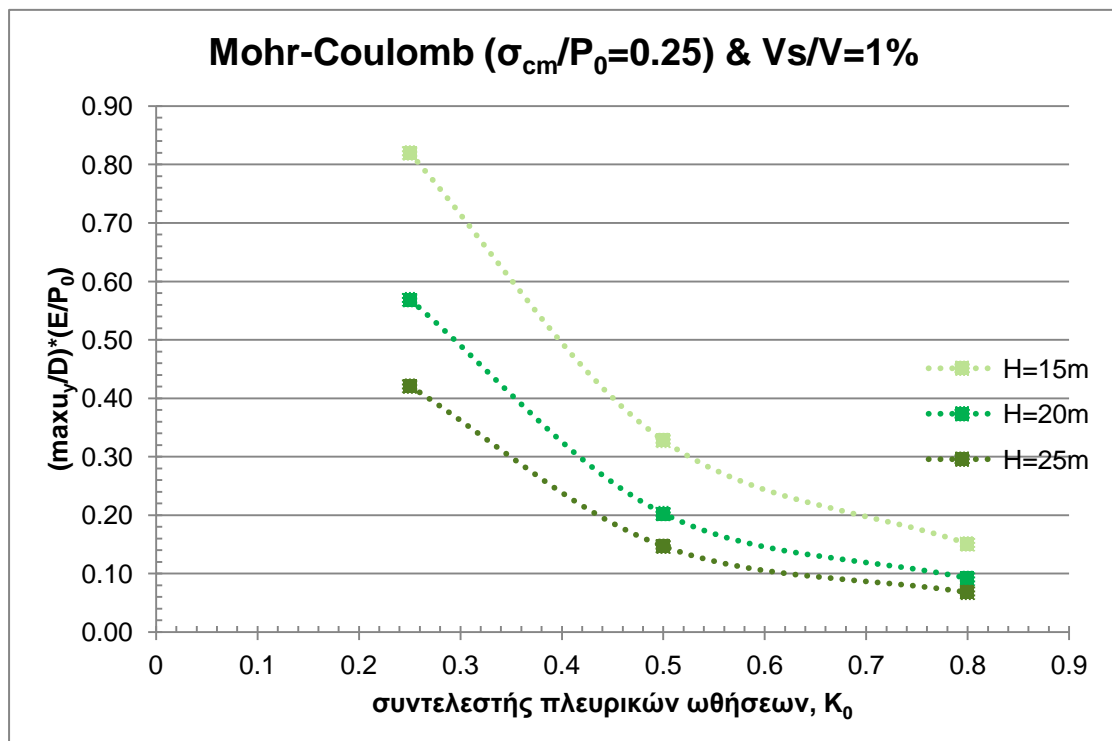
Σχήμα 2.45: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.



Σχήμα 2.46: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.25\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.



Σχήμα 2.47: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=0.50\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.



Σχήμα 2.48: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής και $V_s/V=1\%$ για διαφορετικό πάχος υπερκείμενων εδαφών.

2.3.4.2 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος των υπερκείμενων εδαφών

Όπως ήδη αναφέρθηκε το πάχος των υπερκείμενων εδαφών επηρεάζει τις τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων και συνεπώς επιδρά στην ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση.

Παρατηρούμε πως και για τις δύο τιμές του λόγου $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ και για ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου $V_s/V=0.25\%$ όταν ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων έχει μικρές τιμές, μικρότερο ύψος υπερκείμενων δίνει μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης ενώ όσο ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων αυξάνεται, υπάρχει μία τιμή του από την οποία και μετά συμβαίνει το αντίθετο και μεγαλύτερα υπερκείμενα δίνουν μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης (Σχήμα 2.43 & Σχήμα 2.46). Γενικά, όσο αυξάνεται το ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με τη διαφορά πως η τιμή του K_0 στην οποία τέμνονται οι καμπύλες έχει μεγαλύτερη τιμή απ' ότι πριν (Σχήμα 2.44 & Σχήμα 2.47). Ως επακόλουθο, όταν $V_s/V=1\%$ και για όλο το εύρος των τιμών του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων τα μικρά υπερκείμενα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης (Σχήμα 2.45 & Σχήμα 2.48).

2.3.5 Παράμετρος: Συμπεριφορά εδάφους

2.3.5.1 Επιρροή του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται το έδαφος

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάζεται τόσο η γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά του εδάφους όσο και η γραμμικώς ελαστική - ιδεατώς πλαστική συμπεριφορά και για τη περίπτωση όπου το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά εξετάζονται δύο λόγοι $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$, 0.50 και 0.25, από τους οποίους προκύπτει η τιμή της συνοχής με χρήση του τύπου $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$ όταν η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ (Πίνακας 2.5).

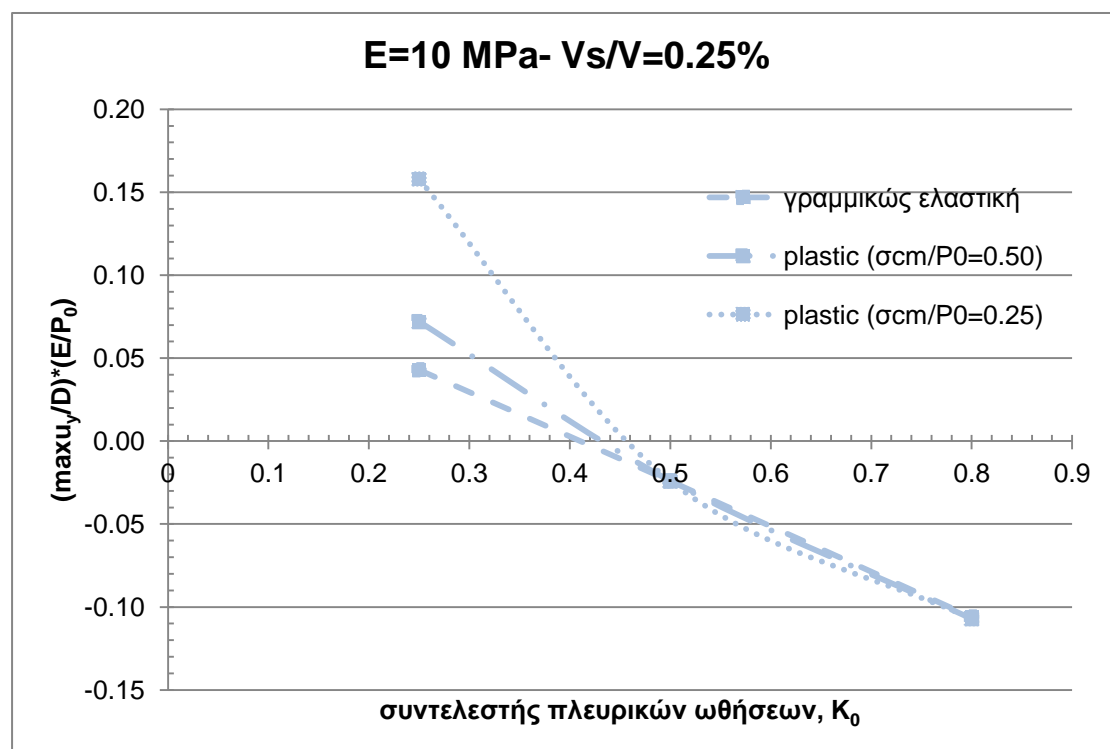
Πίνακας 2.5: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για παραμετρική ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους

Εδαφικές παράμετροι			
συμπεριφορά	τύπος	-Γραμμικώς ελαστική -Mohr-Coulomb	
	συνθήκες	στραγγισμένες	
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24	
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	10 & 200	
λόγος Poisson	ν =	0.2	
γωνία τριβής	φ (°) =	35	
συνοχή	c (kPa) =	31.2 & 62.5	
Παράμετροι επένδυσης			
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25	25

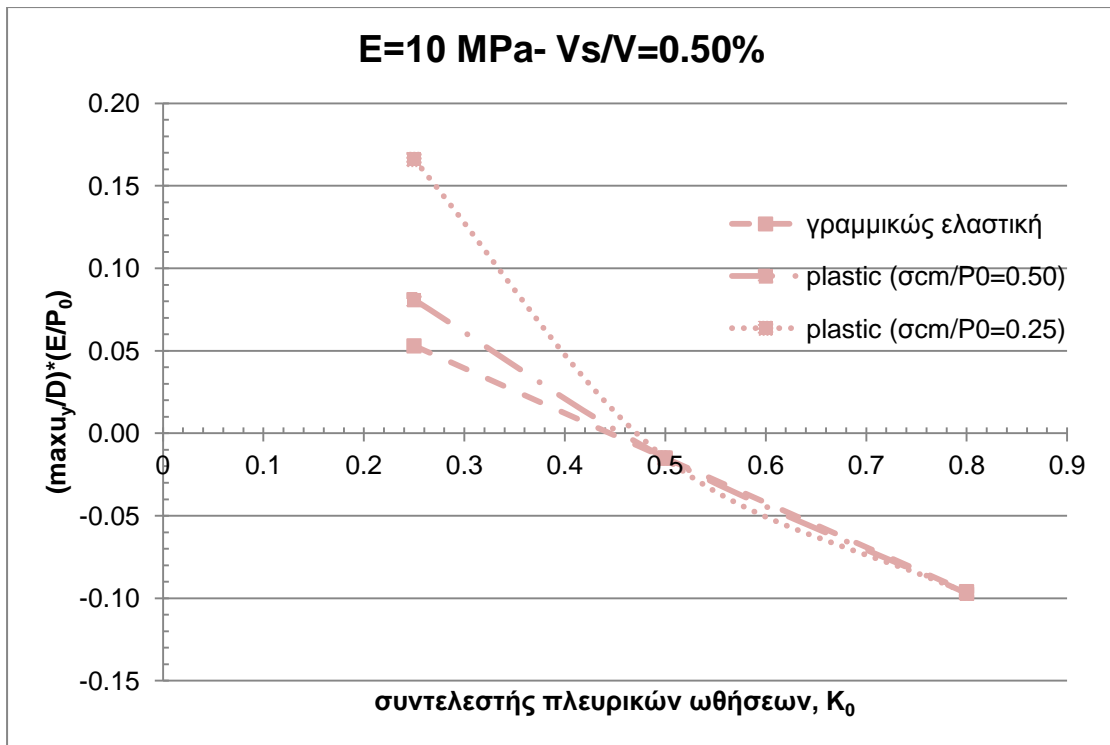
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.1	0.4
βάρος	w (kN/m/m) =	2.5	10
λόγος Poisson	ν =	0.15	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000083	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.1	0.4
δυστένεια	EA (kN/m) =	2.90E+06	1.16E+07

Στην ενότητα αυτή επιλέγεται ως παράμετρος η συμπεριφορά του εδάφους και παρουσιάζεται η επίδραση αυτής στην ανηγμένη καθίζηση για δεδομένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας και του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου καθώς και για δεδομένη τιμή του πάχους επένδυσης σκυροδέματος και του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 2.49-2.51 το μέτρο ελαστικότητας είναι E=10 MPa ενώ στα Σχήματα 2.52-2.54 είναι E=200 MPa. Τέλος Σχήματα 2.55-2.57 το πάχος σκυροδέματος είναι d=0.10m ενώ στα Σχήματα 2.58-2.60 είναι d=0.40m.

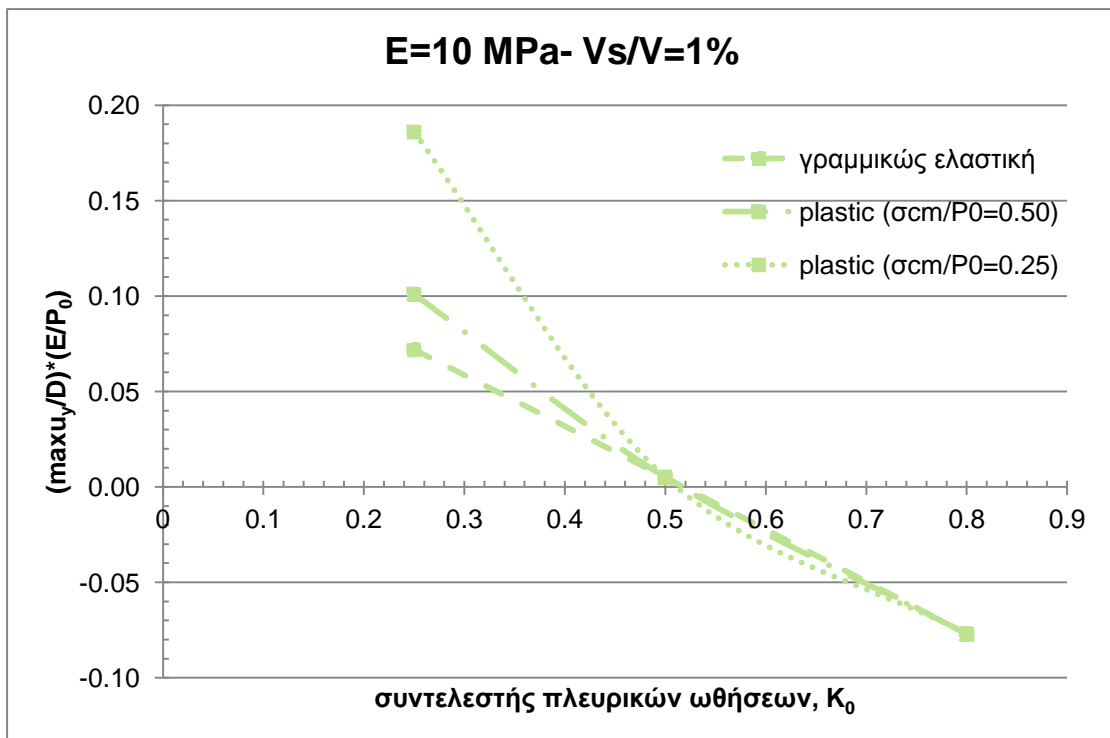
Στα παρακάτω σχήματα που έχουν προκύψει από τους συνδυασμούς τιμών του Πίνακα 2.5 υπάρχουν αρνητικές τιμές της ανηγμένης καθίζησης και αυτό γιατί το έδαφος αντί να καθιζάνει ανυψώνεται.



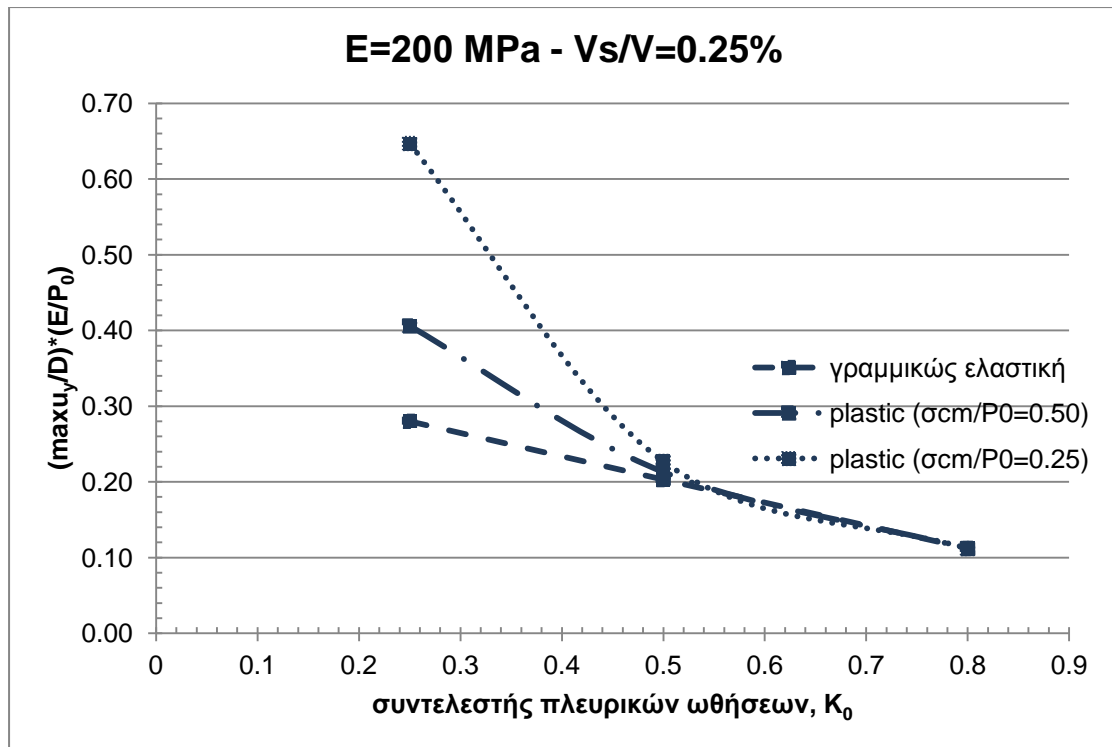
Σχήμα 2.49: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν E=10MPa & Vs/V=0.25%.



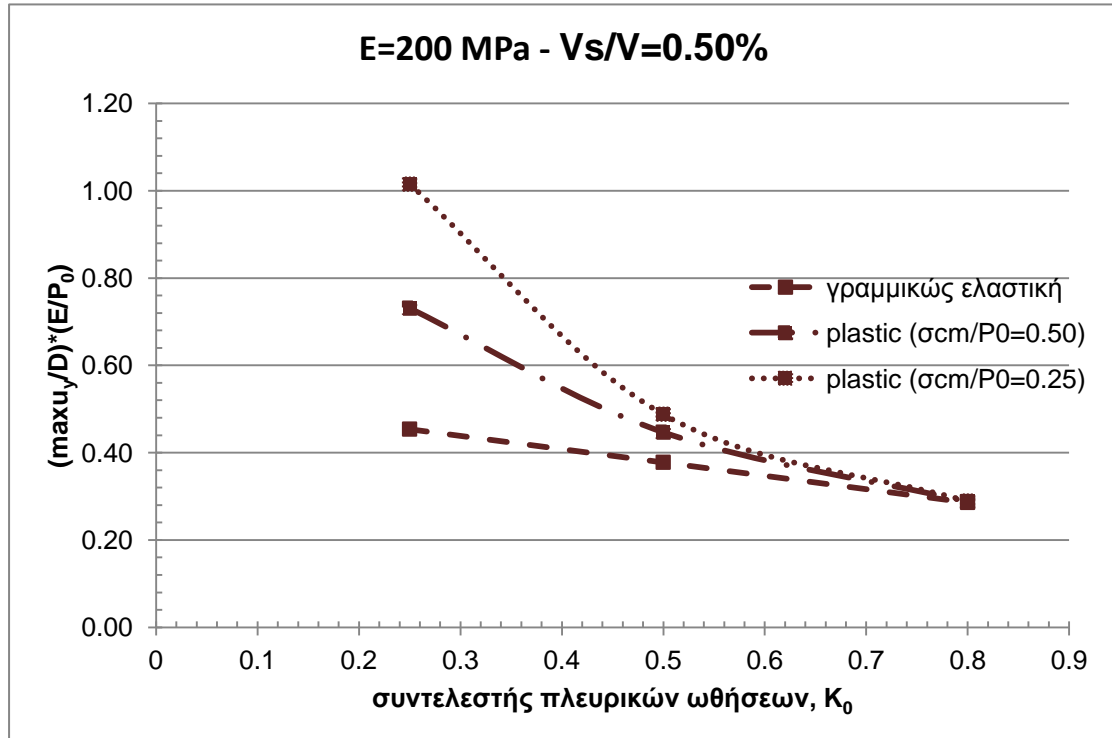
Σχήμα 2.50: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν E=10MPa & Vs/V=0.50%.



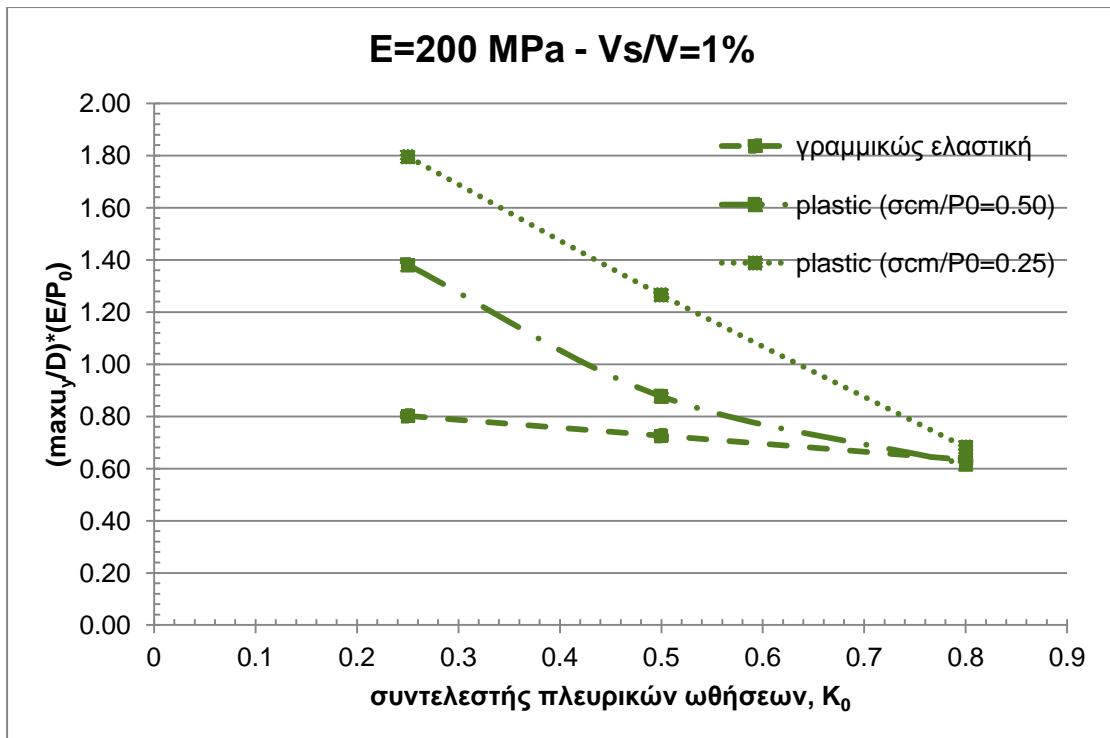
Σχήμα 2.51: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν E=10MPa & Vs/V=1%.



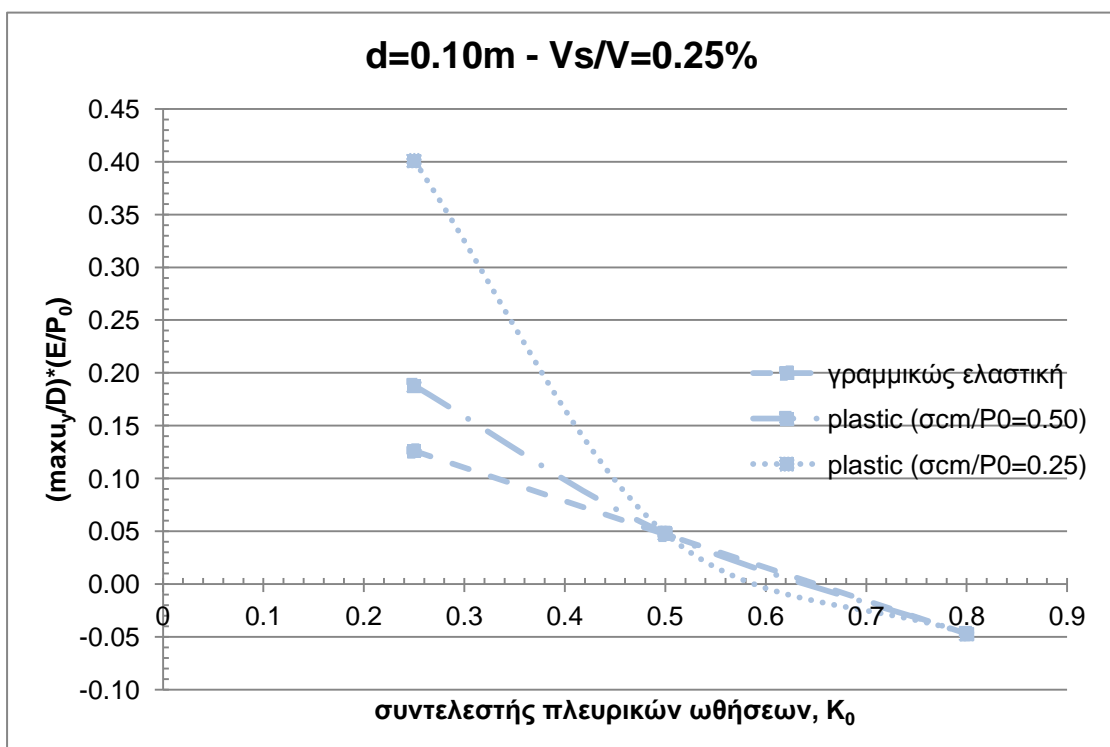
Σχήμα 2.52: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_s/V=0.25\%$.



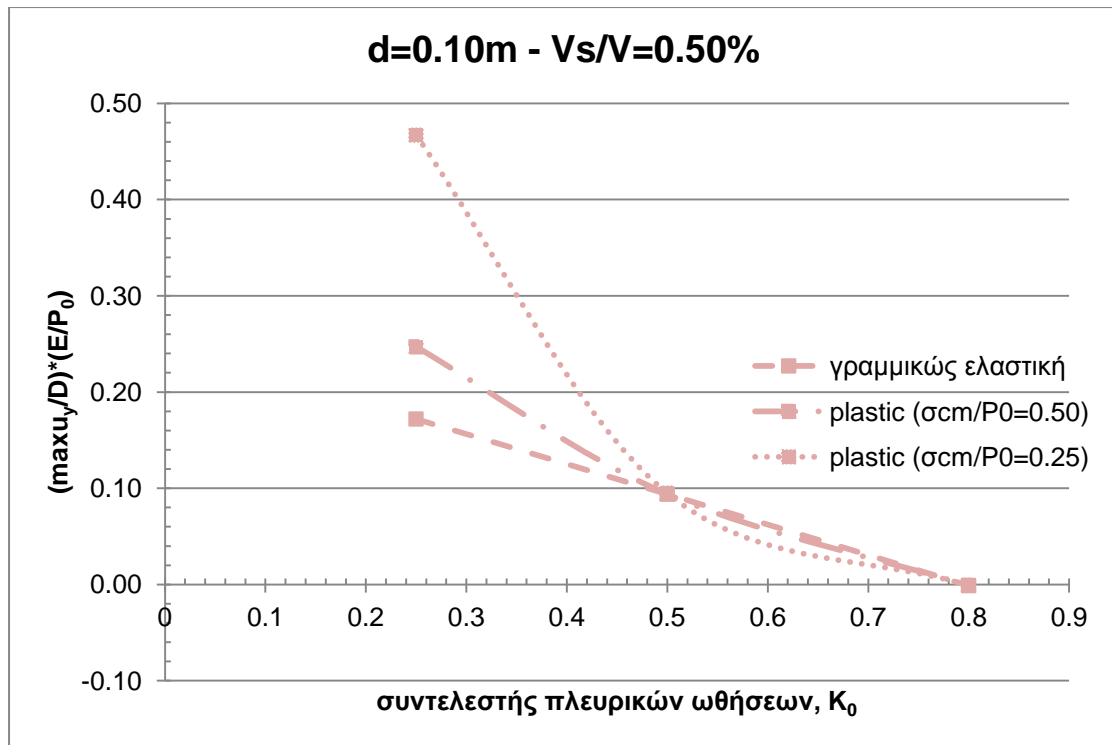
Σχήμα 2.53: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_s/V=0.50\%$.



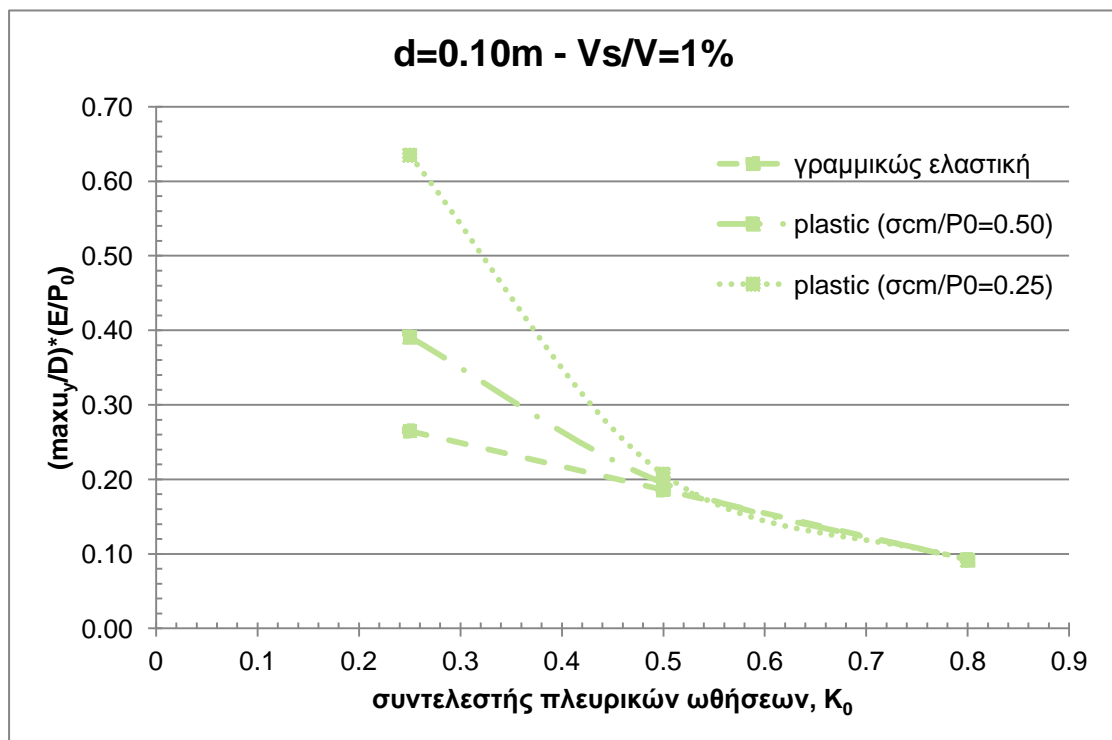
Σχήμα 2.54: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν $E=200\text{MPa}$ & $V_s/V=1\%$.



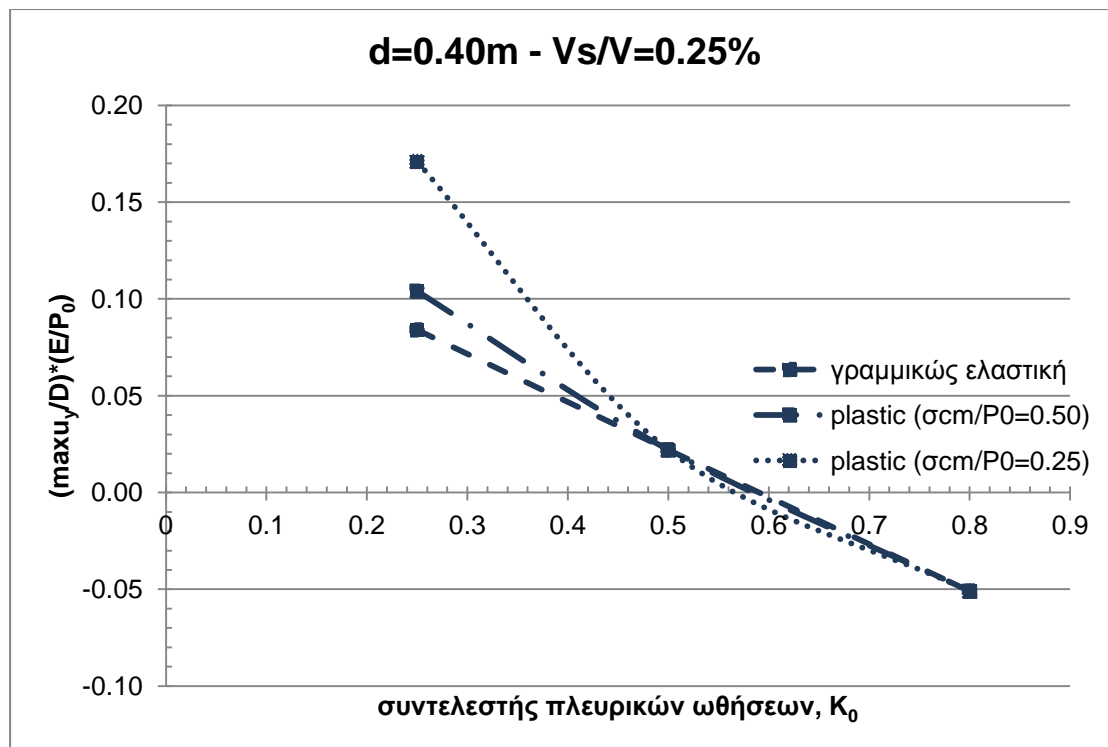
Σχήμα 2.55: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10\text{m}$ & $V_s/V=0.25\%$.



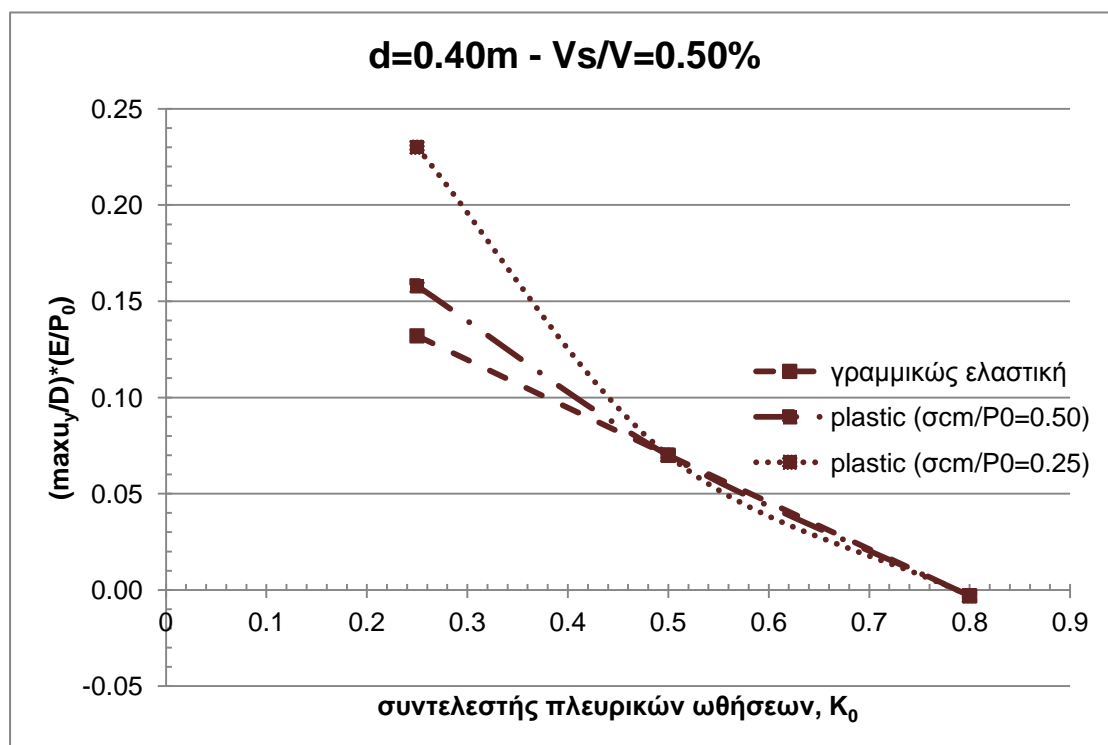
Σχήμα 2.56: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10m$ & $V_s/V=0.50\%$.



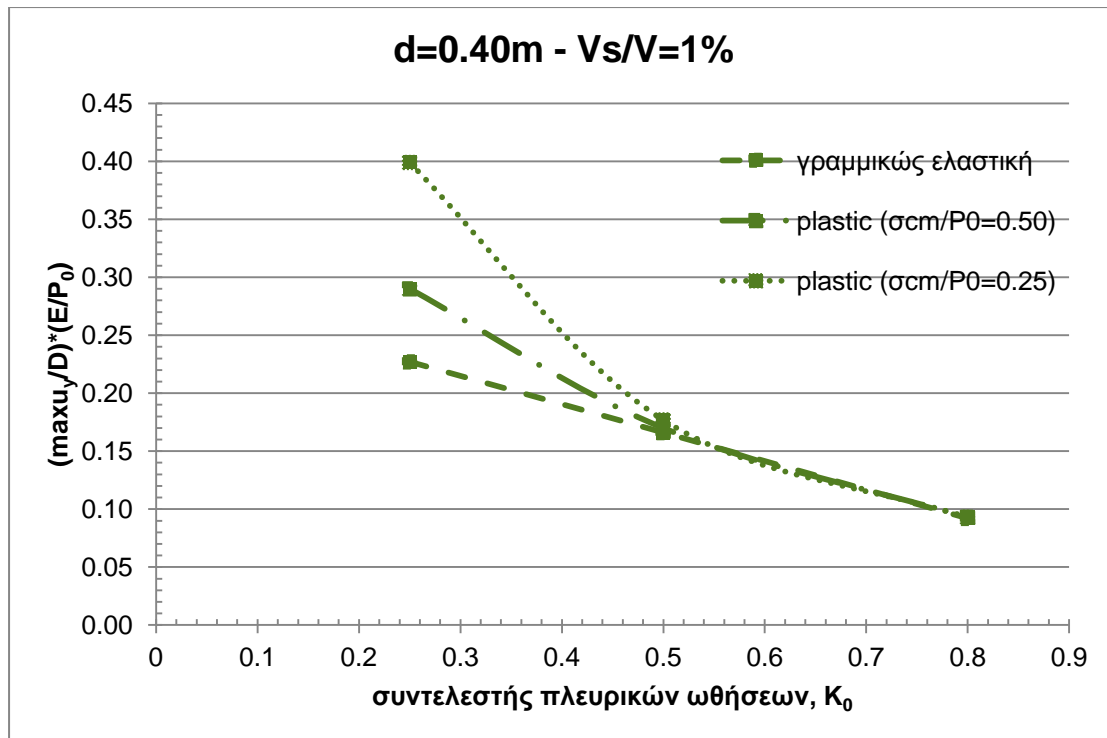
Σχήμα 2.57: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.10m$ & $V_s/V=1\%$.



Σχήμα 2.58: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν d=0.40m & Vs/V=0.25%.



Σχήμα 2.59: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής όταν d=0.40m & Vs/V=0.50%.



Σχήμα 2.60: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής όταν $d=0.40m$ & $V_s/V=1\%$.

2.3.5.2 Συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του εδάφους

Από τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της συμπεριφοράς του εδάφους στην ανηγμένη επιφανειακή καθίζηση. Μία γενική παρατήρηση είναι πως όσο αυξάνεται το ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V , αυξάνεται η τιμή της ανηγμένης καθίζησης $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$, ενώ όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων αυτή μειώνεται. Επίσης, για $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές της ανηγμένης καθίζησης σχεδόν ταυτίζονται ενώ για το διάστημα $K_0=0.25-0.5$ η χαμηλής ποιότητας βραχομάζα ($\frac{\sigma_{cm}}{P_0} = 0.25$) δίνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης σε αντίθεση με το έδαφος που συμπεριφέρεται ελαστικά το οποίο δίνει τις μικρότερες τιμές.

3. Παραμετρικές αναλύσεις επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης αβαθούς σήραγγας (Μέρος Β')

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής παρουσίαση διαφόρων παραμέτρων και του τρόπου που αυτές επιδρούν στην ανηγμένη καθίζηση. Ανάμεσα σε αυτές εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο διανοίγεται η σήραγγα, δηλαδή με τη μέθοδο NATM ή με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής. Κατ' επέκταση εξετάστηκε σε κάθε περίπτωση ο βαθμός αποτόνωσης και ο λόγος V_s/V αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται συγκριτική παρουσίαση του τρόπου που επιδρά η κάθε μέθοδος διάνοιξης στην ανηγμένη καθίζηση, θεωρώντας πως σε κάθε συντελεστή αποτόνωσης αντιστοιχεί μία τιμή V_s/V .

3.1 Επιρροή της μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας

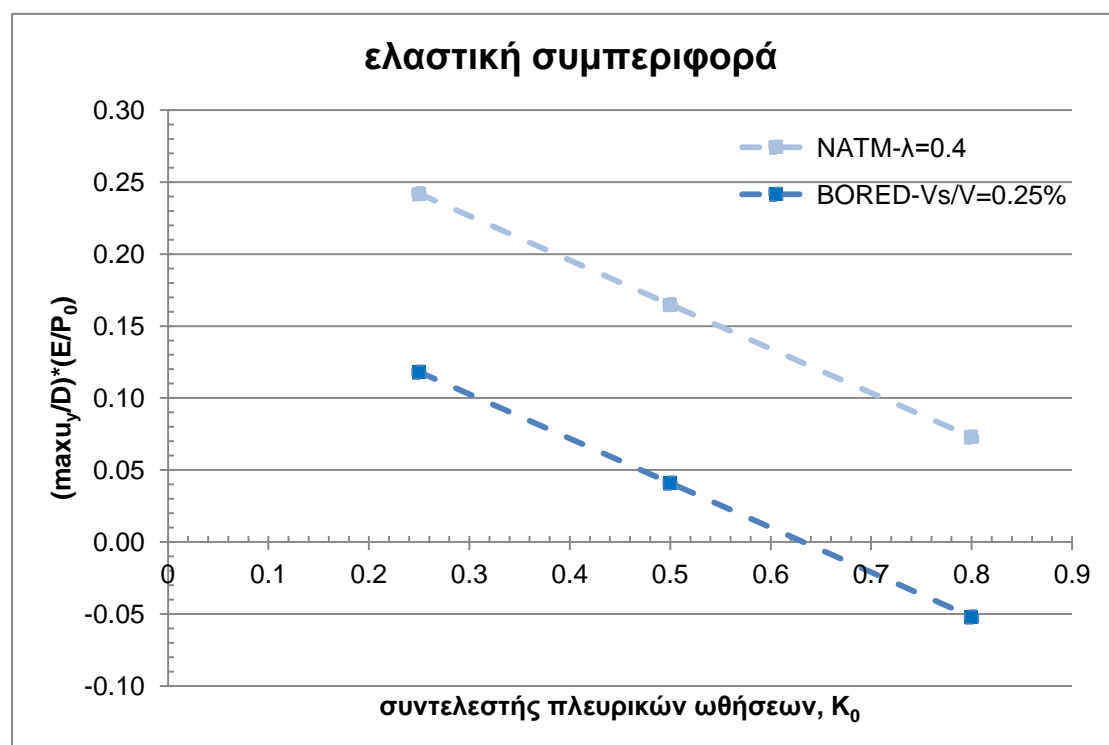
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση του τρόπου διάνοιξης (NATM & BORED) στην ανηγμένη καθίζηση τόσο για γραμμικώς ελαστική όσο και για γραμμικώς ελαστική - ιδεατώς πλαστική συμπεριφορά εδάφους, με ύψος υπερκείμενων $H=20\text{m}$. Για την πλαστική συμπεριφορά εδάφους η γωνία τριβής έχει τιμή $\varphi=35^\circ$ ενώ η τιμή της συνοχής c προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{cm} = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$ για τιμές του λόγου $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ 0.50 και 0.25 (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Τιμές εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών επένδυσης για διάνοιξη με μέθοδο NATM & TBM

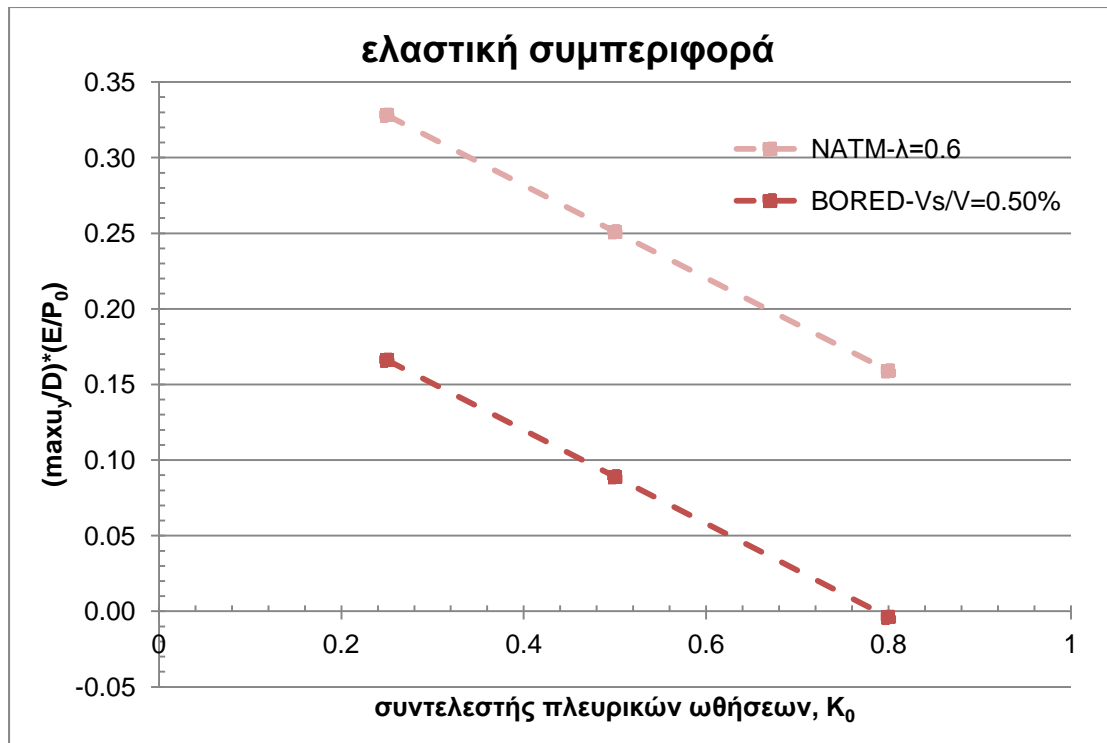
Εδαφικές παράμετροι		
συμπεριφορά	τύπος	-Γραμμικώς ελαστική -Mohr-Coulomb
	συνθήκες	στραγγισμένες
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	24
μέτρο ελαστικότητας	E (MPa) =	50
λόγος Poisson	ν =	0.2
γωνία τριβής	φ (°) =	35
συνοχή	c (kPa) =	31.2 & 62.5
Παράμετροι επένδυσης		
συμπεριφορά	τύπος	ελαστική
ειδικό βάρος	γ (kN/m ³) =	25
ισοδύναμο πάχος	d (m) =	0.2
βάρος	w (kN/m/m) =	5
λόγος Poisson	ν =	0.15
μέτρο ελαστικότητας	E (GPa) =	29
ροπή αδράνειας	I (m ⁴ /m) =	0.000667
εμβαδόν	A (m ²) =	0.2

δυστένεια	EA (kN/m) =	5.80E+06
δυσκαμψία	EI (kNm ² /m) =	1.9343E+04

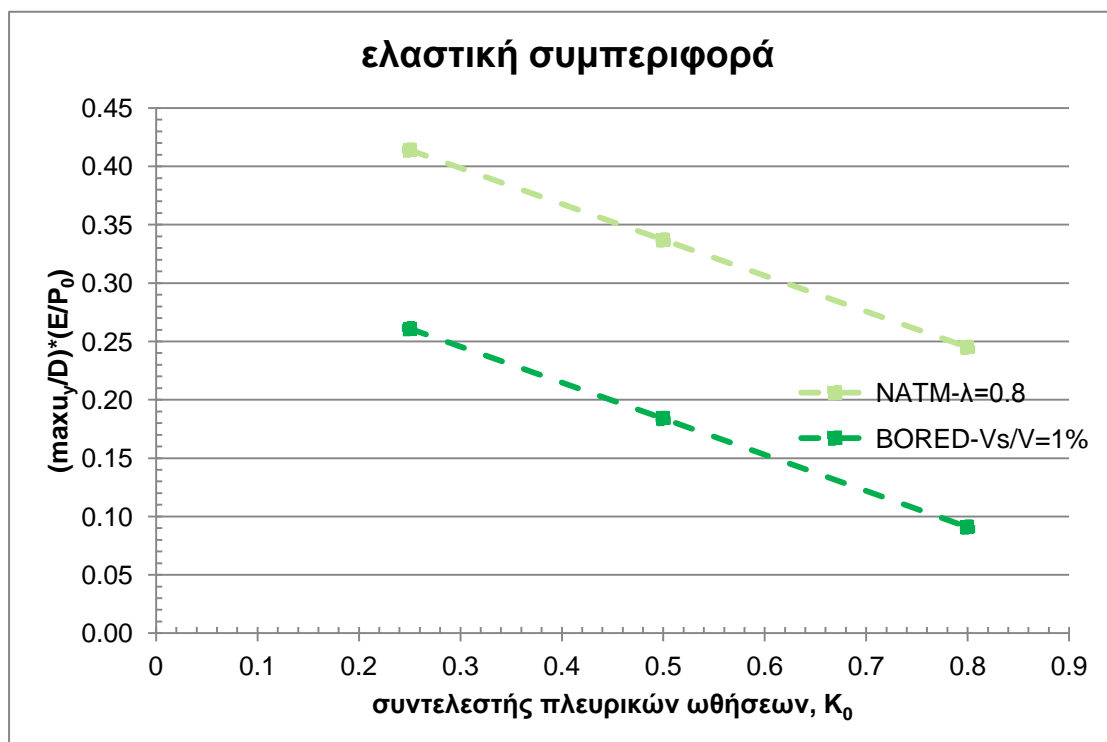
Για τη μέθοδο NATM εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του βαθμού αποτόνωσης λ (0.4-0.6-0.8) ενώ αντίστοιχα για διάνοιξη με μηχανήμα TBM εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V (0.25%-0.5%-1%), για τιμές του K_0 από 0.25-0.80. Στα Σχήματα 3.1-3.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την περίπτωση όπου το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά ενώ στα Σχήματα 3.4-3.6 & 3.7-3.9 το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά με $\frac{\sigma_{cm}}{P_0}$ 0.50 και 0.25 αντίστοιχα.



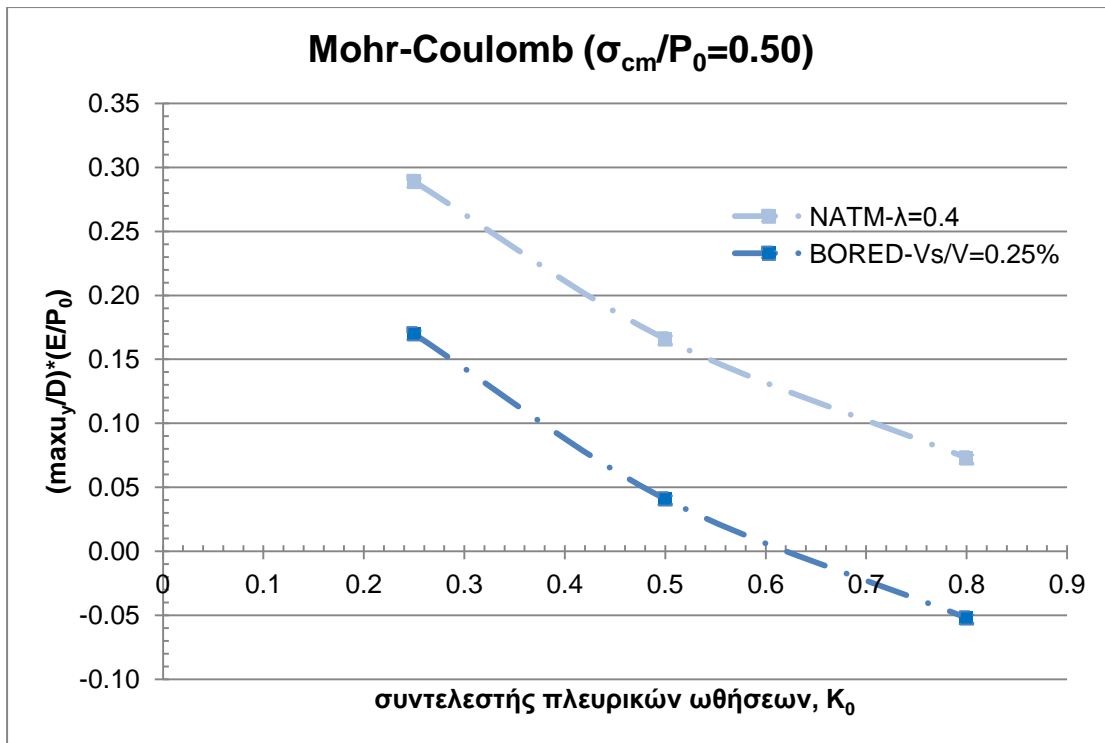
Σχήμα 3.1: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.4$ & $V_s/V=0.25\%$.



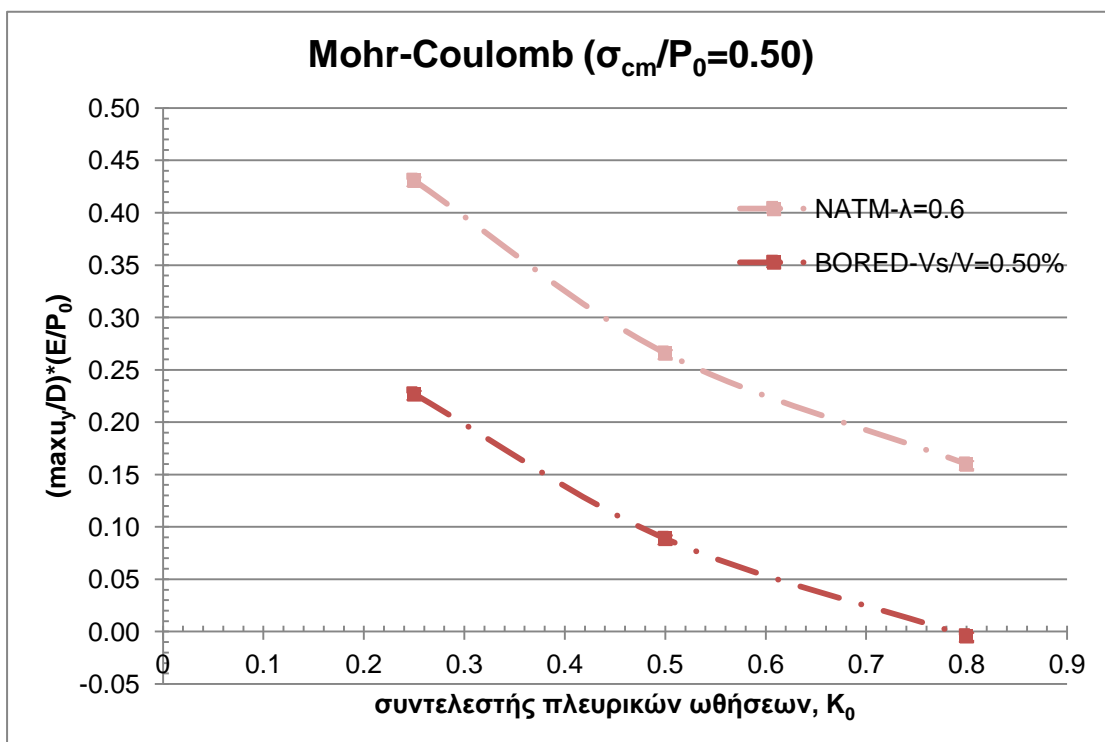
Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.6$ & $V_s/V=0.50\%$



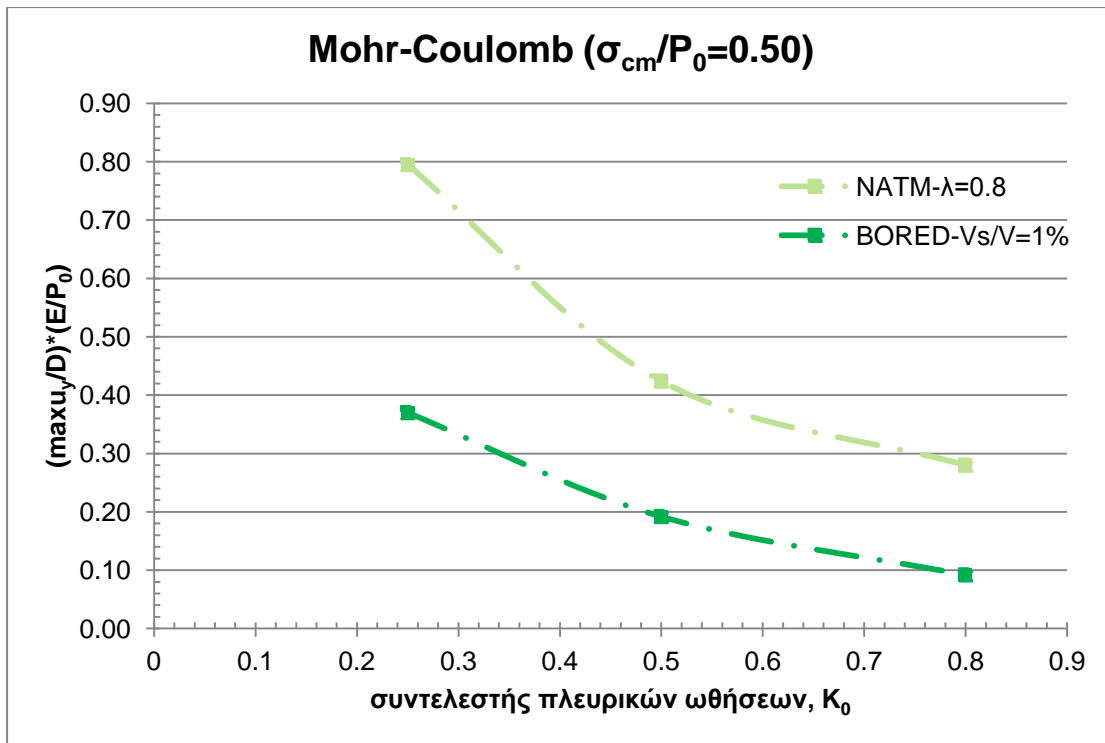
Σχήμα 3.3: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για ελαστική συμπεριφορά εδάφους, $\lambda=0.8$ & $V_s/V=1\%$.



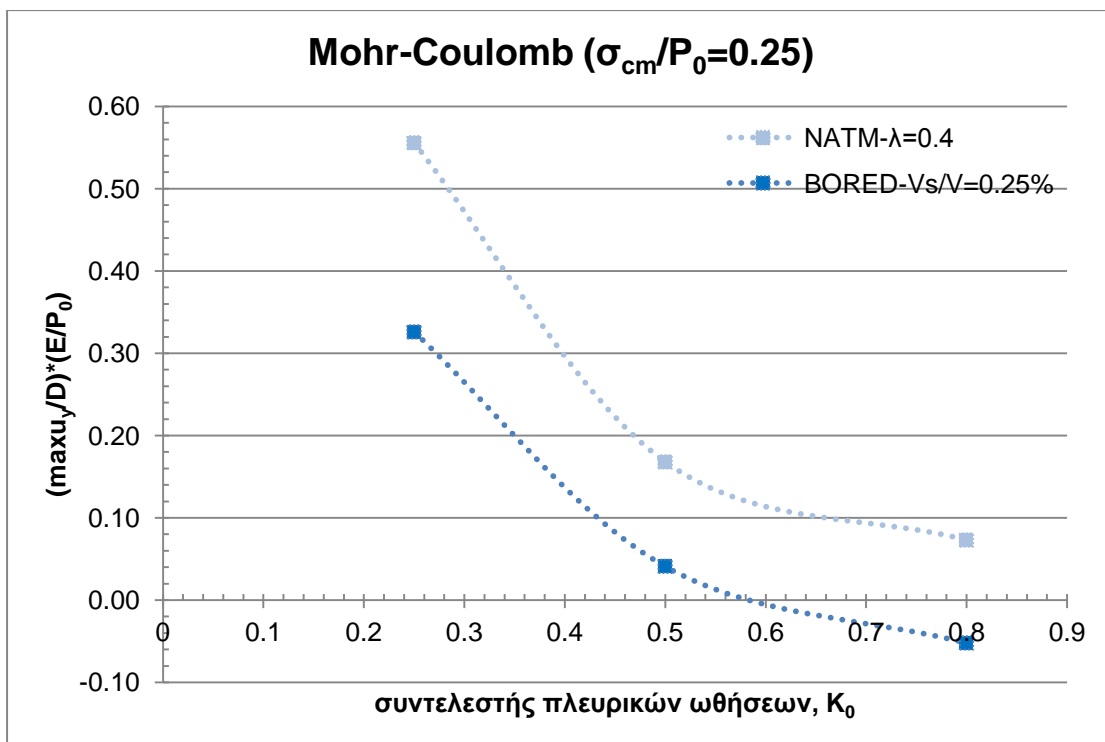
Σχήμα 3.4: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.4$ & $V_s/V=0.25\%$.



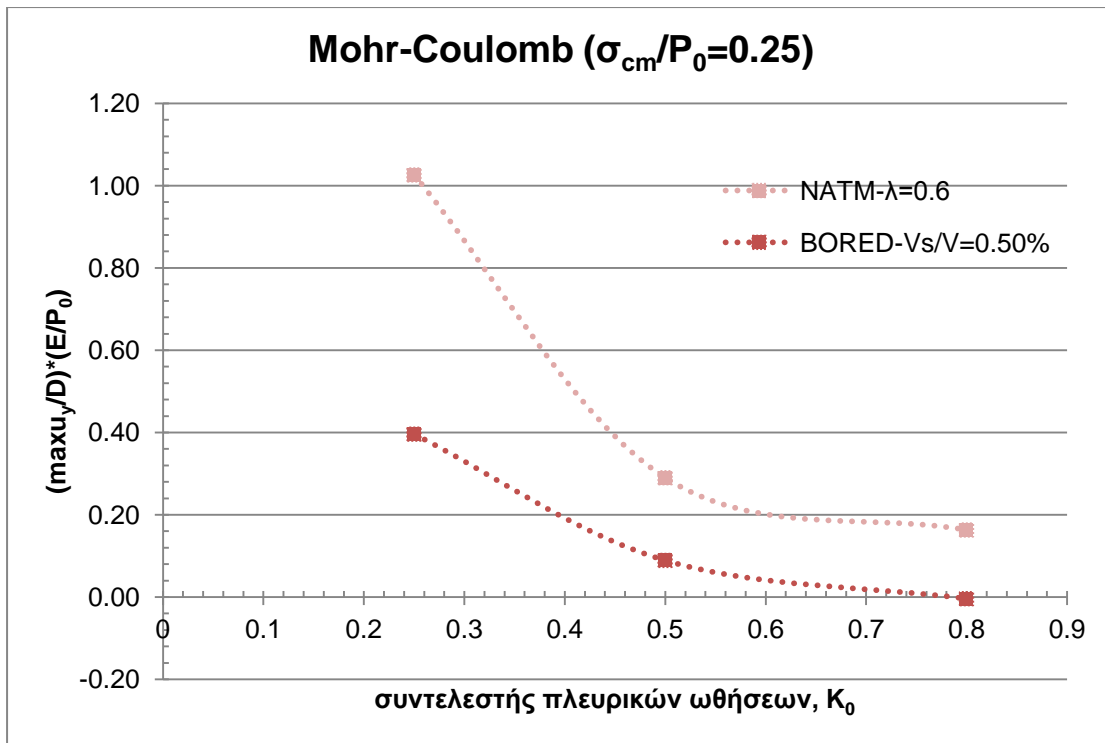
Σχήμα 3.5: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.6$ & $V_s/V=0.50\%$.



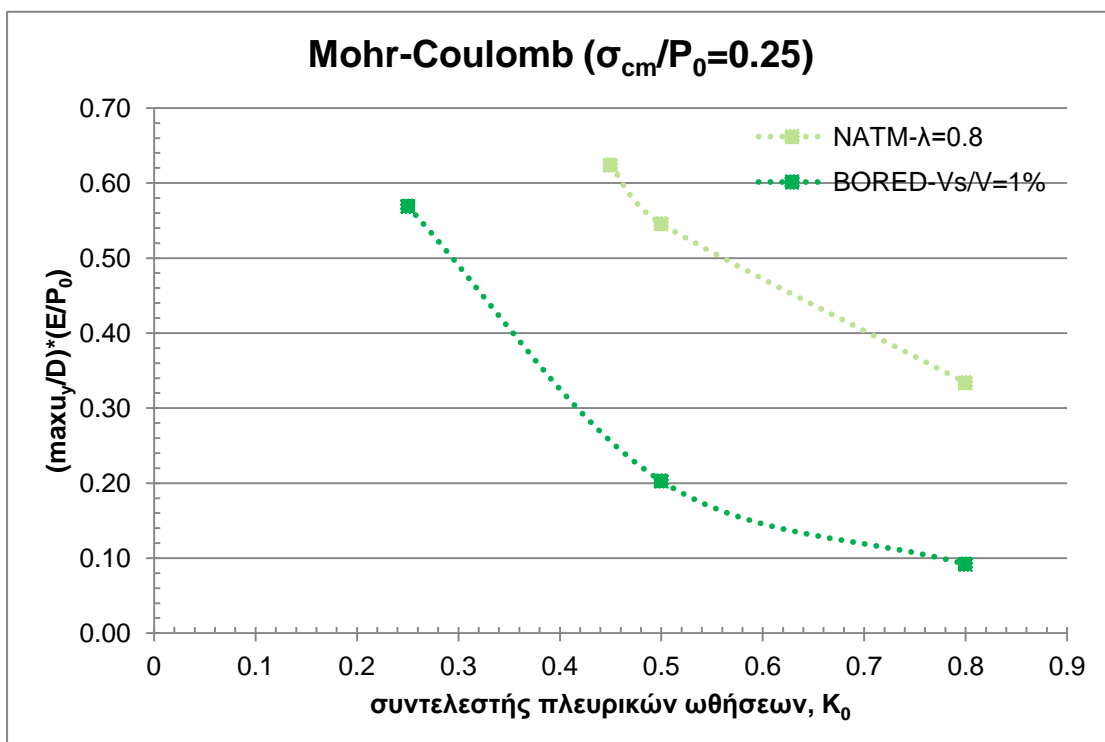
Σχήμα 3.6: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.50$, $\lambda=0.8$ & $V_s/V=1\%$.



Σχήμα 3.7: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.4$ & $V_s/V=0.25\%$.

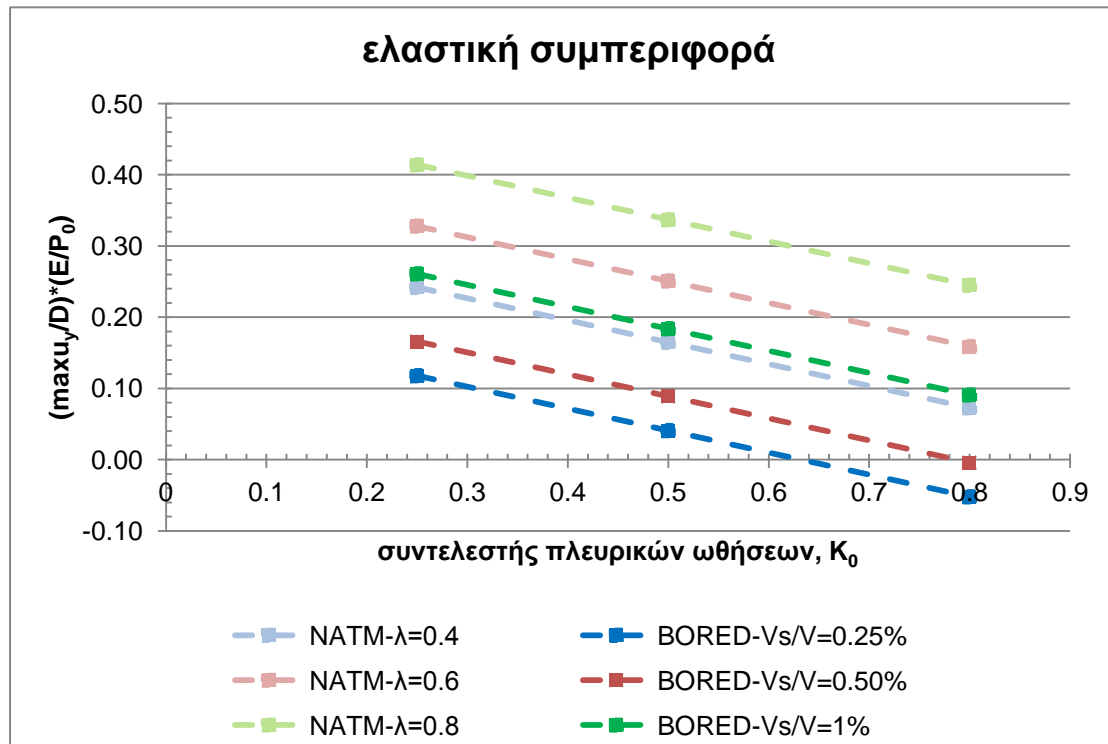


Σχήμα 3.8: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.6$ & $V_s/V=0.50\%$.

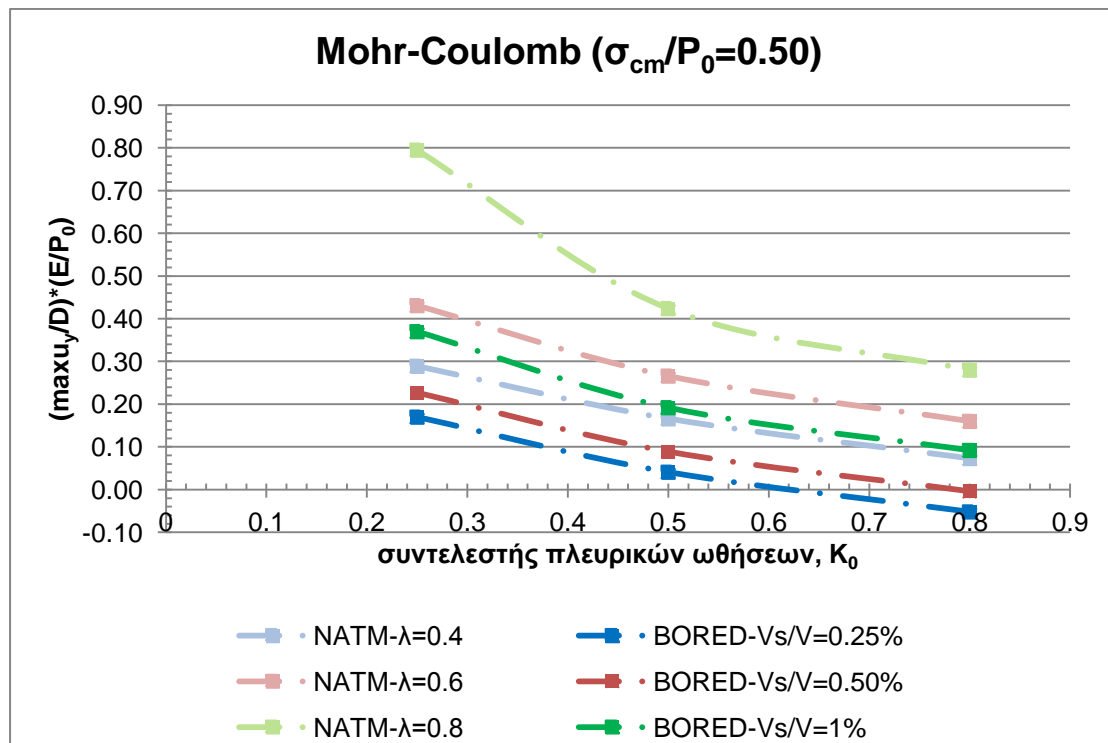


Σχήμα 3.9: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για $\sigma_{cm}/P_0=0.25$, $\lambda=0.8$ & $V_s/V=1\%$.

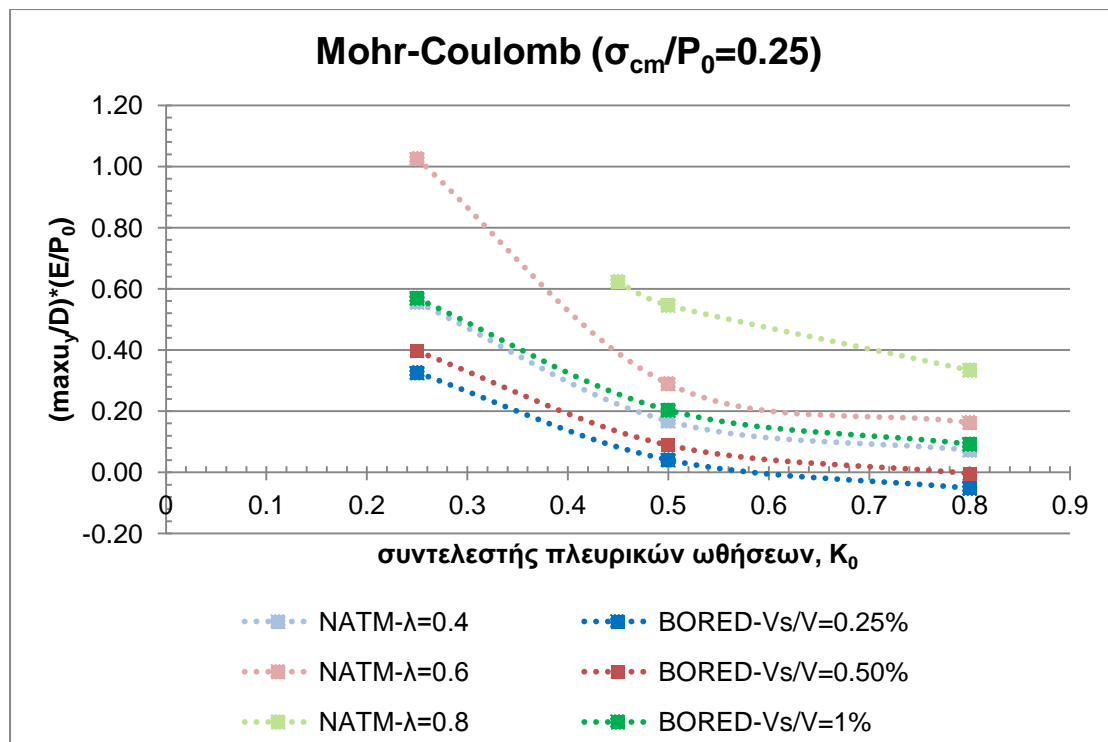
Στα Σχήματα 3.10-3.12 παρουσιάζονται συγκριτικά όλες οι καμπύλες για κάθε συνδυασμό διάνοιξης με κριτήριο τη συμπεριφορά του εδάφους.



Σχήμα 3.10: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με ελαστική συμπεριφορά και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM.



Σχήμα 3.11: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.50$) και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM.



Σχήμα 3.12: Μεταβολή της ανηγμένης επιφανειακής καθίζησης συναρτήσει του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων για διάνοιξη σε έδαφος με συμπεριφορά κατά Mohr-Coulomb ($\sigma_{cm}/P_0=0.25$) και διάνοιξη με μέθοδο NATM ή TBM.

3.2 Συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα το πρώτο βασικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η διάνοιξη με τη μέθοδο NATM δίνει αισθητά μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σε σχέση με τη διάνοιξη με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής. Για τη σύγκριση έχει επιλεγεί ένας συγκεκριμένος βαθμός αποτόνωσης με μία συγκεκριμένη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου για τα οποία εκτιμάται πως έχουν κάποια αντιστοιχία.

Ο τρόπος που επιδρά η μέθοδος διάνοιξης στην ανηγμένη καθίζηση περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 2.3.1.2 ωστόσο επισημαίνονται και σε αυτή την ενότητα κάποια βασικά στοιχεία. Όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά, μεγαλύτερος βαθμός αποτόνωσης ή μεγαλύτερο ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ που τείνουν να μειωθούν όσο αυξάνεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων ενώ το ίδιο συμβαίνει και όταν το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά – ιδεατώς πλαστικά με το ρυθμό μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ να αυξάνεται όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας και να είναι σημαντικά μεγαλύτερος για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.4) απ' ότι σε μεγαλύτερες τιμές του K_0 (0.4-0.8)

4. Γενικά συμπεράσματα

Η διάνοιξη σήραγγας σε χαμηλά υπερκείμενα και ειδικά σε αστικό περιβάλλον χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς μπορούν να προκύψουν σοβαρές βλάβες στις ανωδομές εξαιτίας των επιφανειακών καθιζήσεων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας εξετάστηκαν οι μεταβολές που παρουσιάζουν οι καθιζήσεις όταν μεταβάλλονται ο τρόπος διάνοιξης της σήραγγας, το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος επένδυσης σκυροδέματος, το πάχος των υπερκειμένων εδαφών καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται το έδαφος. Από τις εκτενείς αναλύσεις προέκυψαν κάποια συμπεράσματα τα οποία και παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

4.1 Συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας

- Η διάνοιξη με τη μέθοδο NATM δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή αποτόνωσης λ δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ (NATM)
- Μεγαλύτερη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ (BORED)
- Αύξηση του K_0 οδηγεί σε μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.4) ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ είναι μεγαλύτερος απ' ότι για K_0 (0.4-0.8)
- Για $\lambda=0.4$ και $\lambda=0.6$ και για τιμές $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σχεδόν ταυτίζονται
- Για τιμές $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σχεδόν ταυτίζονται ανεξαρτήτως της συμπεριφοράς του εδάφους

4.2 Συμπεράσματα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας

- Μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας E δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Μεγαλύτερη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Αύξηση του K_0 οδηγεί σε μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$

- Για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.5) ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ είναι μεγαλύτερος απ' ό τι για K_0 (0.5-0.8)
- Συνδυασμός μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας και V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Για συγκεκριμένη τιμή του E , για $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σχεδόν ταυτίζονται, ανεξαρτήτως της συμπεριφοράς του εδάφους (εξαίρεση αποτελεί ο συνδυασμός $E=200$ MPa & $V_s/V=1\%$).

4.3 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος επένδυσης σκυροδέματος

- Μεγαλύτερο πάχος επένδυσης σκυροδέματος δίνει μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Μεγαλύτερη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Αύξηση του K_0 οδηγεί σε μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.5) ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ είναι μεγαλύτερος απ' ό τι για K_0 (0.5-0.8)
- Συνδυασμός μικρού πάχους επένδυσης σκυροδέματος και V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Η περίπτωση όπου $d=0.40$ m είναι αυτή για την οποία προκύπτουν ουσιαστικές διαφορές στις τιμές της επιφανειακής καθίζησης.
- Για συγκεκριμένη τιμή του d , για $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σχεδόν ταυτίζονται, ανεξαρτήτως της συμπεριφοράς του εδάφους.

4.4 Συμπεράσματα σχετικά με το πάχος των υπερκείμενων εδαφών

- Όταν το K_0 είναι μικρό, χαμηλά υπερκείμενα δίνουν μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ ενώ από μία τιμή του K_0 και μετά υψηλά υπερκείμενα δίνουν μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$

- Όσο αυξάνεται το ποσοστό ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V αυξάνει η τιμή του K_0 για την οποία αντιστρέφεται η επίδραση του πάχους των υπερκείμενων εδαφών
- Όταν $V_s/V=1\%$ για όλο το εύρος των τιμών του K_0 τα μικρά υπερκείμενα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης καθίζησης

4.5 Συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς του εδάφους

- Χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Μεγαλύτερη τιμή του ποσοστού ανηγμένης απώλειας όγκου V_s/V δίνει μεγαλύτερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Αύξηση του K_0 οδηγεί σε μικρότερες τιμές $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$
- Για μικρές τιμές του K_0 (0.25-0.4) ο ρυθμός μείωσης των τιμών $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ είναι μεγαλύτερος απ' ότι για K_0 (0.4-0.8)
- Για τιμές $V_s/V=0.25\%-1\%$ και $K_0=0.5-0.8$ οι $\frac{\max u_y}{D} \cdot \frac{E}{P_0}$ σχεδόν ταυτίζονται ανεξαρτήτως της συμπεριφοράς του εδάφους

Βιβλιογραφικές αναφορές

Αναγνωστόπουλος Α. και Μιχάλης Η. (2004), 'Σημειώσεις αντιστηρίξεων και καθιζήσεων λόγω εκσκαφών', Ε.Μ.Π

Αναγνωστόπουλος Α., Μιχάλης Η. και Αναγνωστόπουλος Γ., 'Κριτήρια εδαφικών μετακινήσεων και κατηγορίες βλαβών κτιρίων λόγω διανοίξεως αβαθών σηράγγων'

Bjerrum L (1963) "Allowable settlement of structures 'Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering', Weisbaden, Germany, Vol. III, pp.135-137

Boscardin M. and Cording E.. (1989) 'Building response to excavation-included settlement' Jour of Geot. Eng., ASCE, Vol. 115, No 1, pp 1-21.

Burland, J. B., and Worth, C.P. (1974) 'Allowable and differential settlement of structures including damage and soil –structure interaction' Proceedings, Conference on Settlement of structures, Cambridge University, England pp.611-654

Franzius J.N. Potts, D.M. Burland, J.B (2006) 'The response of surface structures to tunnel construction 'Proceedings ICE Geotechnical Engineering Vol. 159 Issue GE1, pp. 3-17

Hoek E and Diederichs M.S.(2006) 'Empirical estimation of rock mass modulus', Jour of Rock Mechanics & Mining Sciences., No 43, pp 203-215.

Mair, R.J. and Taylor, R.N. and Burland, J.B., (1996) 'Prediction of ground movements and assessments of risk of building damage due to bored tunneling', Proceedings Int. Symp. On Geotechnical aspects of underground construction in soft ground. London, pp. 713-717

Potts, D.M. and Addenbrooke, T.I., (1997) ' A structure's influence on tunneling induced ground movements', Proceedings ICE Vol. 125 Issue 2, pp. 109-125

Skempton, A.W. and Mac Donald, D.H., (1956) 'Allowable settlement of buildings' Proceedings ICE, Part III, Vol. 5, pp.727-768.