

Αριθμητικές Αναλύσεις για τη Διερεύνηση Μεθόδων Βελτίωσης Εδαφών σε Προβλήματα Καθιζήσεων Στείρων Υλικών Λιγνιτωρυχείων

Numerical Analyses for the Investigation of Soil Improvement Methods in Settlement Issues of Spoil Materials from Lignite Mines

ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ, Α.Γ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΚΕΤΑ
ΘΕΟΧΑΡΗΣ, Α.Ι. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΚΕΤΑ
ΤΣΙΑΓΚΑΣ, Δ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΚΕΤΑ
ΚΟΥΚΟΥΖΑΣ, Ν.Κ. Γεωλόγος, Διευθυντής Ερευνών, ΕΚΕΤΑ
ΖΕΥΓΩΛΗΣ, Ι.Ε. Μεταλλειολόγος-Μεταλλουργός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Εξετάζεται η απόκριση μιας μεγάλης απόθεσης εδαφικών στείρων λιγνιτωρυχείων ως έδαφος θεμελίωσης τυπικού επιχώματος. Λόγω της μεγάλης συμπιεστότητας των στείρων και με σκοπό τον περιορισμό των μεγάλων καθιζήσεων αναλύθηκε η επίδραση τριών μεθόδων βελτίωσης του εδάφους: δυναμική συμπύκνωση, χαλικοπάσσαλοι και βαθιά εδαφική ανάμειξη με χρήση ιπτάμενης τέφρας. Οι καθιζήσεις αναλύθηκαν με τη χρήση 2D πεπερασμένων στοιχείων υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και θεώρηση ξηρών εδαφικών συνθηκών. Χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, το Mohr-Coulomb και το Hardening Soil.

ABSTRACT : The response of a massive heap from lignite mines' spoils is being investigated when used as a foundation soil for a typical embankment. Due to the high compressibility of the spoil material and in order to limit large settlements, the effects of three soil improvement methods were analyzed: dynamic compaction, stone columns, and deep soil mixing using fly ash. The settlements were analyzed using 2D finite elements under plane strain conditions and assuming dry conditions. Two constitutive models were employed, the Mohr-Coulomb and the Hardening Soil.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιφανειακή εξόρυξη λιγνίτη (και γενικότερα άνθρακα) για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, προκαλεί τον σχηματισμό μεγάλων και βαθιών εκσκαφών και τεράστιων σωρών από στείρα γεω-υλικά (που υπέρκεινται του λιγνίτη). Καθώς τα λιγνιτωρυχεία φτάνουν στο τέλος της λειτουργίας τους – στο πλαίσιο αντιμετώπισης της κλιματικής κρίσης – οι περιοχές αυτές καλούνται να αποκατασταθούν προς όφελος της κοινωνίας. Η αξιοποίηση των περιοχών εξόρυξης λιγνίτη και των σωρών στείρων είναι πλέον κοινωνική απαίτηση με την ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών στο πλαίσιο της αειφορίας. Κατά τη μετάβαση στη μετα-λιγνιτική εποχή, η αποτελεσματική αξιοποίηση αυτών των περιοχών αποτελεί διεθνώς προτεραιότητα, δημιουργώντας προκλήσεις προς τους μηχανικούς, τους ερευνητές και τις κοινωνίες. Σημαντικές τεχνικές προκλήσεις όσον αφορά στην αξιοποίηση των αποθέσεων στείρων υλικών αποτελούν η χαοτική και περίπλοκη δομή τους, τα εν γένει χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς και η μεγάλη μεταβλητότητα αυτών. Οι προκλήσεις αντικατοπτρίζονται σε αρκετές περιπτώσεις αστοχίας πρικών αποθέσεων στείρων παγκοσμίως, οδηγώντας συχνά σε περιβαλλοντικούς κινδύνους και προκαλώντας κοινωνική ανησυχία. Ένα μέρος των προκλήσεων αυτών μπορεί να αντιμετωπιστεί, ανάλογα την περίπτωση, με τη χρήση μεθόδων βελτίωσης εδάφους (Han, 2015).

Η παρούσα εργασία διερευνά αριθμητικά την επίδραση διαφορετικών μεθόδων βελτίωσης στην απόκριση ενός σωρού απόθεσης στείρων λιγνιτωρυχείων χαμηλής συμπίεστότητας. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η μείωση των αναμενόμενων καθιζήσεων λόγω εξωτερικής επιφόρτισης του σωρού. Θεωρήθηκε ότι ο σωρός απόθεσης αποτελεί τη βάση έδρασης ενός επιχώματος ύψους 4 m επί του οποίου πρόκειται να εδρασθεί γραμμικό τεχνικό έργο (π.χ. οδοποιία ή σιδηροδρομική γραμμή). Χρησιμοποιήθηκαν 2Δ πετρερασμένα στοιχεία και διερευνήθηκε η εφαρμογή των τριών ακόλουθων μεθόδων βελτίωσης εδάφους: δυναμική συμπίκνωση, χαλικοπάσσαλοι, και βαθιά ανάμιξη με ιπτάμενη τέφρα. Οι μέθοδοι αυτοί επιλέχθηκαν βάσει κριτηρίων που αφορούν την έκταση των στείρων και τα χαρακτηριστικά που αυτά παρουσιάζουν. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκε στην ανάλυση των καθιζήσεων και της απομείωσης τους λόγω της εδαφικής βελτίωσης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Ιδιότητες υλικών

Η Ελλάδα υπήρξε σημαντικός παραγωγός λιγνίτη, με τις βαθιές εκσκαφές των ορυχείων να οδηγούν στο σχηματισμό τεράστιων σωρών αποθέσεων. Οι Zengolis et al. (2021) περιέγραψαν εκτενώς τις συνθήκες και τις γεωτεχνικές ιδιότητες τυπικών στείρων υλικών εκσκαφής για μία ελληνική απόθεση. Μια σύντομη περιγραφή επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας και βασίζεται αποκλειστικά στην εν λόγω εργασία όπως και οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.

Ο σωρός απόθεσης αναπτύχθηκε από δύο γειτονικές εκσκαφές λιγνιτωρυχείων και έχει μέσο ύψος 170 m, μήκος 5 km, πλάτος 1,80-3,65 km στη βάση του και 0,4-2,1 km στην κορυφή του. Οι αρχικοί (πριν την εκσκαφή) εδαφικοί σχηματισμοί αναφέρονται σε μια παχιά ζώνη υπερκείμενων στείρων υλικών από μάργες και αργίλους και περιστασιακά μικρές ζώνες ασθενών κροκαλοπαγών και κορεσμένης άμμου. Το αντιπροσωπευτικό υλικό των στείρων είναι ιλύς υψηλής πλασιμότητας (MH κατά USCS) ενώ εμφανίζονται υλικά διαφόρων χαρακτηριστικών - από ιλυώδεις χάλικες μέχρι άργιλοι υψηλής πλασιμότητας - και το εξεταζόμενο υλικό παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια.

Λόγω της άναρχης δομής του υλικού και για να καταστεί εφικτή η ανάλυση, η παρούσα εργασία υιοθέτησε ένα ομοιόμορφο ομοιογενές εδαφικό υλικό. Η υπόθεση αυτή διερευνήθηκε σε βάθος από τους Zengolis et al. (2021), με βάση τα αποτελέσματα εκτεταμένων εργαστηριακών δοκιμών. Καθότι ο χαρακτηρισμός μιας στρωματογραφίας δεν είναι εφικτός, η απόθεση των στείρων εκφράστηκε από ένα ενιαίο υλικό με υψηλή μεταβλητότητα. Επιπλέον η εφαρμογή μεθόδων βελτίωσης γενικώς μειώνει και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του αρχικού εδάφους. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 1: Ιδιότητες στείρων, επιχώματος, στείρων μετά τη δυναμική συμπίκνωση, χαλικοπασσάλων και στείρων μετά την βαθιά ανάμιξη με ιπτάμενη τέφρα.

Table 1: Properties of spoil, embankment, spoil after dynamic compaction, stone columns and spoil after deep mixing.

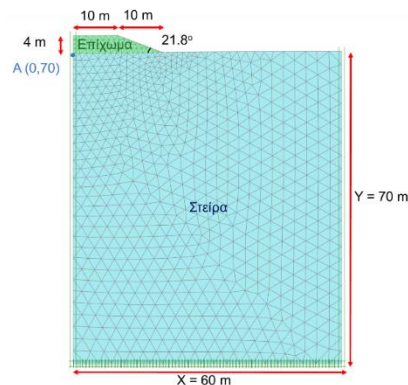
Εδαφικά στοιχεία	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	ν	Mohr-Coulomb		Hardening Soil	
					E (MPa)	$E_{50,ref} = E_{oed,ref}$ (MPa)	m	
Στείρα	16,9	25,2	17,6	0,3	5	5	0,5, 1	
Επίχωμα	20	35	1	0,2	15	15	0,5	
Στείρα–Δυναμική συμπίκνωση	16,9	25,2	17,6	0,3	10-30	10-30	0,5, 1	
Χαλικοπάσσαλοι	20	35	1	0,2	60	60	0,5, 1	
Στείρα–Βαθιά ανάμιξη	16,9	25,2	17,6	0,3	10-50	10-50	0,5, 1	

Για τις τιμές των παραμέτρων των στειρών υλικών υιοθετήθηκαν οι μέσες τιμές από τη μελέτη των Zengolis et al. (2021). Επιπλέον, η επίδραση των μεθόδων βελτίωσης στα στείρα υλικά βασίστηκε στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, καθώς αυτό έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση των καθιζήσεων, αφήνοντας άλλες παραμέτρους αμετάβλητες. Για το επίχωμα και τους χαλικοπασσάλους, χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές πυκνής άμμου και αμμοχάλικου αντίστοιχα. Ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων υπολογίστηκε από τη γνωστή σχέση του Jaky: $K_0=1-\sin\phi$ και ο συντελεστής διαστολής ψ ορίστηκε ως μηδέν για κάθε στοιχείο.

2.2 Αριθμητικά προσομοιώματα και μέθοδοι βελτίωσης εδαφών

Για την αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης των μεθόδων βελτίωσης στην απόκριση της απόθεσης στειρών λιγνιτωρυχείων θεωρήθηκε ότι η απόθεση αποτελεί τη βάση έδρασης ενός επιχώματος γραμμικού τεχνικού έργου. Για την ανάλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Plaxis, 2020) υπό 2Δ συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, λόγω της φύσης του προβλήματος, θεωρώντας ξηρές εδαφικές συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του προβλήματος. Η γεωμετρία του επιχώματος, το εδαφικό προσομοίωμα και η διακριτοποίηση με τριγωνικά στοιχεία 15 κόμβων και πολύ πυκνό κανάβο απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Θεωρήθηκε αμετακίνητο σύνορο στον πυθμένα του κανάβου και δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης στα κατακόρυφα σύνορα.

Για την εδαφική συμπεριφορά χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, το ελαστικό-τέλεια πλαστικό με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (MC) και το Hardening Soil (HS). Το επίχωμα θεωρήθηκε ότι έχει τις ιδιότητες μιας πυκνής άμμου (Πίνακας 1) με μία ελάχιστη συνοχή $c=1$ kPa και για αριθμητικούς λόγους. Το επιλεγμένο σημείο A στη μέση της βάσης του επιχώματος (Σχήμα 1) χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς για την εκτίμηση των καθιζήσεων. Τα αποτελέσματα εκφράζονται με τη χρήση του συντελεστή μείωσης των καθιζήσεων β , ο οποίος ισούται με τη καθίζηση του σημείου A λόγω φόρτισης του επιχώματος μετά την εφαρμογή μιας μεθόδου βελτίωσης προς την καθίζηση λόγω της ίδιας φόρτισης πριν την εφαρμογή της βελτίωσης.

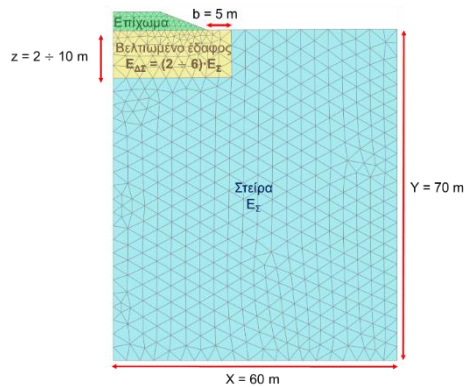


Σχήμα 1: Κανάβος πεπερασμένων στοιχείων αρχικού προσομοιώματος.

Figure 1: Finite element mesh of the initial model.

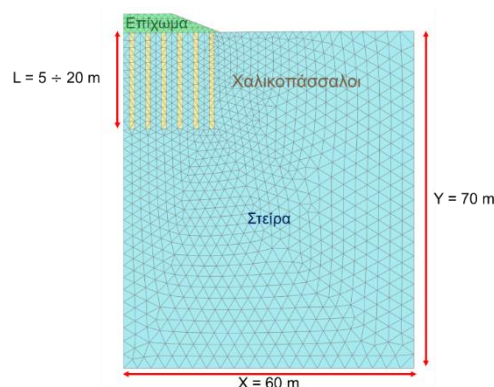
Η μέθοδος της δυναμικής συμπύκνωσης (ΔΣ) χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ομοιογένειας και των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους και είναι ιδιαίτερα αποδοτική για μεγάλες εκτάσεις (>5000 m²) (Han, 2015), χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική στην παρούσα περίπτωση. Ο βαθμός βελτίωσης της ΔΣ συνήθως καθορίζεται από επιτόπου δοκιμές πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου, όπως η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT) - με τον αριθμό N_{SPT} και η Δοκιμή Πρεσσιόμετρου (PM) - με την οριακή πίεση P_L ή το μέτρο ελαστικότητας κατά Menard E_M . Συνεπώς, η ποσοτικοποίηση της μεθόδου πραγματοποιήθηκε βασιζόμενη σε βιβλιογραφικά δεδομένα (π.χ. Tsitsas et al., 2015, Hamidi et al., 2012) από επιτόπου δοκιμές που έχουν εφαρμοστεί σε μαλακούς-συμπιεστούς εδαφικούς σχηματισμούς. Επίσης, βασίστηκε σε εμπειρικές συσχετίσεις του μέτρου

μονοδιάστατης συμπίεσης E_{oed} με τις παραμέτρους N_{SPT} (Sanglerat, 1972) και E_M (Techniques Louis Menard and Menard Inc, 1975) και λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμική σχέση μεταξύ του E_{oed} με το μέτρο ελαστικότητας (E). Τελικώς, το βάθος επιρροής της ΔΣ θεωρήθηκε από 2 έως 10 m επιτυγχάνοντας μία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των στείρων (E_τ) από 2 έως 6 φορές της αρχικής του τιμής (Σχήμα 2) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη οποιαδήποτε αύξηση της γωνίας τριβής (ϕ).



Σχήμα 2: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης δυναμικής συμπίκνωσης.
Figure 2: Finite element mesh for the dynamic compaction method simulation.

Η μέθοδος των χαλικοπασσάλων (ΧΠ) μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε μαλακά μη οργανικά λεπτόκοκκα εδάφη (αργίλους, ιλύες) και λεπτόκοκκες αργιλώδεις ή ιλυώδεις άμμους, όπως τα υπό εξέταση στείρα υλικά. Οι ΧΠ αναλύθηκαν με τη μορφή ισοδύναμων διαμήκων εδαφικών στηλών, καθώς χρησιμοποιήθηκαν 2Δ αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης, μια προσέγγιση η οποία απλοποιεί το πρόβλημα και αγνοεί την τρίτη διάσταση αλλά έχει χρησιμοποιηθεί κατά επανάληψη με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Castro, 2017). Η προσέγγιση αυτή υιοθετήθηκε χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη γεωμετρία ενός μεμονωμένου ΧΠ σε τρεις διαστάσεις και ένα τετραγωνικό πλέγμα της ομάδας ΧΠ. Οι παραμετρικές αναλύσεις υλοποιήθηκαν μεταβάλλοντας το μήκος L (Σχήμα 3) και τον λόγο αντικατάστασης της επιφάνειας a_r (το ποσοστό αντικατάστασης του εδάφους με το υλικό πλήρωσης των ΧΠ) από 0,1 έως 0,5. Το ισοδύναμο πλάτος των ΧΠ παρέμεινε σταθερό και ίσο με 1 m. Δεν χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας μεταξύ των ΧΠ και του περιβάλλοντος εδάφους, το οποίο συνάδει με τη συνήθη πρακτική (Castro, 2014). Για τις ιδιότητες των ΧΠ χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές πυκνού αμμοχάλικου (Πίνακας 1).



Σχήμα 3: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης χαλικοπασσάλων ($a_r = 0,3$).
Figure 3: Finite element mesh of stone columns simulation using $a_r = 0.3$.

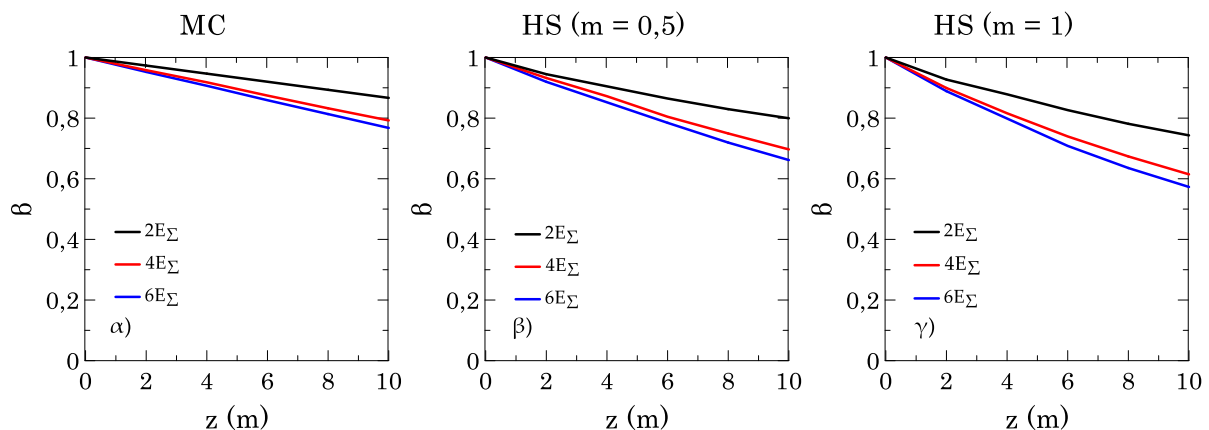
Η χρήση της βαθιά ανάμειξης με ιπτάμενη τέφρα (ΙΤ) ως πρόσθετο δομικό υλικό, εκτός από τη βελτίωση του εδάφους, μπορεί να αποτρέψει σοβαρά οικονομικά, χωροταξικά και

περιβαλλοντικά ζητήματα. Η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται στα λιγνιτωρυχεία της περιοχής της απόθεσης είναι κατηγορίας C (ASTM C618-93). Η ποσοτικοποίηση της μεθόδου βασίζεται στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μετά την ανάμιξη, υποθέτοντας σταθερή συνοχή. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της βασίστηκε σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βιβλιογραφίας που διεξήχθησαν σε αργιλικά και ιλυώδη δείγματα (π.χ. Mantikos, 2012, Yu et al., 2017) βελτιωμένα με ιπτάμενη τέφρα τύπου C. Τελικώς, συμπεραίνεται ότι αναμένεται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας (E_{IT}) του εδάφους από 2 έως 10 φορές. Η IT μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετά μεγάλα βάθη (έως και 40 m για συγκεκριμένες περιπτώσεις). Επιλέχθηκε να διερευνηθεί η επιρροή αυτής της μεθόδου για ελαφρώς μεγαλύτερα βάθη από αυτά των ΧΠ, 25 m αντί για 20 m. Η IT προσομοιώθηκε παρόμοια με τους ΧΠ, με κύριες διαφορές στο μέτρο ελαστικότητας και στη γεωμετρία της βελτιωμένης εδαφικής στήλης (μήκος μέχρι 25 m και σταθερό πλάτος ίσο με 0,8 m).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Δυναμική συμπίκνωση

Προτού, παρουσιαστεί η επίδραση των μεθόδων βελτίωσής, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι καθιζήσεις χωρίς βελτίωση αναμένονται να φτάσουν τα 0,52 m, 0,40 m και 0,29 m για MC, HS ($m=0,5$) και HS ($m=1$) αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή μείωσης των καθιζήσεων β συναρτήσει του βάθους επιρροής z της $\Delta\Sigma$, για 2 έως 6 φορές αύξηση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας και για τα δύο καταστατικά προσομοιώματα. Παρατηρείται μία ικανοποιητική μείωση των αρχικών καθιζήσεων μετά τη δυναμική συμπίκνωση η οποία για βάθος επιρροής $z = 10$ m ισούται με 13 - 23%, 20 - 34% και 26 - 43% για MC, HS ($m = 0,5$) και HS ($m = 1$) αντιστοίχως. Οι αναλύσεις με το καταστατικό προσομοίωμα HS προβλέπουν μεγαλύτερη μείωση των καθιζήσεων, δηλαδή μεγαλύτερη βελτίωση σε σχέση με το MC. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στην περίπτωση του MC, χρησιμοποιείται σταθερό μέτρο ελαστικότητας (E_{MC}), ενώ στο HS χρησιμοποιείται μεταβαλλόμενο μέτρο ελαστικότητας το οποίο αυξάνεται με την αύξηση των τάσεων, δηλαδή με το βάθος, παράλληλα λαμβάνοντας υπόψη ότι $E_{50,ref}=E_{MC}$. Επιπροσθέτως, για το HS ($m=1$) συγκριτικά με το HS ($m=0,5$), οι καθιζήσεις μειώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, λόγω του μέτρου ελαστικότητας, το οποίο αυξάνεται εντονότερα με το βάθος για μεγαλύτερο m . Αυτές οι παρατηρήσεις είναι κοινές και για τις επόμενες αναλύσεις των μεθόδων βελτίωσης εδαφών.



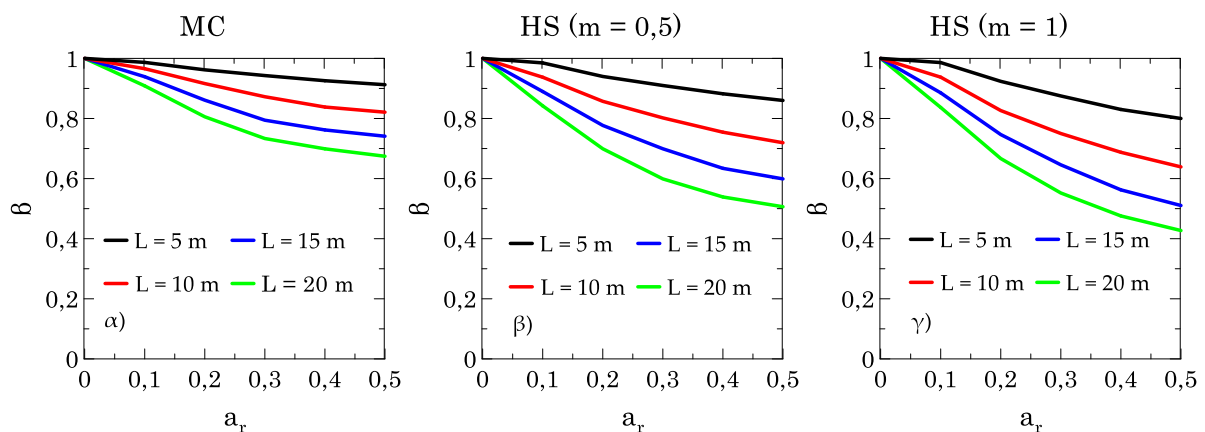
Σχήμα 4: Επίδραση του βάθους βελτίωσης z στη μείωση των τελικών καθιζήσεων (β) για 2-6 φορές αύξηση του E_z και για (α) MC, (β) HS ($m = 0,5$) και (γ) HS ($m=1$).
 Figure 4: Effect of the depth of improvement z on the decrease of the settlements (β) for 2-6 times of E_z increase, for (a) MC, (b) HS ($m=0.5$) and (c) HS ($m=1$).

Με το MC, ο συντελεστής μείωσης της καθίζησης β έχει μία τέλεια γραμμική σχέση με το βάθος επιρροής z (Σχήμα 4). Με το HS ($m=0,5$), επικρατεί η ίδια σχέση μόνο για $E_{\Delta z} \geq 4E_z$. Αντιθέτως,

για HS ($m=1$), ο συντελεστής μείωσης της καθίζησης β μειώνεται περίπου εκθετικά με την αύξηση του βάθους επιρροής z . Επιπλέον, ο συντελεστής β εμφανίζει αμελητέα μεταβολή για τα εφαρμοσμένα καταστατικά προσομοιώματα για μικρά βάθη επιρροής ($z < 4$ m) και για μικρή αύξηση του $E_{\Delta\Sigma}$ ($E_{\Delta\Sigma} \leq 2E_{\Sigma}$). Καθώς αυξάνεται το $E_{\Delta\Sigma}$ και το z , παρατηρείται σημαντική μείωση των καθιζήσεων, ενώ όταν πια $E_{\Delta\Sigma} > 4E_{\Sigma}$, παρατηρούνται αμελητέες διαφορές.

3.2 Χαλικοπάσσαλοι

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η επιρροή του ποσοστού αντικατάστασης a_r στο βαθμό μείωσης των καθιζήσεων β για διάφορα μήκη L . Όπως και στην περίπτωση της $\Delta\Sigma$, παρατηρούνται μεγαλύτερες μειώσεις καθιζήσεων για HS ($m=1$) σε σχέση με το HS ($m=0,5$) και στο HS (ανεξαρτήτως m) σε σχέση με το MC. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μία ικανοποιητική μείωση των αρχικών καθιζήσεων για $a_r = 0,5$ και μήκη χαλικοπασσάλων $L = 10 - 20$ m κατά 18 - 33%, 28 - 49% και 36 - 57% για MC, HS ($m = 0,5$) και HS ($m = 1$) αντιστοίχως. Αντιθέτως, όταν $L = 5$ m προκύπτει σχεδόν αμελητέα βελτίωση, κυρίως για MC και HS ($m=0,5$), όπου η μείωση των καθιζήσεων φτάνει 10% περίπου.



Σχήμα 5: Επιρροή του a_r στο βαθμό μείωσης του β για τις διάφορες τιμές του μήκους των χαλικοπασσάλων με το (α) MC, (β) HS ($m = 0,5$) και (γ) HS ($m = 1$).

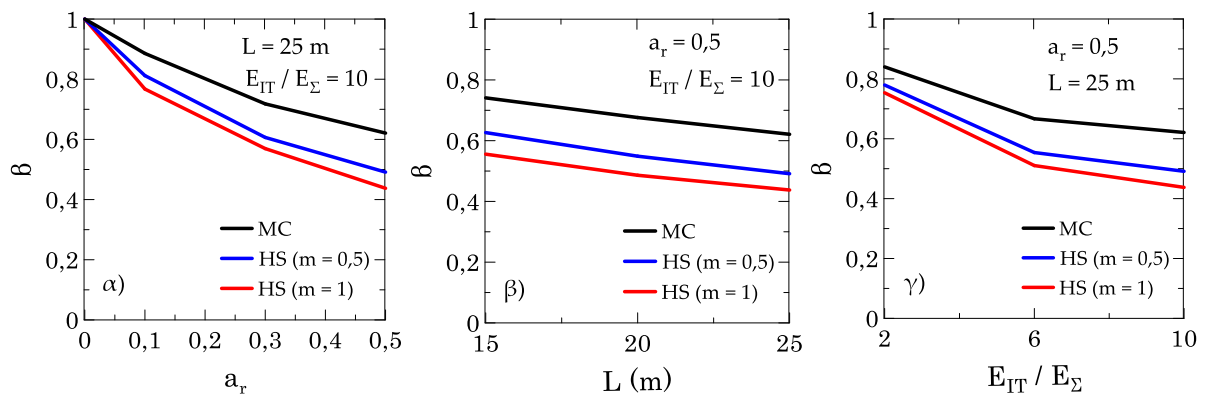
Figure 5: Effect of a_r on the decrease of β for the several lengths L of the stone columns with (a) MC, (b) HS ($m=0.5$) and (c) HS ($m=1$).

Ο συντελεστής β μειώνεται περίπου εκθετικά με την αύξηση του a_r , καθώς η αύξηση του δεν αυξάνει μόνο τη μέση δυσκαμψία του υπεδάφους αλλά συμβάλλει και στη μείωση των πλαστικών παραμορφώσεων (Castro, 2014). Παρατηρείται ότι το μήκος των ΧΠ δεν έχει φτάσει στη κρίσιμη τιμή του, δηλαδή όσο αυξάνεται το μήκος (μέχρι και τα 20 m) συνεχίζει να επιδρά σημαντικά στη μείωση των καθιζήσεων. Επιπλέον, το ποσοστό αντικατάστασης $a_r = 0,1$ δεν προσδίδει κάποια βελτίωση ($\beta \approx 1$) για κάθε εφαρμοστέο καταστατικό προσομοίωμα. Τέλος, για $a_r=0,1$ ο συντελεστής μείωσης β είναι παρόμοιος για HS ($m=0,5$) και HS ($m=1$). Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το a_r , οι τιμές του συντελεστή μείωσης διαφέρουν.

3.3 Βαθιά ανάμειξη με ιπτάμενη τέφρα

Το Σχήμα 6 παρουσιάζει την επίδραση τριών παραμέτρων: του λόγου αντικατάστασης της επιφάνειας a_r , του μήκους L της βελτιωμένης εδαφικής στήλης και του λόγου των μέτρων ελαστικότητας E_{IT}/E_{Σ} (πριν και μετά την IT) στον βαθμό μείωσης των καθιζήσεων. Και οι τρεις παράμετροι εμφανίζουν σημαντική επίδραση στη μείωση των καθιζήσεων. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6β, υπάρχει υψηλή μείωση των καθιζήσεων για τη περίπτωση $E_{IT}/E_{\Sigma}=10$ με $a_r=0,5$ και $L=15 - 25$ m, κατά 26 - 38% για το MC, 37 - 51% για το HS ($m=0,5$) και 44 - 56% για το HS ($m=1$). Για την περίπτωση $a_r=0,5$ με $L=25$ m και $E_{IT}/E_{\Sigma}=2 - 10$ (Σχήμα

6γ), η μείωση κυμαίνεται 16 - 38% για το MC, 22 - 51% για το HS (m=0,5) και 25 - 56% για το HS (m=1).



Σχήμα 6: Σύγκριση των MC, HS (m = 0,5) και HS (m = 1) όσον αφορά τον συντελεστή μείωσης των καθιζήσεων β ως συνάρτηση του (α) a_r , (β) L και (γ) E_{IT}/E_{Σ} .

Figure 6: Comparison of M-C, HS (m = 0.5) and HS (m = 1) concerning the settlement reduction factor β as a function of (a) a_r , (b) L and (c) E_{IT}/E_{Σ} .

Η αύξηση του λόγου a_r (Σχήμα 6α) οδηγεί σε μια περίπου εκθετική μείωση του συντελεστή μείωσης της καθίζησης β , όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων (ενότητα 3.1). Η ίδια τύπου σχέση (εκθετική μείωση) εμφανίζεται και μεταξύ του λόγου E_{IT}/E_{Σ} και του συντελεστή β . Η εκθετική σχέση, στην περίπτωση αυτή, εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη την κοινή μεταβολή των αποκλινοσών τάσεων με τις παραμορφώσεις. Αυξάνοντας κάθε φορά το μέτρο ελαστικότητας, αναπτύσσονται μικρότερες μεταβολές στις παραμορφώσεις. Επιπλέον, η αύξηση του λόγου E_{IT}/E_{Σ} , ειδικά για $E_{IT}/E_{\Sigma} \geq 6$ δεν προκαλεί διαφορές στο β . Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ότι όταν $E_{IT}/E_{\Sigma} = 6$ καμία περαιτέρω αύξηση δεν είναι ωφέλιμη.

Το Σχήμα 6β παρουσιάζει τη μεταβολή του συντελεστή μείωσης β με το μήκος L . Παρουσιάζεται μια γραμμική σχέση από 15 m έως 25 m. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος L δεν έχει φθάσει στην κρίσιμη τιμή του, κατά την οποία οι εδαφικές στήλες που έχουν αναμειχθεί με IT συμπεριφέρονται ως σταθεροί πάσσαλοι (end-bearing columns). Παρόλο που με την IT το έδαφος ενισχύεται 5 m βαθύτερα σε σχέση με τους ΧΠ, τα αποτελέσματα (Σχήμα 5 και Σχήμα 6) στη μείωση των καθιζήσεων, συγκρίνοντας τη μέγιστη επίδραση της κάθε μεθόδου στο πλαίσιο εφαρμογής της παρούσας μελέτης ($L=20$ m με $a_r=0,5$ για τους ΧΠ και $L=25$ m με $a_r=0,5$ για την IT), είναι αρκετά παρόμοια, επιτυγχάνοντας σχεδόν 60% μείωση των αρχικών καθιζήσεων.

Η διαφορά του συντελεστή β μεταξύ HS (m=1) και HS (m=0,5) είναι σχετικά σταθερή για ένα εύρος $a_r=0,1-0,5$ (Σχήμα 6α), αντίθετα με ότι παρατηρείται για τους ΧΠ (Σχήμα 5). Οι δύο αυτές περιπτώσεις, ΧΠ και IT, διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία (διάμετρος εδαφικών στηλών), τις μηχανικές ιδιότητες (συνοχή, γωνία τριβής, μέτρο ελαστικότητας) και το ειδικό βάρος. Το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων στην προκειμένη περίπτωση είναι η διάμετρος των εδαφικών στηλών και κατ' επέκταση η συνολική γεωμετρία της ομάδας εδαφικών στηλών, δηλαδή ο αριθμός και κατανομή τους στο χώρο σε σχέση με το επίχωμα για ένα δεδομένο a_r .

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην απόκριση αποθέσεων στείρων λιγνιτωρυχείων οι οποίες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της μετάβασης στη μετα-λιγνιτική εποχή. Ειδικότερα, εξετάστηκε η θεμελίωση ενός τυπικού επίχωματος 4 m σε σωρό στείρων λιγνιτωρυχείων, η οποία αποτελεί πρόκληση λόγω της υψηλής συμπίεστικότητας των υλικών της απόθεσης. Διερευνήθηκε αριθμητικά η επίδραση στις καθιζήσεις τριών μεθόδων βελτίωσης του εδάφους: δυναμική συμπίκνωση ($\Delta\Sigma$), χαλικοπάσσαλοι (ΧΠ) και βαθιά ανάμιξη με ιπτάμενη τέφρα (IT).

Επιπλέον, εξετάστηκαν οι διαφορές δύο συνήθων καταστατικών προσομοιωμάτων, δηλαδή Mohr-Coulomb (MC) και Hardening Soil (HS). Στις εδαφικές στήλες βελτίωσης του εδάφους (χαλικοπάσσαλοι και ιπτάμενη τέφρα), ο συντελεστής καθίζησης β μειώνεται περίπου εκθετικά με τον λόγο της επιφάνειας αντικατάστασης a . Για τη μέθοδο των ΧΠ και της ΙΤ, το μήκος των εδαφικών στηλών ενίσχυσης δεν φτάνει στο κρίσιμο όριο για τα εφαρμοστέα βάθη (έως 20 m και 25 m αντίστοιχα) και για τα δύο καταστατικά προσομοιώματα.

Συγκρίνοντας τα καταστατικά προσομοιώματα, το MC έχει αμελητέες διαφορές με το HS για τα μικρότερα βάθη βελτίωσης. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, εμφανίζονται σημαντικές διαφορές, με το MC να εμφανίζει μικρότερη μείωση των καθιζήσεων από το HS, αποτελώντας μία πιο συντηρητική προσέγγιση. Αυτό οφείλεται στο ότι στο MC το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό, ενώ στο HS το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με το βάθος.

Συνολικά, τα εξεταζόμενα στείρα υλικά εμφανίζουν μεγάλες καθιζήσεις λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας. Στην παρούσα μελέτη, και οι τρεις μέθοδοι βελτίωσης οδηγούν σε σημαντική μείωση των καθιζήσεων (40 – 60% περίπου). Στη περίπτωση εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων βελτίωσης με τον τρόπο που έχουν προσομοιωθεί στη μελέτη αυτή, για την επίτευξη μέγιστης μείωσης καθιζήσεων, συνιστάται η χρήση είτε των ΧΠ είτε της ΙΤ, οι οποίες προβλέπεται να δώσουν σχεδόν 60% μείωση των καθιζήσεων, έναντι της ΔΣ η οποία ενδέχεται να δώσει έως και 40%.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα για την παρούσα εργασία έχει χρηματοδοτηθεί από το Research Fund for Coal and Steel (RFCS) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο πλαίσιο του έργου SUMAD με αριθμό G.A. 847227 και του έργου POMHAZ με αριθμό G.A. 101057326.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Castro, J. 2014. Numerical modelling of stone columns beneath a rigid footing. *Computers and Geotechnics*, 60, 77-87.
- Castro, J. 2017. Modeling Stone Columns. *Materials*, 10, 782.
- Hamidi, B., Nikraz, H. & Varaksin, S. The application of dynamic compaction on Marjan Island. *Proceedings of the 11th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics (ANZ 2012)*, 2012. The Australian Geomechanical Society and New Zealand Geotechnical Society, 1202-1207.
- Han, J. 2015. *Principles and practice of ground improvement*, John Wiley & Sons.
- Mantikos, B. 2012. Experimental investigation of the mixing of pozzolanic fly ash on the behaviour of sterile deposits (in Greek). Ph.D. diss., National Technical University of Athens.
- Plaxis 2020. 2D finite element geotechnical analysis software. Connect Edition V20.3. Ireland: Bentley Systems.
- Sanglerat, G. 1972. *The Penetrometer and Soil Exploration: Interpretation of Penetration Diagrams - Theory and Practice*, Elsevier Publishing Company.
- Techniques Louis Menard & Menard Inc 1975. *The Menard Pressuremeter: Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design*, Techniques Louis Menard.
- Tsitsas, G., Dimitriadi, V., Zekkos, D., Dumitru, M., Ciortan, R. & Manea, S. 2015. Dynamic compaction of collapsible soils – case study from a motorway project in Romania. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*.
- Yu, H., Yin, J., Soleimanbeigi, A. & Likos, W. J. 2017. Effects of Curing Time and Fly Ash Content on Properties of Stabilized Dredged Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, 04017199.
- Zevgolis, I. E., Theocharis, A. I., Deliveris, A. V., Koukoulas, N. C., Roumpos, C. & Marshall, A. M. 2021. Geotechnical Characterization of Fine-Grained Spoil Material from Surface Coal Mines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147, 04021050.