

Αβεβαιότητα γεωτεχνικών παραμέτρων σε ετερογενείς αποθέσεις λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών από λιγνιτωρυχεία

Uncertainty of geotechnical parameters in heterogeneous spoil deposits of fine-grained soil materials from lignite mines

ΘΕΟΧΑΡΗΣ, Α.Ι. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
ΖΕΥΓΩΛΗΣ, Ι.Ε. Μεταλλειολόγος - Μεταλλουργός Μηχανικός, Αν. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΡΟΥΜΠΟΣ, Χ. Μεταλλειολόγος - Μεταλλουργός Μηχανικός, Δ.Ε.Η.
ΚΟΥΚΟΥΖΑΣ, Ν.Κ. Γεωλόγος, Διευθυντής Ερευνών, Ε.Κ.Ε.Τ.Α.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό στείρων από ελληνικά λιγνιτωρυχεία με έμφαση στη στατιστική ανάλυση, στις πιθανοτικές κατανομές και στη χωρική μεταβλητότητα των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων. Οργανώθηκε και αξιολογήθηκε μια βάση δεδομένων με τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και παρέχονται οι μέσες, διάμεσες και χαρακτηριστικές τιμές και οι συντελεστές διακύμανσης. Επιπλέον, οι γεωτεχνικές παράμετροι αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της κατάλληλης στατιστικής κατανομής. Τέλος, ποσοτικοποιήθηκε η χωρική μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των στείρων και προέκυψε η κλίμακα διακύμανσης για την κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση.

ABSTRACT: This work focuses on the geotechnical characterization of spoil materials from Greek lignite mines and presents the statistical analysis, the probabilistic distributions and the spatial variability of their basic engineering properties. A database of laboratory test results was established, and the mean, median and characteristic values and coefficients of variation are provided. In addition, the geotechnical properties were analyzed to determine the appropriate statistical distribution. Finally, the spatial variability of the spoils' properties was quantified and the scale of variation for the vertical and horizontal directions was obtained.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξόρυξη άνθρακα αποτελεί μια μεγάλη και σημαντική βιομηχανία. Κατά τη διαδικασία αυτή τεράστιες ποσότητες υπερκείμενων υλικών - πάνω από 1 δισεκατομμύριο τόνοι ετησίως (Bian et al., 2012) - εκσκάπτονται με σκοπό την πρόσβαση στα κοιτάσματα άνθρακα. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται ως στείρα ή άγονα και απορρίπτονται σε ογκώδεις αποθέσεις, συχνά χωρίς επεξεργασία ή μελέτη για μελλοντική αξιοποίηση. Η βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων γενικώς και των στείρων ειδικώς αποτελεί παγκόσμια προτεραιότητα με στόχο την κατάλληλη αξιοποίησή τους. Οι αποθέσεις στείρων αποτελούνται από ένα εδαφικό μίγμα με αξιοσημείωτα υψηλή ετερογένεια και μεταβλητότητα στις ιδιότητες του. Ως εκ τούτου τα στείρα υλικά δεν υπόκεινται σε τυποποιημένες για εδαφικούς σχηματισμούς μεθόδους αξιολόγησης και οι συνήθεις γεωτεχνικές πρακτικές πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή.

Οι Masoudian et al. (2019) παρουσίασαν μια συστηματική επισκόπηση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων αρκετών ευρωπαϊκών αποθέσεων στείρων λιγνιτωρυχείων και υπογράμμισαν την αξιοσημείωτη μεταβλητότητα (αισθητά μεγαλύτερη από τα συνήθη εδάφη). Αυτή η ετερογένεια δεν επηρεάζεται μόνο από φυσικές - γεωλογικές διεργασίες, αλλά και (1) από τη μέθοδο μεταφοράς των υλικών της εκσκαφής (π.χ. με χρήση ταινιοδρόμων έναντι χωματοουργικών αυτοκινήτων), (2) τη μέθοδο απόθεσης (π.χ. με οπισθοπορεία και απόθεση σε υφιστάμενα πρηνή ή κατασκευή από κάτω προς τα πάνω δημιουργώντας αλλεπάλληλες οριζόντιες

στρώσεις), (3) τη διαφορετική προέλευση των εδαφών (π.χ. εάν προέρχονται από ένα ή περισσότερα ορυχεία με την ίδια ή διαφορετική γεωλογία), καθώς και (4) τη διάρκεια και τον χρονικό προγραμματισμό των διαφόρων σταδίων του μεταλλευτικού σχεδιασμού. Οι δυσκολίες και η γεωτεχνική αβεβαιότητα που συνοδεύει τις αποθέσεις στείρων υλικών αντικατοπτρίζονται σε αρκετά περιστατικά αστοχίας πρηνών.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό και συγκεκριμένα στην αβεβαιότητα των γεωτεχνικών παραμέτρων μιας μεγάλης απόθεσης στείρων στην Ελλάδα. Οργανώθηκε και αξιολογήθηκε μια βάση δεδομένων από διαθέσιμα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και παρέχονται βασικά στατιστικά στοιχεία. Επιπλέον, οι γεωτεχνικές παράμετροι αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της κατάλληλης κατανομής για την πιθανοτική περιγραφή τους. Τέλος, ποσοτικοποιήθηκε η χωρική μεταβλητότητα των παραμέτρων των στείρων και προέκυψε η κλίμακα διακύμανσης για την κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση. Απώτερος σκοπός των παραπάνω (στατιστική επεξεργασία, πιθανοτική περιγραφή και χωρική μεταβλητότητα) είναι η χρήση τους σε στοχαστικές αναλύσεις για την αξιολόγηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της απόθεσης.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Ελλάδα αποτέλεσε έναν από τους κορυφαίους παραγωγούς λιγνίτη στην Ευρώπη, ενώ έχει εισέλθει σε φάση περάτωσης της λιγνιτοπαραγωγής με εξόρυξη 12,1 εκατομμύρια τόνων το 2021 (Euracoal, 2022). Στη βορειοδυτική Ελλάδα έχουν αναπτυχθεί αρκετά μεγάλα λιγνιτωρυχεία (συχνά βάθους 150-200 μ, με κλίση 10°-15°) και η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μία τεράστια απόθεση στείρων που δημιουργήθηκε από τέτοιες βαθιές εκσκαφές. Η απόθεση δημιουργήθηκε σε μια εξαντλημένη περιοχή εξόρυξης μεταξύ δύο επιφανειακών λιγνιτωρυχείων («Καρδιά» και «Νότιο Πεδίο»). Τα προφίλ του εδάφους στις εκσκαφές των ορυχείων αποτελούνται από μια παχιά ζώνη δεκάδων μέτρων υπερκειμένων (τεταρτογενείς αποθέσεις) που επικαλύπτουν τα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη (νεογενείς αποθέσεις). Τα υπερκείμενα (στείρα) υλικά αποτελούνται κυρίως από μάργες (κατάταξη ως ιλύες) και αργίλους και περιστασιακά από άμμους.

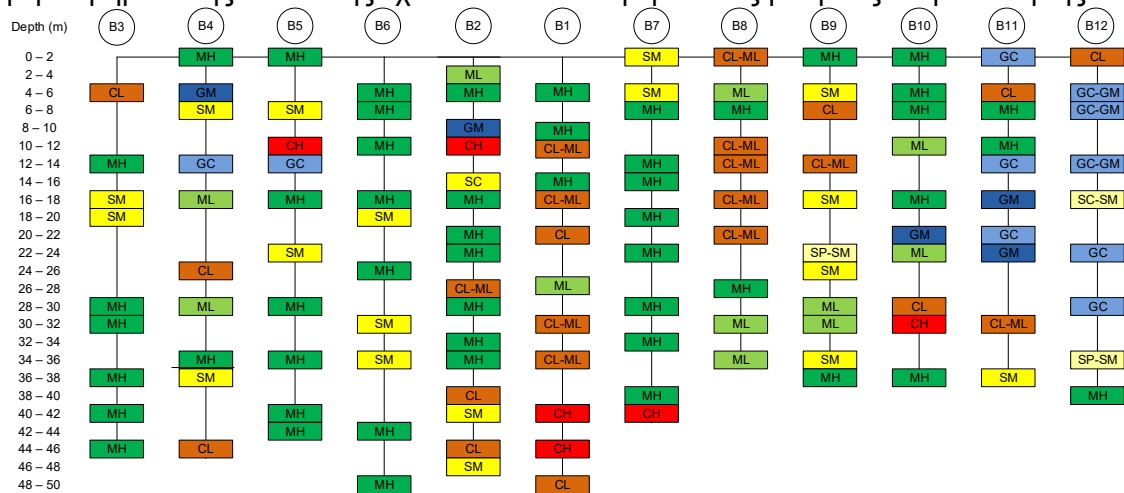
Η κατασκευή του σωρού απόθεσης ξεκίνησε το 1999. Το μέγιστο ύψος του σωρού επιτεύχθηκε το 2009 και έκτοτε έχει πραγματοποιηθεί μόνο πλευρική διεύρυνση. Ο σωρός έχει μήκος περίπου 5 km, πλάτος 0,4-2,1 km στην κορυφή, 1,8-3,65 km στη βάση και ύψος 150-170m. Το 2010 διεξήχθη εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα. Μεταξύ άλλων, η έρευνα περιλάμβανε δώδεκα δειγματοληπτικές γεωτρήσεις βάθους περίπου 40-50 m η καθεμία, κατά μήκος του άξονα απόθεσης. Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές και έγινε προσδιορισμός των ορίων Atterberg, μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων (ποσοστό υγρασίας, κορεσμένο βάρος, ειδικό βάρος) και αξιολόγηση μηχανικών ιδιοτήτων (δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, δοκιμές τριαξονικής θλίψης με μετρήσεις πίεσης πόρων και δοκιμές 1Δ στερεοποίησης). Στην παρούσα εργασία, τα δεδομένα από τις δοκιμές αυτές αναλύθηκαν συστηματικά για την αξιολόγηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της απόθεσης και συγκεκριμένα με σκοπό τη στατιστική επεξεργασία για την ποσοτικοποίηση της γεωτεχνικής αβεβαιότητας.

3. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η ταξινόμηση των στείρων υλικών σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS) σε βάθος και κατά μήκος του διαμήκους άξονα της εξεταζόμενης απόθεσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (Zevgolís et al., 2021). Εμφανίζονται πολλοί διαφορετικοί τύποι εδαφών σε μια χωρικά τυχαία διάταξη, που κυμαίνεται από χάλικες και άμμους έως ιλύες και αργίλους.

Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για τον εντοπισμό στρώσεων ανά τύπο εδάφους, ωστόσο στην προκειμένη περίπτωση δεν μπορεί να γίνει τέτοια διάκριση. Εξετάστηκαν με το βάθος και άλλες γεωτεχνικές παράμετροι (όπως επί τόπου μετρήσεις SPT, η γωνία τριβής ϕ' και η συνοχή c' , η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) χωρίς όμως να παρουσιάζεται καμία σαφής εδαφική δομή (Zevgolís et al., 2021). Εξάλλου και οι μέθοδοι δημιουργίας της απόθεσης υποδηλώνουν ένα άναρχο εδαφικό μίγμα. Τα στείρα υλικά

μεταφέρθηκαν στον χώρο απόρριψης πρωτίστως με συνεχή (μεταφορικές ταινίες) και δευτερευόντως με ασυνεχή (φορητά) μέσα μεταφοράς. Αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές καταστάσεις του εδαφικού υλικού στη θέση απόθεσης. Επιπλέον, η μέθοδος απόρριψης δεν ήταν συστηματικά η ίδια και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές χρησιμοποιήθηκαν κατευθύνσεις απόρριψης από κάτω προς τα πάνω και από πάνω προς τα κάτω, ενώ η αρχική τοπογραφία δεν ήταν πάντα επίπεδη. Επιπλέον, η απόθεση δημιουργήθηκε από σείρα δύο διαφορετικών ορυχείων, γεγονός που υποδηλώνει διαφορετική προέλευση. Τέλος, συχνά η απόθεση μπορεί να έχει σταματήσει για λόγους που σχετίζονται με την παραγωγή του ορυχείου και να επανεκκίνησε μετά από μήνες ή και χρόνια. Συνεπώς διάφορα τμήματα της απόθεσης έχουν υποστεί διαφορετικούς βαθμούς στερεοποίησης.



Σχήμα 1: Χαρακτηρισμός των σείρων υλικών (USCS) κατά μήκος του άξονα της απόθεσης
 Figure 1: Classification of spoil material (USCS) along the longitudinal axis of the spoil heap

Όλα τα παραπάνω υποστηρίζουν περαιτέρω ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί μια γενική στρωματογραφία ή ένας χαρακτηρισμός με το βάθος. Δεδομένης της άναρχης δομής χρησιμοποιήθηκε η στατιστική επεξεργασία του σωρού απόθεσης θεωρώντας τα σείρα υλικά ως ενιαίο εδαφικό σχηματισμό με σημαντική εγγενή μεταβλητότητα. Έτσι, ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός και η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη ένα εδαφικό στρώμα. Σημειώνεται ότι η στατιστική επεξεργασία λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα των εδαφικών δειγμάτων που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις και τα οποία έγινε προσπάθεια να είναι αντιπροσωπευτικά των εδαφικών υλικών που εμφανίζονται. Με αυτό τον τρόπο και χωρίς μεγάλες αλλαγές στη γεωλογία των ορυχείων προέλευσης των σείρων και στον τρόπο απόθεσης, τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και για μελλοντικές αποθέσεις.

Η στατιστική ανάλυση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων που ακολουθεί χρησιμοποιεί κοινούς στατιστικούς ορισμούς. Οι κύριες παράμετροι είναι η μέση τιμή (μ) και η διάμεσος (m), η τυπική απόκλιση (σ) και ο συντελεστής διακύμανσης (COV), ενώ παρουσιάζονται επίσης οι ελάχιστες-μέγιστες τιμές και τα εύρη. Οι αναφερόμενες τιμές COV για φυσικά εδάφη μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία (e.g., Zevgolits et al., 2021, Tables S1 and S2). Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις στατιστικές παραμέτρους για τη γωνία τριβής (ϕ') και τη συνοχή (c') (προερχόμενες όλες από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές με στερεοποίηση και μέτρηση της πίεσης πόρων), τους δείκτες συμπίεσης (C_c) και επανασυμπίεσης (C_r), το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης (E_s) και τον συντελεστή διαπερατότητας (k). Αναφέρεται ότι η γωνία τριβής και η συνοχή εξετάστηκαν ανεξάρτητα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μεταξύ τους συσχέτιση.

Μια επισκόπηση της ταξινόμησης στο Σχήμα 1 δείχνει ότι τα λεπτόκοκκα υλικά καθορίζουν τη συνολική απόκριση. Συγκεκριμένα, 92 από τα 128 δείγματα (72%) χαρακτηρίστηκαν ως λεπτόκοκκα, εκ των οποίων 63 χαρακτηρίστηκαν ως ιλύες (52 MH και 11 ML), 11 ως αργιλικές ιλύες / ιλυώδεις άργιλοι (CL-ML) και 18 ως άργιλοι (12 CL και 6 CH). Στα υπόλοιπα δείγματα υπήρχε πάντα ένα σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών. Συμπεραίνεται ότι όλα τα δείγματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της στατιστικής αξιολόγησης της εκσκαφής, δεδομένου ότι όλα περιείχαν σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων. Σε κάθε

περίπτωση μια στατιστική ανάλυση με εξαίρεση των μη λεπτόκοκκων δειγμάτων (δεν παρουσιάζεται στο παρόν) έδειξε ότι τα αποτελέσματα ήταν πρακτικά τα ίδια, υποστηρίζοντας περαιτέρω την απόφαση να συμπεριληφθούν όλα τα δείγματα. Συγκεκριμένα, 74 από τα 128 δείγματα που εξετάστηκαν (57%) ταξινομήθηκαν ως ιλύες, με μέσες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων γενικά σε συμφωνία με ιλύες υψηλής πλασιμότητας.

Πίνακας 1: Παράμετροι αντοχής, συμπιεστότητας και διαπερατότητας της απόθεσης
Table 1: Strength, compressibility, and permeability parameters for the spoil heap

| Παράμετρος | ϕ' (°) | c' (kPa) | C_c (-) | C_r (-) | E_{s1} (MPa) $\Delta\sigma_v = 100$ - 200kPa | E_{s2} (MPa) $\Delta\sigma_v = 200$ - 400kPa | k (cm/s) $\sigma_v = 100$ kPa |
|------------|-------------|------------|-----------|-----------|--|--|------------------------------------|
| n | 43 | 43 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 |
| μ | 25.2 | 17.6 | 0.216 | 0.037 | 2.7 | 4.0 | $4.9 \cdot 10^{-7}$ |
| m | 26.7 | 11.7 | 0.194 | 0.037 | 2.4 | 3.5 | $3.0 \cdot 10^{-7}$ |
| X_k | 21.8 | 8.3 | 0.176 | 0.030 | 2.0 | 3.1 | $2.45 \cdot 10^{-7}$ |
| σ | 6.8 | 18.7 | 0.081 | 0.015 | 1.4 | 1.8 | $4.9 \cdot 10^{-7}$ |
| COV (%) | 27 | 106 | 38 | 41 | 51 | 45 | 99 |
| min | 8.2 | 0 | 0.064 | 0.013 | 1.0 | 1.7 | $1.2 \cdot 10^{-8}$ |
| max | 39.2 | 72.4 | 0.398 | 0.090 | 8.1 | 11.3 | $1.9 \cdot 10^{-6}$ |
| Εύρος | 31.0 | 72.4 | 0.334 | 0.077 | 7.1 | 9.6 | $0.6 \cdot 10^{-2}$ |

n: πληθυσμός, μ : μέση τιμή, m: διάμεσος, σ : τυπική απόκλιση, COV: συντελεστής διακύμανσης

4. ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

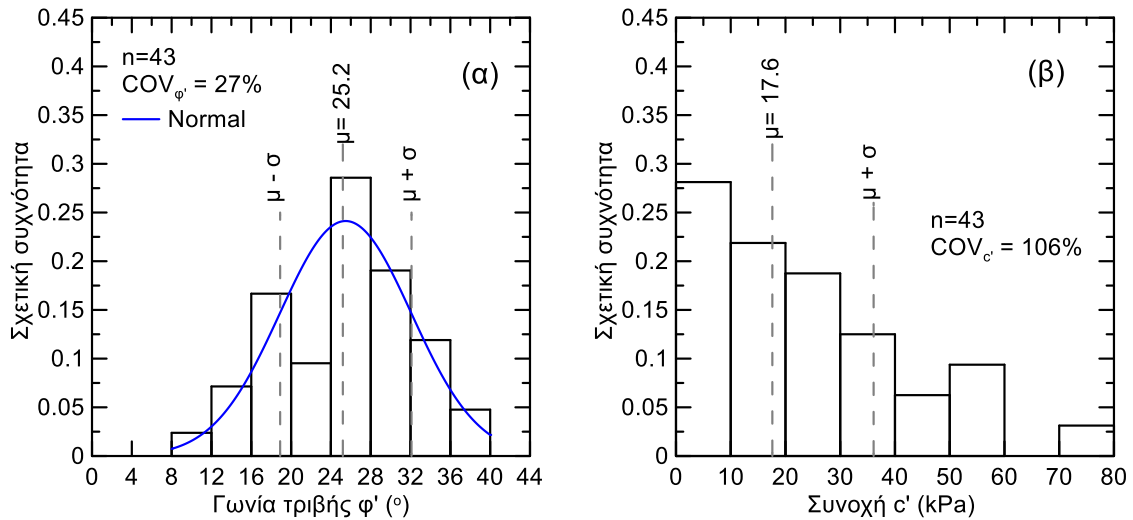
Μια κλασική γεωτεχνική ανάλυση λαμβάνοντας μία χαρακτηριστική τιμή για κάθε εδαφική ιδιότητα θα ήταν επαρκής για μια προκαταρκτική αξιολόγηση, αλλά ακατάλληλη για σχεδιασμό λόγω της σημαντικής ετερογένειας. Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση των κατάλληλων στατιστικών κατανομών. Συνήθως στη γεωτεχνική μηχανική χρησιμοποιούνται συνεχείς κατανομές, ενώ συνήθεις επιλογές αποτελούν η Student, η κανονική και η λογαριθμοκανονική κατανομή. Η κανονική και λογαριθμοκανονική κατανομή αποτελούν τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατανομές στην επιστήμη και τη μηχανική επειδή περιγράφουν με ακρίβεια διάφορα φυσικά φαινόμενα και μπορούν να υιοθετηθούν εύκολα και αποτελεσματικά σε πρακτικές εφαρμογές. Επίσης, είναι δυνατή η άμεση χρήση τους σε στοχαστικές αναλύσεις μεγάλου υπολογιστικού κόστους ενώ άλλες κατανομές (όπως η Student) μπορεί να προκαλέσει υπολογιστικά προβλήματα. Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση για την κανονική κατανομή (και δύο ισοδύναμες παράμετροι για τη λογαριθμοκανονική) καθορίζουν τη θέση και την αιχμή και αρκούν για τον ορισμό της. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ανάλυση μόνο για αυτές τις δύο κατανομές καθώς μπορούν να περιγράψουν με επάρκεια τις βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους, εκτός από την ειδική περίπτωση της συνοχής.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα για τις παραμέτρους αντοχής (γωνία τριβής και συνοχή) και στο Σχήμα 3 για τους δείκτες συμπίεσης και επανασυμπίεσης. Δύο βήματα τάσεων χρησιμοποιήθηκαν για το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης 100-200 kPa και 200-400 kPa που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4, οι αντίστοιχοι συντελεστές ονομάστηκαν E_{s1} και E_{s2} .

Η γωνία τριβής κυμαίνεται από 8.2° έως 39.2° ενώ η κατανομή είναι περίπου συμμετρική με πτώση της σχετικής συχνότητας για τις γωνίες 20°-24°. Η κανονική κατανομή μπορεί να περιγράψει επαρκώς τα αποτελέσματα και η πτώση πιθανώς επηρεάζεται από το περιορισμένο μέγεθος των δεδομένων.

Η συνοχή παρουσιάζει μια ασυνήθιστη κατανομή με αρκετά δείγματα να έχουν πολύ χαμηλή ή μηδενική συνοχή. Ταυτόχρονα, παρουσιάζει μια μακριά ουρά μέχρι τα 80 kPa. Ο συντελεστής μεταβλητότητας $COV_c=105\%$ ποσοτικοποιεί επίσης αυτή την ιδιόμορφη συμπεριφορά καθώς για συνήθη εδαφικά υλικά κυμαίνεται μέχρι 70% σε ακραίες περιπτώσεις.

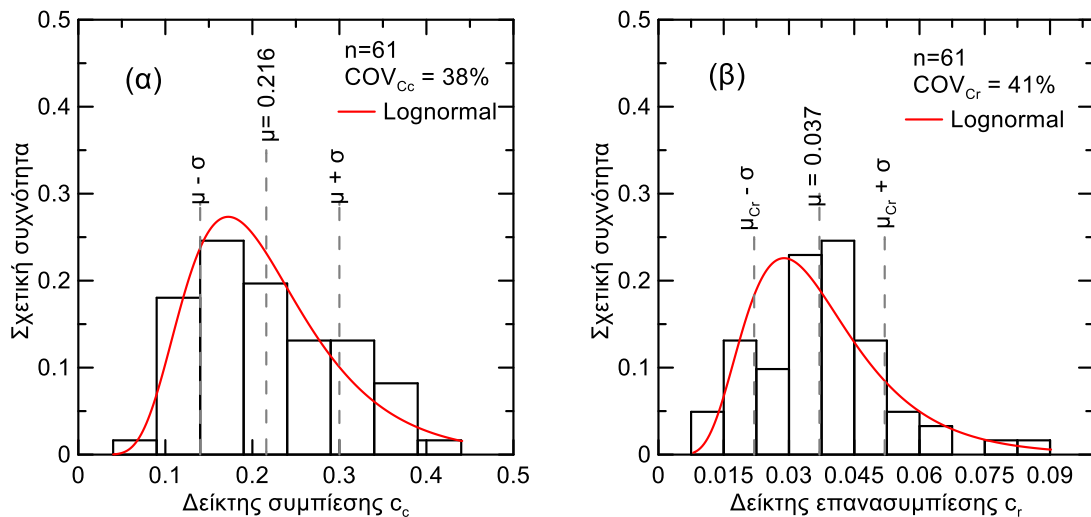
Συνεπώς είναι σαφές ότι η ετερογένεια των στειρών προτείνει μία σημαντικά υψηλότερη μεταβλητότητα της συνοχής. Να σχολιαστεί πως η ετερογένεια του υλικού επηρεάζει τα στατιστικά μεγέθη της.



Σχήμα 2: Ιστογράμματα και κατανομές για (α) τη γωνία τριβής ϕ' και (β) τη συνοχή c' των στειρών υλικών

Figure 2: Histograms and distributions for (a) the effective friction angle ϕ' and (b) the effective cohesion c'

Καμία συνήθης κατανομή δεν επαρκεί για την περιγραφή της συνοχής για την οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κατανομές ακραίων τιμών σε άλλες εργασίες (π.χ. κατανομή Gumbel), αλλά ακόμη και αυτές στην προκειμένη περίπτωση δεν ήταν κατάλληλες. Σημειώνεται ότι δεν ήταν δυνατή η συσχέτιση μεταξύ της συνοχής και της γωνίας τριβής. Κατά συνέπεια, η στοχαστική θεώρηση της συνοχής απαιτεί εξαιρετική προσοχή λόγω της αβεβαιότητας οποιασδήποτε εφαρμοζόμενης κατανομής.

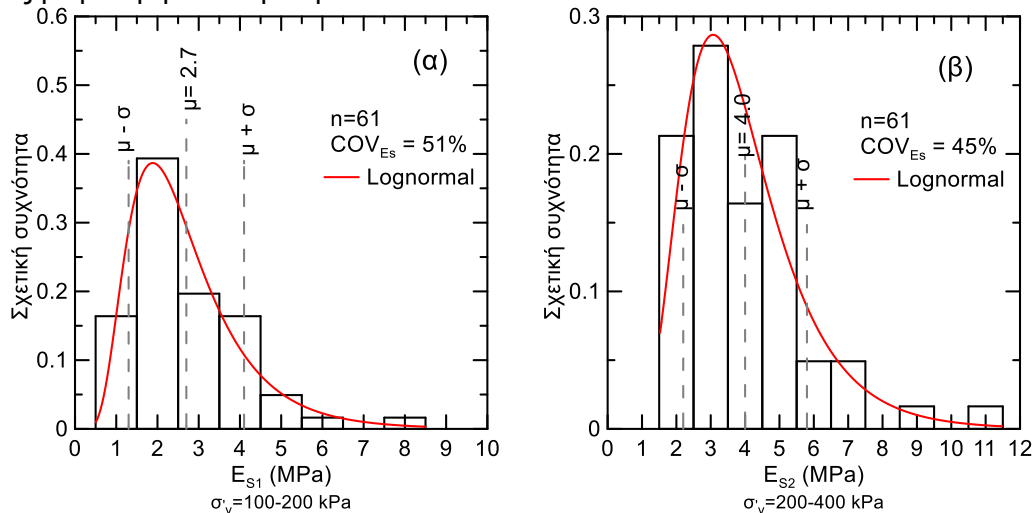


Σχήμα 3: Ιστογράμματα και κατανομές για τους δείκτες (α) συμπίεσης και (β) επανασυμπίεσης των στειρών υλικών

Figure 3: Histograms and distributions for (a) the compression and (b) the recompression indices of the spoil

Μια εναλλακτική προσέγγιση θα ήταν η χρήση παραμετρικής ανάλυσης με βάση τη μηδενική συνοχή ως συντηρητική επιλογή - καθώς αρκετά αποτελέσματα έδειξαν αυτή τη συμπεριφορά - και προς τη μέση τιμή των 17.6 kPa. Μια βιώσιμη σχεδιαστική λύση θα ήταν η

χρήση μιας χαρακτηριστικής τιμής συνοχής (παράλληλα με την πιθανοτική κατανομή για τη γωνία τριβής) ως η καλύτερη εκτίμηση του στατιστικού μέσου. Η μέση τιμή της συνοχής είναι 17.6 kPa, η διάμεσος 11.7 kPa και η τυπική απόκλιση 18.7 kPa με πληθυσμό 43 δειγμάτων. Με βάση τον Schneider (1997) ο στατιστικός συντελεστής για την περίπτωση αυτή με βάση την κατανομή Student είναι 0.39 και η χαρακτηριστική τιμή $17.6 \cdot 0.39 \cdot 18.7 = 10.3$ kPa, δηλαδή ελαφρώς μικρότερη από τη διάμεσο.



Σχήμα 4: Ιστογράμματα και κατανομές για το μέτρο 1Δ συμπίεσης των στείρων για δύο βήματα ενεργού τάσης

Figure 4: Histograms and distributions for the 1D compression modulus of the spoil for two effective stress increments

Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται οι δείκτες συμπίεσης και επανασυμπίεσης. Ο δείκτης συμπίεσης κυμαίνεται από 0.05 έως 0.4, παρουσιάζει πολύ χαμηλές συχνότητες σε χαμηλές τιμές, αλλά μεταβάλλεται γρήγορα, ενώ σε υψηλότερες τιμές σχηματίζει σημαντική ουρά. Η διάμεσος είναι υψηλότερη από τη μέση τιμή, οδηγώντας σε ένα ιστόγραμμα με θετική ασυμμετρία (οι περισσότερες παρατηρήσεις βρίσκονται δεξιά της κορυφής). Η λογαριθμοκανονική κατανομή περιγράφει επαρκώς το ιστόγραμμα αποτυπώνοντας πολύ καλά το κέντρο και τις ουρές. Το ιστόγραμμα του δείκτη επανασυμπίεσης εμφανίζει ορισμένες ιδιαιτερότητες, όπως ένα κενό στο διάστημα 0.0675-0.075, το οποίο πιθανώς οφείλεται στον μικρό πληθυσμό των δεδομένων. Η λογαριθμοκανονική κατανομή κρίνεται επαρκής παρότι και άλλες κατανομές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Δύο βήματα τάσεων χρησιμοποιήθηκαν για το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης (Σχήμα 4). Η λογαριθμοκανονική κατανομή ταιριάζει με αρκετή ακρίβεια ενώ καθώς αυξάνεται η τάση, ο συντελεστής διακύμανσης μειώνεται ελαφρώς.

5. ΧΩΡΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΣΤΕΙΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Αφού περιγράφηκαν οι κατάλληλες κατανομές, ακολουθεί ο χωρικός χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των στείρων. Η χωρική μεταβλητότητα των γεωτεχνικών ιδιοτήτων μπορεί να είναι κρίσιμη για την ανάλυση αξιοπιστίας και την αξιολόγηση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής. Η αποκατάσταση των αποθέσεων στείρων σχετίζεται άμεσα με τη χωρική μεταβλητότητά τους και η ακριβής περιγραφή τους μπορεί να οδηγήσει σε καταλληλότερη κατανόηση, προσομοίωση και σχεδιασμό. Χαρακτηριστικά προβλήματα που σχετίζονται με την αποκατάσταση και μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από τη χωρική μεταβλητότητα είναι η ευστάθεια πρανών, οι καθιζήσεις σιδηροδρομικών ή οδικών επιχωμάτων και κτηρίων, καθώς και η κατασκευή και λειτουργία συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο χαρακτηρισμός της χωρικής μεταβλητότητας γίνεται συνήθως με την κλίμακα διακύμανσης - ΚΔ (Scale of Fluctuation) (Vanmarcke, 1984, Vanmarcke, 1977) ή εναλλακτικά το μήκος συσχέτισης (correlation length). Κάτω από την απόσταση της ΚΔ, οι ιδιότητες των εδαφών επιδεικνύουν μια αρκετά ισχυρή εξάρτηση. Συνεπώς, οι μικρές ΚΔ αντιστοιχούν σε ταχείες

διακυμάνσεις, ενώ οι μεγάλες παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση σε μεγάλες αποστάσεις (Bong and Stuedlein, 2017, Stuedlein et al., 2012).

Η παρούσα ενότητα αποσκοπεί στον χαρακτηρισμό της χωρικής μεταβλητότητας μέσω της ποσοτικοποίησης της κλίμακας διακύμανσης. Για κάθε γεωτεχνική παράμετρο, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές αναλύσεων σε δύο κάθετες διευθύνσεις, την κατακόρυφη και την οριζόντια. Υπολογίστηκαν τα δύο ημιβαριογράμματα και οι σχετικές κλίμακες διακύμανσης. Περισσότερες λεπτομέρειες επί της μεθοδολογίας υπολογισμού μπορούν να βρεθούν στο Theocharis et al. (2023). Τα αποτελέσματα παρέχουν εικόνα της χωρικής κατανομής των στείρων υλικών και δημιουργούν βάση για περαιτέρω μελέτες. Σημειώνεται ότι η ανάλυση της χωρικής μεταβλητότητας βασίζεται σε δεδομένα που προέκυψαν για μια τυπική γεωτεχνική ανάλυση της περιοχής (όπως συνήθως συμβαίνει). Συνεπώς, υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται με τις αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων, ιδίως κατά την οριζόντια διεύθυνση. Τα τελικά αποτελέσματα αποτελούν μια εκτίμηση της ΚΔ και της τάξης μεγέθους του εύρους που πρέπει να συμπεριληφθεί σε μια στοχαστική ανάλυση και όχι έναν ακριβή υπολογισμό. Γενικώς δεν υπάρχει μελέτη δημοσιευμένη που να αναφέρεται στον χωρικό χαρακτηρισμό των στείρων υλικών λιγνιτωρυχείων.

Για την κατακόρυφη διεύθυνση οι παρατηρήσεις από μια συγκεκριμένη γεώτρηση αντιστοιχίστηκαν μόνο με άλλες από την ίδια γεώτρηση. Τα ζεύγη που προέκυψαν και από τις δώδεκα γεωτρήσεις αναλύθηκαν στη συνέχεια μαζί και δημιουργήθηκε το πειραματικό ημιβαριόγραμμα. Τέλος, προέκυψε μία αντιπροσωπευτική τιμή για την κατακόρυφη ΚΔ μετά την προσαρμογή ενός εκθετικού θεωρητικού προσομοιώματος.

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις ΚΔ για τις γεωτεχνικές παραμέτρους. Όλες οι παράμετροι παρουσιάζουν συγκρίσιμες ΚΔ στην κατακόρυφη διεύθυνση εκτός από την συνοχή, με τις ΚΔ να κυμαίνονται από 6,2 m έως 13,5 m και 22,4 m για τη συνοχή. Η ΚΔ της συνοχής είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων ενώ η γωνία τριβής παρουσιάζει τη μικρότερη. Τέλος, οι κλίμακες διακύμανσης για το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης είναι κοντά μεταξύ τους και παρουσιάζουν φθίνουσα τάση καθώς αυξάνεται το αντίστοιχο βήμα τάσης.

Οι κατακόρυφες ΚΔ βρίσκονται εντός του εύρους της βιβλιογραφίας αλλά μεταξύ των υψηλότερων τιμών που συναντώνται για τα φυσικά εδάφη (Ching and Schweckendiek, 2021). Το εύρος τους δηλώνει μια μεσαία μεταβλητότητα στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Αυτό σχετίζεται με τη μέθοδο κατασκευής όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Οι γεωτρήσεις προέρχονται από μια περιοχή που κατασκευάστηκε κυρίως με εξοπλισμό συνεχούς λειτουργίας (ταινιόδρομοι) και, επομένως, οι κατακόρυφες "ζώνες" μπορούν να προτείνουν παρόμοιες ιδιότητες όταν προέρχονται από την ίδια περιοχή του ίδιου ορυχείου και έχουν μεταφερθεί με τον ίδιο τρόπο. Κατά συνέπεια, πιθανολογείται ότι παρουσιάζεται μεγάλη μεταβλητότητα όταν αλλάζει η περιοχή εξόρυξης ή ο τρόπος μεταφοράς και έτσι, η κλίμακα της διακύμανσης είναι μεσαία.

Πίνακας 2: Κατακόρυφη και οριζόντια κλίμακα διακύμανσης των γεωτεχνικών παραμέτρων
Table 2: Vertical and horizontal scale of fluctuation for the geotechnical parameters

| Κατακόρυφη κλίμακα διακύμανσης (m) | | | | | |
|------------------------------------|---------|-------|-------|----------|----------|
| c' | ϕ' | C_c | C_r | E_{s1} | E_{s2} |
| 22.4 | 6.2 | 9.6 | 12.0 | 13.5 | 12.3 |
| Οριζόντια κλίμακα διακύμανσης (m) | | | | | |
| c' | ϕ' | C_c | C_r | E_{s1} | E_{s2} |
| 161 | 265 | 264 | 285 | 190 | 162 |

Ο προσδιορισμός της οριζόντιας ΚΔ είναι δυσκολότερος λόγω της ακανόνιστης απόστασης των γεωτρήσεων και των διαφορετικών υψών από τα οποία ελήφθησαν τα δείγματα για τις εργαστηριακές δοκιμές. Ωστόσο, αυτό ισχύει για τις περισσότερες γεωτεχνικές έρευνες. Τα δεδομένα από μια συγκεκριμένη γεώτρηση αντιστοιχίστηκαν μόνο με άλλες γεωτρήσεις για να αποκλειστεί η κατακόρυφη συσχέτιση. Οι οριζόντιες ΚΔ είναι γενικώς στην ίδια τάξη μεγέθους. Συνολικά, το εύρος των αποτελεσμάτων είναι μεγάλο, με τη χαμηλότερη τιμή να ισούται με 161

m για τη συνοχή και τη μεγαλύτερη με 285 m για τον δείκτη επανασυμπίεσης. Οι δείκτες συμπίεσης και επανασυμπίεσης παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές για την οριζόντια ΚΔ. Συγκεκριμένα, ο δείκτης συμπίεσης έχει τιμή 264 m και ο δείκτης επανασυμπίεσης 285 m. Τα αποτελέσματα των μέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης είναι αρκετά μεταβλητά, σε αντίθεση με την κατακόρυφη διεύθυνση. Τέλος, ο συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζει παρόμοιες τιμές ανεξάρτητα από την αύξηση του βήματος τάσης από 162 m έως 190 m. Συνολικά, οι κλίμακες διακύμανσης στην οριζόντια διεύθυνση είναι πολύ υψηλότερες από ό,τι στην κατακόρυφη, όπως αναμενόταν. Τα αποτελέσματα βρίσκονται εντός του εύρους που συναντάται στη βιβλιογραφία, αλλά πάνω από τις μέσες τιμές (Ching and Schweckendiek, 2021).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα στείρα ορυχείων άνθρακα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο λόγω των τεράστιων εκτάσεων που καλύπτουν και των δυνατοτήτων αξιοποίησής τους. Παρ' όλ' αυτά απουσιάζει διεθνώς ο συστηματικός γεωτεχνικός χαρακτηρισμός τους. Στην παρούσα εργασία, έγινε μια συστηματική προσπάθεια χαρακτηρισμού και ποσοτικοποίησης των γεωτεχνικών παραμέτρων των στείρων υλικών μιας ογκώδους απόθεσης στην Ελλάδα. Οι μηχανικές ιδιότητες αναλύθηκαν στατιστικώς για την παροχή μέσων, διάμεσων τιμών και συντελεστών διακύμανσης. Αυτή η στατιστική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση της μεταβλητότητας του υλικού παρέχοντας μια προσέγγιση για την εξέταση παρόμοιων περιπτώσεων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η απόθεση παρουσιάζει εξαιρετική ετερογένεια, ενώ ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι η ποσοτικοποίηση αυτής της μεταβλητότητας, υποδεικνύοντας ότι η μεταβλητότητα των γεωτεχνικών παραμέτρων της απόθεσης υπερβαίνει εκείνη των φυσικών εδαφών. Επιπλέον, η παρούσα εργασία αξιολόγησε τις στατιστικές κατανομές των γεωτεχνικών παραμέτρων. Η γωνία τριβής έχει συμμετρική κατανομή που περιλαμβάνει πολλές παρατηρήσεις στις ουρές και περιγράφεται επαρκώς από την κανονική κατανομή. Η συνοχή παρουσιάζει μια ασυνήθιστη κατανομή με σημαντικό αριθμό χαμηλών ή μηδενικών τιμών και μια μεγάλη ουρά. Ο δείκτης συμπίεσης παρουσιάζει θετική ασυμμετρία που περιγράφεται κατάλληλα από τη λογαριθμοκανονική κατανομή ενώ ο δείκτης επανασυμπίεσης περιγράφεται με την κανονική κατανομή. Ένα σημαντικό ζήτημα που εξετάζεται για πρώτη φορά στην παρούσα εργασία είναι ο χαρακτηρισμός της χωρικής μεταβλητότητας των γεωτεχνικών παραμέτρων που ποσοτικοποιείται μέσω της κλίμακας διακύμανσης (ΚΔ). Συνολικά, οι ΚΔ βρίσκονται εντός του εύρους της βιβλιογραφίας, αλλά στο υψηλότερο άκρο. Οι γεωτεχνικές παράμετροι συσχετίζονται έντονα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση για αποστάσεις μεγαλύτερες από 10 m. Οι τιμές αυτές βρίσκονται γενικά στην περιοχή επιρροής των γεωτεχνικών έργων, υποδεικνύοντας ότι μια ενιαία αντιπροσωπευτική τιμή θα ήταν μη ρεαλιστική. Ωστόσο στο οριζόντιο επίπεδο η συσχέτιση είναι υψηλότερη με ΚΔ που φθάνουν έως και τα 285 m. Επομένως, κατά την οριζόντια διεύθυνση, οι ιδιότητες κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από την περιοχή επιρροής των περισσότερων τεχνικών εφαρμογών και θα μπορούσε να υιοθετηθεί μια χαρακτηριστική τιμή. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν για την περαιτέρω ανάλυση και τον σχεδιασμό. Τα προηγμένα αριθμητικά και στοχαστικά εργαλεία φαίνονται ως ο κατάλληλος τρόπος για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των εξαιρετικά ετερογενών στείρων υλικών.

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

Bian Z, Miao X, Lei S, Chen SE, Wang W, Struthers S, 2012. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. Science. 337(6095), 702-703

- Bong T, Stuedlein AW, 2017. Spatial Variability of CPT Parameters and Silty Fines in Liquefiable Beach Sands. 143(12), 04017093
- Ching J, Schweckendiek T, 2021. State-of-the-Art review of inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models. In: (TC304) TCoEPoRAM, editor.: SIMSG , ISSMGE,
- Euracoal, 2022. EURACOAL Market Report 1/2022 - 6/2022. European Association for Coal and Lignite,
- Masoudian MS, Afrapoli MAH, Tasalloti A, Marshall AM, 2019. A general framework for coupled hydro-mechanical modelling of rainfall-induced instability in unsaturated slopes with multivariate random fields. Computers and Geotechnics. 115, 103162
- Schneider HR, 1997. Panel discussion: Definition and determination of characteristic soil properties. In: Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Balkema, Rotterdam [u.a.]
- Stuedlein AW, Kramer SL, Arduino P, Holtz RD, 2012. Geotechnical Characterization and Random Field Modeling of Desiccated Clay. 138(11), 1301-1313
- Theocharis AI, Zevgolis IE, Roumpos C, Koukouzas NC, 2023. Geotechnical uncertainty within heterogeneous lignite mine spoils: probability distributions and spatial variability of physical and mechanical properties. (under review).
- Vanmarcke E, 1984. Random Fields: Analysis and Synthesis. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Vanmarcke EH, 1977. Probabilistic Modeling of Soil Profiles. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 103(11), 1227-1246
- Zevgolis IE, Theocharis AI, Deliveris AV, Koukouzas NC, Roumpos C, Marshall AM, 2021. Geotechnical Characterization of Fine-Grained Spoil Material from Surface Coal Mines. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 147(7), 04021050