



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Επόπτης Καθηγητής: Αλαμανής Νικόλαος Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κωνσταντίνος Στεφανόπουλος



ΒΟΛΟΣ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ
2025

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην επιτυχία αυτής της προσπάθειας. Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ θερμά όλους τους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «*Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων*» του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τις πολύτιμες γνώσεις, τη συνεχή καθοδήγηση και την επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στον επόπτη καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Νικόλαο Αλαμανή, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, για την αμέριστη καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις ουσιαστικές επιστημονικές παρατηρήσεις του, που συνέβαλαν καταλυτικά στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω επίσης στην οικογένειά μου, για τη συνεχή τους ενθάρρυνση και στήριξη σε όλα τα στάδια αυτής της διαδρομής. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τη σύζυγό μου, Καλλιόπη Βλάχου, για την υπομονή, τη συμπαράσταση και την ψυχική δύναμη που μου προσέφερε σε κάθε δύσκολη στιγμή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Πρόλογος.....	Σελ. 4
2. Εισαγωγή.....	Σελ. 4
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	Σελ. 5
4. Γεωτεχνικοί Κίνδυνοι και Αντιμετώπισή τους.....	Σελ. 7
4.1 Φυσικά φαινόμενα και γεωτεχνικά προβλήματα.....	Σελ. 7
4.2 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές προεκτάσεις.....	Σελ. 9
4.3 Ο ρόλος των ειδικών κατασκευών στη διαχείριση κινδύνων.....	Σελ. 10
4.3.1 Τοίχοι Αντιστήριξης και Σταθεροποίηση Πρανών.....	Σελ. 11
4.3.2 Ενέματα και Ενισχύσεις Εδάφους.....	Σελ. 15
4.3.3 Γεωσυνθετικά Υλικά και Τεχνολογίες.....	Σελ. 17
4.3.4 Τεχνολογίες παρακολούθησης και πρόβλεψης γεωτεχνικών κινδύνων....	Σελ. 21
4.3.5 Κατασκευές ελέγχου διάβρωσης και προστασίας εδαφών.....	Σελ. 23
5. Θεμελιώδεις Αρχές της Γεωτεχνικής Μηχανικής.....	Σελ. 24
5.1 Χαρακτηριστικά και μηχανική συμπεριφορά εδαφών.....	Σελ. 25
5.2 Γεωτεχνικές έρευνες και αξιολόγηση κινδύνου.....	Σελ. 29
5.3 Κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο (ΕΑΚ, EC7, ISO, ΕΣΠΕΚ).....	Σελ. 33
6. Κατηγορίες Ειδικών Γεωτεχνικών Κατασκευών.....	Σελ. 36
6.1 Πασσαλώσεις – Μικροπασσάλωση.....	Σελ. 36
6.2 Αγκυρωμένα τοιχία και κατακόρυφες ενισχύσεις.....	Σελ. 37
6.3 Τεχνικές Ενίσχυσης Πρανών (Soil Nailing, Γεωϋφάσματα).....	Σελ. 38
6.3.1 Τεχνική Soil Nailing (Καρφιά Εδάφους).....	Σελ. 38
6.3.2 Γεωϋφάσματα και Γεωενισχυτικά Υλικά (Geotextiles).....	Σελ. 40
6.3.3 Συνδυασμένη Εφαρμογή και Σύγχρονες Τάσεις.....	Σελ. 42
6.4 Ενέματα, Deep Mixing, Jet Grouting.....	Σελ. 42
6.5 Γεωσυνθετικά και Τεχνολογίες Ενίσχυσης Εδάφους.....	Σελ. 43

7. Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Πτυχές των Ειδικών Κατασκευών.....	Σελ. 44
7.1 Επίδραση στο Περιβάλλον και Αειφορία.....	Σελ. 44
7.2 Οικονομική αποδοτικότητα και τεχνικές επιλογές.....	Σελ. 45
7.3 Παρακολούθηση και Συντήρηση.....	Σελ. 46
7.3.1 Σκοπός της παρακολούθησης.....	Σελ. 46
7.3.2 Τεχνολογίες παρακολούθησης.....	Σελ. 47
7.3.3 Διαδικασίες συντήρησης.....	Σελ. 48
7.3.4 Διαχείριση δεδομένων και ανάλυση.....	Σελ. 49
7.3.5 Προκλήσεις και προοπτικές.....	Σελ. 49
8. Εφαρμογές και Μελέτες Περίπτωσης.....	Σελ. 50
8.1 Σταθεροποίηση Κατολισθήσεων.....	Σελ. 50
8.2 Αντιμετώπιση Σεισμικού Κινδύνου.....	Σελ. 52
8.3 Έργα σε Υποδομές Μεταφορών (οδοποιία, σιδηρόδρομοι).....	Σελ. 55
8.4 Υδραυλικά, Λιμενικά και Υπόγεια Έργα.....	Σελ. 59
8.5 Παραδείγματα Εφαρμογών στην Ελλάδα.....	Σελ. 63
8.5.1 Εγνατία Οδός – Τμήμα Ασπροβάλτα.....	Σελ. 63
8.5.2 Μετρό Θεσσαλονίκης – Σταθμός Βενιζέλου.....	Σελ. 64
8.5.3 Ε.Ο. Τρίπολης–Καλαμάτας – Αντιμετώπιση Κατολισθήσεων.....	Σελ. 66
9. Καινοτομίες και Τεχνολογικές Εξελίξεις.....	Σελ. 68
9.1 Προηγμένα Υλικά και Βελτιωτικές Τεχνικές.....	Σελ. 68
9.2 Προσομοιώσεις, Ψηφιακές Τεχνολογίες και BIM.....	Σελ. 70
9.3 Έξυπνη Παρακολούθηση Γεωτεχνικών Έργων.....	Σελ. 74
9.4 Αυτοματισμοί και Ρομποτική στη Γεωτεχνική Μηχανική.....	Σελ. 76
10. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	Σελ. 80
11. Βιβλιογραφία.....	Σελ. 83

1.Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονείται στο πλαίσιο της διπλωματικής μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων» του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μελέτη των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών, η κατηγοριοποίησή τους, οι εφαρμογές τους, καθώς και η συμβολή τους στην πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών και τεχνικών κινδύνων.

Η ανάγκη για ασφαλείς και λειτουργικές κατασκευές, ιδίως σε περιοχές με γεωτεχνικές ιδιαιτερότητες ή υψηλή σεισμικότητα, καθιστά την κατανόηση των τεχνικών αυτών επιτακτική. Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιαστούν οι κυριότερες τεχνολογίες, να αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους και να αναδειχθούν μέσω πραγματικών μελετών περίπτωσης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξή του, καθώς και όλους όσοι συνέβαλαν στην εξέλιξη της παρούσας εργασίας.

2.Εισαγωγή

Οι ειδικές κατασκευές στη γεωτεχνική μηχανική αποτελούν ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογής για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων εδάφους και θεμελίωσης. Αξιοποιούνται κυρίως σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας ή σε περιοχές με ιδιαίτερες γεωτεχνικές συνθήκες, όπου απαιτείται προηγμένη μηχανική και εξειδικευμένες λύσεις. Τέτοιες κατασκευές περιλαμβάνουν συστήματα αντιστήριξης πρανών, ενίσχυση θεμελιώσεων, τεχνικές βελτίωσης εδάφους, καθώς και κατασκευές υπόγειας υποδομής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι τοίχοι αντιστήριξης (βαρύτητας, πασσαλότοιχοι, αγκυρωμένοι), οι μικροπασσαλώσεις για την ενίσχυση υφιστάμενων θεμελιώσεων, οι τεχνικές εδαφοκαρφώσεων (soil nailing) για την σταθεροποίηση εκσκαφών, καθώς και η χρήση διαφραγματικών τοίχων σε βαθιές

εκσκαφές. Παράλληλα, εφαρμόζονται μέθοδοι βελτίωσης εδαφών, όπως η προφόρτιση με κατακόρυφους στραγγιστήρες, η χρήση γεωυφασμάτων και γεωπλεγμάτων, και η εφαρμογή ελαφρών υλικών πλήρωσης. Οι εφαρμογές των ειδικών κατασκευών εκτείνονται σε πλήθος τεχνικών έργων: αυτοκινητόδρομοι, σιδηροδρομικές γραμμές, υπόγειες κατασκευές (μετρό, πάρκινγκ), θεμελιώσεις γεφυρών, λιμενικά και υδραυλικά έργα, καθώς και η προστασία μνημείων και ιστορικών κτιρίων. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από παράγοντες όπως η φύση του εδάφους, οι γεωλογικές συνθήκες, το είδος του έργου και το κόστος. Συνολικά, οι ειδικές κατασκευές ενισχύουν την ασφάλεια, τη σταθερότητα και τη μακροχρόνια αντοχή των τεχνικών έργων, αποτελώντας βασικό εργαλείο του σύγχρονου γεωτεχνικού μηχανικού για την επιτυχία απαιτητικών έργων σε ποικίλες γεωπεριβαλλοντικές συνθήκες. Κατά το κύριο μέρος της εργασίας θα αναφερθούν συγκεκριμένα παραδείγματα κατασκευών σε διάφορες περιοχές που έχουν χρησιμοποιηθεί.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η γεωτεχνική μηχανική αποτελεί θεμέλιο της πολιτικής μηχανικής, εστιάζοντας στη μελέτη της συμπεριφοράς των γεωυλικών (εδάφη, βράχοι, υπόγεια ύδατα) και στη θεμελίωση τεχνικών έργων υπό γεωπεριβαλλοντικούς περιορισμούς. Στο πεδίο αυτό, οι ειδικές κατασκευές έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των τεχνικών έργων και της ανάγκης για ασφαλή υλοποίηση σε εδάφη με δυσμενείς ή ασταθείς συνθήκες.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σταδιακή μετατόπιση της γεωτεχνικής πρακτικής από τις εμπειρικές μεθόδους σε συστηματικές, ποσοτικές προσεγγίσεις, με χρήση ψηφιακής μοντελοποίησης, προηγμένων υλικών και τεχνικών παρακολούθησης (Budhu, 2011). Οι βασικές κατηγορίες ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών περιλαμβάνουν τεχνικές αντιστήριξης, ενίσχυσης και βελτίωσης εδαφους, πασσαλώσεις, καθώς και κατασκευές αντιμετώπισης σεισμικού κινδύνου και κατολισθήσεων (Das & Sobhan, 2013).

Η εφαρμογή γεωτεχνικών κατασκευών σε έργα υποδομών, όπως αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι και φράγματα, έχει αναπτυχθεί ταχέως τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των αυξανόμενων περιβαλλοντικών και αστικών πιέσεων. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση τεχνικών όπως η αγκύρωση, τα soil nails και τα γεωφάσματα βελτιώνουν σημαντικά τη σταθερότητα πρανών και τις ιδιότητες των θεμελιώσεων (Koerner, 2012· Zhang et al., 2019).

Παράλληλα, ενισχύεται η ανάγκη για αειφόρο σχεδιασμό, όπου οι γεωτεχνικές παρεμβάσεις δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον, αλλά ενσωματώνονται σε αυτό με ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υλικών, ελέγχου ρύπων και βελτιστοποίηση κόστους. Ο ρόλος των γεωσυνθετικών είναι κρίσιμος προς αυτή την κατεύθυνση (Shukla, 2017), ενώ εξελίξεις όπως το jet grouting και το deep soil mixing επιτρέπουν πλέον την ενίσχυση αδύναμων εδαφών με ελάχιστη διατάραξη του περιβάλλοντος (Bruce, 2000).

Η χρήση τεχνολογιών BIM (Building Information Modeling) και των ψηφιακών γεωτεχνικών προσομοιώσεων (π.χ. PLAXIS, FLAC, GeoStudio) υποστηρίζει την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κατασκευών, την επιλογή κατάλληλων λύσεων και την εκτίμηση κινδύνου πριν την κατασκευή (Potts & Zdravković, 2001). Επιπλέον, τα σύγχρονα εργαλεία παρακολούθησης και διάγνωσης, όπως οι αισθητήρες καταπόνησης, τα συστήματα γεωδαιτικής παρακολούθησης και η τεχνητή νοημοσύνη, δίνουν νέα διάσταση στη διαχείριση της ασφάλειας και της συντήρησης γεωτεχνικών έργων (Goh et al., 2020).

Ειδική έμφαση δίνεται επίσης στον σεισμικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε χώρες υψηλής σεισμικότητας, όπως η Ελλάδα. Η βιβλιογραφία αναφέρεται εκτενώς στην εφαρμογή κατακόρυφων και οριζόντιων ενισχύσεων, διαφραγματικών τοίχων και πασσαλοπασσάλων για τον περιορισμό των επιπτώσεων της σεισμικής δραστηριότητας (Gazetas et al., 2016). Η συμμόρφωση με πρότυπα όπως ο Ευρωκώδικας 7 (EC7), ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ) και τα πρότυπα ISO είναι θεμελιώδης παράγοντας αξιοπιστίας και ασφάλειας των έργων.

Εν κατακλείδι, η επιστημονική βιβλιογραφία αναδεικνύει την κρίσιμη συμβολή των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών στη διαχείριση κινδύνων, τη βιωσιμότητα των έργων και την ασφάλεια των υποδομών. Η κατανόηση των διαθέσιμων τεχνολογιών, η

αξιολόγηση του γεωτεχνικού περιβάλλοντος και η ενσωμάτωση της καινοτομίας αποτελούν βασικούς άξονες για την επιτυχή εφαρμογή των μεθόδων αυτών.

4. Γεωτεχνικοί Κίνδυνοι και Αντιμετώπισή τους

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην κατανόηση και διαχείριση των γεωτεχνικών κινδύνων, οι οποίοι ενδέχεται να προκύψουν είτε από φυσικά φαινόμενα είτε από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στον σχεδιασμό και την ασφάλεια τεχνικών έργων, καθώς σχετίζονται άμεσα με την ευστάθεια, την αντοχή και τη μακροχρόνια λειτουργικότητα των κατασκευών. Οι μηχανικοί καλούνται να αντιμετωπίσουν φαινόμενα όπως κατολισθήσεις, υγροποίηση εδαφών, καθιζήσεις, διαβρώσεις και σεισμικές αστοχίες, τα οποία μπορούν να επιφέρουν καταστροφικές συνέπειες σε υποδομές και ανθρώπινες ζωές.

Το κεφάλαιο αυτό θα εξετάσει αρχικά τα φυσικά φαινόμενα που επιδρούν στις γεωτεχνικές συνθήκες και δημιουργούν προβλήματα στα εδάφη θεμελίωσης (ενότητα 4.1), ενώ στη συνέχεια θα αναλυθούν συγκεκριμένοι τύποι γεωτεχνικών κινδύνων (ενότητα 4.2) και θα παρουσιαστούν οι σύγχρονες τεχνικές αντιμετώπισής τους (ενότητα 4.3). Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνικών στις ειδικές γεωτεχνικές κατασκευές είναι καθοριστικής σημασίας για την πρόληψη αστοχιών και τη βιώσιμη ανάπτυξη τεχνικών έργων σε ευαίσθητα περιβάλλοντα.

4.1 Φυσικά φαινόμενα και γεωτεχνικά προβλήματα

Η γεωτεχνική συμπεριφορά ενός εδάφους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από φυσικά φαινόμενα, όπως η σεισμική δραστηριότητα, οι έντονες βροχοπτώσεις, οι πλημμύρες, η διάβρωση, καθώς και από σταδιακές γεωδυναμικές διεργασίες, όπως η καθίζηση ή η εδαφική διαστολή λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία ή στην υγρασία. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να μεταβάλουν δραστικά τις μηχανικές ιδιότητες των γεωυλικών, επιφέροντας σοβαρές αλλοιώσεις στη σταθερότητα των τεχνικών έργων.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι έντονες βροχοπτώσεις, οι οποίες αυξάνουν τον βαθμό κορεσμού των εδαφών, μειώνοντας την αντοχή τους σε διάτμηση και αυξάνοντας την πιθανότητα αστοχίας πρηνών (Van Asch et al., 1999). Η επιφανειακή διάβρωση, επίσης, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα σε περιοχές με μικρή

φυτοκάλυψη ή ανώμαλο ανάγλυφο, καθώς διαβρώνει τη δομή του εδάφους και μειώνει τη φέρουσα ικανότητά του (Montgomery, 2007).

Σημαντικός είναι και ο ρόλος των σεισμών, οι οποίοι μέσω των σεισμικών κυμάτων επιδρούν δυναμικά στο υπέδαφος, προκαλώντας φαινόμενα υγροποίησης, οριζόντιες μετατοπίσεις ή καθιζήσεις. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε περιοχές με κορεσμένα, χαλαρά εδάφη, όπως οι αλλουβιακές αποθέσεις, όπου η σεισμική διέγερση μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη απώλεια της αντοχής των γεωυλικών (Seed & Idriss, 1971).



Εικόνα 1: Ολοσχερής καταστροφή Χ.Υ.Τ.Α Σάμου, από κατολίσθηση.
<https://geognosis.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/05/xyta.jpg>

Τα πλημμυρικά φαινόμενα, τέλος, πέραν της επιφανειακής διάβρωσης, επηρεάζουν και την υπόγεια υδροφορία, μεταβάλλοντας τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, με άμεσες επιπτώσεις στη στατική ισορροπία θεμελιώσεων και πρανών (Corrola et al., 2014). Όλα τα παραπάνω καθιστούν απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση των γεωπεριβαλλοντικών παραμέτρων, καθώς και την πρόβλεψη πιθανών μεταβολών που ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα κατά την κατασκευή ή κατά τη διάρκεια ζωής ενός τεχνικού έργου.

4.2 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές προεκτάσεις

Η εμφάνιση γεωτεχνικών κινδύνων δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό ζήτημα, αλλά συνδέεται στενά με το φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον. Η αδυναμία πρόληψης ή αποτελεσματικής αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές υποβαθμίσεις, κοινωνικές ανισότητες, καθώς και οικονομικές απώλειες. Η παρούσα ενότητα αναλύει τις ευρύτερες επιπτώσεις των γεωτεχνικών φαινομένων στο περιβάλλον και στις τοπικές κοινωνίες, προβάλλοντας την ανάγκη για μια ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση κινδύνου, που να περιλαμβάνει όχι μόνο τεχνικές λύσεις, αλλά και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους.

Οι γεωτεχνικές αστοχίες —όπως κατολισθήσεις, καθιζήσεις ή διαβρώσεις— επιφέρουν σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες. Η κατάρρευση πρανών μπορεί να προκαλέσει την αποψίλωση της βλάστησης, την καταστροφή υδρολογικών δικτύων και την επιμόλυνση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, λόγω της μεταφοράς ρύπων ή επιβλαβών υλικών. Ειδικά σε περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. λατομεία, οδικά έργα), ο συνδυασμός τεχνικών παρεμβάσεων και φυσικών φαινομένων συχνά εντείνει την αποσταθεροποίηση των γεωυλικών και προκαλεί μη αναστρέψιμες αλλοιώσεις στο τοπίο (Glade et al., 2005).

Οι κοινωνικές επιπτώσεις είναι επίσης έντονες, ιδίως όταν οι γεωτεχνικές καταστροφές αγγίζουν κατοικημένες περιοχές ή υποδομές κοινής ωφέλειας. Η απώλεια κατοικιών, η αποκοπή οδικών δικτύων και η διακοπή βασικών υπηρεσιών (όπως ηλεκτροδότηση, υδροδότηση ή τηλεπικοινωνίες) οδηγούν σε κοινωνικές αναταραχές, οικονομικές ζημιές και υποβάθμιση της ποιότητας ζωής (Alexander, 2000). Επιπλέον, οι ευάλωτες κοινωνικές ομάδες —όπως οι ηλικιωμένοι, οι άποροι ή οι κάτοικοι απομονωμένων περιοχών— είναι συνήθως αυτοί που πλήττονται περισσότερο, γεγονός που εντείνει τις κοινωνικές ανισότητες και θέτει ζητήματα περιβαλλοντικής δικαιοσύνης (Wisner et al., 2004).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η μη επαρκής ενημέρωση και εκπαίδευση των πολιτών σε θέματα γεωτεχνικής διακινδύνευσης οδηγεί σε χαμηλή ετοιμότητα και ελλιπή απόκριση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η ενσωμάτωση στρατηγικών περιβαλλοντικής επικοινωνίας, συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών και περιβαλλοντικής εκπαίδευσης, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι σε γεωτεχνικούς κινδύνους (UNDRR, 2019).

Κατά συνέπεια, η ανάλυση των γεωτεχνικών φαινομένων δεν μπορεί να περιορίζεται μόνο σε τεχνικά δεδομένα και μεθοδολογίες. Αντιθέτως, απαιτεί τη διεπιστημονική συνεργασία γεωτεχνικών, περιβαλλοντολόγων, κοινωνιολόγων και οικονομολόγων, με στόχο τη δημιουργία ολοκληρωμένων και κοινωνικά αποδεκτών λύσεων.

4.3 Ο ρόλος των ειδικών κατασκευών στη διαχείριση κινδύνων

Οι ειδικές κατασκευές αποτελούν κρίσιμο εργαλείο στη γεωτεχνική μηχανική για την πρόληψη, τον περιορισμό και την αντιμετώπιση κινδύνων που σχετίζονται με το έδαφος και τις φυσικές καταστροφές. Η παρούσα ενότητα εστιάζει στην τεχνική σημασία αυτών των παρεμβάσεων, στις βασικές κατηγορίες ειδικών κατασκευών, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο συμβάλλουν στη μείωση των γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών κινδύνων, όπως κατολισθήσεις, σεισμικές αστοχίες και διάβρωση. Παράλληλα, εξετάζεται ο ρόλος τους στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της προστασίας κρίσιμων υποδομών.

Οι ειδικές γεωτεχνικές κατασκευές σχεδιάζονται και εφαρμόζονται για την **ενίσχυση του εδάφους**, τη **σταθεροποίηση πρανών**, την **προστασία από διαβρωτικά φαινόμενα**, καθώς και τη **θεμελίωση υποδομών** σε προβληματικά εδάφη. Ο ρόλος τους στη διαχείριση κινδύνων είναι διττός: αφενός **προληπτικός**, με σκοπό την αποτροπή αστοχιών, και αφετέρου **αντιμετωπιστικός**, με στόχο την αποκατάσταση ζημιών ή την προστασία μετά από φυσικά φαινόμενα (Lacasse & Nadim, 2009).

Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα ειδικών κατασκευών περιλαμβάνουν:

- **Τοίχοι αντιστήριξης:** χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση πρανών και την πρόληψη κατολισθήσεων. Μπορούν να είναι βαρύτητας, πασσαλοσανίδων, αγκυρούμενοι ή και ενισχυμένοι με γεωφάσματα.
- **Ενέματα (grouting):** εγχύσεις υλικών στο έδαφος για ενίσχυση της αντοχής ή μείωση της διαπερατότητας. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε φράγματα, σιραγγές και θεμελιώσεις.
- **Μικροπασσαλομήξεις και αγκυρώσεις:** παρέχουν στήριξη σε πρανή και βαθιές εκσκαφές, και βελτιώνουν την αντοχή εδαφικών μαζών, ιδίως σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

- **Γεωσυνθετικά υλικά (geosynthetics):** συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του εδάφους και στη φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση ροής υδάτων, με εφαρμογές σε αναχώματα, πρανή, αλλά και γεωδραυλικά έργα (Koerner, 2012).
- **Κατασκευές ελέγχου διάβρωσης:** όπως οι γκαμπιόνες, τα λιθορριπές, και τα πλέγματα, χρησιμοποιούνται για τη μείωση της διάβρωσης σε πρανή ή κοίτες ποταμών, προστατεύοντας τις υποδομές και το φυσικό περιβάλλον.

Η χρήση τέτοιων κατασκευών απαιτεί **γεωτεχνική διερεύνηση** και ανάλυση κινδύνων (risk assessment), ώστε να επιλεγούν τα κατάλληλα μέτρα με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τη γεωμορφολογία, το είδος της υποδομής και το αναμενόμενο φορτίο ή φυσικό φαινόμενο (Phoon et al., 2010).

Επιπλέον, πολλές από τις κατασκευές αυτές ενσωματώνονται σε **ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης** με αισθητήρες και τηλεμετρία, βελτιώνοντας τη **διαχείριση κινδύνου σε πραγματικό χρόνο** και την έγκαιρη προειδοποίηση (early warning systems), κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο σε υποδομές ζωτικής σημασίας, όπως δρόμοι, σιδηρόδρομοι και φράγματα (Culshaw, 2005).

Τέλος, η σύγχρονη προσέγγιση προωθεί τον σχεδιασμό **βιώσιμων και "πράσινων" κατασκευών**, όπως ενισχυμένα πρανή με φυτεύσεις (green walls) και γεωφάσματα φιλικά προς το περιβάλλον, ενισχύοντας την **ανθεκτικότητα** χωρίς να παραβιάζεται η ισορροπία του οικοσυστήματος.

4.3.1 Τοίχοι Αντιστήριξης και Σταθεροποίηση Πρανών

Η σταθεροποίηση πρανών και η αντιστήριξη εδαφικών μαζών αποτελούν κεντρικό άξονα στη γεωτεχνική διαχείριση κινδύνων, ειδικά σε περιοχές με έντονες υψομετρικές διαφορές, αστάθεια εδαφών και αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα. Οι **τοίχοι αντιστήριξης (retaining walls)** είναι από τις πιο διαδεδομένες ειδικές κατασκευές, προσφέροντας μηχανική υποστήριξη σε εδάφη που διαφορετικά θα υφίσταντο αστοχία ή κατολίσθηση.

Οι κύριες λειτουργίες τους περιλαμβάνουν:

- Τη **στήριξη ασταθών πρανών**, ώστε να μην υπάρξει εδαφική μετακίνηση.

- Τον έλεγχο της επιφανειακής και υπόγειας απορροής (μέσω αποστραγγιστικών σωλήνων).
- Τη δημιουργία τεχνικά ασφαλών επιπέδων θεμελίωσης για υποδομές (π.χ. δρόμοι, γέφυρες).
- Τη μείωση της πιθανότητας γεωτεχνικών κινδύνων (π.χ. κατολισθήσεων, διαβρώσεων, ερπυσμού).

Τύποι Τοίχων Αντιστήριξης

Οι βασικές κατηγορίες τοίχων περιλαμβάνουν:

- **Βαρύτητας (Gravity Walls)**

Χρησιμοποιούν το ίδιο τους το βάρος (συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα ή λιθοδομή) για να αντισταθούν στην ώθηση του εδάφους. Είναι απλοί στη σχεδίαση, αλλά απαιτούν μεγάλη θεμελίωση και χώρο.



Εικόνα 2: Τόχος βαρύτητας μεγάλης μάζας. https://www.maccaferri.com/gr/wp-content/uploads/2022/12/mass-gravity-retaining-walls_2.jpg

- **Τοίχοι με Αντηρίδες (Counterfort Walls)**

Φέρουν εσωτερικές νευρώσεις για ενίσχυση, ιδιαίτερα σε υψηλά πρηνή. Επιτρέπουν καλύτερη κατανομή των τάσεων, μειώνοντας το πάχος του κύριου τοίχου.



Εικόνα 3: Τοίχοι με Αντηρίδες. <https://www.geoquest-group.com/wp-content/uploads/sites/20/2019/11/TechWall2-800x535.jpg>

- **Τοίχοι Συγκράτησης με Πασσάλους (Pile Walls)**

Αποτελούνται από σειρές πασσάλων (συνήθως μεταλλικών ή από σκυρόδεμα) που διεισδύουν στο έδαφος και συνεργάζονται με αγκυρώσεις. Ιδανικοί για ασταθή εδάφη ή σεισμικές περιοχές (Zhang et al., 2022).



Εικόνα 4: Πασσαλότοιχοι . https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2018/08/pilotska_stijena.jpg

- **Τοίχοι από Συρματοκιβώτια (Gabion Walls)**

Κατασκευάζονται από συρμάτινα κλουβιά γεμάτα λίθους. Επιτρέπουν καλή αποστράγγιση, είναι ευέλικτοι και οικονομικοί, ιδανικοί για περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

Συνθήκες Εφαρμογής & Κριτήρια Επιλογής

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από:

- Τη **γεωμετρία** και τη **στατικότητα** του πρανούς.
- Τη **σεισμική επιφόρτιση** της περιοχής.
- Το **είδος του εδάφους** (συνεκτικό, αμμώδες, αργιλώδες).
- Τη **διαθεσιμότητα υλικών** και **κόστος** κατασκευής.

Για παράδειγμα, σε ημιορεινές περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις και κίνδυνο ερπυσμού, ένας οπλισμένος τοίχος βαρύτητας με αποστραγγιστικό σύστημα είναι πιο κατάλληλος, ενώ σε δύσβατα σημεία με περιορισμένο χώρο, προτιμώνται πασσαλότοιχοι με αγκυρώσεις.

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Σημαντική μείωση γεωτεχνικού κινδύνου	Ακριβό κόστος σχεδιασμού και κατασκευής
Προστασία υποδομών (δρόμοι, οικισμοί)	Απαιτούν τακτική συντήρηση (ειδικά τα συστήματα αποστράγγισης)
Δυνατότητα συνδυασμού με αγκυρώσεις	Ενδέχεται να μετατοπιστούν σε σεισμικά επεισόδια

Παραδείγματα Εφαρμογής στην Ελλάδα

- **Εθνική Οδός Καλαμάτας – Σπάρτης:** Κατασκευή τοίχων αντιστήριξης και δικτύων απορροής για σταθεροποίηση πρανών σε κατολισθαίνοντα τμήματα (Γεωργακόπουλος & Μπούσμπουρας, 2019).
- **Εγνατία Οδός:** Χρήση πασσαλοτοίχων και αγκυρούμενων τοίχων σε περιοχές όπως τα Τέμπη και τα Γρεβενά, για την αποφυγή κατολισθήσεων και ερπυσμού.

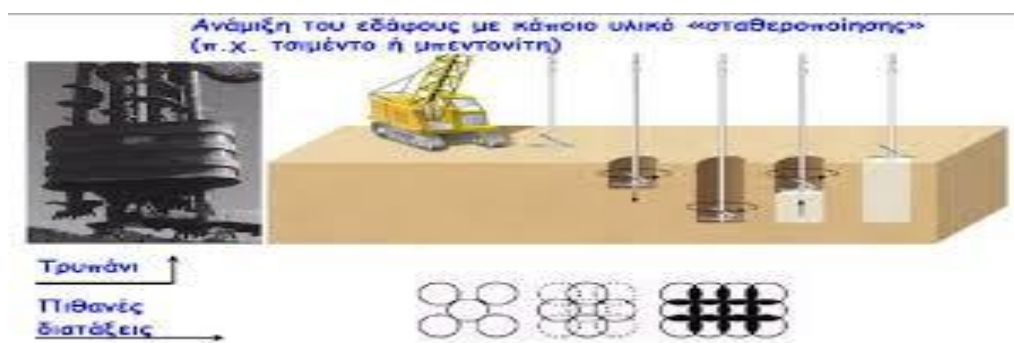
Συμπεράσματα – Σχέση με Διαχείριση Κινδύνου

Οι τοίχοι αντιστήριξης αποτελούν ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία διαχείρισης γεωτεχνικών κινδύνων, καθώς προσφέρουν άμεση τεχνική λύση και προστασία

ανθρώπινων δραστηριοτήτων και υποδομών. Ορθός σχεδιασμός και συνδυασμός τους με άλλα μέτρα (αποστραγγιστικά, φυτεύσεις, ενέματα) ενισχύει δραστικά τη θωράκιση περιοχών υψηλού κινδύνου.

4.3.2 Ενέματα και Ενισχύσεις Εδάφους

Οι τεχνικές ενίσχυσης εδάφους με χρήση **ενεμάτων (grouting)** και άλλων μεθόδων βελτίωσης γεωτεχνικών χαρακτηριστικών αποτελούν κρίσιμα εργαλεία στη γεωτεχνική μηχανική για την αντιμετώπιση **αστάθειας εδαφών, διήθησης υδάτων, υπόγειων κοιλοτήτων και σεισμικής ρευστοποίησης**.



Εικόνα 5: Ενεμάτωση εδάφους, π.χ τσιμέντο. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS8SC4N4KYopx9h-OI235DYr-QExTaUoc-IFQ&s>

1) Τι είναι τα Ενέματα;

Τα ενέματα είναι **ρευστά υλικά** (τσιμέντο, χημικές ενώσεις, πηλός, πολυμερή) που εισάγονται εντός του εδάφους μέσω γεωτρήσεων, με σκοπό:

- Τη βελτίωση της αντοχής και της ακαμψίας του εδάφους.
- Τη μείωση της διαπερατότητας.
- Την πλήρωση υπόγειων κοιλοτήτων ή ρωγμών σε εδαφικά στρώματα ή βραχώδεις σχηματισμούς.

Πίνακας 2: Κύριοι Τύποι Ενεμάτων και Εφαρμογές.

Είδος Ενεμάτων	Περιγραφή και Εφαρμογές
Τσιμεντενέματα	Ανάμιξη νερού και τσιμέντου – αυξάνει αντοχή σε εδάφη με μεγάλους πόρους (χαλίκια, άμμοι).
Χημικά Ενέματα	Ρητίνες, <u>σιλικόνες</u> , πολυμερή – βελτιώνουν αμμώδη εδάφη ή φράσσουν ρωγμές.
Ενέματα με Αργίλο (Clay Grouts)	Ιδανικά για περιορισμό ροής υπόγειων υδάτων.
Ενεμάτωση με πίεση (Jet Grouting)	Χρήση υψηλής πίεσης για ανάμιξη εδάφους και <u>ενέματος</u> <u>in-situ</u> – δημιουργούνται "στήλες" ενισχυμένου εδάφους.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και Όρια Χρήσης – Περιορισμοί.

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Εφαρμόζονται σε ήδη υπάρχοντα έργα χωρίς εκτεταμένες εκσκαφές	Υψηλό κόστος, ειδικά σε χημικά <u>ενέματα</u>
Ενίσχυση θεμελίωσης παλαιών κατασκευών	Δεν είναι αποτελεσματικά σε πολύ συνεκτικά ή αδιαπέραστα εδάφη
Σταθεροποίηση πριν ή μετά από σεισμικά γεγονότα	Απαιτείται εμπειρία και ακρίβεια στην εφαρμογή

2) Άλλες Τεχνικές Ενίσχυσης Εδάφους

Πέρα από την ενεμάτωση, σημαντικές τεχνικές ενίσχυσης περιλαμβάνουν:

- **Μηχανικά Συμπυκνωμένα Εδάφη (Compacted Fills):** Εφαρμόζονται σε επιχωματώσεις ή σε θεμελιώσεις, προσφέροντας υψηλή φέρουσα ικανότητα.
- **Ενίσχυση με Γεώπλεγματα (Geogrids) και Γεωϋφάσματα (Geotextiles):** Χρησιμοποιούνται για την αύξηση της διάτμησης και της σταθερότητας πρανών και θεμελιώσεων (Koerner, 2016).
- **Μικροπάσσαλοι (Micropiles):** Λεπτοί, υψηλής αντοχής πάσσαλοι που συνδυάζονται με ενέματα για τη βελτίωση υπεδάφους σε δυσπρόσιτες περιοχές ή υφιστάμενες κατασκευές.



Εικόνα 6: Μικροπάσσαςτοι (Micropiles).

<https://www.eurodrill.gr/image/cache/catalog/freatopasaloι/067-900x900.jpg>

Παραδείγματα Εφαρμογής στην Ελλάδα

1. **Σταθμός Μετρό Θεσσαλονίκης (Βενιζέλου):** Εκτεταμένη χρήση τσιμεντενέσεων και jet grouting για σταθεροποίηση των εδαφών και προστασία αρχαιολογικών ευρημάτων (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, 2021).
2. **Κατολισθήσεις στη Ζήρεια (Κορινθία):** Χρήση μικροπασσάλων και ενέματος για την αντιστήριξη πρανών μετά από σεισμικά φαινόμενα (Καλογερόπουλος & Σωτηρόπουλος, 2020).

Ρόλος στη Διαχείριση Κινδύνων

Οι τεχνικές ενίσχυσης εδάφους ενισχύουν την αντοχή των γεωκατασκευών και επιτρέπουν την ασφαλή δόμηση και λειτουργία υποδομών σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας. Ιδιαίτερα σε σεισμικά ενεργές ή πλημμυροπαθείς ζώνες, η ενεμάτωση λειτουργεί προληπτικά αλλά και επεμβατικά, περιορίζοντας την έκταση ζημιών και διευκολύνοντας τη μετασεισμική αποκατάσταση (Gallipoli et al., 2023).

4.3.3 Γεωσυνθετικά Υλικά και Τεχνολογίες

Τα γεωσυνθετικά υλικά αποτελούν μια κατηγορία τεχνητών πολυμερών που χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωτεχνική μηχανική για τη βελτίωση των μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφών. Η χρήση τους αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες ως απάντηση στις αυξανόμενες ανάγκες για ασφαλείς, οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνικές ενίσχυσης εδαφών και αντιστήριξης πρανών (Koerner, 2012).

- **Είδη Γεωσυνθετικών Υλικών**

Τα κυριότερα είδη γεωσυνθετικών είναι:

- **Γεωφάσματα (Geotextiles):** Πρόκειται για υφασμένα ή μη υφασμένα υλικά που χρησιμοποιούνται για διαχωρισμό, φιλτράρισμα, ενίσχυση και προστασία του εδάφους. Χρησιμοποιούνται σε δρόμους, πρανή και υποδομές όπου απαιτείται σταθεροποίηση (Jones & Dixon, 2015).



Εικόνα 7: Γεωφάσματα.

https://www.thracegroup.com/uploads_image/2021/03/16/plf0tfesadg6m14hn1qpolfgg13ss5_X50Y50.png?v=1615906927

- **Γεωπλέγματα (Geogrids):** Είναι πλεγμένα ή συγκολλημένα δομικά πλέγματα που χρησιμοποιούνται κυρίως για ενίσχυση εδαφών, όπως η βελτίωση αντοχής πρανών και βάσεων οδοστρωμάτων (Koerner, 2012).



Εικόνα 8: Μονο-αξονικά γεωπλέγματα. https://www.maccaferri.com/gr/wp-content/uploads/2022/12/Monoaxial-Geogrids_4.jpg

- **Γεωμεμβράνες (Geomembranes):** Αδιαπέραστα υλικά που χρησιμοποιούνται για στεγανοποίηση, αποτροπή διαρροών και προστασία από ρύπανση, ιδανικά σε υδατοφράγματα, υγειονομικές ταφές και δεξαμενές (Vazquez et al., 2016).



Εικόνα 9: Χρήση γεωμεμβρανών. <https://www.biostalis-shop.gr/image/cache//data/Oikodomika%20Ylika/Geomembranes/geomembranes-biostalis-shop-600x315w.jpg>

- **Γεωδίκτυα (Geonets) και Γεωσύνθετα (Geocomposites):** Χρησιμοποιούνται κυρίως για αποστράγγιση και απομάκρυνση υδάτων, προστατεύοντας τις κατασκευές από υδροστατικές πιέσεις.

1. Λειτουργίες και Πλεονεκτήματα

Οι λειτουργίες των γεωσυνθετικών είναι ποικίλες και πολύτιμες στη διαχείριση γεωτεχνικών κινδύνων:

- **Διαχωρισμός:** Αποτρέπουν την ανάμιξη διαφορετικών στρωμάτων εδάφους, π.χ. στη βάση δρόμων, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των στρώσεων και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των κατασκευών (Jones & Dixon, 2015).
- **Ενίσχυση:** Η μηχανική αντοχή των γεωπλεγμάτων και γεωυφασμάτων βελτιώνει τη συνοχή και την αντοχή του εδάφους, μειώνοντας τον κίνδυνο καθιζήσεων, κατολισθήσεων και αποκολλήσεων (Koerner, 2012).
- **Φιλτράρισμα και Αποστράγγιση:** Επιτρέπουν τη διέλευση νερού ενώ συγκρατούν σωματίδια εδάφους, αποτρέποντας τη διάβρωση και εξασφαλίζοντας την απομάκρυνση υδάτων από κρίσιμες ζώνες (Vazquez et al., 2016).
- **Στεγανοποίηση:** Γεωμεμβράνες δημιουργούν φράγματα στην κίνηση υγρών, προστατεύοντας περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές από διαρροές και ρύπανση.

2. Εφαρμογές στη Διαχείριση Κινδύνων

Η χρήση των γεωσυνθετικών υλικών έχει αποδειχθεί καθοριστική στην αντιμετώπιση γεωτεχνικών κινδύνων:

1. **Σταθεροποίηση πρανών και πρανών ορυγμάτων:** Με τη χρήση γεωπλεγμάτων ενισχύεται το έδαφος, αυξάνοντας τη φέρουσα ικανότητα και μειώνοντας τον κίνδυνο κατολισθήσεων (Koerner, 2012).
2. **Πρόληψη καθιζήσεων:** Τα γεωυφάσματα διαχωρίζουν το έδαφος από τα επιφανειακά υλικά, αποτρέποντας την ανάμειξη και τις ανωμαλίες στην υποδομή (Jones & Dixon, 2015).
3. **Διαχείριση υδάτων:** Η αποστράγγιση μέσω γεωδίχτων και γεωσυνθέτων μειώνει τις υδροστατικές πιέσεις και τον κίνδυνο αποσταθεροποίησης των εδαφικών μαζών.
4. **Προστασία περιβάλλοντος:** Με τις γεωμεμβράνες εξασφαλίζεται η αποφυγή ρύπανσης υπογείων υδάτων και εδαφών σε περιοχές αποθήκευσης και διάθεσης αποβλήτων (Vazquez et al., 2016).

Η ευελιξία, η ανθεκτικότητα και η οικονομικότητα των γεωσυνθετικών υλικών τα καθιστούν αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης γεωτεχνικής μηχανικής. Με τη σωστή επιλογή και εφαρμογή, συμβάλλουν αποφασιστικά στη μείωση των

γεωτεχνικών κινδύνων και στην προστασία των υποδομών και του περιβάλλοντος.

4.3.4 Τεχνολογίες παρακολούθησης και πρόβλεψης γεωτεχνικών κινδύνων.

Σε αυτό το τμήμα θα εξετάσουμε τις σύγχρονες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη γεωτεχνικών κινδύνων. Η έγκαιρη ανίχνευση κινδύνων και η πρόβλεψη πιθανών καταστροφών αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για την πρόληψη και την αποτελεσματική διαχείριση των γεωτεχνικών κινδύνων. Θα αναλύσουμε τις κύριες τεχνολογίες αισθητήρων, δορυφορικής τηλεπισκόπησης, γεωραντάρ και ψηφιακής μοντελοποίησης, καθώς και τη σημασία των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης.

Η σύγχρονη γεωτεχνική μηχανική αξιοποιεί προηγμένες τεχνολογίες για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη γεωτεχνικών κινδύνων, με στόχο την προστασία ανθρώπων, υποδομών και περιβάλλοντος. Η έγκαιρη ανίχνευση μεταβολών στις γεωτεχνικές παραμέτρους και η πρόβλεψη ενδεχόμενων αστοχιών συμβάλλουν καθοριστικά στη διαχείριση των κινδύνων, περιορίζοντας τις οικονομικές ζημιές και τις ανθρώπινες απώλειες (Dai et al., 2002; Kundu et al., 2016).

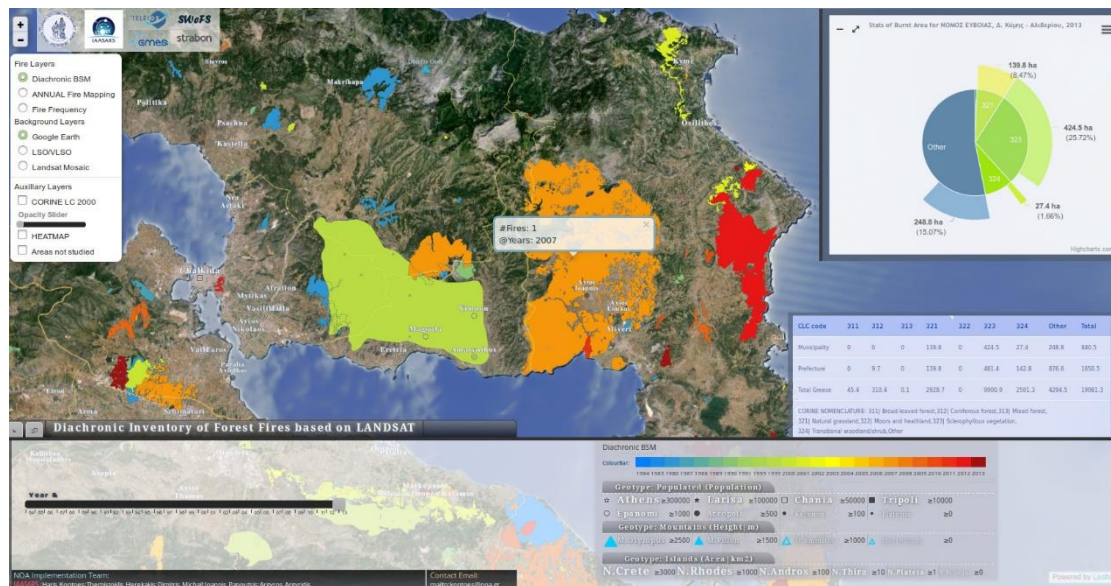
Τεχνολογίες αισθητήρων

Η χρήση αισθητήρων αποτελεί τη βασική μέθοδο παρακολούθησης σε γεωτεχνικά έργα. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι επιφανειακοί και υπόγειοι αισθητήρες παρακολούθησης μετακινήσεων (π.χ. ηλεκτρομηχανικοί, οπτικοί, GPS), οι αισθητήρες πίεσης, οι ενσωματωμένοι επιταχυνσιόμετρα και οι συσκευές μέτρησης υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους (Fellenius, 2012). Τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν την αξιολόγηση της σταθερότητας πρανών, την παρακολούθηση της συμπεριφοράς θεμελιώσεων και την ανίχνευση πρώιμων σημάτων αστοχίας.

Δορυφορική τηλεπισκόπηση και χρήση GIS

Οι δορυφορικές τεχνολογίες, όπως το InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), προσφέρουν υψηλής ακρίβειας δεδομένα για την παρακολούθηση παραμορφώσεων του εδάφους σε μεγάλη κλίμακα και με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (Bürgmann et al., 2012). Συνδυασμένες με τα γεωγραφικά συστήματα

πληροφοριών (GIS), οι δορυφορικές εικόνες διευκολύνουν τη χωρική ανάλυση των γεωτεχνικών κινδύνων και την ανάπτυξη χαρτών επικινδυνότητας.



Εικόνα 10: Τηλεπισκόπηση. https://fperegrine.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/11/diachronic_bsm.jpg

1. Γεωραντάρ και ηλεκτρικές μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι, όπως το γεωραντάρ (GPR) και οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, χρησιμοποιούνται για την έρευνα των υπόγειων στρωμάτων και την ανίχνευση ασυνέχειας ή ζωνών αστάθειας (Dahlin & Zhou, 2004). Η ανάλυση αυτών των δεδομένων ενισχύει την αξιοπιστία της εκτίμησης κινδύνου, ιδίως σε περιοχές με σύνθετες γεωλογικές συνθήκες.



Εικόνα 11: Είδη γεωραντάρ.

<https://www.poultsidis.com/cache/d/ad42c804def3804eb915fa16b37213b4.jpg>

2. Ψηφιακή μοντελοποίηση και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης

Η ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων βασισμένων σε αριθμητικές προσομοιώσεις (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία) επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των γεωτεχνικών έργων υπό διαφορετικά σενάρια φόρτισης (Cheng & Liu, 2014). Ταυτόχρονα, τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης συνδυάζουν τα δεδομένα αισθητήρων με αλγορίθμους ανάλυσης για την άμεση ειδοποίηση των αρμόδιων φορέων, επιτρέποντας τη λήψη προληπτικών μέτρων (Martha et al., 2017).

4.3.5 Κατασκευές ελέγχου διάβρωσης και προστασίας εδαφών

Η διάβρωση των εδαφών αποτελεί έναν από τους πιο σοβαρούς γεωτεχνικούς και περιβαλλοντικούς κινδύνους, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες κλιματικές διακυμάνσεις και ανθρώπινες παρεμβάσεις. Η απώλεια επιφανειακού εδάφους όχι μόνο υποβαθμίζει τη γονιμότητα και την παραγωγικότητα των εδαφών, αλλά επίσης προκαλεί δυσλειτουργίες σε υποδομές και απειλεί την ασφάλεια των κατοίκων. Οι κατασκευές ελέγχου της διάβρωσης και προστασίας των εδαφών έχουν ως στόχο τη

μείωση της απώλειας εδάφους, την αύξηση της σταθερότητας και την αποτροπή αρνητικών περιβαλλοντικών και κοινωνικών συνεπειών.

Οι κατασκευές ελέγχου διάβρωσης περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών και υλικών, που επιλέγονται ανάλογα με τη γεωμορφολογία, το είδος του εδάφους, την κλίση του εδάφους, και το είδος της διάβρωσης (επιφανειακή, αυλακώδης, σχισμοειδής κλπ.) (Poesen et al., 2003). Συνήθεις μέθοδοι περιλαμβάνουν:

1. **Τοιχία αντιστήριξης και αναβαθμίδες:** Εφαρμόζονται για τη συγκράτηση του εδάφους σε επικλινείς επιφάνειες, μειώνοντας την ταχύτητα απορροής του νερού και επομένως τη διάβρωση (Morgan, 2005).
2. **Δίκτυα γεωφάντων και γεωσυνθετικών υλικών:** Χρησιμοποιούνται για τη θωράκιση επιφανειών από τη διάβρωση, ειδικά σε σημεία όπου το νερό ρέει με μεγάλη ένταση (Koerner, 2012).
3. **Βιοτεχνικές μέθοδοι:** Περιλαμβάνουν τη φύτευση ειδικών φυτών με βαθύ ριζικό σύστημα που σταθεροποιεί το έδαφος και βελτιώνει τη δομή του (Gray & Sotir, 1996).
4. **Κατασκευές αποστράγγισης και ανακατεύθυνσης υδάτων:** Ελέγχουν τη ροή του νερού ώστε να αποφεύγονται πλημμύρες και εδαφική διάβρωση (Schiechl & Stern, 1997).

Η αποτελεσματικότητα των κατασκευών αυτών εξαρτάται από τον σωστό σχεδιασμό και την κατάλληλη εφαρμογή τους, καθώς και από τη συνεχή συντήρηση και παρακολούθηση (Lal, 1998). Επιπλέον, η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων είναι κρίσιμη για τη βιωσιμότητα και αποδοχή τέτοιων έργων από τις τοπικές κοινότητες (Hessel et al., 2017).

5. Θεμελιώδεις Αρχές της Γεωτεχνικής Μηχανικής

Η γεωτεχνική μηχανική αποτελεί θεμέλιο λίθο της πολιτικής μηχανικής, καθώς αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών που βρίσκονται στη βάση κάθε τεχνικού έργου. Οι αρχές της επιστήμης αυτής διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον εντοπισμό, την ανάλυση και την αντιμετώπιση

γεωτεχνικών κινδύνων, ειδικά στο πλαίσιο της σύγχρονης περιβαλλοντικής διαχείρισης και των ειδικών κατασκευών που αναπτύσσονται σε περιοχές υψηλού κινδύνου.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι βασικές έννοιες και αρχές της γεωτεχνικής μηχανικής, οι οποίες αποτελούν τη βάση για την κατανόηση πιο εξειδικευμένων θεμάτων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και θα εξεταστούν στα επόμενα. Συγκεκριμένα:

- Στην ενότητα **5.1**, αναλύονται τα κύρια **χαρακτηριστικά και η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών**, όπως η συνοχή, η διατμητική αντοχή, η διαπερατότητα και η συμπιεστότητα, τα οποία καθορίζουν την απόκριση του εδάφους υπό φορτίσεις ή περιβαλλοντικές επιδράσεις.
- Η ενότητα **5.2** επικεντρώνεται στις **γεωτεχνικές έρευνες και τη διαδικασία αξιολόγησης γεωτεχνικών κινδύνων**, που αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο του σχεδιασμού τεχνικών έργων και ειδικών κατασκευών. Θα αναλυθούν οι βασικές μέθοδοι, οι φάσεις της έρευνας και τα κρίσιμα σημεία για την κατανόηση της επικινδυνότητας του υπεδάφους.
- Τέλος, η ενότητα **5.3** παρουσιάζει το **θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο** που διέπει τον γεωτεχνικό σχεδιασμό, όπως οι Ελληνικοί Αντισεισμικοί Κανονισμοί (ΕΑΚ), ο Ευρωκώδικας 7 (EC7), τα πρότυπα ISO και οι οδηγίες της ΕΣΠΕΛ. Η ύπαρξη και η εφαρμογή αυτών των κανονισμών είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των έργων.

Το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως κρίσιμος συνδετικός κρίκος μεταξύ της θεωρητικής βάσης και της εφαρμοσμένης πρακτικής στη γεωτεχνική μηχανική και αποτελεί προϋπόθεση για την κατανόηση των ειδικών γεωτεχνικών λύσεων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

5.1 Χαρακτηριστικά και μηχανική συμπεριφορά εδαφών

Η κατανόηση της φύσης και της συμπεριφοράς του εδάφους αποτελεί τον πυρήνα της γεωτεχνικής μηχανικής. Τα εδάφη είναι σύνθετα γεωλογικά υλικά με ετερογενή σύνθεση, που διαφέρουν σημαντικά ως προς τη φυσική τους κατάσταση, τη μηχανική τους απόκριση και την επίδρασή τους στην ασφάλεια των τεχνικών έργων. Η

συμπεριφορά τους επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση, το πορώδες, η υγρασία, το βάθος, και οι φυσικοχημικές διεργασίες που τα έχουν διαμορφώσει με την πάροδο του χρόνου (Das & Sobhan, 2018).

Η ενότητα αυτή αποσκοπεί στην παρουσίαση των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών, όπως η διατμητική αντοχή, η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής, η διαπερατότητα και η συμπιεστότητα. Παράλληλα, αναλύονται η ταξινόμηση των εδαφών και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα και φέρουσα ικανότητά τους, παρέχοντας το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ερμηνεία γεωτεχνικών συμπεριφορών στο πεδίο.

- **Δομή και σύσταση εδάφους**

Το έδαφος αποτελείται από στερεά σωματίδια (ορυκτά και οργανικά), πόρους (κενά) και υγρά (νερό ή/και αέρα). Η κοκκομετρική διαβάθμιση – δηλαδή η κατανομή των κόκκων ανά μέγεθος – επηρεάζει τη μηχανική απόκριση του εδάφους, όπως την αποστράγγιση, τη φέρουσα ικανότητα και τη σταθερότητα πλαγίων. Η ταξινόμηση των εδαφών σε αμμώδη, αργιλώδη ή ιλύες βασίζεται στην αναλογία των κόκκων και τις αντίστοιχες ιδιότητες (Craig, 2012).

Ο δείκτης πλαστικότητας, το όριο υγρότητας και το όριο πλαστικότητας είναι κρίσιμες παράμετροι για τα λεπτόκοκκα εδάφη, ενώ για τα χονδρόκοκκα (άμμοι, χαλίκια), σημαντικότερη είναι η γωνία εσωτερικής τριβής.

- **Συμπιεστότητα και καθιζήσεις**

Η συμπιεστότητα αναφέρεται στην ιδιότητα του εδάφους να μειώνει τον όγκο του υπό εφαρμογή φορτίων. Είναι σημαντική για τη θεμελίωση κατασκευών, καθώς σχετίζεται άμεσα με τις καθιζήσεις των δομών. Τα οργανικά και αργιλώδη εδάφη παρουσιάζουν υψηλή συμπιεστότητα, ενώ τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι συνήθως λιγότερο επιρρεπή σε καθιζήσεις (Budhu, 2011). Οι καθιζήσεις μπορεί να είναι άμεσες (ελαστικές) ή μακροχρόνιες (συμπιεστικές ή ενοποιητικές), και η πρόβλεψή τους απαιτεί εργαστηριακές και επιτόπιες δοκιμές.

- **Διατμητική αντοχή**

Η διατμητική αντοχή είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να φέρει ένα έδαφος πριν από την αστοχία. Εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

1. Τη **συνοχή (c)**, που είναι αποτέλεσμα ηλεκτροχημικών δεσμών και επιφανειακής τάσης,
2. Τη **γωνία εσωτερικής τριβής (φ)**, που σχετίζεται με την τριβή μεταξύ των κόκκων του εδάφους.

Η σχέση μεταξύ αυτών δίνεται από το κλασικό κριτήριο αστοχίας του Mohr–Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

όπου τ η διατμητική αντοχή και σ η ορθή τάση στο επίπεδο διάτμησης (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996). Η διατμητική αντοχή καθορίζει την ευστάθεια πρανών, την αντοχή θεμελίων και την αποδοτικότητα τεχνικών λύσεων για έλεγχο αστοχιών.



Εικόνα 12: Διατμητική Αστοχία. Κατά την αστοχία, η διατμητική τάση κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας φθάνει στη διατμητική αντοχή του εδάφους.

https://docplayer.gr/docs-images/41/10792706/images/page_2.jpg

- **Διαπερατότητα και υδραυλική αγωγιμότητα**

Η διαπερατότητα εκφράζει την ικανότητα ενός εδάφους να επιτρέπει τη διέλευση του νερού μέσω των πόρων του. Μετράται με τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (k), ο οποίος είναι υψηλότερος σε άμμους και χαλίκια και μικρότερος σε αργίλους. Η διαπερατότητα επηρεάζει σημαντικά φαινόμενα όπως η αποστράγγιση, η υπόγεια ροή και η υδραυλική πίεση (Coduto, Yeung, & Kitch, 2016)

Ο έλεγχος της διαπερατότητας είναι ουσιώδης για την αποφυγή φαινομένων όπως υδραυλική διήθηση ή φραγμένα φίλτρα, ειδικά σε κατασκευές φραγμάτων, επιχωμάτων και τοιχίων αντιστήριξης.



Εικόνα 13: Γεωτεχνικές υπηρεσίες – Υδραυλική αγωγιμότητα.

<https://www.gozetim.com/images/jeoteknik-hizmetler---hidrolik-iletkenlik.jpg>

- **Συμπεριφορά υπό φόρτιση – Παραμορφωσιμότητα**

Τα εδάφη δεν είναι απολύτως ελαστικά, αλλά παρουσιάζουν **μη γραμμική και εξαρτώμενη από το χρόνο παραμόρφωση**. Η ανάλυση της **παραμορφωσιμότητας** γίνεται με μετρήσεις του **μέτρου ελαστικότητας (E)** και του **συντελεστή Poisson (ν)**. Στις περισσότερες εφαρμογές, η εδαφική απόκριση μοντελοποιείται με ελαστικά ή ελαστοπλαστικά μοντέλα, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και τα δεδομένα της περιοχής (Smith, 2014).

- **Εδαφική ενίσχυση και τροποποίηση ιδιοτήτων**

Σε περιπτώσεις προβληματικών εδαφών, χρησιμοποιούνται τεχνικές **ενίσχυσης** ή **βελτίωσης** όπως η προσθήκη γεωσυνθετικών, οι χημικές σταθεροποιήσεις (π.χ. με ασβέστη ή τσιμέντο), ή η μηχανική συμπύκνωση. Οι μέθοδοι αυτές τροποποιούν τις ιδιότητες του εδάφους ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του έργου και να μειώνεται ο κίνδυνος αστοχίας (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011).

Η γνώση της συμπεριφοράς των εδαφών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή εκτέλεση γεωτεχνικών έργων και την αποφυγή καταστροφικών αστοχιών. Η κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων, σε συνδυασμό με την εφαρμογή γεωτεχνικών ερευνών και κανονισμών, αποτελεί απαραίτητη

προϋπόθεση για τον σύγχρονο μηχανικό. Στις επόμενες ενότητες, θα αναλυθούν οι μέθοδοι συλλογής αυτών των δεδομένων (5.2) και το πλαίσιο μέσα στο οποίο εφαρμόζονται (5.3).

5.2 Γεωτεχνικές έρευνες και αξιολόγηση κινδύνου

Οι γεωτεχνικές έρευνες αποτελούν αναπόσπαστο στάδιο σχεδιασμού και κατασκευής τεχνικών έργων, καθώς επιτρέπουν την ακριβή αποτύπωση των εδαφικών και γεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής. Μέσω της δειγματοληψίας, των εργαστηριακών δοκιμών και των επιτόπιων ερευνών, συλλέγονται κρίσιμα δεδομένα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του υπεδάφους, τη φέρουσα ικανότητα, τις πιθανολογούμενες καθιζήσεις και τη σεισμική απόκριση της θέσης του έργου (Clayton et al., 2014). Παράλληλα, η ερμηνεία των γεωτεχνικών δεδομένων ενσωματώνεται στην **αξιολόγηση του γεωτεχνικού κινδύνου**, συμβάλλοντας στην πρόληψη αστοχιών και την ασφαλή κατασκευή.

• Σκοπός των γεωτεχνικών ερευνών

Ο βασικός στόχος των γεωτεχνικών ερευνών είναι η συλλογή αξιόπιστων πληροφοριών για:

- Τη σύσταση και την κατακόρυφη διάταξη των εδαφικών στρωμάτων.
- Την παρουσία νερού και τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών του υπεδάφους.
- Πιθανούς γεωλογικούς ή γεωτεχνικούς κινδύνους (π.χ. καθιζήσεις, ρηγματώσεις, ρευστοποιήσεις).
- Τη δυνατότητα θεμελίωσης και τη συμπεριφορά της κατασκευής στο συγκεκριμένο υπόβαθρο (Powrie, 2004).

Η αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων οδηγεί στην εκτίμηση της **γεωτεχνικής επικινδυνότητας** και στην επιλογή κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης.

• Μέθοδοι γεωτεχνικής έρευνας

Επιφανειακή επιθεώρηση (Desktop study)

Πριν τις επιτόπιες εργασίες, πραγματοποιείται η συλλογή γεωλογικών χαρτών, αεροφωτογραφιών και ιστορικών δεδομένων που αφορούν προηγούμενες γεωτεχνικές μελέτες, σεισμικότητα, υπόγεια ύδατα και χρήση γης. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια

αρχική κατανόηση των συνθηκών και καθοδηγεί το σχεδιασμό των δοκιμών πεδίου (Fell et al., 2008).

Δοκιμές πεδίου (in situ testing)

Οι δοκιμές πεδίου περιλαμβάνουν τεχνικές μέτρησης των ιδιοτήτων του εδάφους απευθείας στο φυσικό του περιβάλλον. Ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες είναι:

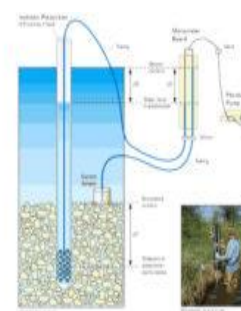
Δοκιμή διείδυσης πρότυπου κώνου (SPT): παλμική διείδυση και καταγραφή αριθμού κρούσεων.



Εικόνα 14: Χρήση μεθόδου SPT.

<https://pdiwebsitestorage.blob.core.windows.net/websitedocstorage/2017/03/SPT-Testing-Marshallville-02-Web-710x420.jpg>

1. **Δοκιμή στατικού κώνου (CPT):** συνεχής καταγραφή αντίστασης σε διείδυση.
2. **Πιεζομετρικές μετρήσεις (piezometers):** καθορισμός υδροστατικής πίεσης και στάθμης υπόγειων νερών.



Εικόνα 15: Χρήση πιεχομετρητή. <https://www.aavadinstrument.com/wp-content/uploads/2022/03/Piezo.jpg>

3. **Δοκιμές επιτόπιας διαπερατότητας** (Lugeon, packer tests): για καθορισμό υδραυλικής αγωγιμότητας γεωλογικών σχηματισμών.

Οι δοκιμές αυτές είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας, της σταθερότητας πλαγιών και της εκτίμησης καθιζήσεων.

Εργαστηριακές δοκιμές

Συμπληρωματικά, πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές σε δειγματοληφθέντα εδάφη και βράχους για προσδιορισμό:

- Φυσικών χαρακτηριστικών: υγρασία, πυκνότητα, πορώδες, πλαστικότητα.
- Μηχανικών ιδιοτήτων: διατμητική αντοχή (δοκιμή τριβής), συμπίεστικότητα (δοκιμές ενοποίησης), παραμορφωσιμότητα (δοκιμές φόρτισης).
- Υδραυλικών παραμέτρων: συντελεστής διαπερατότητας (δοκιμή Darcy).

Η επιλογή του τύπου και της έκτασης των εργαστηριακών δοκιμών εξαρτάται από το είδος του έργου, τον κίνδυνο, και τη γεωλογική πολυπλοκότητα (Craig, 2012).

Συστήματα γεωτεχνικής κατηγοριοποίησης και εκτίμηση επικινδυνότητας

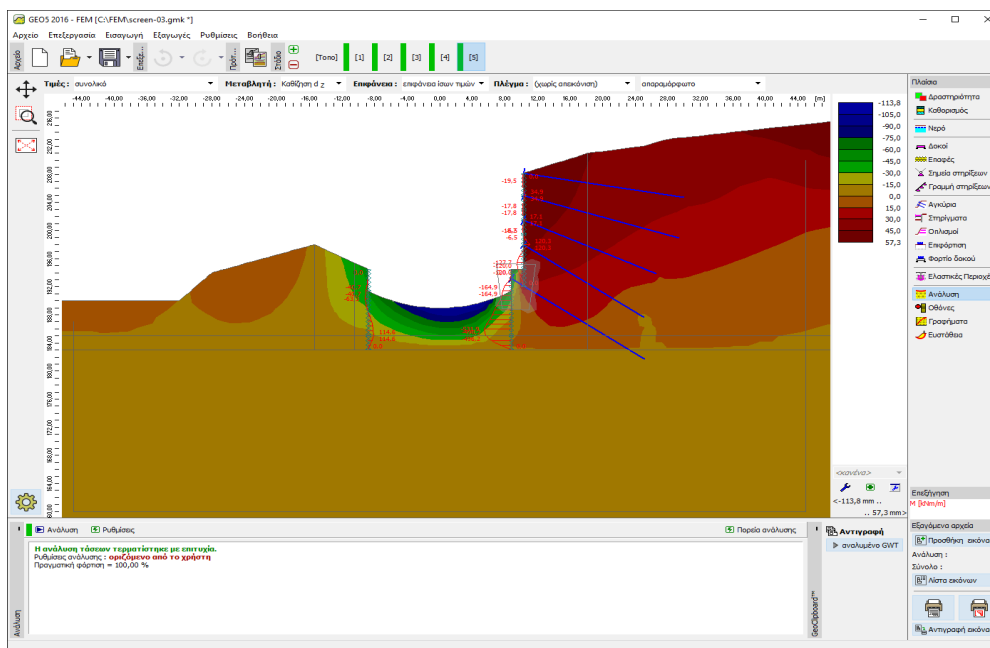
Η ταξινόμηση και αξιολόγηση γεωτεχνικού κινδύνου μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση **συστημάτων βαθμονόμησης (ranking systems)**, στα οποία αξιολογούνται πολλαπλοί παράγοντες, όπως:

1. Κλίση πρανούς
2. Τύπος εδάφους και πετρώματος
3. Παρουσία νερού
4. Σεισμικότητα περιοχής
5. Ιστορικό αστοχιών

Σύμφωνα με τον **Fell et al. (2008)**, η εκτίμηση γεωτεχνικού κινδύνου συνίσταται σε:

- **Προσδιορισμό του σεναρίου αστοχίας**
- **Ανάλυση πιθανότητας εμφάνισης (likelihood)**
- **Εκτίμηση συνεπειών (consequences)**
- **Ποσοτικοποίηση κινδύνου ως συνδυασμό των παραπάνω**

Στο πλαίσιο αυτό, αξιοποιούνται και σύγχρονες μέθοδοι υπολογιστικής υποστήριξης, όπως **λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων (FEM)**, **γεωστατιστική ανάλυση**, και **συστήματα GIS**, τα οποία επιτρέπουν την ολοκληρωμένη απεικόνιση και ερμηνεία γεωτεχνικών δεδομένων.



Εικόνα 16: Χρήση γεωτεχνικού λογισμικού (Σχεδιασμός εκσκαφής).

<https://data.fine.cz/programs-screenshots/geotechnical-engineering-software-fem.gif>

- **Σχέση γεωτεχνικών δεδομένων με τον σχεδιασμό**

Η αξία των γεωτεχνικών δεδομένων αναδεικνύεται στον σχεδιασμό θεμελιώσεων, τοιχίων αντιστήριξης, σηράγγων, επιχωμάτων και πρανών. Η ακρίβεια της μελέτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων που συλλέγονται. Η υποεκτίμηση ή η παράλειψη γεωτεχνικών παραμέτρων έχει αποδειχθεί, ιστορικά, κύρια αιτία αστοχίας τεχνικών έργων (Terzaghi et al., 1996).

Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούν εκτιμήσεις πιθανοτήτων αστοχίας και συνθέτουν το υπόβαθρο για την πρόβλεψη και πρόληψη φαινομένων όπως καθιζήσεις, αστοχίες πρανών, ρευστοποιήσεις ή διαρροές σε υπόγειες υποδομές.

Οι γεωτεχνικές έρευνες δεν αποτελούν απλώς τεχνικό προαπαιτούμενο των έργων, αλλά βασικό εργαλείο πρόγνωσης και διαχείρισης του γεωτεχνικού κινδύνου. Η επαρκής και συστηματική αξιολόγηση των γεωτεχνικών δεδομένων μπορεί να

αποτρέψει σημαντικές αστοχίες, να βελτιώσει το κόστος και τη χρονική αποδοτικότητα του έργου και να εξασφαλίσει τη μακροχρόνια σταθερότητά του. Η σύνδεση των ερευνών με τις κανονιστικές απαιτήσεις (βλ. 5.3) ολοκληρώνει την αναγκαία βάση για σύγχρονο, ασφαλή και τεκμηριωμένο γεωτεχνικό σχεδιασμό.

5.3 Κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο (ΕΑΚ, EC7, ISO, ΕΣΠΕΚ)

Ο σχεδιασμός γεωτεχνικών έργων και η διαχείριση των γεωτεχνικών κινδύνων οφείλει να βασίζεται σε ένα αυστηρό και σαφώς ορισμένο κανονιστικό πλαίσιο. Οι τεχνικές οδηγίες, οι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί, καθώς και τα πρότυπα ποιότητας καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφάλεια, την αντοχή και τη λειτουργικότητα των τεχνικών έργων. Στην ελληνική και ευρωπαϊκή πρακτική, ιδιαίτερη σημασία έχουν ο **Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ)**, ο **Ευρωκώδικας 7 (EC7)** για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό, τα **πρότυπα ISO**, και το **Εθνικό Σχέδιο Πρόληψης Εδαφικών Καταπτώσεων (ΕΣΠΕΚ)**. Αυτά αποτελούν το θεμέλιο για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στη γεωτεχνική μηχανική.

- **Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ)**

Ο ΕΑΚ (ΕΑΚ2000 και αναθεωρήσεις του) καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις για τον **αντισεισμικό σχεδιασμό** τεχνικών έργων. Περιλαμβάνει κατευθυντήριες γραμμές για την κατηγοριοποίηση του εδάφους, την εκτίμηση της σεισμικής επιτάχυνσης σχεδιασμού, και την επιλογή κατάλληλων συντελεστών ασφάλειας (ΟΑΣΠ, 2003).

Βασικά σημεία του ΕΑΚ:

Καθορισμός **σεισμικών ζωνών** ανά την επικράτεια.

- Κατηγοριοποίηση εδαφών σε **τύπους Α έως Ε** (συμπαγή πετρώματα έως πολύ μαλακά εδάφη).
- Ορισμός **συντελεστή σεισμικής σπουδαιότητας** του έργου.
- Προβλέψεις για **ιδιαίτερες γεωτεχνικές συνθήκες**, όπως ρευστοποίηση, καθιζήσεις, και ενεργά ρήγματα.

Η εφαρμογή του ΕΑΚ είναι υποχρεωτική για όλα τα τεχνικά έργα στην Ελλάδα και προϋποθέτει την ενσωμάτωση των γεωτεχνικών δεδομένων στον σεισμικό σχεδιασμό.

- **Ευρωκώδικας 7 (EC7) – Γεωτεχνικός Σχεδιασμός**

Ο Ευρωκώδικας 7 (EN 1997) αποτελεί μέρος των ευρωπαϊκών προτύπων για τον σχεδιασμό τεχνικών έργων. Περιλαμβάνει δύο μέρη:

- **EN 1997-1: General rules** – Γενικοί κανόνες γεωτεχνικού σχεδιασμού.
- **EN 1997-2: Ground investigation and testing** – Οδηγίες για γεωτεχνικές έρευνες και δοκιμές.

Κύριες αρχές του EC7:

- **Ανάλυση με βάση το όριο αστοχίας** (Ultimate Limit State – ULS) και το λειτουργικό όριο (Serviceability Limit State – SLS).
- Χρήση μεθόδου μερικών συντελεστών ασφαλείας (partial safety factors).
- Διακριτός χειρισμός γεωτεχνικής αβεβαιότητας και απαιτήσεων ποιότητας για την τεκμηρίωση του σχεδιασμού.
- Αναγνώριση της σημασίας της μηχανικής εδαφών και βράχων, αλλά και της εμπειρικής τεκμηρίωσης από τοπικά δεδομένα.

Ο EC7 προτείνει επίσης την εφαρμογή γεωτεχνικής κατηγοριοποίησης του έργου (**Geotechnical Category**) για την κλιμάκωση του επιπέδου έρευνας και ανάλυσης. Τα έργα κατηγοριοποιούνται σε:

- **Κατηγορία 1** (απλά έργα με χαμηλό ρίσκο),
- **Κατηγορία 2** (τυπικά τεχνικά έργα),
- **Κατηγορία 3** (έργα υψηλής επικινδυνότητας ή πολύπλοκης γεωτεχνικής συμπεριφοράς).

- **Πρότυπα ISO και ποιοτική διασφάλιση**

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) έχει εκδώσει πληθώρα προτύπων που αφορούν τα συστήματα διαχείρισης ποιότητας, την αξιοπιστία δεδομένων και την ανάλυση επικινδυνότητας.

Ενδεικτικά πρότυπα:

1. **ISO 9001** – Διαχείριση ποιότητας σε έργα μηχανικής.

2. **ISO 14688-1 και 2** – Κατηγοριοποίηση και ονοματολογία εδαφικών υλικών.
3. **ISO 22475** – Εγκατάσταση γεωτεχνικών οργάνων και γεωτρήσεις.
4. **ISO 31000** – Διαχείριση κινδύνου (risk management): αρχές και κατευθύνσεις.

Η συμμόρφωση με τα πρότυπα ISO αυξάνει τη διαφάνεια των γεωτεχνικών μελετών και τη δυνατότητα πιστοποίησης του έργου σε διεθνές επίπεδο (ISO, 2018).

- **Εθνικό Σχέδιο Πρόληψης Εδαφικών Καταπτώσεων (ΕΣΠΕΚ)**

Το **ΕΣΠΕΚ** αποτελεί πρωτοβουλία της Πολιτικής Προστασίας και του ΙΓΜΕ για την **ολοκληρωμένη χαρτογράφηση και πρόληψη γεωκινδύνων** (κυρίως κατολισθήσεων) στην Ελλάδα. Περιλαμβάνει:

- **Χαρτογράφηση περιοχών υψηλής επικινδυνότητας.**
- Εφαρμογή **Συστημάτων GIS** για παρακολούθηση μεταβολών.
- Υλοποίηση **πilotικών παρεμβάσεων σταθεροποίησης** σε ευάλωτες περιοχές.
- Εκπόνηση **τοπικών σχεδίων πρόληψης και αντιμετώπισης.**

Το ΕΣΠΕΚ λειτουργεί ως εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού και πολιτικής απόφασης για την αντιμετώπιση του κινδύνου εδαφικών καταπτώσεων και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας κρίσιμων υποδομών (ΙΓΜΕ, 2020).

Το κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο της γεωτεχνικής μηχανικής στην Ελλάδα και την Ευρώπη έχει εξελιχθεί σημαντικά, με σκοπό την **ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του γεωτεχνικού κινδύνου**. Η εφαρμογή του ΕΑΚ και του EC7, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των ISO και τις κρατικές πρωτοβουλίες όπως το ΕΣΠΕΚ, προσφέρει ένα πολυεπίπεδο σύστημα ελέγχου ποιότητας, αξιοπιστίας και πρόληψης. Η συμμόρφωση με αυτό το πλαίσιο δεν είναι μόνο νομική υποχρέωση αλλά και αναγκαία προϋπόθεση για την **ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα** των τεχνικών έργων στον σύγχρονο γεωτεχνικό σχεδιασμό.

6. Κατηγορίες Ειδικών Γεωτεχνικών Κατασκευών

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει στις βασικές κατηγορίες ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών που αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τη διαχείριση και μείωση γεωτεχνικών κινδύνων σε διάφορα περιβάλλοντα, ιδιαίτερα σε ημιαστικές και αστικές περιοχές με αυξημένες απαιτήσεις σταθερότητας και ασφάλειας. Η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτών των κατασκευών συνιστούν την τεχνολογική βάση για την ενίσχυση και προστασία των εδαφικών υποδομών, καθώς και για την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως καθιζήσεις, κατολισθήσεις και διάβρωση.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι κυριότερες κατηγορίες ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών, όπως οι πασσαλώσεις και μικροπασσαλώσεις, τα αγκυρωμένα τοιχία και οι κατακόρυφες ενισχύσεις, οι τεχνικές ενίσχυσης πρανών με χρήση soil nailing και γεωυφασμάτων, καθώς και μέθοδοι ενέματος και βελτίωσης εδάφους όπως το deep mixing και το jet grouting. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα γεωσυνθετικά υλικά και οι τεχνολογίες ενίσχυσης εδάφους, τα οποία αποτελούν σύγχρονες και αποτελεσματικές λύσεις για την αύξηση της σταθερότητας και της ανθεκτικότητας των εδαφικών κατασκευών.

Η συστηματική προσέγγιση αυτών των θεμάτων θα προσφέρει στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη εικόνα των δυνατοτήτων και των περιορισμών των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών, καθώς και των εφαρμογών τους σε σύγχρονα έργα υποδομής και διαχείρισης περιβαλλοντικών κινδύνων.

6.1 Πασσαλώσεις – Μικροπασσάλωση

Οι πασσαλώσεις αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές ενίσχυσης θεμελίων, ιδιαίτερα σε εδάφη με χαμηλή φέρουσα ικανότητα ή αυξημένο κίνδυνο καθιζήσεων. Ουσιαστικά, οι πάσσαλοι είναι κατακόρυφοι φορείς που μεταφέρουν τα φορτία από τα υπερκείμενα κατασκευαστικά στοιχεία σε βαθύτερα, πιο ανθεκτικά στρώματα εδάφους ή βραχώδους υποβάθρου (Das, 2013).

Τύποι πασσάλων:

- **Ξύλινοι πάσσαλοι:** Παραδοσιακά χρησιμοποιούμενοι, σήμερα περιορισμένης χρήσης λόγω ανθεκτικότητας και περιβαλλοντικών περιορισμών.
- **Σκυροδετημένοι πάσσαλοι:** Ο πιο συνηθισμένος τύπος, κατασκευασμένος είτε με εκσκαφή και σκυροδέτηση in situ είτε με προκατασκευασμένα στοιχεία.
- **Μεταλλικοί πάσσαλοι:** Χρησιμοποιούνται συχνά σε ειδικές εφαρμογές, προσφέροντας υψηλή αντοχή και ευελιξία (Bowles, 1996).
- **Μικροπάσσαλοι:** Με μικρή διάμετρο (συνήθως 150-300 mm), τοποθετούνται με ειδικό εξοπλισμό και χρησιμοποιούνται σε περιορισμένους χώρους, ημιαστικά περιβάλλοντα και για σταθεροποίηση πρανών (Tomlinson & Woodward, 2008).

Οι εφαρμογές των πασσαλώσεων είναι ποικίλες. **1)** χρησιμοποιούνται για τη **σταθεροποίηση** θεμελίων κτιρίων και γεφυρών. **2)** εφαρμόζονται στην **ενίσχυση** πρανών και αναβαθμών. **3)** αποτελούν βασικό μέσο διαχείρισης καθιζήσεων σε μαλακά εδάφη. **4)** η **μικροπασσάλωση** επιτρέπει γρήγορη και αποτελεσματική ενίσχυση με περιορισμένη όχληση στο περιβάλλον, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για περιορισμένους χώρους ή υφιστάμενες κατασκευές (Das, 2013; Bowles, 1996).

Σε ό,τι αφορά τα **τεχνικά χαρακτηριστικά** και τις **σύγχρονες μεθόδους**, **1)** οι γεωτεχνικές έρευνες παίζουν καθοριστικό ρόλο για την επιλογή του τύπου πασσάλου και του κατάλληλου βάθους εφαρμογής. **2)** Η **εκσκαφή** πραγματοποιείται με μεθόδους που **ελαχιστοποιούν τις δονήσεις και τον θόρυβο**, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές. **3)** εφαρμόζονται **τεχνολογίες ελέγχου ποιότητας** όπως **δυναμικές δοκιμές και μετρήσεις φορτίων**, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και αντοχή της κατασκευής. **4)** λαμβάνονται υπόψη **περιβαλλοντικές παράμετροι**, όπως η **αποφυγή ρύπανσης** και η **διαχείριση υπογείων υδάτων**, προωθώντας βιώσιμες πρακτικές στην κατασκευή (Tomlinson & Woodward, 2008).

6.2 Αγκυρωμένα τοιχία και κατακόρυφες ενισχύσεις

Τα αγκυρωμένα τοιχία αποτελούν μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την αντιστήριξη πρανών και την αποτροπή κατολισθήσεων σε ημιαστικά και αστικά περιβάλλοντα. Η βασική τους λειτουργία βασίζεται στην εφαρμογή ειδικών

αγκυρώσεων (συρμάτων ή ράβδων υψηλής αντοχής) που εισάγονται μέσα στο έδαφος ή στο βράχο, παρέχοντας επιπλέον στατική αντοχή και ευστάθεια στην κατασκευή (Burland, 1990).

Οι κατακόρυφες ενισχύσεις, όπως οι **πασσαλοτοιχίες** και οι **κατακόρυφοι πασσάλι**, συνεργάζονται συνήθως με τα **αγκυρωμένα τοιχία**, σχηματίζοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα που μειώνει τις παραμορφώσεις και αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα του πρανούς (Holtz & Kovacs, 1981). Οι ενισχύσεις αυτές τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία και λειτουργούν μεταφέροντας τα φορτία του εδάφους σε βαθύτερα και πιο σταθερά στρώματα, αποτρέποντας τη μετακίνηση και τη διάβρωση του πρανούς (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996).

Η εφαρμογή αγκυρωμένων τοιχίων απαιτεί λεπτομερείς γεωτεχνικές έρευνες για τον καθορισμό της ακριβούς θέσης, βάθους και διαμέτρου των αγκυρώσεων, καθώς και για την επιλογή των κατάλληλων υλικών. Η αντοχή των αγκυρώσεων και η διάρκεια ζωής τους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υγρασία ή επιθετικές χημικές συνθήκες (Das, 2013).

Τεχνικά, η κατασκευή περιλαμβάνει τη διάνοιξη οπών στο πρανές, την εισαγωγή των αγκυρώσεων και τη στερεοποίηση τους με έγχυση τσιμεντοειδούς μάζας. Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του τοιχίου μετά την κατασκευή πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων παραμορφώσεων και δυνάμεων στις αγκυρώσεις, ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα και η ασφάλεια του συστήματος (Tomlinson & Woodward, 2008).

6.3 Τεχνικές Ενίσχυσης Πρανών (Soil Nailing, Γεωϋφάσματα)

Η ενίσχυση πρανών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στη γεωτεχνική μηχανική, ειδικά σε περιοχές με απότομη τοπογραφία, σαθρά εδάφη ή έντονες υδρομετεωρολογικές επιδράσεις. Σκοπός των τεχνικών ενίσχυσης είναι η **αύξηση της ευστάθειας του πρανούς** και η **αποτροπή κατολισθήσεων ή ερπυστικών φαινομένων**, χωρίς απαραίτητα να απαιτείται πλήρης εκσκαφή ή ανασχεδιασμός. Δύο από τις πλέον διαδεδομένες σύγχρονες τεχνικές είναι το **soil nailing** (καρφιά εδάφους) και η χρήση **γεωϋφασμάτων**, τεχνικές που προσφέρουν ευελιξία, ταχύτητα κατασκευής και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Krahn & Fredlund, 2019).

6.3.1 Τεχνική Soil Nailing (Καρφιά Εδάφους)

Το soil nailing είναι μία τεχνική ενίσχυσης πρανών και κάθετων εκσκαφών με τη χρήση παθητικών αγκυρίων (συνήθως ράβδων χάλυβα) που εισάγονται μέσα στο εδαφικό σώμα σε προκαθορισμένες θέσεις και γωνίες κλίσης. Οι ράβδοι αυτές, αφού εισαχθούν σε προτρυπημένες οπές, στερεώνονται με τσιμεντενέσεις (grouting), και συνδυάζονται με πρόσοψη οπλισμένου σκυροδέματος ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) στην επιφάνεια.



Εικόνα 17: Χρήση τεχνικής soil nailing (Καρφιά εδάφους).

https://www.maccaferri.com/wp-content/uploads/2022/12/soil-nailing_4-1024x681.jfif

Αρχές λειτουργίας

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται:

- Στην **αλληλεπίδραση εδάφους και αγκυρίων**, τα οποία ενεργοποιούνται παθητικά μέσω της μετακίνησης του εδάφους.
- Στη **δημιουργία ενός σύνθετου σταθεροποιημένου εδαφικού σώματος**, όπου τα καρφιά λειτουργούν ως ενισχυτικά μέλη υπό αξονική τάση.
- Στη **βελτίωση των διατμητικών χαρακτηριστικών** της εδαφικής μάζας (Schlosser & Unterreiner, 2001).

Πεδία εφαρμογής

Η τεχνική είναι κατάλληλη για:

- Ενίσχυση φυσικών ή τεχνητών πρανών
- Στήριξη εκσκαφών σε πόλεις ή υποδομές μεταφορών
- Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων
- Αναβάθμιση υφιστάμενων έργων (π.χ. φράγματα, σήραγγες)

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- **Μήκος καρφιών:** 4 – 20 m, ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες.
- **Διάμετρος:** 25 – 50 mm (συνήθως ράβδοι S500).
- **Γωνία εισόδου:** 10° έως 20° προς την οριζόντια.
- **Απόσταση τοποθέτησης:** 1.5 – 2.5 m (κατά πλέγμα).

Πλεονεκτήματα

- Ευελιξία εφαρμογής σε ποικιλία εδαφικών συνθηκών
- Χαμηλό κόστος σε σχέση με παραδοσιακές τοιχοποιίες
- Ελάχιστη περιβαλλοντική όχληση και εκσκαφή

Περιορισμοί

1. Δεν είναι κατάλληλη για κορεσμένα ή πολύ μαλακά εδάφη
2. Δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις υψηλών πλευρικών φορτίων ή σεισμικής δραστηριότητας χωρίς εξειδικευμένο σχεδιασμό

Παράδειγμα εφαρμογής

Στο έργο **βελτίωσης της Εθνικής Οδού ΠΑΘΕ στα Τέμπη**, χρησιμοποιήθηκαν συστήματα soil nailing σε πρανή ύψους έως 25 m, με έλεγχο σταθερότητας μέσω γεωδαιτικών σταθμών και πλαστικών ινών στη θεμελίωση των πρόσοψεων (Papadopoulos et al., 2018).

6.3.2 Γεωϋφάσματα και Γεωενισχυτικά Υλικά (Geotextiles)

Τα γεωϋφάσματα αποτελούν ένα σημαντικό κεφάλαιο της γεωσυνθετικής μηχανικής. Είναι συνθετικά πολυμερή υλικά, συνήθως από πολυπροπυλένιο ή πολυεστέρα, με

κυρίως ενισχυτικό, διαχωριστικό, φίλτρο ή αποστραγγιστικό ρόλο. Η ενίσχυση πρανών με γεωϋφάσματα επιτυγχάνεται μέσω στρωματοποίησης ή επένδυσης του πρανούς με αυτά τα υλικά, σε συνδυασμό με γεωπλέγματα ή γεωκυψέλες.

Τύποι γεωϋφασμάτων

- **Υφαντά γεωϋφάσματα (woven):** Υψηλής εφελκυστικής αντοχής, κατάλληλα για ενίσχυση.
- **Μη υφαντά γεωϋφάσματα (non-woven):** Ιδανικά για φιλτράρισμα και αποστράγγιση.
- **Ενισχυμένα σύνθετα γεωυφάσματα:** Συνδυάζουν τις ιδιότητες ενίσχυσης και αποστράγγισης.

Ρόλος στην ενίσχυση πρανών

- **Αυξάνουν την εφελκυστική αντοχή του πρανούς** (δια της ενίσχυσης των διατμητικών τάσεων).
- **Μειώνουν την πιθανότητα διάβρωσης.**
- **Συμβάλλουν στη συγκράτηση των λεπτόκοκκων υλικών.**
- **Δρουν ως φίλτρα** αποτρέποντας τη μετακίνηση σωματιδίων από πίσω εδαφικά στρώματα.

Τεχνικά κριτήρια σχεδιασμού

- **Εφελκυστική αντοχή γεωυφάσματος (Tensile strength):** Συνήθως 30–1000 kN/m
- **Συντελεστής μείωσης λόγω χρόνου και περιβάλλοντος (reduction factors):** Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για μακροχρόνια απόδοση (Koerner, 2012)
- **Συνδυασμός με αποστραγγιστικές στρώσεις ή γεωπλέγματα** για βελτιστοποίηση.

Πλεονεκτήματα

- Ταχύτητα τοποθέτησης
- Συμβατότητα με τεχνικές οικολογικής αποκατάστασης (π.χ. υδροσπορά)

- Δυνατότητα χρήσης σε **απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές**
- Μείωση κόστους και εξάρτησης από ογκώδη υλικά

Παράδειγμα εφαρμογής

Στο έργο **σταθεροποίησης πρανών στην Εγνατία Οδό (τμήμα Κομοτηνή - Ίασμος)** χρησιμοποιήθηκε πολυστρωματική ενίσχυση με **υφαντά γεωϋφάσματα υψηλής αντοχής**, συνδυασμένα με γεωπλέγματα και φυτική κάλυψη για βιοτεχνική αποκατάσταση (Karagiannidis et al., 2020).

6.3.3 Συνδυασμένη Εφαρμογή και Σύγχρονες Τάσεις

Ο συνδυασμός **soil nailing** και γεωϋφασμάτων αποτελεί σύγχρονη προσέγγιση για ενίσχυση πρανών μεγάλης έκτασης και ποικίλης γεωτεχνικής συμπεριφοράς. Η **ενσωμάτωση αισθητήρων τάσης** στα γεωϋφάσματα και **συστήματος παρακολούθησης των καρφιών** σε πραγματικό χρόνο αποτελεί νέα τάση στην **έξυπνη γεωτεχνική σταθεροποίηση** (Zhang et al., 2021).

6.4 Ενέματα, Deep Mixing, Jet Grouting

Η τεχνική των ενεμάτων αποτελεί μια σύγχρονη μέθοδο ενίσχυσης εδαφών, η οποία εφαρμόζεται για τη βελτίωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους, την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της διαπερατότητας (Hausmann, 1990). Με την έγχυση ειδικών υλικών, όπως τσιμεντοειδή διαλύματα, ρητίνες ή άλλα χημικά υλικά, το φυσικό έδαφος μετατρέπεται σε ένα σταθερότερο και πιο ομοιογενές σώμα, κατάλληλο για τη στήριξη κατασκευών ή την αποτροπή καθιζήσεων (Fang, 2017).

Η μέθοδος **deep mixing** βασίζεται στη μηχανική ανάμειξη του εδάφους με συνδετικά υλικά, όπως τσιμέντο ή ασβεστόλιθος, μέσω ειδικών μηχανημάτων που εισάγουν και αναμειγνύουν το συνδετικό υλικό στο έδαφος σε βαθύτερα στρώματα (Bjerrum & Eide, 1988). Αυτή η διαδικασία δημιουργεί στήλες ενισχυμένου εδάφους με αυξημένη φέρουσα ικανότητα και μειωμένη συμπιεστότητα, αποτελώντας λύση για την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η αστάθεια πρανών και οι καθιζήσεις σε μαλακά εδάφη (Khan & Kumar, 2012).

Η τεχνική του **jet grouting** αποτελεί μια πιο εξειδικευμένη μέθοδο, κατά την οποία ένα υψηλής πίεσης τσιμεντοειδές ή άλλο συνδετικό υλικό εγχέεται στο έδαφος μέσω

ειδικού ακροφυσίου, διασπώντας το υφιστάμενο έδαφος και δημιουργώντας ένα στήριγμα με ομοιογενή δομή (Graziani, 1999). Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με δυσπρόσιτα εδάφη ή όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην ενίσχυση, όπως γύρω από θεμελιώσεις γεφυρών ή υπόγειες κατασκευές (Mair & Taylor, 1997).

Όλες αυτές οι μέθοδοι έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και απαιτήσεις έργου, προσφέροντας ευελιξία και αποτελεσματικότητα στη διαχείριση των γεωτεχνικών κινδύνων (Hausmann, 1990; Fang, 2017).

6.5 Γεωσυνθετικά και Τεχνολογίες Ενίσχυσης Εδάφους

Τα γεωσυνθετικά υλικά αποτελούν σημαντική κατηγορία σύγχρονων τεχνολογιών ενίσχυσης εδαφών, που έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στη γεωτεχνική μηχανική λόγω της αποτελεσματικότητάς τους και της οικονομικότητάς τους (Koerner, 2012). Τα γεωσυνθετικά, όπως γεωϋφάσματα, γεωπλέγματα, και γεωκυψελίδες, χρησιμοποιούνται για την αύξηση της σταθερότητας των εδαφών, τον έλεγχο της διάβρωσης, καθώς και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους (Jones & Dixon, 2014).

Η λειτουργία των γεωσυνθετικών βασίζεται στην ενίσχυση του εδάφους μέσω της κατανομής των φορτίων και της παρεμπόδισης της μετακίνησης σωματιδίων εδάφους, γεγονός που οδηγεί στη μείωση των καθιζήσεων και στην αύξηση της αντοχής (Bathurst, 2003). Για παράδειγμα, τα γεωπλέγματα ενισχύουν το έδαφος με την παροχή οριζόντιας αντοχής, ενώ τα γεωϋφάσματα λειτουργούν ως φίλτρα και αποστραγγιστικά στρώματα, βελτιώνοντας τη διαχείριση των υδάτων (Koerner, 2012).

Η εφαρμογή γεωσυνθετικών σε πρανή, οδικά έργα και αναχωματώσεις έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, συμβάλλοντας στην πρόληψη κατολισθήσεων και στη σταθεροποίηση επικλινών επιφανειών (Casagrande & Sutherland, 2010). Επιπλέον, η χρήση γεωσυνθετικών μειώνει την ανάγκη για παραδοσιακά βαριά υλικά ενίσχυσης, καθιστώντας τα έργα πιο φιλικά προς το περιβάλλον, οικονομικά και αποδοτικά (Jones & Dixon, 2014).

Παράλληλα με τα γεωσυνθετικά, αναπτύσσονται συνεχώς νέες τεχνολογίες ενίσχυσης εδάφους, όπως η χρήση νανοϋλικών και βιοτεχνολογικών μεθόδων, που προσφέρουν

περαιτέρω βελτιώσεις στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών και την ανθεκτικότητα των κατασκευών (Lin et al., 2021).

Συνολικά, τα γεωσυνθετικά και οι σύγχρονες τεχνολογίες ενίσχυσης παρέχουν ευέλικτες και αποτελεσματικές λύσεις για την αντιμετώπιση των γεωτεχνικών προκλήσεων, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια των κατασκευών.

7. Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Πτυχές των Ειδικών Κατασκευών

Οι ειδικές γεωτεχνικές κατασκευές αποτελούν κρίσιμο εργαλείο στη διαχείριση και αντιμετώπιση γεωτεχνικών κινδύνων, συμβάλλοντας τόσο στην τεχνική ασφάλεια όσο και στη βιώσιμη ανάπτυξη των έργων υποδομής. Ωστόσο, η εφαρμογή τους δεν περιορίζεται αποκλειστικά στα τεχνικά χαρακτηριστικά και στην αποτελεσματικότητα, αλλά συνδέεται άμεσα με περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε όλα τα στάδια σχεδιασμού, υλοποίησης και λειτουργίας. Η αειφορία, η προστασία του περιβάλλοντος, η βελτιστοποίηση κόστους και η παρακολούθηση της απόδοσης των κατασκευών είναι θεμελιώδη ζητήματα που απασχολούν τους μελετητές και τους φορείς διαχείρισης έργων (Zornberg, 2017; Ng et al., 2020).

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών και τεχνικών πτυχών των ειδικών κατασκευών συμβάλλει στην προώθηση των βέλτιστων πρακτικών που συνάδουν με τις σύγχρονες απαιτήσεις βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας. Επιπλέον, οι οικονομικές παράμετροι και η τεχνική επιλογή των κατάλληλων λύσεων πρέπει να εξετάζονται σε συνδυασμό με την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης και συντήρησης, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια λειτουργικότητα και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Foster et al., 2019).

Το κεφάλαιο αυτό αναλύει διεξοδικά αυτές τις πτυχές, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των προκλήσεων και των ευκαιριών που προκύπτουν από τη χρήση των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών.

7.1 Επίδραση στο Περιβάλλον και Αειφορία

Η κατασκευή και λειτουργία ειδικών γεωτεχνικών έργων επηρεάζει άμεσα το φυσικό περιβάλλον, καθώς συχνά συνεπάγεται εκτεταμένες εργασίες εδαφικών παρεμβάσεων, χρήση φυσικών πόρων και παραγωγή αποβλήτων. Η εκτίμηση και η διαχείριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας των έργων, καθώς και για την εναρμόνισή τους με τα περιβαλλοντικά πρότυπα και τις νομοθετικές απαιτήσεις (Díaz-Pinés et al., 2021).

Οι βασικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζονται περιλαμβάνουν τη δομή και τη σύσταση του εδάφους, την υδρολογία της περιοχής, τη βιοποικιλότητα, καθώς και την ποιότητα αέρα και νερού. Για παράδειγμα, η εφαρμογή μεθόδων όπως η μικροπασσάλωση ή τα γεωσυνθετικά υλικά μπορεί να περιορίσει τη διάβρωση και τη ρύπανση των υδάτων, ενώ η μη σωστή διαχείριση ενέσεων (deep mixing, jet grouting) μπορεί να οδηγήσει σε τοξική ρύπανση του περιβάλλοντος (Chen et al., 2018).

Η αειφορία στον σχεδιασμό και την υλοποίηση ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών απαιτεί την επιλογή φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και τη μείωση των αποβλήτων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Για παράδειγμα, η χρήση ανακυκλωμένων γεωσυνθετικών υλικών ή εναλλακτικών φυσικών υλικών, καθώς και η εφαρμογή τεχνολογιών χαμηλής ενέργειας κατά την κατασκευή, ενισχύουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Hassan et al., 2020).

Επιπλέον, η περιβαλλοντική αδειοδότηση και η συνεχής παρακολούθηση περιβαλλοντικών δεικτών καθιστούν δυνατή την πρόληψη ή έγκαιρη αντιμετώπιση αρνητικών επιπτώσεων, διασφαλίζοντας την ορθή λειτουργία και τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα των έργων (Smith & Jones, 2019). Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει η συμμετοχή και η ενημέρωση των τοπικών κοινωνιών, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι κοινωνικές επιπτώσεις και να ενισχύεται η αποδοχή των έργων.

7.2 Οικονομική αποδοτικότητα και τεχνικές επιλογές

Στην επιλογή των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών, η οικονομική αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την τελική απόφαση. Η αποδοτική διαχείριση πόρων και ο σωστός σχεδιασμός όχι μόνο εξασφαλίζουν τη βιωσιμότητα του έργου, αλλά συμβάλλουν και στη μείωση του συνολικού κόστους συντήρησης και λειτουργίας (Hudson et al., 2014). Η ανάλυση κόστους-οφέλους πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το αρχικό κόστος κατασκευής όσο και τα μακροπρόθεσμα οφέλη, όπως η

αύξηση της ανθεκτικότητας και η μείωση των επιπτώσεων περιβαλλοντικών κινδύνων (Bell & Culshaw, 2012).

Οι τεχνικές επιλογές βασίζονται σε παράγοντες όπως το είδος του εδάφους, οι γεωλογικές συνθήκες, η χρήση του χώρου και η φύση των κινδύνων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Για παράδειγμα, η επιλογή μεταξύ πασσαλώσεων, ενέματος ή γεωσυνθετικών υλικών θα εξαρτηθεί από το συνδυασμό κόστους, τεχνικής αποτελεσματικότητας και περιβαλλοντικής επίπτωσης (Das, 2013). Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών όπως το *deep mixing* και το *jet grouting* έχει βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα σε περιπτώσεις που απαιτούν υψηλή αντοχή και γρήγορη εφαρμογή (Burland & Burbidge, 2010).

Η βελτιστοποίηση των τεχνικών επιλογών απαιτεί συνεργασία μεταξύ γεωτεχνικών μηχανικών, οικονομολόγων και περιβαλλοντολόγων, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση με το ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Mitchell, 2014). Η υιοθέτηση καινοτόμων υλικών και μέτρων, όπως η χρήση ανακυκλωμένων γεωσυνθετικών υλικών ή η αξιοποίηση φυσικών πόρων με βιώσιμο τρόπο, μπορεί επίσης να συμβάλει στην οικονομική αποδοτικότητα (Koerner, 2016).

Τέλος, η συνεκτίμηση των παραγόντων αυτών σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης κινδύνου καθιστά τις ειδικές γεωτεχνικές κατασκευές αποτελεσματικά εργαλεία για τη μείωση των επιπτώσεων φυσικών καταστροφών, συμβάλλοντας παράλληλα στην κοινωνική και οικονομική σταθερότητα των περιοχών που εφαρμόζονται (Stark & Mesri, 2017).

7.3 Παρακολούθηση και Συντήρηση

Η παρακολούθηση και η συντήρηση των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών αποτελούν κρίσιμες διαδικασίες για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας λειτουργικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας αυτών των έργων. Η σημασία της έγκαιρης ανίχνευσης προβλημάτων και η εφαρμογή προληπτικών συντηρητικών μέτρων αναδεικνύεται ιδιαίτερα, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου οι κατασκευές υπόκεινται σε έντονες φυσικές και ανθρωπογενείς καταπονήσεις.

7.3.1 Σκοπός της παρακολούθησης

Η βασική επιδίωξη της παρακολούθησης είναι η συνεχιζόμενη εκτίμηση της κατάστασης της κατασκευής ώστε να εντοπίζονται τυχόν αποκλίσεις από την

προβλεπόμενη συμπεριφορά. Αυτό περιλαμβάνει την καταγραφή παραμέτρων όπως μετακινήσεις, παραμορφώσεις, φορτία, και περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, σεισμική δραστηριότητα) που μπορούν να επηρεάσουν την ακεραιότητα της κατασκευής (Leroueil & Vaughan, 1990; Zhang et al., 2021).

7.3.2 Τεχνολογίες παρακολούθησης

Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης των γεωτεχνικών κατασκευών. Χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα αισθητήρων, όπως:

- **Γεωδαιτικά όργανα (total stations, GPS):** Για την ακριβή μέτρηση μετακινήσεων και καθιζήσεων.



Εικόνα 18: Γεωδαιτικός Σταθμός παρακολούθησης.

<https://www.totalstation.gr/images/stories/virtuemart/product/KOLIDA%20KTS-442UT.jpg>

- **Ένθετοι αισθητήρες (inclinometers, piezometers):** Για την παρακολούθηση της κλίσης των τοιχίων και της πίεσης των πόρων στο έδαφος.
- **Σύγχρονες τεχνολογίες όπως LIDAR και UAV (drones):** Για την τρισδιάστατη αποτύπωση και την επιθεώρηση δύσβατων περιοχών (Fang et al., 2019).



Εικόνα 19: Χρήση τεχνολογιών όπως LIDAR και UAV.
<https://www.geoerga.gr/assets/images/services/s02-lidar/c.jpg?v=20250519c>

- **Συστήματα συνεχούς καταγραφής δεδομένων και τηλεμετρίας:** Επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, σημαντικό για περιοχές με αυξημένο κίνδυνο (Schmertmann & Brown, 2000).

7.3.3 Διαδικασίες συντήρησης

Η συντήρηση των ειδικών κατασκευών περιλαμβάνει προληπτικές και διορθωτικές παρεμβάσεις που εξασφαλίζουν τη διαρκή λειτουργικότητα και την ασφάλεια. Τα βασικά στοιχεία της συντήρησης είναι:

1. **Τακτικές επιθεωρήσεις:** Προγραμματισμένες επιθεωρήσεις με οπτική εξέταση και χρήση ειδικού εξοπλισμού για την ανίχνευση ρωγμών, διάβρωσης, φθορών ή άλλων αλλοιώσεων.
2. **Καθαρισμός και απομάκρυνση φερτών υλικών:** Αποτρέπουν τη συσσώρευση που μπορεί να επιβαρύνει τις κατασκευές ή να προκαλέσει φθορές.

3. **Επισκευές και ενισχύσεις:** Σε περίπτωση εντοπισμού βλαβών, εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές όπως έγχυση υλικών, αντικατάσταση φθαρμένων τμημάτων ή προσθήκη ενισχυτικών στοιχείων (Terzaghi et al., 1996).
4. **Αναθεώρηση και ανανέωση συστημάτων αποστράγγισης:** Ιδιαίτερα σημαντικό για την αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης και υποσκαφής (Das, 2010).

7.3.4 Διαχείριση δεδομένων και ανάλυση

Η σωστή διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται κατά την παρακολούθηση είναι καθοριστική για την έγκαιρη λήψη αποφάσεων. Χρησιμοποιούνται λογισμικά ανάλυσης και μοντελοποίησης που επιτρέπουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό διαφορετικά σενάρια και την αξιολόγηση της ανάγκης για παρεμβάσεις (Baziar et al., 2017).

7.3.5 Προκλήσεις και προοπτικές

Παρά τα σημαντικά τεχνολογικά βήματα, η παρακολούθηση και η συντήρηση αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως:

- **Πολυπλοκότητα γεωτεχνικών συνθηκών:** Η ετερογένεια των εδαφικών ιδιοτήτων απαιτεί εξειδικευμένες λύσεις για κάθε περίπτωση.
- **Κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας συστημάτων παρακολούθησης:** Ειδικά για μεγάλα έργα ή δυσπρόσιτες περιοχές.
- **Ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών (π.χ. AI, μηχανική μάθηση):** Προσφέρει δυνατότητες αυτοματοποιημένης ανάλυσης και πρόβλεψης, αλλά απαιτεί επιπλέον έρευνα και ανάπτυξη (Zhou et al., 2020).

Η εξέλιξη των μεθόδων παρακολούθησης και συντήρησης είναι καθοριστική για την αύξηση της ασφάλειας, τη μείωση κόστους και την προώθηση βιώσιμων πρακτικών στη γεωτεχνική μηχανική.

8. Εφαρμογές και Μελέτες Περίπτωσης

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει σε πρακτικές εφαρμογές και συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση κινδύνων σε διάφορα τεχνικά έργα. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν τη σταθεροποίηση κατολισθήσεων, την αντιμετώπιση σεισμικών κινδύνων, την ενίσχυση υποδομών μεταφορών και τη βελτίωση υδραυλικών, λιμενικών και υπόγειων έργων. Σε κάθε κατηγορία έργου, αναλύονται οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς και τα μέτρα μετριασμού που εφαρμόζονται για την ελαχιστοποίησή τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη χρήση σύγχρονων ψηφιακών τεχνολογιών, όπως BIM (Building Information Modeling), GIS (Geographic Information Systems) και τηλεπισκόπηση (remote sensing), τα οποία συμβάλλουν στην ακριβέστερη σχεδίαση, παρακολούθηση και διαχείριση των έργων. Στο πλαίσιο αυτό, τονίζονται οι κρίσιμες γεωτεχνικές παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων τεχνικών και υλικών, ενώ παράλληλα εξετάζονται οι οικονομικές πτυχές, τα κόστη συντήρησης και η ανθεκτικότητα των κατασκευών υπό την επίδραση των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών.

Η πολυδιάστατη προσέγγιση των εφαρμογών αυτών είναι αναγκαία για την επίτευξη βιώσιμων λύσεων που συνδυάζουν τεχνική αποτελεσματικότητα, περιβαλλοντική προστασία και κοινωνική αποδοχή. Σημειώνεται ότι κάποιες από τις τεχνικές και αρχές που αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια (όπως στην ανάλυση των ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών και στη διαχείριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων) θα ενσωματωθούν εδώ όπου κρίνεται αναγκαίο, ώστε να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα των πρακτικών εφαρμογών.

8.1 Σταθεροποίηση Κατολισθήσεων

Η σταθεροποίηση κατολισθήσεων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής με στόχο την αποκατάσταση και τη διασφάλιση της σταθερότητας επικλινών εδαφών που απειλούνται από αστάθεια ή έχουν υποστεί ήδη κατολισθητικά φαινόμενα. Οι κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές σε υποδομές, οδικά δίκτυα και κατοικίες, καθώς και σημαντικές περιβαλλοντικές

επιπτώσεις, όπως απώλεια βλάστησης και αλλοίωση υδρολογικών συστημάτων (Varnes, 1984; Cruden & Varnes, 1996).



Εικόνα 20: Εγασίες σταθεροποίησης Κατολίσθησης. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTXuQLv90p3YPvALL2YcyIbOoGl4Xpkko_ymytBLtwQfyrPVUJrZyrSU8hR_xvBDFM2E34&usqp=CAU

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής σταθεροποίησης εξαρτάται από παράγοντες όπως τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, το υδρογεωλογικό καθεστώς, το μέγεθος και ο τύπος της κατολίσθησης, αλλά και το οικονομικό πλαίσιο του έργου (Duncan, 1996). Κύριες μέθοδοι σταθεροποίησης περιλαμβάνουν μηχανικές παρεμβάσεις, όπως πασσαλώσεις, soil nailing και κατασκευή αντιστηρίξεων (βλ. Κεφάλαιο 6.1, 6.3), καθώς και υδραυλικές παρεμβάσεις, όπως η βελτίωση της αποστράγγισης για τη μείωση της υδροστατικής πίεσης (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Η ολοκληρωμένη εκτίμηση κινδύνου πρέπει να περιλαμβάνει την ανάλυση των αιτιών και της δυναμικής της κατολίσθησης, καθώς και την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του πρανούς (βλ. Κεφ. 5.2). Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην περιβαλλοντική διάσταση της παρέμβασης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις σε τοπικό και ευρύτερο επίπεδο (βλ. Κεφ. 7.1) (Anderson et al., 2017).

Η εφαρμογή σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων, όπως τα GIS και remote sensing, αποτελεί κλειδί για την ακριβή χαρτογράφηση, παρακολούθηση μεταβολών και δημιουργία προγνωστικών μοντέλων, που συμβάλλουν σημαντικά στην πρόληψη και αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων (Guzzetti et al., 2012; Van Westen et al., 2008).

Τέλος, η οικονομική αξιολόγηση των λύσεων σταθεροποίησης περιλαμβάνει όχι μόνο το αρχικό κόστος κατασκευής αλλά και τα κόστη συντήρησης, καθώς και την ανθεκτικότητα των παρεμβάσεων σε μελλοντικές κλιματικές αλλαγές, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 7.2 (Bachmann et al., 2017).

8.2 Αντιμετώπιση Σεισμικού Κινδύνου

Η αντιμετώπιση του σεισμικού κινδύνου αποτελεί κρίσιμο τομέα στη γεωτεχνική μηχανική, ιδιαίτερα σε χώρες και περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Ο σεισμός προκαλεί μεγάλες δυνάμεις και μετατοπίσεις στο έδαφος, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχίες πρανών, θεμελιώσεων και γεωτεχνικών κατασκευών, με καταστροφικές συνέπειες για υποδομές, περιβάλλον και ανθρώπινες ζωές (Seed et al., 1988).



Εικόνα 21: Αστοχία πρανούς μετά από σεισμό στη Λευκάδα, έτος 2003.

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftkm.tee.gr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F03%2FMakra_Rovithis_Parousiash.pdf&psig=AOvVaw3opXAqzqZ3Du0HB6kvdAmq&ust=1754725194117000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCOCnyPba-o4DFQAAAAAdAAAAABAE

Φυσικά φαινόμενα και επιπτώσεις

Η σεισμική δόνηση μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις, ρευστοποιήσεις εδαφών (liquefaction), κατολισθήσεις και καταστροφές σταθεροποιητικών έργων. Η ρευστοποίηση είναι ένα ιδιαίτερα επικίνδυνο φαινόμενο, στο οποίο τα κορεσμένα από νερό κοκκώδη εδάφη χάνουν τη φέρουσα ικανότητά τους, συμπεριφερόμενα σαν υγρά, με αποτέλεσμα την αστοχία των θεμελιώσεων και των επιχώσεων (Youd & Idriss, 2001). Έχει αποδειχθεί ότι η ρευστοποίηση σχετίζεται στενά με τη σύσταση του εδάφους, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και τα σεισμικά φορτία (βλ. κεφάλαιο 5.1 για γεωτεχνικά χαρακτηριστικά).

Τεχνικές αντιμετώπισης

Η πρόληψη και αντιμετώπιση του σεισμικού κινδύνου συνίσταται σε συνδυασμό μέτρων, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Βελτίωση εδάφους (ground improvement): Τεχνικές όπως η συμύκνωση, η ενίσχυση με γεωσυνθετικά υλικά, η έγχυση ενέματος (jet grouting) και ο deep mixing, μπορούν να βελτιώσουν τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και να μειώσουν την πιθανότητα ρευστοποίησης (Vesic, 1995; Yasuda et al., 2003). Αυτές οι μέθοδοι αναπτύχθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 6.4.



Εικόνα 22: Βελτίωση πρανών και προστασία από την έκπλυση του εδάφους.

https://www.virens.com/wp-content/uploads/terre-armate-rinforzate-01_-scaled.jpg

- **Σχεδιασμός ευέλικτων θεμελιώσεων:** Η χρήση ειδικών θεμελιώσεων, όπως οι πασσαλότοιχοι και οι πλάκες μεγάλης διατομής, που μπορούν να απορροφήσουν και να διασπείρουν τις σεισμικές δυνάμεις, μειώνοντας το φορτίο στο έδαφος (Kramer, 1996).



Εικόνα 23: Πασσαλότοιχος εφαπτόμενων πασσάλων.

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fnereus.library.upatras.gr%2Fformerpat%2Fptyxiakes%2Fste%2Fste_pty%2F2006-2010%2F9118pe.pdf&psig=AOvVaw018O7CfpcjB26B9-5mUKRj&ust=1754725895643000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCLC2-cHd-o4DFQAAAAAdAAAAABAE

- **Δομικός αντισεισμικός σχεδιασμός:** Αν και αφορά κυρίως την κατασκευή, η συνεργασία γεωτεχνικών και δομικών μηχανικών είναι απαραίτητη για την ολοκληρωμένη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου. Η εφαρμογή προτύπων όπως το EC8 (Ευρωκώδικας 8) εξασφαλίζει την ανθεκτικότητα των έργων (EN 1998-1, 2004).
- **Παρακολούθηση και έγκαιρη προειδοποίηση:** Η χρήση σύγχρονων αισθητήρων, GIS και τεχνικών τηλεπισκόπησης επιτρέπει την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του εδάφους και τη διαχείριση έκτακτων καταστάσεων (βλ. Κεφάλαιο 7.3). Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση κινδύνων και τη λήψη μέτρων μετριασμού (Allen & Zoback, 2011).



Εικόνα 25: Σιδηροδρομικό δίκτυο Θεσσαλίας που επλήγη από τις πλημμύρες.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.kathimerini.gr%2Fconomy%2F563146507%2Fstocheyomena-erga-gia-veltiosi-ypodomon-stoys-sidirodromoy%2F&psig=AOvVaw07-In6uYfWXgnPBdtIBtN-&ust=1754726287372000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCNjC6oHf-o4DFQAAAAAdAAAAABAE>

Γεωτεχνικές προκλήσεις και παράμετροι

Η επιλογή της κατάλληλης γεωτεχνικής μεθόδου για την κατασκευή υποδομών μεταφορών εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- Το είδος και η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών (π.χ. ιζηματογενή, ηφαιστειακά, ασβεστολιθικά) (βλ. κεφάλαιο 5.1).
- Η τοπογραφία και το υδρολογικό καθεστώς της περιοχής.
- Οι φορτίσεις από την κυκλοφορία και το περιβάλλον (π.χ. δονήσεις, φορτία ανέμου).
- Η πιθανότητα φυσικών κινδύνων όπως σεισμοί, κατολισθήσεις και πλημμύρες (βλ. κεφάλαιο 7.2 και 8.2).

Η αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων απαιτεί λεπτομερείς γεωτεχνικές έρευνες και μοντέλα πρόβλεψης, με τη χρήση σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων όπως GIS, BIM και τηλεπισκόπηση (βλ. κεφάλαιο 8.1).

Τεχνικές και μέτρα σταθεροποίησης και κατασκευής

Για την αποφυγή κατολισθήσεων και καθιζήσεων, εφαρμόζονται:

- **Σταθεροποίηση πρανών** μέσω τεχνικών όπως ο έλεγχος κλίσης, η τοποθέτηση στηθαίων, γεωπλεγμάτων και αγκυρώσεων (Mitchell & Soga, 2005).
- **Αποστράγγιση υπεδάφους** για μείωση της υδροστατικής πίεσης και πρόληψη ρευστοποιήσεων (βλ. κεφάλαιο 5.2).



Εικόνα 26: Αποστράγγιση Υπεδάφους.

https://static.wixstatic.com/media/ba89ea_b43d740e1c0a481a8792f67d1c8e32ce~mv2.jpeg/v1/fill/w_1284,h_963,al_c/ba89ea_b43d740e1c0a481a8792f67d1c8e32ce~mv2.jpeg

- **Κατασκευή θεμελιώσεων μεγάλης αντοχής** με πάσσαλους ή πασσάλους μικρής διατομής σε ευαίσθητες περιοχές (Kramer, 1996).



Εικόνα 27: Κατασκευή πασσάλων θεμελίωσης διαμέτρου Φ1000mm και μήκους 30 μέτρων. https://hmconstruction.gr/wp-content/uploads/2020/02/IMG_20240109_160117-Site.jpg

- **Ενίσχυση επιχωμάτων** με γεωσυνθετικά υλικά για αύξηση της αντοχής και μείωση της παραμόρφωσης (Koerner, 2012).



Εικόνα 28: Πλέγματα και γεωφάσματα στη Γκουανταλαχάρα (Μεξικό).
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mallasygeotextilesguadalajara.com%2Fproductos-mallas-y-geotextiles-gdl%2Fgeosint%25C3%25A9ticos%2F&psig=AOvVaw2VQJzAOHdcYsu6cXKDsPQT&ust=1754727208535000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCOi3mLni-o4DFQAAAAAdAAAAABAL>

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μέτρα μετριασμού

Οι εργασίες σε υποδομές μεταφορών επιφέρουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως αλλοίωση τοπίου, υποβάθμιση υδατικών πόρων, διατάραξη οικοσυστημάτων και αύξηση εκπομπών ρύπων. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται μέτρα περιβαλλοντικής διαχείρισης, όπως:

- Ορθολογική διαχείριση αποβλήτων και ανακύκλωση υλικών.
- Χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών και τεχνικών.
- Διατήρηση και αποκατάσταση φυσικής βλάστησης και οικοτόπων (Gómez-Baggethun et al., 2013).

Οικονομική διαχείριση και ανθεκτικότητα

Η οικονομική βιωσιμότητα των έργων μεταφορών βασίζεται στον ισορροπημένο προγραμματισμό κόστους κατασκευής, συντήρησης και διαχείρισης κινδύνων. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η ανθεκτικότητα των έργων στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, με σκοπό τη μείωση των μελλοντικών δαπανών λόγω φθορών και βλαβών (Sterling et al., 2012)

8.4 Υδραυλικά, Λιμενικά και Υπόγεια Έργα

Η κατασκευή και διαχείριση υδραυλικών, λιμενικών και υπόγειων έργων αποτελεί ένα ιδιαίτερα απαιτητικό πεδίο της γεωτεχνικής μηχανικής, λόγω της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος, υδρολογικών συνθηκών, μηχανικών καταπονήσεων και περιβαλλοντικών περιορισμών. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν φράγματα, υδροηλεκτρικά, κανάλια, λιμάνια, αποχετευτικά συστήματα, τούνελ, και υπόγειες εγκαταστάσεις (Coduto, 2001).

Γεωτεχνικές προκλήσεις και κρίσιμες παράμετροι

Οι προκλήσεις στα υδραυλικά, λιμενικά και υπόγεια έργα εστιάζουν ιδιαίτερα στη διαχείριση υδάτων και στην αλληλεπίδραση εδάφους-νερού, που επηρεάζουν τη σταθερότητα και λειτουργικότητα των κατασκευών. Οι κρίσιμες παράμετροι περιλαμβάνουν:

- **Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και δυναμική υπόγειων υδάτων:** Σε φράγματα και κανάλια, η κίνηση και πίεση του νερού στο έδαφος μπορεί να προκαλέσει διάβρωση και αστοχίες. Π.χ. οι πίδακες διαρροής (piping) αποτελούν συχνή αιτία αστοχιών φραγμάτων (βλ. κεφάλαιο 5.2).



Εικόνα 29: Φράγμα Teton (Η.Π.Α), διάβρωση του επιχώματος.

<https://www.waterresourcesengineering.com/wp-content/uploads/2021/02/image-29-13.jpg>

- **Δυναμική φόρτιση από κύματα και παλίρροιες σε λιμενικά έργα:** Τα κύματα επιδρούν με μεταβαλλόμενες πιέσεις, απαιτώντας ειδικές κατασκευές που μπορούν να απορροφήσουν ή να ανακατευθύνουν αυτές τις δυνάμεις (Kramer, 1996).



Εικόνα 30: Τεχνικές προστασίας από κύματα και παλίρροιες σε λιμενικά έργα.

<https://opencourses.auth.gr/courses/OCRS425/image/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1%20%CE%9C%CE%B1%CE%B8%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82.png>

<https://thumbs.dreamstime.com/b/%CE%BA%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%B8%CF%81%CE%B1%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B5%CF%82-10293625.jpg>

- **Διάβρωση και αστοχίες λόγω κορεσμού σε υπόγεια έργα:** Το νερό προκαλεί αλλαγές στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών, αυξάνοντας τη συμπιεστότητα και μειώνοντας την αντοχή (Gikas, 2010).

Η αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων γίνεται μέσω γεωτεχνικών ερευνών και με τη χρήση εργαλείων όπως GIS και remote sensing για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών (Gikas, 2010).

Τεχνικές ενίσχυσης και σταθεροποίησης

Στα υδραυλικά και λιμενικά έργα εφαρμόζονται εξειδικευμένες τεχνικές όπως:

Ενέματα και Jet Grouting

- Σε φράγματα και τούνελ με πορώδη εδάφη, εφαρμόζεται jet grouting για δημιουργία αδιαπέρατων φραγμάτων υδάτων ή ενίσχυση του εδάφους με τσιμεντοπολτούς.
- Π.χ. το έργο αναβάθμισης του φράγματος Hoover στις ΗΠΑ χρησιμοποίησε jet grouting για να σταθεροποιήσει ασταθή πετρώματα στην περιοχή θεμελίωσης (American Society of Civil Engineers, 2019).



Εικόνα 31: Φράγμα Hoover ΗΠΑ - Χρήση τεχνικής Jet grouting. <https://www.schnabel.com/wp-content/uploads/2024/03/Jet-Grouting-Operation-in-Lower-Olentangy-Tunnel-Project-1024x768.jpeg> https://energypress.gr/sites/default/files/article/images/fragma_hoover.jpg

Γεωσυνθετικά Υλικά

- 1) Χρησιμοποιούνται ευρέως σε λιμενικές κατασκευές για πρόληψη διάβρωσης της ακτογραμμής και ενίσχυση των τεχνικών έργων.
- 2) Σε έργο λιμένα στην Βαλτική Θάλασσα εφαρμόστηκαν γεωφύσματα ως φράγματα για τη συγκράτηση ιζημάτων και τη βελτίωση της αδιάβροχης συμπεριφοράς (Koerner, 2012).

Στήριξη με Αγκύρια και Πασσαλοτοιχία

- Τα υπόγεια τούνελ συχνά στηρίζονται με πασσαλοτοιχίες και αγκύρια για αντιμετώπιση πλευρικών πιέσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλού υδροφόρου ορίζοντα.
- Στο μετρό της Κωνσταντινούπολης, όπου η στάθμη υδροφόρου είναι υψηλή, χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί πασσαλοτοιχίας και ενεμάτων για διασφάλιση της σταθερότητας (Tureli et al., 2018).

Deep Mixing (Βαθιά Ενίσχυση)

- Σε περιοχές με ασταθή εδάφη κάτω από υδραυλικά έργα, η μέθοδος βαθιάς ανάμιξης αναμειγνύει το έδαφος με τσιμεντοειδή υλικά, δημιουργώντας ενισχυμένα στρώματα.



Εικόνα 32: Deep Mixing (Baθiά Enίσxuxh). <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B978012408076800011X-f11-10-9780124080768.jpg>
<https://www.researchgate.net/publication/337195301/figure/fig2/AS:824424089542656@1573569428349/Deep-soil-mixing-for-shear-wall-installation-at-toe-of-ash-pond-embankment.jpg>

- Έργα αντιστήριξης ακτών στην Ιαπωνία έχουν χρησιμοποιήσει αυτή τη μέθοδο για την προστασία από τσουνάμι και τη βελτίωση σταθερότητας (Japan Geotechnical Society, 2020).

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βιώσιμες πρακτικές

- **Υδραυλικές Παρεμβάσεις σε Υγροτόπους:** Η κατασκευή καναλιών και φραγμάτων μπορεί να αλλοιώσει τη φυσική ροή νερού, προκαλώντας μείωση βιοποικιλότητας, αλλοίωση εδαφικών συνθηκών και μεταβολές στο υδρολογικό κύκλο (Mitsch & Gosselink, 2015).
- **Λιμενικές Εγκαταστάσεις σε Παράκτιες Ζώνες:** Αλλαγές στην ακτογραμμή, διάβρωση και ρύπανση από βιομηχανικές δραστηριότητες είναι συχνά προβλήματα. Η χρήση γεωσυνθετικών και «πράσινων» τεχνικών κατασκευής βοηθά στην αποτροπή τέτοιων φαινομένων.

Μέτρα Μετριασμού

- **Επαναφορά Υγροτόπων** μετά την ολοκλήρωση έργων μέσω φυτοτεχνικών και βιοτεχνολογικών μεθόδων.
- **Οικολογική Διαχείριση Λιμένων** με σχεδιασμό που επιτρέπει τη φυσική ροή υδάτων και τη δημιουργία ζωνών προστασίας.

- **Χρήση Βιοτεχνολογιών**, όπως φυτά ριζόβια που βελτιώνουν την ποιότητα νερού και σταθεροποιούν τα εδάφη (Rajput et al., 2022).
- **Ψηφιακά Εργαλεία Παρακολούθησης** (BIM, GIS, remote sensing) για συνεχή έλεγχο περιβαλλοντικών δεικτών και έγκαιρη αντιμετώπιση προβλημάτων (Abu-Hilal et al., 2021).

Οικονομική διαχείριση και ανθεκτικότητα

Λόγω της πολυπλοκότητας και της υψηλής δαπάνης κατασκευής, η οικονομική διαχείριση είναι κρίσιμη. Η πρόβλεψη κόστους συντήρησης, η ανθεκτικότητα στις κλιματικές μεταβολές και οι επενδύσεις σε τεχνολογίες πρόληψης και παρακολούθησης διασφαλίζουν μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των έργων (Sterling et al., 2012).

Η μακροχρόνια βιωσιμότητα των έργων απαιτεί:

1. **Προγραμματισμό Συντήρησης** με βάση προβλέψεις φθορών λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων.
2. **Επενδύσεις σε Ανθεκτικές Κατασκευές** που αντέχουν σε ακραία καιρικά φαινόμενα και αυξημένες υδρολογικές μεταβολές (Sterling et al., 2012).
3. **Εφαρμογή Έξυπνων Συστημάτων Διαχείρισης Υδάτων**, τα οποία χρησιμοποιούν αισθητήρες και αυτοματισμούς για βέλτιστη λειτουργία.

8.5 Παραδείγματα εφαρμογών στην Ελλάδα

Η γεωτεχνική μηχανική περιλαμβάνει την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης, ενίσχυσης και παρακολούθησης σε έργα υψηλού κινδύνου, όπως οδικά έργα και υπόγειες κατασκευές. Παρακάτω παρουσιάζονται τρία αντιπροσωπευτικά παραδείγματα που αναδεικνύουν τις τεχνικές, τις προκλήσεις και τις λύσεις που υιοθετήθηκαν στο ελληνικό γεωτεχνικό περιβάλλον.

8.5.1 Εγνατία Οδός – Τμήμα Ασπροβάλτα

Η Εγνατία Οδός αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες οδικές υποδομές της Ελλάδας, με το τμήμα Ασπροβάλλας να παρουσιάζει έντονα γεωτεχνικά προβλήματα λόγω

απότομων πρανών και ασταθών εδαφικών σχηματισμών. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από εναλλαγές αργίλων, μαργών και αποσαθρωμένων σχιστολίθων, με έντονη διάβρωση και παρουσία υπόγειων υδάτων (Stamatoroulos et al., 2004).

Πριν την κατασκευή, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες γεωτεχνικές έρευνες που περιλάμβαναν γεωτρήσεις βάθους έως 25 m, δοκιμές SPT, CPT, λήψη δειγμάτων και εργαστηριακές αναλύσεις (κοκκομετρική, Atterberg limits, υδραυλική αγωγιμότητα, κ.ά.). Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευστάθειας των πρανών μέσω μεθόδων Bishop, Janbu και Morgenstern-Price.

Η σταθεροποίηση επιτεύχθηκε με τη διαμόρφωση βαθμίδων (benches) σε συνδυασμό με κατασκευή τοίχων αντιστήριξης, εφαρμογή αποστραγγιστικών στραγγιστηρίων, γεωπλεγμάτων και φύτευση για ενίσχυση επιφανειακής συνοχής. Το ελάχιστο αποδεκτό όριο για τον συντελεστή ασφάλειας (FS) ορίστηκε στο 1.5. Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον λογισμικών γεωτεχνικής ανάλυσης όπως το Slide και το GeoStudio.



Εικόνα 33: Τεχνική, soil nailing stabilization. <https://www.geostabilization.com/wp-content/uploads/2024/02/AL-Soil-Nail-Wall-Banner-scaled.jpg>

Στο πλαίσιο της παρακολούθησης εφαρμόστηκε σύστημα μέτρησης μετακινήσεων με κλισιόμετρα και αγκυρωμένους αισθητήρες σε βάθος, επιτρέποντας έγκαιρη παρέμβαση σε περιπτώσεις πιθανών ολισθήσεων (GEOINFORMATICS, 2005).

8.5.2 Μετρό Θεσσαλονίκης – Σταθμός Βενιζέλου

Η κατασκευή του σταθμού Βενιζέλου στη Θεσσαλονίκη συνιστά ένα έργο αυξημένης γεωτεχνικής πολυπλοκότητας λόγω της συνύπαρξης αρχαιολογικών ευρημάτων και γεωλογικών ανομοιογενειών. Η γεωλογική στρωματογραφία περιλαμβάνει στρώματα κόκκινης άργιλου, χαλαρά ιζήματα και ανθρωπογενείς επιχωματώσεις (Anagnostou et al., 2008).

Η εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων έγινε με πάνω από 350 γεωτρήσεις πριν την εκσκαφή και 1.100 εντός της κατασκευής, περιλαμβάνοντας δοκιμές SPT, CPT και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Επιλέχθηκε μηχάνημα τύπου Earth Pressure Balance (EPB) TBM για την εκσκαφή, λόγω της ανάγκης ελέγχου των καθιζήσεων και διατήρησης της ευστάθειας στο μέτωπο.

Για την προστασία του εδάφους και την αποφυγή καθιζήσεων, εφαρμόστηκε τεχνική jet grouting με κατακόρυφες και κεκλιμένες στήλες (διάμετρος έως 2 m, μήκος 4.4–10 m), σε βάθος έως 31 m. Η ενίσχυση έγινε με εναλλασσόμενη εφαρμογή υπό γωνία και πλήρωση με τσιμεντούχο ενέματα (Papadopoulos et al., 2014).



Εικόνα 34: Μετρό Θεσσαλονίκης, τεχνική θεμελίωσης jet grouting.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.michanikosapps.gr%2Fblog%2F2340&psig=AOvVaw1i5PtdopgM9hgbMLGpFt0j&ust=1752221920858000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCPDooNDtsY4DFQAAAAAdAAAAABAL>

Το monitoring περιλάμβανε piezometers, inclinometers, strain gauges και pressure cells με παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα διαχειρίζονταν μέσω του λογισμικού GSM Kronos, με καθορισμένα όρια ειδοποίησης (80%) και συναγερμού (100–120%) για παραμορφώσεις ή καθιζήσεις (Tzamos et al., 2020).

Η αποκάλυψη του Decumanus Maximus εντός του εργοταξίου προκάλεσε τροποποίηση του σχεδίου και δημιουργία σταθμού-μουσείου. Το γεγονός αυτό απαίτησε προσομοίωση σε περιβάλλον BIM για να επιτευχθεί συμβατότητα του νέου σχεδιασμού με τις υφιστάμενες γεωμετρικές και γεωτεχνικές παραμέτρους (Katsiri & Vassiliadis, 2021).

8.5.3 Ε.Ο. Τρίπολης–Καλαμάτας – Αντιμετώπιση Κατολισθήσεων

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της Εθνικής Οδού Τρίπολης–Καλαμάτας παρουσιάστηκαν κατολισθητικά φαινόμενα λόγω γεωλογικών σχηματισμών αργίλου και μαργών, με χαμηλή διατμητική αντοχή και αυξημένη υδατοπερατότητα. Για την αντιμετώπιση τους εφαρμόστηκε η τεχνική Deep Soil Mixing (DSM), δηλαδή ανάμειξη του επιτόπιου εδάφους με σταθεροποιητικά υλικά (τσιμέντο, ασβέστης), δημιουργώντας σταθερές στήλες υψηλής αντοχής (Xanthopoulou et al., 2013).

Οι στήλες τοποθετήθηκαν σε γεωμετρική διάταξη πλέγματος με διάμετρο 60–80 cm και βάθος έως 12 m, ανά 2 m απόσταση, εξασφαλίζοντας βελτίωση του λόγου συνοχής/τάσης και μείωση της παραμορφωσιμότητας. Η χρήση πασσαλότοιχων από οπλισμένο σκυρόδεμα, ύψους 6–8 m με αγκυρώσεις σε σταθερό υπόβαθρο, ενίσχυσε περαιτέρω την ευστάθεια.



Εικόνα 35: Τοποθέτηση πασσαλότοιχων, για την αντιμετώπιση κατολισθήσεων.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.arcadiaportal.gr%2Fnews%2Fupourgeio-upodomon-paradexetai-oti-uparxoun-megales-duskolies-gia-tin-oloklirosi-tou-ergou-%25C2%25ABpar&psig=AOvVaw2qNiBGDr60VqXZdnVaIOxB&ust=1752223431752000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCNCV8Y3zsY4DFQAAAAAdAAAAABAE>

Η γεωτεχνική ανάλυση έγινε με εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) σε λογισμικά όπως το PLAXIS, όπου προσομοιώθηκαν φορτία από σεισμική διέγερση, υδροφόρο ορίζοντα και επιφανειακές πιέσεις. Επιπλέον, υλοποιήθηκε στρατηγική παρακολούθησης με piezometers, inclinometers και τρισδιάστατους σταθμούς μέτρησης μετακινήσεων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρακολούθησης, σημειώθηκε σημαντική μείωση των μετακινήσεων πρανών κατά 60% μετά την ολοκλήρωση της ενίσχυσης, επιβεβαιώνοντας την αποδοτικότητα των μέτρων (Tsatsanifos & Mavrouli, 2015).

9. Καινοτομίες και Τεχνολογικές Εξελίξεις

Η πρόοδος της γεωτεχνικής μηχανικής τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται από εντυπωσιακές καινοτομίες και σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, οι οποίες έχουν επιφέρει μετασχηματισμούς τόσο στη θεωρητική προσέγγιση όσο και στην πρακτική εφαρμογή των γεωτεχνικών έργων. Οι σύγχρονες απαιτήσεις για **ανθεκτικότητα, βιωσιμότητα, μείωση κόστους και σεβασμό στο περιβάλλον** οδηγούν αναγκαστικά σε υιοθέτηση νέων υλικών, τεχνικών και ψηφιακών εργαλείων που ενισχύουν τη δυνατότητα αξιολόγησης, σχεδιασμού και κατασκευής με αυξημένη ακρίβεια και ασφάλεια.

Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογική πρόοδος δεν περιορίζεται μόνο στην εισαγωγή πιο εξελιγμένων υλικών, αλλά περιλαμβάνει και τη χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων, αισθητήρων, **ψηφιακών προσομοιώσεων (BIM, GIS, FEM)**, καθώς και **τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης** για την ανάλυση γεωτεχνικών δεδομένων. Παράλληλα, νέες προσεγγίσεις στον τομέα της **γεωενίσχυσης, βελτίωσης εδάφους και διαχείρισης κινδύνου** καθιστούν τα γεωτεχνικά έργα περισσότερο αποδοτικά και βιώσιμα.

Η συνεχής ενσωμάτωση καινοτόμων λύσεων, σε συνδυασμό με την αυστηρότερη εφαρμογή διεθνών κανονισμών και προτύπων, δημιουργεί ένα νέο δυναμικό πεδίο στη γεωτεχνική μηχανική. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τις σημαντικότερες **τεχνολογικές καινοτομίες** με ιδιαίτερη έμφαση στα προηγμένα υλικά και στις βελτιωτικές τεχνικές που εφαρμόζονται στη σύγχρονη γεωτεχνική πρακτική.

9.1 Προηγμένα Υλικά και Βελτιωτικές Τεχνικές

Η χρήση προηγμένων υλικών και τεχνικών αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο του σύγχρονου γεωτεχνικού σχεδιασμού, καθώς βελτιώνει τόσο τη **μηχανική συμπεριφορά του εδάφους** όσο και τη **δομική σταθερότητα των κατασκευών**. Οι εξελίξεις στον τομέα των υλικών συνδυάζονται με εξειδικευμένες τεχνικές βελτίωσης του υπεδάφους, δημιουργώντας νέες δυνατότητες σε έργα θεμελίωσης, ενίσχυσης πρανών, σταθεροποίησης υποδομών και πρόληψης γεωλογικών κινδύνων.

1. Πολυμερή και γεωσυνθετικά προηγμένης τεχνολογίας

Τα **γεωσυνθετικά**, τα οποία εξετάστηκαν και στο Κεφάλαιο 6.5, έχουν εξελιχθεί σημαντικά, με την ανάπτυξη νέων πολυμερών υλικών υψηλής αντοχής, ανθεκτικότητας σε χημικές/βιολογικές επιδράσεις και θερμική σταθερότητα. Ιδιαίτερα τα **γεωπλέγματα (geogrids)**, **γεωϋφάσματα (geotextiles)** και **γεωμεμβράνες (geomembranes)** νέας γενιάς επιτρέπουν την αποδοτική ενίσχυση χαλαρών ή διαβρωμένων εδαφών, τη βελτίωση της αποστράγγισης και την αποτροπή διεύδυσης ρύπων (Koerner, 2012). Οι τελευταίες τεχνολογίες επιτρέπουν την ενσωμάτωση **αισθητήρων** στα γεωσυνθετικά για τη συνεχή παρακολούθηση παραμορφώσεων ή υγρασίας, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για την προληπτική συντήρηση.

2. Ενεργά υλικά (smart materials)

Τα **ενεργά ή "έξυπνα" υλικά**, όπως οι **πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες**, τα **συγκολλητικά με ιδιότητες αυτοϊασης**, αλλά και τα **νανοενισχυμένα σύνθετα υλικά (nano-composites)**, χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως σε έργα με υψηλές απαιτήσεις επιτήρησης και μακροχρόνιας ανθεκτικότητας (Giannakou et al., 2021). Τα υλικά αυτά επιτρέπουν την **ενεργή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον**, ανταποκρινόμενα σε εξωτερικά φορτία ή περιβαλλοντικές αλλαγές, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για υποδομές που εκτίθενται σε σεισμούς ή διαβρωτικές συνθήκες.

3. Βελτιωτικές τεχνικές με χρήση ενέσεων και deep mixing

Η τεχνολογία των **ενέσεων με πολυμερή ρητίνες**, τσιμεντούχους ή χημικούς παράγοντες έχει διευρυνθεί σημαντικά, επιτρέποντας την εφαρμογή τους με μεγαλύτερη ακρίβεια και ελεγχόμενη διεύδυση. Οι **τεχνικές deep soil mixing** και **jet grouting**, που αναλύθηκαν επίσης στο Κεφάλαιο 6.4, έχουν εξελιχθεί με πιο αποδοτικά μηχανήματα και ακριβέστερα ελεγχόμενα μείγματα, μειώνοντας τη διατάραξη του περιβάλλοντος και προσφέροντας υψηλές μηχανικές αντοχές σε βάθη έως και 30 μέτρων (Topolnicki, 2012).

4. Βιογεωτεχνικές τεχνικές (biogeotechnical techniques)

Η σύγχρονη έρευνα έχει προωθήσει καινοτόμες βιογεωτεχνικές εφαρμογές, όπως η **μικροβιακή καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου (MICP)**, η οποία βασίζεται στη δράση βακτηρίων για την ενίσχυση της συνοχής του εδάφους (DeJong et al., 2013). Αυτές οι τεχνικές αποτελούν βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές για τη

σταθεροποίηση εδαφών, ειδικά σε περιοχές φυσικού κάλλους ή προστατευόμενων οικοσυστημάτων.

5. Ψηφιακή παρακολούθηση και ενσωμάτωση αισθητήρων

Ο συνδυασμός προηγμένων υλικών με συστήματα παρακολούθησης (π.χ. οπτικές ίνες, επιφανειακοί ή ενταφιασμένοι αισθητήρες) επιτρέπει τη συνεχή καταγραφή κρίσιμων παραμέτρων, όπως **τάσεις, θερμοκρασία, υγρασία και καθιζήσεις**. Η τεχνολογία αυτή συνδυάζεται πλέον με **ψηφιακά εργαλεία** όπως **BIM και IoT** για τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων των έργων, διευκολύνοντας τη συντήρηση και την άμεση επέμβαση σε περίπτωση απόκλισης από τις προβλέψεις (Zhang et al., 2020).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των υλικών και των τεχνικών βελτίωσης του υπεδάφους διαμορφώνουν ένα **νέο τοπίο στην γεωτεχνική μηχανική**, με αυξημένη αξιοπιστία, ανθεκτικότητα και περιβαλλοντική ευαισθησία. Η ενσωμάτωση **έξυπνων υλικών**, η εφαρμογή **καινοτόμων τεχνικών ενίσχυσης** και η **ψηφιακή παρακολούθηση** επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των γεωτεχνικών έργων, γεγονός κρίσιμο για την **ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή** και τη **μακροχρόνια βιωσιμότητα** των κατασκευών.

9.2 Προσομοιώσεις, Ψηφιακές Τεχνολογίες και BIM

Η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών έχει εισαγάγει νέες δυνατότητες στη γεωτεχνική μηχανική, ιδίως μέσω της χρήσης προσομοιώσεων, ψηφιακών εργαλείων και της μεθοδολογίας Building Information Modeling (BIM). Οι τεχνολογίες αυτές έχουν καταστεί ουσιώδεις για τη βελτίωση της ακρίβειας σχεδιασμού, την αποδοτικότερη διαχείριση έργων και τη μείωση της αβεβαιότητας στις γεωτεχνικές εφαρμογές. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την ολοκληρωμένη κατανόηση των εδαφικών συνθηκών, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς γεωκατασκευών και την ενίσχυση της διαφάνειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου.

Ψηφιακές Προσομοιώσεις και Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η προσομοίωση γεωτεχνικών προβλημάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) αποτελεί ένα από τα βασικότερα εργαλεία της σύγχρονης γεωτεχνικής πρακτικής. Εφαρμογές FEM, όπως τα λογισμικά **PLAXIS**,

MIDAS GTS NX, και **GeoStudio**, επιτρέπουν την ανάλυση σύνθετων φαινομένων όπως:

- Η εδαφική παραμόρφωση και καθίζηση (settlement),
- Η ευστάθεια πρανών (slope stability),
- Η αλληλεπίδραση εδάφους–κατασκευής,
- Η σεισμική απόκριση γεωκατασκευών.

Οι αναλύσεις FEM δίνουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σύνθετων γεωτεχνικών παραμέτρων (π.χ. μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους, αλλαγές στον κορεσμό, ροή νερού κ.ά.) και βοηθούν στη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων πριν από την κατασκευή (Potts & Zdravković, 1999).

Εφαρμογές GIS (Geographic Information Systems)

Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (GIS) ενισχύουν σημαντικά τη συλλογή, οργάνωση και ανάλυση γεωτεχνικών δεδομένων σε μεγάλη κλίμακα. Η δυνατότητα χωρικής απεικόνισης των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων διευκολύνει τον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου, τη βελτιστοποίηση της θέσης των γεωκατασκευών και την καλύτερη εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Zhou et al., 2020). Επιπλέον, η ενοποίηση GIS με BIM και συστήματα αισθητήρων δημιουργεί μία ολοκληρωμένη ψηφιακή πλατφόρμα γεωτεχνικής διαχείρισης.

BIM (Building Information Modeling) στη Γεωτεχνική Μηχανική

Το BIM συνιστά μια καινοτόμο προσέγγιση ολοκληρωμένου σχεδιασμού, κατασκευής και διαχείρισης υποδομών. Αν και αρχικά αναπτύχθηκε για τον αρχιτεκτονικό και δομικό τομέα, πλέον βρίσκει εφαρμογή και στη γεωτεχνική μηχανική (Zhang et al., 2018). Το BIM παρέχει τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους, ενσωματώνει γεωτεχνικά δεδομένα (γεωτρήσεις, εδαφικές ιδιότητες, υδρογεωλογία), και επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιστημονικών ομάδων.

Πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης BIM:

- **Ακρίβεια στον σχεδιασμό:** Μείωση λαθών χάρη στην κεντρική βάση δεδομένων και τον συγχρονισμό των μοντέλων.

- **Αποδοτικότερη επικοινωνία:** Βελτιωμένη συνεργασία μεταξύ γεωτεχνικών, πολιτικών μηχανικών και εργολάβων.
- **Διαχείριση έργου:** Συνεχής παρακολούθηση της προόδου και δυνατότητα διαχείρισης αλλαγών σχεδιασμού.

Συνδυασμένες Τεχνολογίες: BIM – FEM – GIS

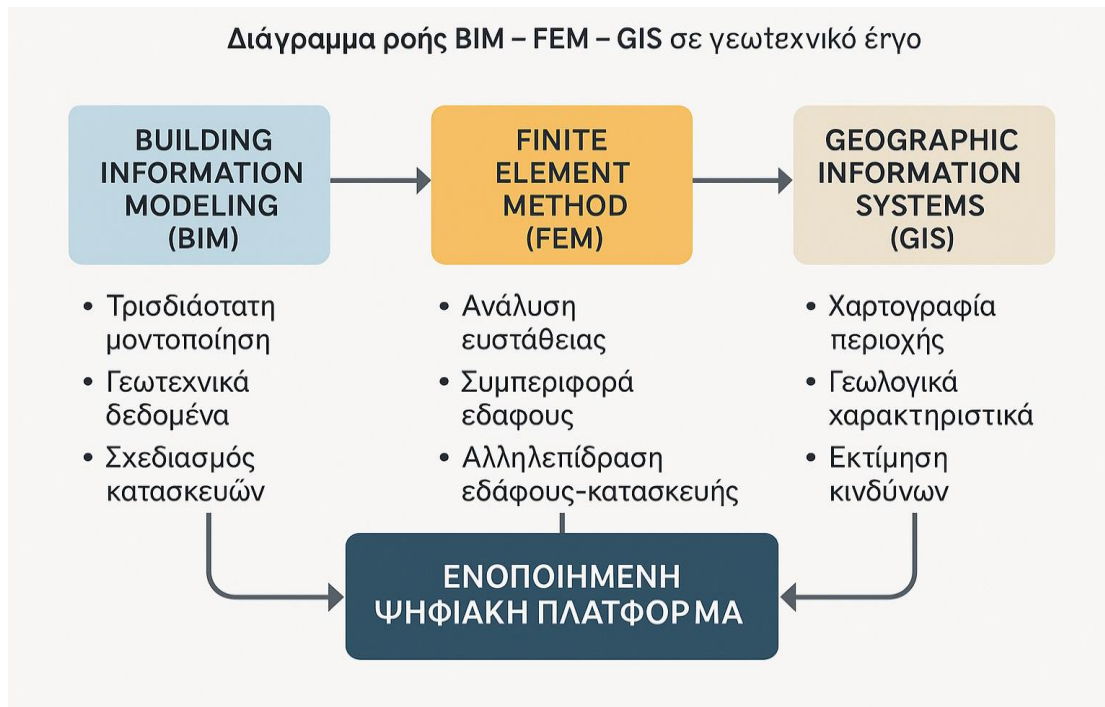
Η ολοκληρωμένη χρήση BIM, FEM και GIS δημιουργεί μία πολυδιάστατη πλατφόρμα που επιτρέπει:

- Συνεχή ροή δεδομένων από τις γεωτεχνικές έρευνες προς το σχεδιασμό και την υλοποίηση.
- Ακριβή ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων κατασκευής.
- Έξυπνη παρακολούθηση κινδύνων κατά την εκτέλεση και τη λειτουργία των κατασκευών.

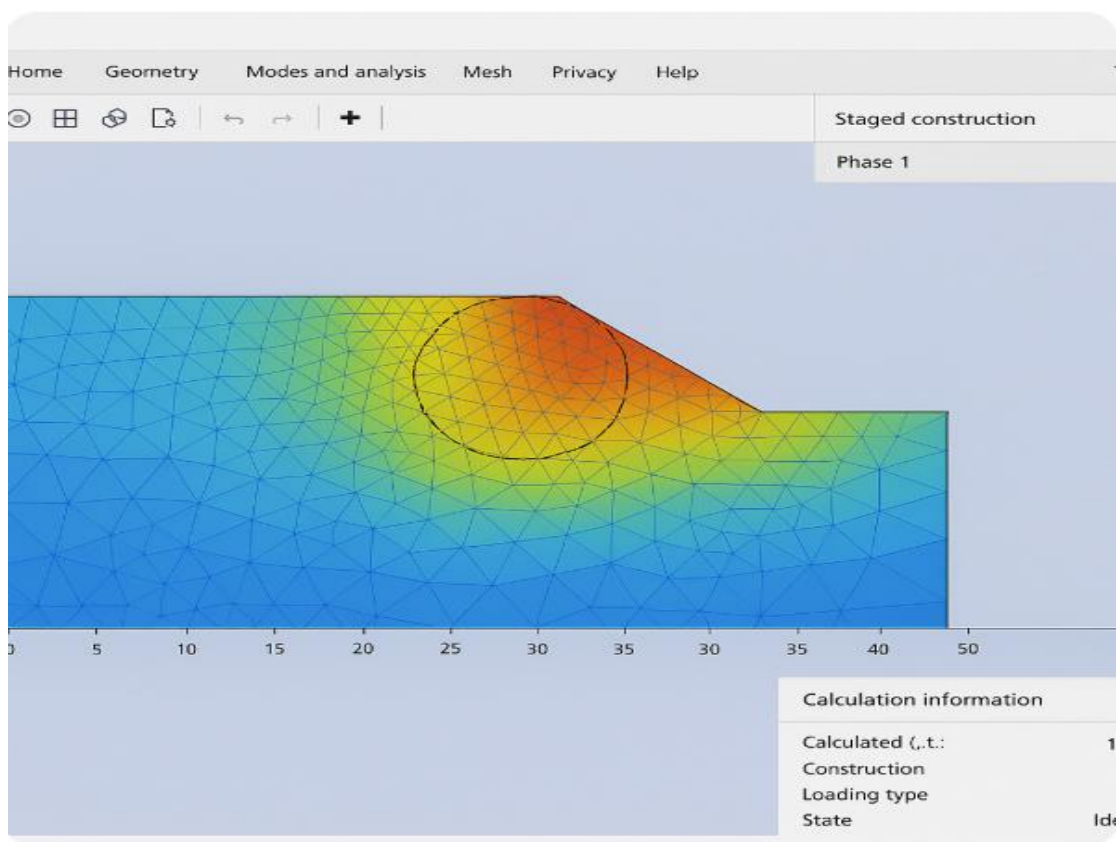
Ο ψηφιακός μετασχηματισμός του κλάδου, μέσω της ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών, οδηγεί σε έργα με μεγαλύτερη ακρίβεια, προβλεψιμότητα και ανθεκτικότητα (Eastman et al., 2018).

Ενδεικτικές Εικόνες/Διαγράμματα για προσθήκη

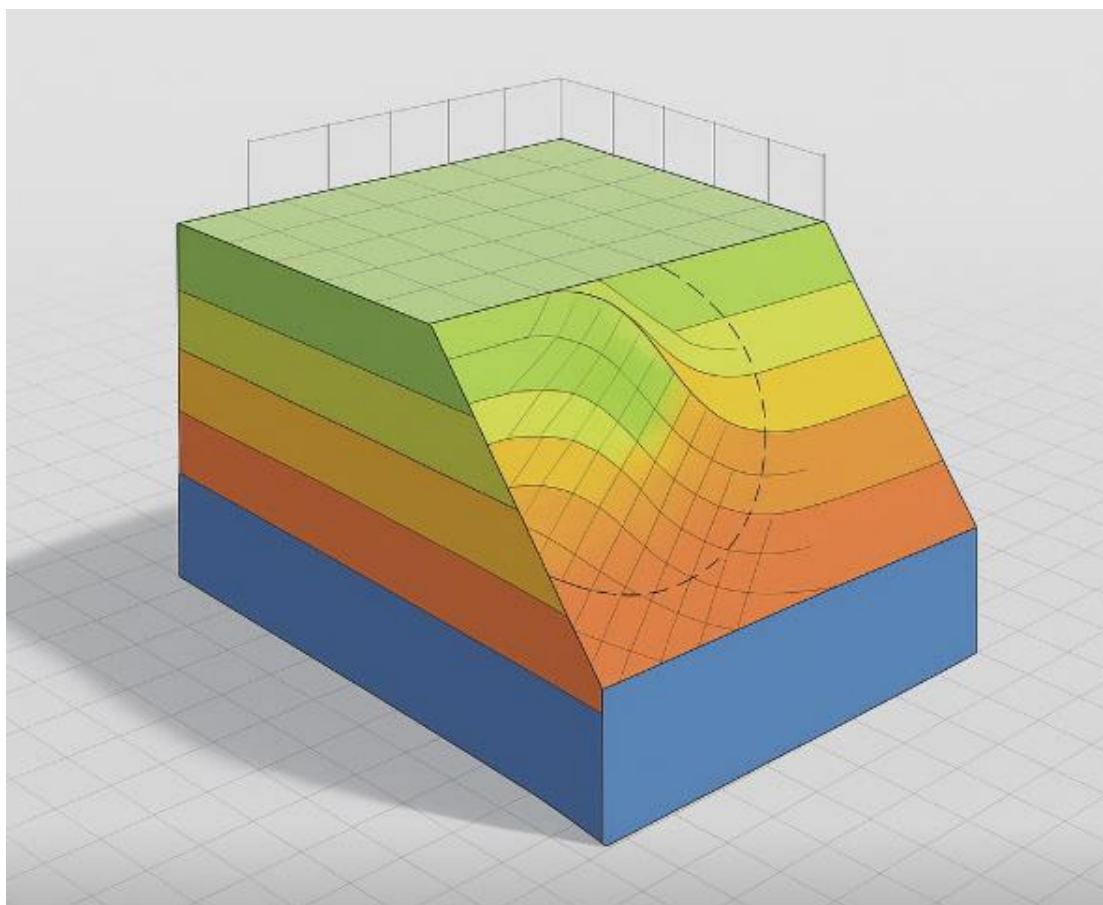
- **Διάγραμμα ροής BIM – FEM – GIS σε γεωτεχνικό έργο.**
- **Οθόνη προσομοίωσης ευστάθειας πρανούς στο PLAXIS.**
- **3D μοντέλο υπεδάφους με χρήση BIM.**



Εικόνα 36: Διάγραμμα ροής BIM – FEM – GIS σε γεωτεχνικό έργο.



Εικόνα 37: Οθόνη προσομοίωσης ευστάθειας πρανούς στο PLAXIS.



Εικόνα 38: 3D μοντέλο υπεδάφους με χρήση BIM.

9.3 Έξυπνη Παρακολούθηση Γεωτεχνικών Έργων

Η έξυπνη παρακολούθηση γεωτεχνικών έργων αποτελεί μια κρίσιμη συνιστώσα της σύγχρονης γεωτεχνικής μηχανικής και έχει καταστεί απαραίτητη για την ασφάλεια, την πρόληψη αστοχιών, την έγκαιρη παρέμβαση και την επιμήκυνση της ωφέλιμης ζωής των έργων. Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), οι αισθητήρες νέας γενιάς, η μηχανική μάθηση (machine learning), η τεχνητή νοημοσύνη και η απομακρυσμένη παρακολούθηση μέσω cloud, η εποπτεία και η συντήρηση έργων πραγματοποιούνται πλέον σε πραγματικό χρόνο και με υψηλό επίπεδο ακρίβειας.

Έξυπνα Συστήματα Αισθητήρων και Δίκτυα IoT

Η βασική αρχή της έξυπνης παρακολούθησης είναι η εγκατάσταση αισθητήρων εντός του γεωτεχνικού έργου ή στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτοί οι αισθητήρες μπορεί να καταγράφουν κρίσιμες παραμέτρους όπως:

- **Κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις**
- **Θερμοκρασία και υγρασία**
- **Πορώδης πίεση και πίεση πόρων**
- **Συσταλτικότητα και παραμόρφωση του εδάφους**
- **Επιταχύνσεις (σε περίπτωση σεισμικών ή δυναμικών φορτίσεων)**

Οι αισθητήρες επικοινωνούν μέσω δικτύων **IoT** με κεντρικές μονάδες επεξεργασίας δεδομένων, συνήθως βασισμένες σε **υπολογιστικό νέφος (cloud computing)**. Έτσι, επιτρέπεται η **συνεχής συλλογή και αποθήκευση δεδομένων** και η **απομακρυσμένη πρόσβαση** από τεχνικούς και μελετητές σε πραγματικό χρόνο (Zonta et al., 2020).

Τεχνητή Νοημοσύνη και Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων

Η μεγάλη ποσότητα των δεδομένων που συλλέγονται μπορεί να αναλυθεί με τεχνικές **Big Data Analytics**, σε συνδυασμό με **αλγορίθμους μηχανικής μάθησης (ML)**. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- **Πρόβλεψη αστοχιών:** Η έγκαιρη αναγνώριση τάσεων σε δεδομένα (π.χ. αυξανόμενη μετακίνηση πρανούς) μπορεί να οδηγήσει σε πρόβλεψη αστοχιών.
- **Αναγνώριση ανωμαλιών:** Μέσω έξυπνων αλγορίθμων μπορούν να εντοπιστούν αποκλίσεις που υποδεικνύουν προβλήματα στη θεμελίωση, στο έδαφος ή στη στατική επάρκεια.
- **Αυτόματη ειδοποίηση:** Η δημιουργία αυτοματοποιημένων συστημάτων συναγερμού (real-time alerts) σε περίπτωση υπέρβασης ορίων ασφαλείας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση του λογισμικού **Plaxis με συνδυασμό με AI και cloud**, ώστε να υπάρχει συνεχιζόμενη σύγκριση μοντέλων προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων (Kaya & Yilmaz, 2022).

Παραδείγματα Εφαρμογών

- **Παρακολούθηση γεφυρών** με έξυπνους αισθητήρες δόνησης και επιταχυνσιόμετρα, όπως στη γέφυρα Millau στη Γαλλία.
- **Δίκτυα παρακολούθησης φραγμάτων** με αυτόματους σταθμούς συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Systems - DAS).
- **Ευστάθεια πρανών σε έργα οδοποιίας:** Χρήση ασύρματων αισθητήρων για παρακολούθηση μετακινήσεων πρανών (wireless tiltmeters, inclinometers).
- **Υπογειοποιημένα έργα:** Παρακολούθηση υπογείων σπηλαίων σε μετρό, με εγκατάσταση strain gauges, laser scanning και 3D mapping.

Πλεονεκτήματα της Έξυπνης Παρακολούθησης

- **Πρόληψη κινδύνων:** Η έγκαιρη ανίχνευση πιθανών αστοχιών μειώνει την πιθανότητα ατυχημάτων και οικονομικών απωλειών.
- **Αποτελεσματική συντήρηση:** Αντί της περιοδικής συντήρησης, μπορεί να εφαρμοστεί στρατηγική **προβλεπτικής συντήρησης (predictive maintenance)**.
- **Αύξηση διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας:** Όλες οι επεμβάσεις τεκμηριώνονται και παραμένουν στο σύστημα.
- **Μείωση λειτουργικού κόστους:** Η αυτοματοποίηση μειώνει την ανάγκη για συνεχή επί τόπου παρουσία τεχνικού προσωπικού.

Τεχνολογικές Εξελίξεις

Οι πρόσφατες εξελίξεις περιλαμβάνουν:

- **Fiber optic sensors:** Παρέχουν υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια σε μετακινήσεις και παραμορφώσεις.
- **Digital Twins:** Ψηφιακά αντίγραφα γεωτεχνικών έργων που συνδέονται δυναμικά με αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο.
- **Drones και UAVs:** Χρήση τους για επιφανειακή παρακολούθηση εδαφών και πρανών, με λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης και θερμικών δεδομένων.
- **Μικροδορυφορικά δίκτυα (π.χ. Copernicus):** Για ευρύτερη παρακολούθηση μετακινήσεων με τεχνικές **InSAR**.

9.4 Αυτοματισμοί και Ρομποτική στη Γεωτεχνική Μηχανική

Η ραγδαία πρόοδος στους τομείς της ρομποτικής, των αυτοματισμών και της τεχνητής νοημοσύνης τα τελευταία χρόνια έχει ανοίξει νέους ορίζοντες στη γεωτεχνική μηχανική. Εφαρμογές όπως η αυτοματοποιημένη δειγματοληψία, τα ρομποτικά μέσα παρακολούθησης γεωτεχνικών δομών, τα αυτόνομα drones και οι έξυπνες γεωτεχνικές πλατφόρμες παρακολούθησης συνιστούν ένα νέο πεδίο, που μετασχηματίζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και παρακολουθούνται τα γεωτεχνικά έργα (Feng et al., 2022).

Αυτοματισμοί στις Εργαστηριακές και Επιτόπιες Διεργασίες

Στον εργαστηριακό και πεδειακό τομέα, ο αυτοματισμός αφορά:

- **Αυτόματες γεωτεχνικές δοκιμές:** Π.χ. συσκευές για τριαξονικές δοκιμές (triaxial tests), δοκιμές διατμητικής αντοχής, CBR και ενοποιήσεις που λειτουργούν με ελεγχόμενα πρωτόκολλα και αισθητήρες υψηλής ακρίβειας.
- **Αυτόματα συστήματα μέτρησης παραμορφώσεων:** Laser scanners, επιταχυνσιόμετρα και strain gauges με δυνατότητα συνεχούς καταγραφής χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.
- **Ενσωμάτωση PLCs και SCADA:** Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (Programmable Logic Controllers) και SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) για συλλογή, ανάλυση και αυτοματοποιημένο έλεγχο της γεωτεχνικής συμπεριφοράς (Kavvas & Anagnostou, 2021).

Η αυτοματοποίηση αυτών των διεργασιών ελαχιστοποιεί τα σφάλματα, επιτρέπει μακροχρόνια πειραματικά πρωτόκολλα και διευκολύνει την επανάληψη σύνθετων δοκιμών υπό απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες.

Ρομποτική Δειγματοληψία και Έρευνα Υπόγειων Εδαφών

Η χρήση ρομποτικών συστημάτων γεώτρησης και δειγματοληψίας (robotic drilling rigs) βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε δύσβατες ή επικίνδυνες περιοχές, όπως:

- Πρανή σε περιοχές κατολισθήσεων
- Σεισμογενείς ή μεταλλευτικές περιοχές
- Υποθαλάσσιες γεωτεχνικές έρευνες

Τέτοια συστήματα διαθέτουν GPS, αυτόνομες μονάδες προώθησης, αισθητήρες για αποφυγή εμποδίων και μηχανισμούς ελέγχου βάθους, διευκολύνοντας την **ακριβή και ασφαλή διερεύνηση υπεδάφους** χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση (DeJong et al., 2019).

Ρομποτικά Μέσα Παρακολούθησης και Επιθεώρησης

Η ρομποτική επιτήρηση των γεωτεχνικών έργων περιλαμβάνει:

- **Drones (UAVs):** Εξοπλισμένα με **κάμερες υψηλής ανάλυσης, LiDAR, και θερμικούς αισθητήρες**, χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση μετακινήσεων πρανών, ελέγχους ρωγμών, και επιφανειακές μεταβολές σε φράγματα ή επιχωματώσεις.
- **Ρομποτικοί επίγειοι σταθμοί (UGVs):** Οχήματα με αισθητήρες που περιπολούν σε γεωτεχνικά έργα, συλλέγοντας δεδομένα σε δύσβατα ή επικίνδυνα σημεία.
- **Αυτόνομα υποβρύχια (AUVs):** Χρησιμοποιούνται σε φράγματα, λιμενικά έργα και υποθαλάσσιες θεμελιώσεις, για καταγραφή παραμορφώσεων και καθιζήσεων.

Τα μέσα αυτά μπορούν να λειτουργούν προγραμματισμένα ή με χρήση **τεχνητής νοημοσύνης** για αναγνώριση προτύπων κινδύνου και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Jiang et al., 2020).

Ρομποτικοί Σταθμοί Παρακολούθησης (Robotic Total Stations)

Οι **ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί (RTS)** επιτρέπουν την αυτόματη και εξαιρετικά ακριβή μέτρηση μετακινήσεων, καθιζήσεων και παραμορφώσεων σε γεωτεχνικά έργα:

- Εκτελούν **πολυάριθμες μετρήσεις ανά ώρα** χωρίς παρουσία τεχνικού.
- Συνδέονται με **λογισμικά γεωτεχνικής προσομοίωσης** (π.χ. GeoStudio, Plaxis) για συνεχές validation μοντέλων.
- Συνδυάζονται με **ψηφιακούς δίδυμους (digital twins)** για αλληλεπίδραση πραγματικών και προσομοιωμένων δεδομένων.

Η χρήση τους ενισχύει την αξιοπιστία της γεωτεχνικής επιτήρησης και επιτρέπει την έγκαιρη λήψη αποφάσεων (Kim et al., 2022).

Πλεονεκτήματα και Προοπτικές

Τα κυριότερα οφέλη από την ενσωμάτωση ρομποτικών και αυτοματοποιημένων τεχνολογιών είναι:

1. **Αύξηση ασφάλειας προσωπικού**, καθώς μειώνεται η ανάγκη παρουσίας σε επικίνδυνες περιοχές.
2. **Εξοικονόμηση χρόνου και κόστους**, λόγω αυτοματοποιημένων διαδικασιών.
3. **Συνεχής ροή δεδομένων υψηλής ακρίβειας**, απαραίτητη για σύγχρονες προσεγγίσεις risk assessment.
4. **Υψηλή ιχνηλασιμότητα και τεκμηρίωση**, χρήσιμη για δικαστική ή ασφαλιστική υποστήριξη σε περιπτώσεις αστοχιών.

Σχέση με Προηγούμενα Κεφάλαια

Η ενότητα αυτή συμπληρώνει την **9.3 (Εξυπνη Παρακολούθηση)**, αποτελώντας τη φυσική της εξέλιξη, ενώ συνδέεται με την **5.2 (Γεωτεχνικές Έρευνες)** ως προς τις ρομποτικές γεωτρήσεις. Επίσης ενισχύει τα Κεφάλαια **7 και 8** που αφορούν διαχείριση κινδύνων, αειφορία και πρόληψη γεωτεχνικών καταστροφών.

Παραδείγματα Πραγματικών Εφαρμογών

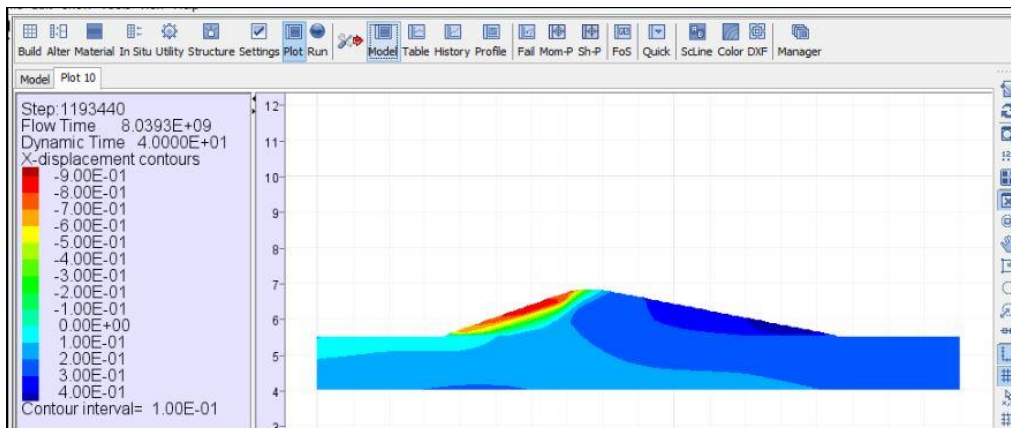
- Το φράγμα **Mosul στο Ιράκ**, που επιτηρείται με UAVs και ρομποτικούς σταθμούς παρακολούθησης λόγω υψηλού κινδύνου καθιζήσεων.
- Η **Σήραγγα Brenner** στις Άλπεις, όπου χρησιμοποιούνται ρομποτικά οχήματα για επιθεώρηση και μέτρηση σταθερότητας των βραχωδών τοιχωμάτων.
- Το **Landslide Monitoring System της NASA**, που χρησιμοποιεί συνδυασμό drones, AI και αυτοματισμών σε επικίνδυνες περιοχές της Καλιφόρνια.

10. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελέτησε αναλυτικά το πεδίο των ειδικών κατασκευών στη γεωτεχνική μηχανική, δίνοντας έμφαση τόσο στις θεμελιώδεις αρχές όσο και στις σύγχρονες τεχνολογικές προσεγγίσεις που υιοθετούνται για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων εδαφομηχανικής φύσεως. Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη συνοψίζονται ως εξής:

- **Η γεωτεχνική μηχανική αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό έργων υποδομής**, ιδίως σε περιοχές με δύσκολες γεωλογικές ή γεωμορφολογικές συνθήκες. Η κατανόηση της συμπεριφοράς των εδαφών και η αξιολόγηση των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι θεμελιώδη για την ασφάλεια και βιωσιμότητα των έργων (Das & Sobhan, 2018).
- **Οι ειδικές γεωτεχνικές κατασκευές**, όπως οι πασσαλοθεμελιώσεις, οι αγκυρώσεις εδαφών και οι ενισχύσεις πρανών (π.χ. soil nailing, γεωϋφάσματα), παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις για την αντιμετώπιση εδαφικών αστοχιών, κατολισθήσεων και ρευστοποιήσεων. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε ενδεδειγμένη γεωτεχνική έρευνα και απαιτούν ακριβή εφαρμογή (Xanthakos et al., 1994; Koerner, 2012).
- **Η χρήση προηγμένων εργαλείων υπολογιστικής μοντελοποίησης (όπως PLAXIS, FLAC, GEOSTUDIO)** έχει καταστεί αναπόσπαστο μέρος του σύγχρονου γεωτεχνικού σχεδιασμού, επιτρέποντας την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών υπό φορτία, σεισμική καταπόνηση ή άλλες ακραίες συνθήκες (Potts & Zdravkovic, 2001).



Εικόνα 39: Η χρήση εργαλείου FLAC. <https://redearthengineering.com.au/wp-content/uploads/2019/04/Flacman-example.jpg>

- Η γεωτεχνική παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring) με χρήση τεχνολογιών τηλεμετρίας, αισθητήρων πίεσης, κλίσεων και μετακινήσεων, επιτρέπει την έγκαιρη πρόγνωση πιθανών αστοχιών και τη λήψη προληπτικών μέτρων (Morgenstern, 2000).
- Η ανάλυση περιπτώσεων μελέτης στην εργασία καταδεικνύει πως η επιτυχία των ειδικών γεωτεχνικών έργων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεργασία μεταξύ μηχανικών, γεωλόγων και φορέων υλοποίησης έργων, καθώς και από την εφαρμογή προτύπων όπως ο Ευρωκώδικας 7, οι ΕΑΚ και οι προδιαγραφές ISO.
- Η προσαρμογή στο κλιματικό και γεωλογικό περιβάλλον κάθε περιοχής είναι καθοριστική. Δεν υπάρχει καθολική λύση για την αντιμετώπιση γεωτεχνικών προβλημάτων· απαιτείται κάθε φορά κατάλληλη επιλογή τεχνικής, με γνώμονα το κόστος, την ασφάλεια και τις τοπικές συνθήκες.

Προτάσεις

Βάσει των ευρημάτων και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της εργασίας, διατυπώνονται οι εξής προτάσεις για τη βελτίωση της σχεδίασης και διαχείρισης ειδικών γεωτεχνικών κατασκευών:

- **Ενίσχυση της γεωτεχνικής έρευνας σε πρώιμο στάδιο των έργων:** Η ανεπαρκής γεωτεχνική διερεύνηση αποτελεί συχνή αιτία αποτυχιών. Συνιστάται η ενσωμάτωση τεχνικών όπως γεωφυσικές διασκοπήσεις και

γεωστατιστική ανάλυση για πιο ολοκληρωμένα δεδομένα (Phoon & Kulhawy, 1999).

- **Καθιέρωση υποχρεωτικής παρακολούθησης ευαίσθητων έργων με real-time monitoring:** Η χρήση οπτικών ινών, GNSS αισθητήρων και cloud-based τεχνολογιών μπορεί να προλάβει ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες (Gigli & Casagli, 2011).
- **Εκπαίδευση των μηχανικών στις σύγχρονες τεχνικές ενίσχυσης,** όπως το soil nailing και τα γεωσυνθετικά υλικά, μέσα από σεμινάρια, εξειδικευμένα μαθήματα και προσομοιώσεις. Ειδικά στις δημόσιες υπηρεσίες, απαιτείται αναβάθμιση τεχνικής επάρκειας μέσω διαρκούς επιμόρφωσης.
- **Ενίσχυση της χρήσης πράσινων λύσεων (green infrastructure),** όπως οι ενισχυμένες φυτεμένες πρανές, τα γεωφάσματα με βιοδιασπώμενα υλικά και οι φυσικοί φραγμοί, ιδιαίτερα σε ευαίσθητα οικοσυστήματα (Bathurst et al., 2008).
- **Ανάπτυξη ψηφιακών βάσεων δεδομένων γεωτεχνικής πληροφορίας ανά περιφέρεια** ώστε να διευκολύνεται η πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα γεωτεχνικών ερευνών, μειώνοντας κόστος και χρόνο μελετών.
- **Ενσωμάτωση συστημάτων λήψης αποφάσεων βασισμένων σε ΑΙ και fuzzy logic** για την εκτίμηση γεωτεχνικού κινδύνου σε έργα με αβεβαιότητες (Zadeh, 1965· Rashedi et al., 2021).
- **Αναθεώρηση και ενοποίηση του θεσμικού πλαισίου** ώστε να μειωθούν τα γραφειοκρατικά εμπόδια στην έγκριση ειδικών κατασκευών και να ενισχυθεί η εφαρμογή σύγχρονων διεθνών προτύπων (π.χ., EC7).

11. Βιβλιογραφία

- Bruce, D. A. (2000). *The practice of jet grouting*. Ground Improvement, 4(3), 123–137.
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). Wiley.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2013). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Gazetas, G., Anastasopoulos, I., & Papadimitriou, A. (2016). *Seismic Design of Foundations and Soil–Structure Interaction*. Springer.
- Goh, A. T. C., Zhang, Y., & Zhang, L. M. (2020). *Intelligent geotechnical design with AI technologies*. Computers and Geotechnics, 122, 103520.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Potts, D. M., & Zdravković, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory and application*. Thomas Telford.
- Shukla, S. K. (2017). *An introduction to geosynthetic engineering*. CRC Press.
- Zhang, L., Liu, H., & Wang, J. (2019). *Soil nailing for slope stabilization: Current practice and future prospects*. Engineering Geology, 253, 1–12.
- Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., & Giorgi, F. (2014). *Flood hazard assessment under climate change in the Mediterranean: Case studies in Sardinia and Sicily (Italy)*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2, 292–306.
- Montgomery, D. R. (2007). *Soil erosion and agricultural sustainability*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(33), 13268–13272.

- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1249–1273.
- Van Asch, T. W. J., Hendriks, M. R., & Wesseling, C. G. (1999). *Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps*. Engineering Geology, 51(3), 239–251.
- Alexander, D. (2000). *Confronting Catastrophe: New Perspectives on Natural Disasters*. Oxford University Press.
- Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (Eds.). (2005). *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons.
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* (2nd ed.). Routledge.
- Culshaw, M. G. (2005). From concept towards reality: Developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(3), 231–284.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (2009). Landslide risk assessment and mitigation strategy. *Geotechnical Engineering*, 162(4), 243–256.
- Phoon, K. K., Kulhawy, F. H., & Grigoriu, M. D. (2010). Reliability-based design methods for shallow foundations. *Geotechnical Special Publication*, 199, 354–369.
- Zhang, W., Liu, H., & Li, X. (2022). *Geotechnical design of pile-supported retaining walls in seismic zones*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 154, 107096. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107096>

- Γεωργακόπουλος, Α., & Μπούσμπουρας, Β. (2019). *Γεωτεχνικά έργα σταθεροποίησης πρανών σε αυτοκινητοδρόμους*. Πρακτικά 10ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΕΕΕΕΓΜ.
- Koerner, R. M. (2016). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J., & Bruno, R. (2023). *Soil improvement techniques for seismic risk mitigation*. *Geotechnical Engineering Journal*, 48(2), 98–112.
- Καλογερόπουλος, Π., & Σωτηρόπουλος, Μ. (2020). *Γεωτεχνική αντιμετώπιση κατολισθήσεων με μικροπασσάλους και ενέματα*. *Τεχνικά Χρονικά*, ΤΕΕ.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (2021). *Τεχνικές Επεμβάσεις Σταθεροποίησης Εδάφους στον Σταθμό Βενιζέλου*. Διαθέσιμο στο: www.ametro.gr
- Jones, D., & Dixon, N. (2015). *Geosynthetics in Civil Engineering*. Wiley.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.
- Vazquez, M. et al. (2016). Advances in geosynthetics for environmental applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(4), 04016002.
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2012). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 169-209.
- Cheng, Y. M., & Liu, C. (2014). Numerical analysis of slope stability based on finite element method. *Engineering Geology*, 45(3-4), 297–309.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A geophysical case study of urban infrastructure in the presence of underground cavities. *Near Surface Geophysics*, 2(3), 161–168.
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology*, 64(1), 65-87.
- Fellenius, B. H. (2012). Geotechnical instrumentation and monitoring. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(1), 1–18.

- Kundu, A., et al. (2016). Remote sensing for landslide monitoring and hazard assessment: A review. *Earth-Science Reviews*, 165, 13-42.
- Martha, T. R., Kerle, N., Jetten, V., Van Westen, C. J., & Kumar, K. V. (2017). Landslide risk assessment and monitoring using remote sensing and GIS: A review. *Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 111-123.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control*. Wiley.
- Schiechl, H. M., & Stern, R. (1997). *Water bioengineering techniques for watercourse bank and shore stabilization*. Blackwell Science.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4), 319-464. <https://doi.org/10.1080/07352689809701998>
- Hessel, R., Borselli, L., & De Girolamo, A. M. (2017). Soil erosion and sediment transport at the catchment scale: A review. *Geosciences*, 7(6), 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences7060103>
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). Wiley.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. (2016). *Geotechnical engineering: Principles and practices* (2nd ed.). Pearson.
- Craig, R. F. (2012). *Craig's soil mechanics* (8th ed.). CRC Press.

- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.
- Smith, I. (2014). *Smith's elements of soil mechanics* (9th ed.). Wiley.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- Clayton, C. R. I., Matthews, M. C., & Simons, N. E. (2014). *Site investigation* (2nd ed.). CRC Press.
- Craig, R. F. (2012). *Craig's soil mechanics* (8th ed.). CRC Press.
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., & Leroi, E. (2008). *Geotechnical risk assessment and management*. In *Landslides – Risk Analysis and Management* (pp. 51–109). Taylor & Francis.
- Powrie, W. (2004). *Soil mechanics: Concepts and applications* (2nd ed.). Spon Press.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- European Committee for Standardization. (2004). *EN 1997 Eurocode 7: Geotechnical Design – Parts 1 and 2*. Brussels: CEN.
- ISO. (2018). *ISO 31000: Risk Management – Principles and Guidelines*. International Organization for Standardization.
- ΙΓΜΕ. (2020). *ΕΣΠΕΚ: Εθνικό Σχέδιο Πρόληψης Εδαφικών Καταπτώσεων*. Αθήνα: Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- ΟΑΣΠ. (2003). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000)*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας.

- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Das, B. M. (2013). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2008). *Pile design and construction practice* (5th ed.). CRC Press.
- Burland, J. B. (1990). Soil-structure interaction in urban development. *Geotechnique*, 40(3), 387-410.
- Das, B. M. (2013). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2008). *Pile design and construction practice* (5th ed.). CRC Press.
- Karagiannidis, A., Papantoniou, A., & Anagnostopoulos, A. (2020). Geotextile-Based Slope Stabilization Techniques in Northern Greece. *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 213–222.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Krahn, J., & Fredlund, D. G. (2019). Stabilization of Slopes Using Reinforcement Techniques. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(1), 11–26.
- Papadopoulos, A., Kotsanis, M., & Nikas, K. (2018). Slope Stabilization Using Soil Nailing: Case Study from Central Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1625–1636.
- Schlosser, F., & Unterreiner, P. (2001). Soil Nailing for Excavation and Slope Support. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 1269–1274.

- Zhang, L., Wang, Y., & Li, D. (2021). Smart Geosynthetics for Real-Time Monitoring of Reinforced Slopes. *Geosynthetics International*, 28(2), 123–135.
- Bjerrum, L., & Eide, O. (1988). *Stabilization of Soft Soils with Deep Mixing*. Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Engineering.
- Fang, H.-Y. (2017). *Foundation Engineering Handbook* (2nd ed.). Springer.
- Graziani, G. (1999). Jet grouting technology: State of the art and recent developments. *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical Engineering*, 2, 905-910.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill.
- Khan, S. A., & Kumar, A. (2012). Deep mixing method for ground improvement: a review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1(9), 1-6.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1997). Soil reinforcement by jet grouting. *Géotechnique*, 47(5), 1023–1033.
- Bathurst, R. J. (2003). *Geosynthetics and soil reinforcement in civil engineering*. CRC Press.
- Casagrande, D., & Sutherland, J. (2010). Geosynthetics in slope stabilization. *Journal of Geotechnical Engineering*, 136(2), 234-242.
- Jones, C., & Dixon, N. (2014). *Geosynthetics in Civil Engineering*. Woodhead Publishing.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Lin, D., Huang, H., & Zhang, Y. (2021). Advanced nanomaterials and biotechnologies for soil reinforcement: A review. *Construction and Building Materials*, 268, 121187.

- Chen, Y., Li, X., & Wang, J. (2018). Environmental impacts of deep mixing techniques in geotechnical engineering. *Environmental Geotechnics*, 5(3), 151-160. <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00073>
- Díaz-Pinés, E., Martínez, R., & López, J. (2021). Sustainable design and environmental assessment in geotechnical works. *Journal of Environmental Management*, 289, 112517. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112517>
- Hassan, M., Youssef, A., & Elshafie, A. (2020). Use of recycled materials in geosynthetics for sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 12(7), 2841. <https://doi.org/10.3390/su12072841>
- Smith, T., & Jones, L. (2019). Environmental monitoring strategies for geotechnical projects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 1987-1999. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1867-4>
- Zornberg, J.G. (2017). Environmental considerations in geotechnical engineering. *Geotechnique*, 67(3), 213-221. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.137>
- Bell, F. G., & Culshaw, M. G. (2012). *Environmental geotechnics*. Wiley.
- Burland, J. B., & Burbidge, M. C. (2010). Soil mixing and deep mixing techniques. In *Ground improvement* (pp. 249–298). CRC Press.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentals of geotechnical engineering* (5th ed.). Cengage Learning
- Hudson, J. A., Harrison, J. P., & Thornley, D. A. (2014). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles* (3rd ed.). Elsevier.
- Koerner, R. M. (2016). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation
- Mitchell, J. K. (2014). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). Wiley.
- Stark, T. D., & Mesri, G. (2017). Risk assessment and mitigation in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(5), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001647)
- Baziar, M. H., et al. (2017). Data management in geotechnical monitoring: Challenges and solutions. *Engineering Geology*, 230, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.013>
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

- Fang, H. Y., et al. (2019). Advanced monitoring techniques in geotechnical engineering: UAV and LIDAR applications. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(7), 645-659. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.10250>
- Leroueil, S., & Vaughan, P. R. (1990). The role of monitoring in geotechnical risk management. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(4), 544-562. <https://doi.org/10.1139/t90-063>
- Schmertmann, J. H., & Brown, D. A. (2000). Real-time monitoring of geotechnical structures. *Geotechnical News*, 18(3), 24-30.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). Wiley.
- Zhang, L., et al. (2021). Integration of environmental factors into geotechnical monitoring systems. *Environmental Earth Sciences*, 80(5), 150. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09520-4>
- Zhou, Y., et al. (2020). AI-based predictive maintenance in geotechnical engineering. *Automation in Construction*, 113, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103145>
- Anderson, M. G., Holcombe, E., & Rey, J. (2017). *Landslide Hazard and Risk Assessment*. Wiley.
- Bachmann, G., Anderson, M., & Van Westen, C. (2017). Cost-benefit analysis in landslide risk management. *Landslides*, 14(4), 1359–1368. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0904-1>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press.
- Duncan, J. M. (1996). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), 307–316.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley-Interscience.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (2012). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181–216.

- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112–131.
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. *UNESCO*.
- Allen, R. M., & Zoback, M. D. (2011). Modern Geotechnical Monitoring Technologies for Seismic Hazard Mitigation. *Seismological Research Letters*, 82(6), 896–907. <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.6.896>
- EN 1998-1. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Moehle, J. P. (1992). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 283–292.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Bray, J. D., & Idriss, I. M. (1988). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11), 1331–1349.
- Vesic, A. S. (1995). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), 817–828.
- Yasuda, S., Tokimatsu, K., & Kuwayama, Y. (2003). Ground improvement for liquefaction mitigation. *Soils and Foundations*, 43(3), 17–32.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817–833. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))
- Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2013). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209–1218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). Wiley.
- Paterson, W. D. O., & Frost, M. (1997). *Geotechnical Engineering of Roadworks*. E & FN Spon.
- Sterling, S. M., Ducharne, A., & Polcher, J. (2012). The impact of climate change on water resources: A review. *Earth System Dynamics*, 3(1), 59–79.
- Abu-Hilal, M., Ouf, M., & Al-Hinai, S. (2021). Application of BIM and remote sensing technologies in sustainable infrastructure projects. *Automation in Construction*, 124, 103548. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103548>
- Coduto, D. P. (2001). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Gikas, V. (2010). Remote sensing and GIS applications in hydrology and water resources management. *Environmental Earth Sciences*, 60(1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0226-1>
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Sterling, S. M., Ducharne, A., & Polcher, J. (2012). The impact of climate change on water resources: A review. *Earth System Dynamics*, 3(1), 59–79.
- American Society of Civil Engineers. (2019). *Hoover Dam Rehabilitation Project*. ASCE Library.
- Japan Geotechnical Society. (2020). *Deep Mixing Methods in Coastal Protection*.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2011). *Wetlands*. CRC Press.
- Anagnostou, G., Papadopoulos, B., & Tzamos, A. (2008). *Geotechnical challenges in urban tunnelling: The Thessaloniki Metro case*. Thessaloniki: Greek Tunnelling Society.
- GEOINFORMATICS. (2005). *Geotechnical Monitoring in Egnatia Odos S.A. Projects*. Athens: National Technical University of Athens.
- Katsiri, E., & Vassiliadis, C. (2021). *BIM integration in complex infrastructure projects: The Metro of Thessaloniki*. *Journal of Construction Innovation*, 21(4), 612–626.

- Papadopoulos, B., Anagnostou, G., & Giannopoulos, G. (2014). *Jet Grouting Techniques in Urban Excavation*. In Proceedings of the HSSMGE Conference.
- Stamatopoulos, A., Kavvadas, M., & Papatheodorou, G. (2004). *Slope stability assessment in the Egnatia Odos motorway*. Bulletin of the Geological Society of Greece, 36, 134–142.
- Tsatsanifos, G., & Mavrouli, O. (2015). *Evaluation of deep soil mixing techniques in landslide mitigation: The Tripoli–Kalamata highway*. In Proceedings of the 16th ECSMGE.
- Tzamos, A., Papadopoulos, B., & Mikelatos, N. (2020). *Real-time monitoring of tunneling works in urban environments: Case study from Thessaloniki Metro*. Tunnelling and Underground Space Technology, 95, 103–112.
- Xanthopoulou, M., Psimoulis, P., & Delis, A. (2013). *Deep Soil Mixing Implementation in the Tripoli–Kalamata Project*. Journal of Geotechnical Engineering, 28(2), 87–94.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2013). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- Giannakou, A., Alexakis, E., & Antoniadis, K. (2021). Smart materials in geotechnical engineering: A review. *Construction and Building Materials*, 286, 122990. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122990>
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Topolnicki, M. (2012). Jet Grouting Technology – An Overview. In *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control* (pp. 373–384).
- Zhang, L., Wang, X., & Li, D. (2020). Digital twins in civil infrastructure: Applications, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 116, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103222>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. John Wiley & Sons.
- Potts, D. M., & Zdravković, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application*. Thomas Telford.

- Zhang, J., Wu, Y., & Xie, J. (2018). Application of Building Information Modeling in Geotechnical Engineering. *Procedia Engineering*, 189, 465–471.
- Zhou, C., Wang, Y., & Wang, J. (2020). Application of GIS in Geotechnical Engineering: Progress and Challenges. *Journal of Geotechnical Engineering*, 146(2), 04019122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002201](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002201)
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. John Wiley & Sons.
- Potts, D. M., & Zdravković, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application*. Thomas Telford.
- Zhang, J., Wu, Y., & Xie, J. (2018). Application of Building Information Modeling in Geotechnical Engineering. *Procedia Engineering*, 189, 465–471.
- Zhou, C., Wang, Y., & Wang, J. (2020). Application of GIS in Geotechnical Engineering: Progress and Challenges. *Journal of Geotechnical Engineering*, 146(2), 04019122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002201](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002201)
- Kaya, S., & Yilmaz, M. (2022). Artificial Intelligence-Based Monitoring in Geotechnical Engineering: A Review. *Geotechnical Frontiers*, 123(2), 457–472.
- Zonta, D., Glisic, B., & Inaudi, D. (2020). Wireless Sensor Networks for Smart Infrastructure Monitoring. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 574–586.
- Zhang, Y., Chen, Z., & Wang, X. (2021). IoT-based Real-Time Monitoring System for Landslide Early Warning. *Sensors*, 21(1), 195.
- Erol, A., & Gokceoglu, C. (2023). Real-time Slope Stability Assessment Using Machine Learning Techniques. *Engineering Geology*, 325, 106982.
- DeJong, J. T., et al. (2019). Robotic Geotechnical Site Characterization: New Opportunities. *Geotechnical Engineering Journal*, 55(3), 217–229.
- Feng, M. Q., Kim, S., & Lee, H. (2022). Smart Sensing and Robotic Systems for Geotechnical Engineering Applications. *Automation in Construction*, 136, 104173.

- Jiang, M., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). UAV-Based 3D Monitoring of Landslides in Mountainous Regions. *Engineering Geology*, 268, 105522.
- Kavvadas, M., & Anagnostou, G. (2021). Automation and Digital Transformation in Geotechnical Engineering. *Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, 45–62.
- Kim, H., Park, J., & Ryu, D. (2022). Integration of Robotic Total Stations with BIM for Real-Time Monitoring. *Automation in Construction*, 136, 103973.

