



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΕΥΘΥΜΙΑΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΛΑΜΑΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΔΡ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΛΑΡΙΣΑ 2024

α

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη Ευστάθεια Κλίσης.....	5
1.1 Γενική Εισαγωγή στη Σταθερότητα Κλίσης.....	5
1.2 Τύποι πρανών.....	6
Κεφάλαιο 2: Ψευδοστατική μέθοδος.....	9
2.1 Εισαγωγή στην Ψευδοστατική Προσέγγιση για Ανάλυση Ευστάθειας.....	9
2.2 Θεωρητικά θεμέλια: Μοντελοποίηση κλίσεων υπό σεισμό με χρήση σταθερής οριζόντιας επιτάχυνσης.....	9
2.3 Απλοποιήσεις και περιορισμοί της μεθόδου.....	11
2.4 Εφαρμογή σε έργα υποδομής σε σεισμικά ενεργές περιοχές.....	12
Κεφάλαιο 3: Μέθοδος Newmark.....	14
3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Newmark Sliding Block.....	14
3.2 Επεξήγηση μιας από τις σημαντικότερες μεθόδους ανάλυσης σεισμών: Μέθοδος ολίσθησης Newmark.....	14
Μαθηματική Διατύπωση:.....	16
3.3 Στην αξιολόγηση μόνιμων μετατοπίσεων πρανών κατά τους σεισμούς.....	16
1. Ασφάλεια και σχεδιασμός υποδομής:.....	16
2. Εκτίμηση κινδύνου και μετριάσμός:.....	16
3. Μετασεισμική απόκριση:.....	17
3.4 Αλληλεπίδραση με την Ψευδοστατική Προσέγγιση.....	17
1. Εστίαση σε διαφορετικές πτυχές:.....	17
2. Ανάλυση με βάση την ανάλυση έναντι της μετατόπισης:.....	18
3. Βελτιωμένη αξιοπιστία:.....	18
3.5 Εφαρμογές σε πραγματικά έργα.....	18
1. Φράγμα Belo Monte, Βραζιλία:.....	19
2. Πυρηνικός Σταθμός Παραγωγής San Onofre, ΗΠΑ: Πυρηνικός Σταθμός Παραγωγής San Onofre, ΗΠΑ:.....	19
3. Μετά τον σεισμό του Κόμπε, Ιαπωνία.....	19
4. Κατολισθήσεις που προκαλούνται από τσουνάμι στην Ινδονησία:.....	19
5. Slope Stability in Urban Infrastructure Projects:Slope Stability in Urban Infrastructure Projects:.....	20
3.6 Μία από τις μεθόδους Newmark είναι η μέθοδος του φάσματος σχεδιασμού, η οποία παρακάτω δείχνει τα έξι πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της:.....	20

Φόντα:.....	20
Περιορισμοί:.....	21
3. 7 Όψεις Βελτίωσης και Θεωρητικής Ανάπτυξης.....	22
1. Μοντέλα δυναμικών πεπερασμένων στοιχείων:.....	22
2. Πιθανολογικές προσεγγίσεις:.....	22
3. Ενσωμάτωση παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο:.....	22
4. Προηγμένη μοντελοποίηση υλικού:.....	23
3.8 Συμπέρασμα.....	23
Κεφάλαιο 4: Αριθμητική προσομοίωση στην ανάλυση ευστάθειας κλίσης.....	24
4.1 Εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους στην ανάλυση ευστάθειας κλίσης...24	
4.2 Τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά στην αριθμητική μοντελοποίηση.24	
4.2.1 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτή που συχνά συντομεύεται ως FEM..24	
4.2.2 Μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM).....	25
4.3 Πλεονεκτήματα της μαθηματικής μοντελοποίησης για περίπλοκες μορφές κλίσεων και το γέμισμα τους.....	26
4.3.1 Χειρισμός σύνθετων γεωμετριών.....	26
4.3.2 Μοντελοποίηση Ετερογενών Υλικών.....	26
4.3.3 Συμπεριφορά εξαρτώμενη από τον χρόνο και δυναμικό φορτίο.....	26
4.4 Ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης και εφαρμογή με βάση τέσσερα μεγάλα έργα.....	27
4.4.1 1 Μελέτη Περίπτωσης 1: Φράγμα Three Gorges, Κίνα.....	27
4.4.2 Μελέτη περίπτωσης 2: Vajont Dam, Ιταλία.....	28
4.4.3 Μελέτη περίπτωσης 3: Σταθερότητα κλίσης αυτοκινητόδρομου στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α.....	28
4.4.4 Οργάνωση της Μελέτης Περίπτωσης 4: Σταθερότητα Κλίσης Ορυχείου ανοιχτού λάκκου στην Αυστραλία.....	28
Μέρος 2: Παραδείγματα και εφαρμογές.....	30
Κεφάλαιο 5: Πετρινά φράγματα.....	30
5.1 Παράδειγμα 1 - Πετρινό Φράγμα 1.....	30
5.1.1 Περιγραφή του Έργου Φράγματος.....	30
5.1.2 Γεωτεχνικές όψεις και ανάλυση ευστάθειας πρανών στις κατασκευές.....	30
5.1.3 Φωτογραφίες και σχέδια.....	32
5.1.4 Συμπέρασμα.....	34
Ενότητα 5.2: Παράδειγμα 2 - Φράγμα από πέτρες 2.....	35
5.2.1 Περιγραφή του Έργου Φράγματος.....	35
5.2.2 Εδαφικές Συνθήκες και Γεωτεχνικές Προκλήσεις.....	35
5.2.3 Τεχνικές Κατασκευής και Δείκτες Ευστάθειας.....	36
5.2.4 Φωτογραφίες και σχέδια.....	37
Κεφάλαιο 6: Κάθετα στηρίγματα.....	40
6.1 Παράδειγμα κάθετης υποστήριξης: Το έργο Κεντρικής Αρτηρίας/Σήραγγας (The Big Dig) στη Βοστώνη.....	40
6.1.1 Περιγραφή έργου.....	40
6.1.2 Γεωτεχνική Ανάλυση.....	41
6.1.3.1 Τοίχοι πολτού.....	43

6.1.4 Φωτογραφίες και σχέδια.....	45
6.1.5 Συμπέρασμα.....	47
Κεφάλαιο 7: Κεκλιμένα στηρίγματα (τοίχοι αντιστήριξης).....	48
7.1 Παράδειγμα κεκλιμένης υποστήριξης σε λιμενική υποδομή: Έργο επέκτασης του λιμένα του Ρότερνταμ.....	48
7.1.1 Περιγραφή της κεκλιμένης στήριξης (τοίχος αντιστήριξης).....	48
7.1.2 Γεωτεχνικές Προκλήσεις και Ανάλυση Ευστάθειας Κλίσης κατά την Κατασκευή.....	49
7.1.3 Τεχνικές Κατασκευής και Μέτρα Ευστάθειας.....	51
7.1.4 Φωτογραφίες και σχέδια.....	52
7.1.5 Συμπέρασμα.....	54
Κεφάλαιο 8: Έργο Προστασίας Περιβάλλοντος.....	54
8.1 Έργο χωματερής: Η χωματερή Mariannhill, Νότια Αφρική.....	54
8.1.1 Περιγραφή του έργου ΧΥΤΑ.....	54
8.1.2 Εστίαση στην περιβαλλοντική γεωτεχνική και τη σταθερότητα των πρανών για την πρόληψη της μόλυνσης.....	55
8.1.3 Φωτογραφίες και σχέδια.....	58
8.1.4 Συμπέρασμα.....	60
Σύναψη.....	60
8.2 Σύνοψη Θεωρητικών Ενοράσεων και Πρακτικών Εφαρμογών.....	60
8.4 Οδηγίες σχετικά με το μέλλον της σταθερότητας των πρανών και της περιβαλλοντικής γεωτεχνικής.....	64
Παραπομπές:.....	66

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή τον κ.Αλαμανή Νικόλαο για την στήριξή του σε κάθε επίπεδο της διπλωματικής εργασίας αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε. Η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, οι συμβουλές του και η καθοδήγηση του συντέλεσαν στον υπέρτατο βαθμό στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα επιπροσθέτως να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές για τις γνώσεις που μας μετέδωσαν όλο αυτό το διάστημα και την πλήρη στήριξή τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την μέλλουσα σύζυγο μου για την υπομονή τους και την ηθική τους στήριξη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάλυση και εφαρμογή της γεωτεχνικής μηχανικής, με έμφαση τόσο στις θεωρητικές προσεγγίσεις όσο και στις πρακτικές εφαρμογές της. Η γεωτεχνική μηχανική αποτελεί έναν από τους βασικότερους κλάδους της πολιτικής μηχανικής, καθώς μελετά τη συμπεριφορά των εδαφών και των βραχωδών σχηματισμών και την αλληλεπίδρασή τους με τις τεχνικές κατασκευές. Στο θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας, θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της ψευδοστατικής μεθόδου και της μεθόδου Newmark, δύο από τις πιο σημαντικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ευστάθειας γεωτεχνικών έργων, ειδικότερα σε σεισμικές συνθήκες. Η παρούσα εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της γεωτεχνικής μηχανικής με μεγαλύτερη έμφαση στις θεωρίες,

τις τεχνικές και τις εφαρμογές της αξιολόγησης ευστάθειας πρανών. Αυτά περιλαμβάνουν τις βασικές αρχές της γεωτεχνικής μηχανικής, τα κοκκώδη υλικά και τις μεθόδους προσομοίωσης. Για τη σεισμική ανάλυση των πρανών, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες αναλύσεις, συγκεκριμένα η Ψευδοστατική Μέθοδος και η Μέθοδος Συρόμενου Μπλοκ Newmark για καλύτερη κατανόηση του θέματος. Επιπλέον, η παρούσα εργασία συζητά τις μεθόδους αριθμητικής προσομοίωσης όπως, FEM και DEM και έχει επικεντρωθεί στο γεγονός ότι αυτές οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές για την επίλυση προβλημάτων ευστάθειας των πρανών. Η ανάλυση ενσωματώνει τόσο θεωρητικές όσο και πραγματικές πτυχές και παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις τρέχουσες τάσεις στη θεωρία και την πρακτική της γεωτεχνικής μηχανικής.

ABSTRACT

. The present thesis focuses on the analysis and application of geotechnical engineering, with an emphasis on both theoretical approaches and practical applications. Geotechnical engineering is one of the fundamental branches of civil engineering, as it studies the behavior of soils and rock formations and their interaction with engineering structures. In the theoretical framework of the thesis, a detailed presentation of the pseudostatic method and the Newmark method will be provided, two of the most important methodologies used for the analysis of the stability of geotechnical structures, especially under seismic conditions.

This thesis provides a comprehensive overview of geotechnical engineering, with a greater emphasis on the theories, techniques, and applications of slope stability assessment. These include the basic principles of geotechnical engineering, granular materials, and simulation methods. For the seismic analysis of slopes, various analyses have been employed, specifically the Pseudostatic Method and the Newmark Sliding Block Method, to gain a better understanding of the subject.

Furthermore, this thesis discusses numerical simulation methods, such as FEM (Finite Element Method) and DEM (Discrete Element Method), and focuses on the fact that these methods are effective in solving slope stability problems. The analysis integrates both theoretical and practical aspects and provides useful insights into the current trends in geotechnical engineering theory and practice.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη Ευστάθεια Κλίσης

1.1 Γενική Εισαγωγή στη Σταθερότητα Κλίσης

Η σταθερότητα της κλίσης μπορεί στη συνέχεια να οριστεί ως η ικανότητα των πλαγιών να στέκονται σταθερές στο έδαφος, στους βράχους ή σε οποιοδήποτε άλλο υλικό που προέρχεται από τη δύναμη της βαρύτητας. Είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα στη γεωτεχνική μηχανική, όπου ενδιαφέρον είναι να αποτραπούν οι πλαγιές, φυσικές ή ανθρωπογενείς, από το να γίνουν ασταθείς και να αποφευχθούν έκτακτες αστοχίες όπως οι

κατολισθήσεις. Η μετακίνηση κατολισθήσεων είναι ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους και συχνά οδηγεί σε καταστροφή κατασκευών, ανθρώπινη σφαγή και απώλεια περιουσίας. Στην ταξινόμηση του Bromhead (1992), ο κύριος λόγος εμφάνισης αστοχίας κλίσης είναι όταν οι κινητήριες δυνάμεις όπως η δύναμη της βαρύτητας υπερνικά τις δυνάμεις αντίστασης που περιλαμβάνουν: αντοχή τριβής και συνοχής του υλικού κλίσης.

Επειδή είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών, διάφορα κατασκευαστικά έργα όπως αυτοκινητόδρομοι, τοίχοι αντιστήριξης και επιχώσεις καθώς και φράγματα απαιτούν τους υπολογισμούς. Διάφοροι παράγοντες καθορίζουν τη σταθερότητα της κλίσης, για παράδειγμα, τη γεωμετρία της κλίσης, τις ιδιότητες των εδαφών, την περιεκτικότητα σε νερό και τις εξωτερικές επιδράσεις όπως οι σεισμοί και επομένως για να σχεδιαστούν ασφαλείς πλαγιές με σταθερή σταθερότητα πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές (Duncan & Wright, 2005). Η ανάλυση ευστάθειας πλαγιάς μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση πιθανών μηχανισμών αστοχίας και να προτείνει μέτρα που θα βελτιώσουν τη σταθερότητα της κλίσης, όπως η ενίσχυση της πλαγιάς ή ο έλεγχος της αποστράγγισης του νερού μέσω της πλαγιάς (Abramson et al., 2001).

1.2 Τύποι πρανών

Μερικά από τα πιο σημαντικά υποθέματα που μπορεί κανείς να λάβει υπόψη κατά τη σύγκριση

Φυσικά και τεχνητά πράγματα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

Οι πλαγιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο βασικούς τύπους: δηλ. απότομες φυσικές πλαγιές και απότομες πλαγιές που δημιουργούνται για το σκοπό αυτό.

- Φυσικές πλαγιές: Δημιουργούνται από δυνάμεις κατασκευής όπως η διάβρωση, η καθίζηση και οι τεκτονικές δυνάμεις ή κίνηση. Στις φυσικές κλίσεις δίνεται κανονικά ένα σταθερό προφίλ όπου οι δυνάμεις που δρουν σε αντίθεση με τη δύναμη της βαρύτητας ισοδυναμούν με τις δυνάμεις που τραβούν την κλίση προς τα κάτω. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως οι έντονες

βροχοπτώσεις ή ένας σεισμός επηρεάζουν την ισορροπία αυτών των πρανών και ως εκ τούτου καταλήγουν σε κατολισθήσεις (Brunsden & Prior, 1984). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πλαγιές που είναι φυσικές έχουν διαφορετική σταθερότητα και αυτό μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες όπως: τύπος εδάφους, βλάστηση και νερό. Για παράδειγμα, το νερό έντονων βροχοπτώσεων οδηγεί σε αλλαγή της σύστασης του στρώματος ειδικά του στρώματος του υπεδάφους όπου η αντοχή στη διάτμηση μειώνεται και οι κλίσεις γίνονται πιο ευαίσθητες σε αστοχία (Hung et al., 2014).

- Τεχνητές πλαγιές: Οι ανθρωπογενείς πλαγιές κατασκευάζονται από ανθρώπινα όντα για παράδειγμα κατά την ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης περιοχής. Αυτά είναι? Παράπλευρα επιχώματα, κομμένα πρανή και γέμισμα πρανών. Οι τεχνητές πλαγιές είναι συγκριτικά πιο εύαλωτες και αυτό υπαγορεύεται πλήρως από το σχεδιασμό και την κατασκευή των πρανών. Αυτά τα χαρακτηριστικά κλίσης περιλαμβάνουν την απότομη κλίση της πλαγιάς, το υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή και τη συμπύκνωση που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της πλαγιάς (Craig, 2013). Οι Terzaghi et al., 1996 έχουν επισημάνει ότι οι τεχνητές πλαγιές είναι ευαίσθητες σε δυναμικά φορτία και επομένως οι κακοσχεδιασμένες πλαγιές θα τείνουν να αστοχούν ειδικά υπό συνθήκες σεισμού.

1. Η σταθερότητα της κλίσης στην κατασκευή εξαρτάται από τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες και συγκεκριμένα.

Τα ακόλουθα είναι καθοριστικοί παράγοντες για τη σταθερότητα των πρανών. φυσικό ή τεχνητό. Η γνώση αυτών των πτυχών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ευστάθειας της πλαγιάς μαζί με την εφαρμογή της στην έγκαιρη αναγνώριση πιθανής αστοχίας πλαγιάς και τα επακόλουθα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την αντιμετώπισή της.

1. Ιδιότητες του εδάφους: Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη σταθερότητα της κλίσης, μεταξύ των οποίων οι αντοχές και η φύση του εδάφους ή του εδάφους. Τέτοιες ιδιότητες των εδαφών που επηρεάζουν τη σταθερότητα περιλαμβάνουν: συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και διαπερατότητα. Για παράδειγμα, τα εδάφη που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο έχουν συχνά χαμηλή αντοχή στη διάτμηση ή με απλά λόγια έχουν χαμηλότερη αντοχή σε αστοχία σε υγρό περιβάλλον (Lambe & Whitman, 1979).

2. Περιεκτικότητα σε νερό: Μια ποσότητα νερού έχει άμεσο αντίκτυπο στη σταθερότητα της κλίσης μέσω των ακόλουθων τρόπων που περιλαμβάνουν: Όταν το νερό εισέρχεται στην πλαγιά το βάρος του εδάφους αυξάνεται και επιπλέον το νερό μειώνει την αλληλομανδάλωσή τους μεταξύ των σωματιδίων και επομένως μειώνεται η αντοχή στη διάτμηση. Εάν υπάρχει νερό σε μια πλαγιά, θα προκαλέσει πίεση στους πόρους, αυτό οδηγεί σε μείωση της αποτελεσματικής τάσης στο έδαφος που οδηγεί σε αστάθεια της πλαγιάς (Terzaghi et al., 1996). Η βύθιση του βρόχινου νερού ή η διείσδυση νερού σε τοποθεσίες που δεν αποστραγγίζονται επαρκώς ή σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις είναι πιθανό να προκαλέσουν γρήγορες αστοχίες στις πλαγιές.
3. Σεισμική Δραστηριότητα: Δυναμικές δυνάμεις μπορούν επίσης να συμβούν από σεισμό όπου η κλίση κλονίζεται και το ακριβές φορτίο που ασκείται στην πλαγιά υπερνικά τις δυνάμεις αντίστασης της πλαγιάς. Η ψευδοστατική ανάλυση εφαρμόζεται ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό της ευστάθειας των πλαγιών που υπόκεινται σε δυνάμεις σεισμού όπου οι δυνάμεις προσεγγίζονται με σταθερή οριζόντια δύναμη Seed 1979. Οι κινήσεις του εδάφους είναι πολύ επιζήμιες όσον αφορά την αστοχία πρανών κάθε φορά που υπάρχει σεισμός σε περιοχές με αμμώδες έδαφος ή απότομες πλαγιές.
4. Γεωμετρία κλίσης: Είναι επίσης σημαντικό να βεβαιωθείτε ότι η γωνία και το ύψος μιας κλίσης καθορίζουν επίσης τη σταθερότητά της. Γενικά όσο πιο απότομη είναι η κλίση τόσο λιγότερο σταθερή θα είναι λόγω των αυξημένων δυνάμεων βαρύτητας στο περιεχόμενο. Με αυτόν τον τρόπο, οι τεχνητές πλαγιές που δημιουργούνται από μηχανικούς πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε καμία γωνία κλίσης να μην υπερβαίνει τη γωνία ανάπαυσης του δεδομένου υλικού (Baker, 1981).
5. Βλάστηση: Η βλάστηση βελτιώνει τη σταθερότητα των πλαγιών παρέχοντας ενίσχυση στο έδαφος από τα ριζικά τους συστήματα καθώς και ελαχιστοποιώντας ή μειώνοντας τον ρυθμό διείσδυσης του νερού στο έδαφος. Σημείωσαν ωστόσο ότι όταν αυτές οι επιφάνειες αφήνονται γυμνές με την αφαίρεση της βλάστησης, όπως σε περιπτώσεις αποψίλωσης δασών ή κατασκευαστικών έργων, τότε είναι πιθανό να οδηγήσουν σε αύξηση της διάβρωσης που οδηγεί σε περισσότερες αστάθειες του εδάφους (Gray & Leiser, 1982).

Κεφάλαιο 2: Ψευδοστατική μέθοδος

2.1 Εισαγωγή στην Ψευδοστατική Προσέγγιση για Ανάλυση Ευστάθειας

Φόρτωση σεισμού

Η ψευδοστατική μέθοδος είναι μια από τις πιο κοινές προσεγγίσεις για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών που υπόκεινται στις σεισμικές επιδράσεις. Αυτή είναι μια κεντρική προσέγγιση που ποσοτικοποιεί τις δυναμικές επιπτώσεις των σεισμών στις στατικές δυνάμεις για να δικαιολογήσει την εφαρμογή της οριακής ισορροπίας για την αξιολόγηση των κινδύνων αστοχίας. Εδώ οι σεισμικές δυνάμεις θεωρούνται ως στατικές οριζόντιες και δυνητικά, αν και λιγότερο συχνά, κατακόρυφες επιταχύνσεις στη μάζα της πλαγιάς (Jibson, 2011). Αυτές οι επιταχύνσεις είναι συνήθως με τη μορφή ενός κλάσματος της βαρυτικής επιτάχυνσης που ονομάζεται σεισμικός συντελεστής και προορίζονται για την κάλυψη των αδρανειακών δυνάμεων που προκύπτουν από τη σεισμική διαταραχή. σταθερότητα πρανών κατά τη διάρκεια του σεισμού— σε περιοχές όπου οι κατολισθήσεις αποτελούν σημαντική απειλή. Η ψευδοστατική προσέγγιση εφαρμόζεται στα περισσότερα έργα υποδομής όπως επιχώσεις δρόμων, τοίχοι αντιστήριξης και φράγματα όπου πρέπει να αναλυθούν λεπτομερώς οι πιθανότητες αστοχίας των πρανών λόγω σεισμικής επίδρασης (Huang et al., 2014).

2.2 Θεωρητικά θεμέλια: Μοντελοποίηση κλίσεων υπό σεισμό με χρήση σταθερής οριζόντιας επιτάχυνσης

Στην ψευδοστατική μέθοδο, πρωταρχικός στόχος είναι η εξέταση των επιπτώσεων της προκαλούμενης από σεισμό αδρανειακής δύναμης στις εκτιμήσεις ευστάθειας των πρανών. Οι σεισμικές δυνάμεις που δρουν σε μια κλίση απλοποιούνται με την εφαρμογή μιας ισοδύναμης στατικής δύναμης, που εκφράζεται ως:

$$F_s = khW$$

Όπου:

- Το FS αναφέρεται στη σεισμική δύναμη >reop είναι η ισχύς που λαμβάνεται στη συχνότητα σχεδιασμού όταν η σεισμική δύναμη κλιμακώνεται στο επίπεδο της δύναμης σχεδιασμού.
- : kh είναι ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής.
- W είναι το βάρος του υλικού κλίσης W είναι το βάρος του υλικού κλίσης.

Ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής 'kh' υπολογίζεται συνήθως από το PGA ενός επιδιωκόμενου σεισμού που είναι το μέτρο της έντασης της δόνησης στην τοποθεσία. Συνήθως, οι τιμές της παραμέτρου kh μπορούν να ποικίλουν από 0. 05 έως 0. 3. η τιμή του οποίου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το επίπεδο σεισμικότητας της υπό εξέταση περιοχής και το βαθμό συντηρητικότητας του έργου (Rathje & Bray, 2013). Σε ορισμένες συγκεκριμένες καταστάσεις, υπάρχει κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής kv που χρησιμοποιείται για να υποδείξει κάθετες επιταχύνσεις, αλλά, γενικά, δεν είναι σημαντικοί ως οριζόντιες και μπορεί να παραλειφθεί σε ορισμένες περιπτώσεις.

Η εξέταση των σεισμικών δυνάμεων ως στατικής φύσης επιτρέπει στον μηχανικό να εφαρμόσει συμβατική προσέγγιση ευστάθειας κλίσης όπως η μέθοδος οριακής ισορροπίας (LEM) για να προσδιορίσει έναν παράγοντα ασφάλειας (FS). Ο συντελεστής ασφάλειας εκφράζεται ως ο λόγος της δύναμης αντίστασης προς την κινητήρια δύναμη που μπορεί να έχει συνιστώσες δύναμης και ή μη. την επιφάνεια πιθανής αστοχίας. Για ανάλυση ψευδοστατικής ευστάθειας κλίσης, ο συντελεστής ασφάλειας εκφράζεται ως: Για ανάλυση ψευδοστατικής ευστάθειας κλίσης, ο συντελεστής ασφάλειας εκφράζεται ως:

$FS = \text{κινητήρια δύναμη} / \text{δύναμη αντίστασης}$

Σε αυτή την προσέγγιση, οι κινητήριες δυνάμεις των σεισμικών δυνάμεων είναι πρόσθετες και ισχύει χαμηλότερη ασφάλεια συντελεστών σε σύγκριση με τις στατικές συνθήκες (Ghasemi et al., 2017). Κανονικά, όταν χρησιμοποιείται ως αναλογία ένας συντελεστής ασφάλειας μεγαλύτερος από 1 είναι αποδεκτός. Το 0 σημαίνει ότι η κλίση είναι σταθερή και οι τιμές μικρότερες από 1 αντιπροσωπεύουν το ποσοστό που είναι αποδεκτό σε μια δεδομένη κλίση. 0 βαθμός προς την πιθανότητα αποτυχίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ψευδοστατική μέθοδος είναι λιγότερο ευέλικτη σε σύγκριση με την ανάλυση χρονικού ιστορικού, οι μηχανικοί συνήθως αναζητούν υψηλότερη τιμή συντελεστή ασφάλειας, για παράδειγμα, 1. 1 ή 1. 2 Κυρίως στοχεύει στο να επιτρέψει τη διακύμανση ιδιαίτερα του σεισμικού συντελεστή και άλλους παράγοντες χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς (Zhang et al., 2016).

2.3 Απλοποιήσεις και περιορισμοί της μεθόδου

Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστούν αρκετές απλουστεύσεις και εγγενείς περιορισμοί της ψευδοστατικής μεθόδου, παρόλο που χρησιμοποιείται ευρέως. Μια άλλη από τις κύριες παραδοχές της μεθόδου είναι ότι η σεισμική δύναμη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως σταθερές δυνάμεις ενώ σε σενάρια πραγματικής ζωής οι δυνάμεις μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με το χρόνο (Mavrouli & Corominas, 2017). Αυτό παραμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τα εξαρτώμενα από τον πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικά του σεισμού, τα οποία μπορεί να συνεπάγονται ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας, κυμαινόμενες επιταχύνσεις και μεταβατικά φορτία στις κατασκευές.

Μια άλλη επιπλοκή της ψευδοστατικής μεθόδου είναι η αδυναμία συμπερίληψης παραμορφώσεων που μπορεί να εμφανιστούν κατά την ανακίνηση και η κλίση θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως άκαμπτο μπλοκ. Στην πραγματικότητα, οι δονήσεις του εδάφους συχνά έχουν ως αποτέλεσμα τόσο τις ελαστικές όσο και τις πλαστικές παραμορφώσεις του νεοσχηματισμένου υλικού πλαγιάς, οι οποίες σταδιακά φθείρονται και, σε κάποιο σημείο, αποτυγχάνουν (Zhu et al., 2018). Αυτές οι παραμορφώσεις δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της ψευδοστατικής προσέγγισης και γι' αυτό το πραγματικό δυναμικό αστοχίας μπορεί να υποτιμηθεί σημαντικά, ειδικά για κλίσεις που αποτελούνται από αδύναμα ή εξαιρετικά παραμορφώσιμα υλικά.

Μια άλλη σημαντική απόφαση που πρέπει να ληφθεί στην ψευδοστατική μέθοδο είναι η επιλογή του σεισμικού συντελεστή k_h . Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής προέρχεται συνήθως από τους χάρτες περιφερειακών σεισμικών κινδύνων ή εμπειρικά δεδομένα και είναι, από τη φύση του, αυθαίρετος χωρίς σαφείς τιμές που αντιπροσωπεύουν τις συγκεκριμένες συνθήκες και κάθε σεισμό (Jibson, 2011). Επομένως, ο ορισμός του k_h μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ανάλυση αστοχίας της κλίσης και τόσο η υπερβολική χρήση μιας πιο συντηρητικής τιμής του k_h όσο και εκείνης μιας πολύ χαμηλής μη συντηρητικής τιμής θα προκαλέσει την απαραίτητη εσφαλμένη εκτίμηση της ευστάθειας της κλίσης.

Επιπλέον, η ψευδοστατική μέθοδος προϋποθέτει ότι η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας δεν αλλάζει κατά τη σεισμική φόρτιση ακόμα κι αν ο σεισμός ενθαρρύνει το σχηματισμό νέων

επιφανειών ολίσθησης ή την επανενεργοποίηση υπαρχουσών. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα στην εκτίμηση του μηχανισμού πραγματικής αστοχίας, ειδικά σε πολύπλοκες συνθήκες υπεδάφους όπου είναι διαθέσιμες αρκετές πιθανές ζώνες αστοχίας (Lai et al., 2015).

2.4 Εφαρμογή σε έργα υποδομής σε σεισμικά ενεργές περιοχές

Η ψευδοστατική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο σχεδιασμό και την ανάλυση έργων υποδομής σε σεισμικές περιοχές. Ένα παράδειγμα χρήσης του είναι στον τομέα των χωματουργικών φραγμάτων όπου ο προσδιορισμός της ευστάθειας των πρανών υπό σεισμικές συνθήκες είναι υψίστης σημασίας. Για παράδειγμα, η ψευδοστατική μέθοδος εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό του φράγματος Bureya στη Ρωσία, όπου επιλέχθηκαν σεισμικοί συντελεστές ανάλογα με τον σεισμικό κίνδυνο για την περιοχή και που θα επέτρεπαν στο φράγμα να μην καταρρεύσει σε περίπτωση σεισμών (Pinyol & Alonso, 2013).

Ομοίως, η ψευδοστατική μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως στην ανάλυση των επιχώσεων και των τοίχων αντιστήριξης σε περιοχές επιρρεπείς σε σεισμούς. Με αυτόν τον τρόπο οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τη διαδικασία για να αποφασίσουν εάν απαιτούνται περαιτέρω μέτρα σταθεροποίησης, όπως ενίσχυση με γεωσυνθετικά ή οικοδομικές βερμούδες από την κατασκευή προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία κατά τη διάρκεια σεισμών (Kramer, 2013). Η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, όπου μπορεί κανείς να κάνει μια χονδρική εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών που δεν απαιτεί τη διενέργεια λεπτομερούς δυναμικής ανάλυσης.

Σε έργα οδοποιίας, ιδιαίτερα σε περιοχές που εκτείνονται μέσα από τα βουνά, η ψευδοστατική αξιολογεί τη σταθερότητα τέτοιων τομών πρανών σε συνθήκες σεισμικότητας. Για παράδειγμα, κατά την κατασκευή της ορεινής σήραγγας Bolu, Τουρκία, έχει χρησιμοποιηθεί η ψευδοστατική μέθοδος στο σχεδιασμό πρανών για την πύλη της σήραγγας, έτσι ώστε τέτοιες πλαγιές να μην μπορούν να αστοχήσουν σε περίπτωση σεισμού (Erguler & Ulusay, 2017). Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος προσέφερε ένα πρακτικό και φθινό μέσο για τον προσδιορισμό της ανάγκης για ενίσχυση πρανών σε μια σεισμικά ενεργή περιοχή.

Ωστόσο, δεδομένου ότι βασίζεται σε ορισμένους περιορισμούς, η ψευδοστατική μέθοδος παραμένει ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών στα

αρχικά στάδια ανάπτυξης της υποδομής. Είναι λιγότερο περίπλοκο και λιγότερο ακριβές από άλλες διατάξεις, αλλά αντιπροσωπεύει μια πιο συντηρητική μέθοδο αντιμετώπισης των σεισμικών δυνάμεων. όπου η λεπτομερής δυναμική ανάλυση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εύλογα λόγω περιορισμών χρόνου και πόρων (Lai et al., 2015). Ωστόσο, για τις τοποθεσίες όπου πρέπει να ληφθούν υπόψη κλίσεις υψηλού κινδύνου ή σημαντικές κατασκευές, μπορούν να εφαρμοστούν πιο λεπτομερείς προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου Newmark ή, ιδιαίτερα, της αριθμητικής μοντελοποίησης, παράλληλα με την ψευδοστατική ανάλυση (Kramer, 2013).

Κεφάλαιο 3: Μέθοδος Newmark

3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Newmark Sliding Block

Η μέθοδος Newmark Sliding Block Method είναι μια από τις πιο γνωστές και αξιόπιστες προσεγγίσεις για την ανάλυση των μόνιμων κινήσεων των πρανών και άλλων εδαφικών σωμάτων κατά τη διάρκεια του σεισμού. Καθιερωμένη από τον Nathan M. Newmark στους είκοσι τριτογενείς, αυτή η προσέγγιση προσφέρει έναν ακριβή τρόπο εκτίμησης των μέγιστων μετατοπίσεων κατολισθήσεων που προκαλούνται από τις κινήσεις του εδάφους που προκαλούνται από σεισμό. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπως η ψευδοστατική προσέγγιση που βασίζεται κυρίως στον παράγοντα ασφάλειας έναντι αστοχίας κλίσης, η μέθοδος Newmark στοχεύει στην αναμενόμενη μετατόπιση καθιστώντας την ένα συμπλήρωμα για τη συνολική ανάλυση της ευστάθειας των πρανών.

3.2 Επεξήγηση μιας από τις σημαντικότερες μεθόδους ανάλυσης σεισμών: Μέθοδος ολίσθησης Newmark

Η μέθοδος Newmark Sliding Block Method ασχολείται με το τμήμα κλίσης ως ένα άκαμπτο μπλοκ τοποθετημένο σε μια κεκλιμένη βάση τριβής. Στον σεισμό η κίνηση του εδάφους δημιουργεί αδρανειακές δυνάμεις που από μόνες τους δημιουργούν μια δύναμη που κάνει τα πράγματα να γλιστρούν. Η μέθοδος ποσοτικοποιεί τη συνολική μετατόπιση του μπλοκ αθροίζοντας βήματα ταχύτητας κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος σεισμικού συμβάντος.

Βασικά βήματα στη μέθοδο Newmark: Βασικά βήματα στη μέθοδο Newmark:

1. Αναπαράσταση κλίσης:

- Η υπόθεση έβδομη απεικονίζει την κλίση ως ένα άκαμπτο μπλοκ που κάθετα στην επιφάνεια δυνητικής διάτμησης κανονικά κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας της πλαγιάς.
- Η φύση της ολισθαίνουσας επιφάνειας ορίζεται από τη γωνία κλίσης και τη γωνία τριβής μεταξύ του μπλοκ και της επιφάνειας στην οποία γλιστράει.

2. Σεισμική κίνηση εδάφους:

- Η σεισμική κίνηση του εδάφους αντιπροσωπεύεται από δύο κατευθυντικές τιμές, την οριζόντια ταχύτητα εδάφους (a_x) και την κατακόρυφη ταχύτητα εδάφους (a_z).
- Αυτές οι επιταχύνσεις στη συνέχεια μεταφράζονται σε όρους ισοδύναμων στατικών δυνάμεων από τη μάζα της κλίσης (M).

3. Εξισορρόπηση δύναμης και εκκίνηση ολίσθησης: Εξισορρόπηση δύναμης και εκκίνηση ολίσθησης:

- Το άλλο είναι η παράλληλη προς την κλίση της αδρανειακής δύναμης $F_x = M a_x$ και η αδρανειακή δύναμη περιστροφής $F_z = M a_z$ είναι κάθετη στην κλίση.
- Η έναρξη της ολίσθησης λαμβάνει χώρα όταν η δύναμη αίσθησης επιπλέον της συνιστώσας της δύναμης βαρύτητας έχει υπερβεί τη διατμητική αντίσταση που εκφράζεται ως $\tau = c + \sigma \tan \phi$ όπου c είναι η συνοχή, σ κανονική τάση και ϕ είναι η γωνία τριβής.

4. Υπολογισμός μετατόπισης:

- Μόλις ξεκινήσει η ολίσθηση, η ταχύτητα του μπλοκ (v) καθορίζεται από τη διαφορά μεταξύ επιταχύνσεων οδήγησης και αντίστασης: ο Μόλις ξεκινήσει η ολίσθηση, η ταχύτητα του μπλοκ (v) προσδιορίζεται από τη διαφορά μεταξύ επιταχύνσεων οδήγησης και αντίστασης:

$$v = M F_x - \tau = a_x M - M \tau$$

- Η αθροιστική μετατόπιση (D) προκύπτει με την ολοκλήρωση της ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου: ο Η αθροιστική μετατόπιση (D) προκύπτει με την ολοκλήρωση της ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου:

$$dD = \int v dt$$

- Στην πράξη, αυτή η ολοκλήρωση γίνεται πολυάριθμα με την ανάλυση των αρχείων σεισμικής επιτάχυνσης.

3. Αθροιστική μετατόπιση και μόνιμη παραμόρφωση: Αθροιστική μετατόπιση και μόνιμη παραμόρφωση:

- Η τελευταία μετατόπιση μπορεί να θεωρηθεί ως η νέα κατάσταση μόνιμης παραμόρφωσης μετά την εμφάνιση του σεισμού στην πλαγιά της περιοχής.
- Αυτή η τιμή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την πραγματοποίηση αξιολογήσεων κινδύνου σχετικά με τις ζημιές στις υποδομές και την πρόληψή τους.

Μαθηματική Διατύπωση:

Η μέθοδος που επιλέχθηκε, δηλαδή η μέθοδος Newmark, υποθέτει ότι η απόκριση δυναμικής κλίσης της κατασκευής είναι ως ένα άκαμπτο μπλοκ. Η κρίσιμη μετατόπιση D δίνεται από: Η κρίσιμη μετατόπιση D δίνεται από:

$$tD = \int_0^T (ax(t) - Mc + \sigma(t)\tan\phi) dt$$

Εκφράζεται με το T όπου το T σημαίνει την ώρα του σεισμού.

3.3 Στην αξιολόγηση μόνιμων μετατοπίσεων πρανών κατά τους σεισμούς

Η μέθοδος Newmark Sliding Block, επομένως, έχει τον κύριο στόχο της να προβλέψει τη μόνιμη μετατόπιση των πρανών υπό σεισμικά επαγόμενες δυνάμεις. Αυτή η εκτίμηση είναι καθοριστική για διάφορους λόγους: Αυτή η εκτίμηση είναι καθοριστική για διάφορους λόγους:

1. Ασφάλεια και σχεδιασμός υποδομής:

- Ενώ η γνώση σχετικά με πιθανή μετατόπιση βοηθά τους μηχανικούς σε κατασκευαστικές πλαγιές και συναφείς κατασκευές, όπως δρόμους, αγωγούς που μπορούν να αντέξουν ή με χώρο ώστε οι κινήσεις να γίνονται χωρίς καταστροφική αστοχία (Zhang et al., 2016).

2. Εκτίμηση κινδύνου και μετριασμός:

- Ενώ οι ποσοτικοποιημένες μετατοπίσεις παρέχουν μια ουσιαστική βάση για την εκτίμηση των κινδύνων, μέτρα μετριασμού της διαχείρισης κινδύνου όπως

σταθεροποίηση πρανών, βελτίωση της αποστράγγισης ή αλλαγές στη χρήση γης είναι επίσης δυνατά (Mavrouli & Corominas, 2017).

3. Μετασεισμική απόκριση:

- Η εκτίμηση της μετατόπισης είναι χρήσιμη για: σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης – για να γνωρίζουμε πού πρέπει να επικεντρωθεί κανείς για να παρακολουθήσει και να εκκενώσει μετά από σεισμό ή πού είναι πιο πιθανό να συμβούν κατολισθήσεις (Ghasemi et al., 2017).

Παράδειγμα μελέτης περίπτωσης:

Με τον σεισμό Tōhoku στη νότια Ιαπωνία το 2011, εφαρμόστηκε η μέθοδος Newmark που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη κατολισθήσεων σε αυτές τις περιοχές. Η μέθοδος ήταν αρκετά χρήσιμη στον εντοπισμό εκείνων των περιοχών όπου οι κατασκευές ήταν πιο επιρρεπείς σε κατάρρευση και έτσι, όταν αυτές οι πληροφορίες δόθηκαν στις αρχές, θα μπορούσε να βοηθήσει στον προσδιορισμό του σημείου που χρειαζόταν περισσότερο η υποδομή για επισκευές (Huang et al., 2014).

3.4 Αλληλεπίδραση με την Ψευδοστατική Προσέγγιση

Ενώ τόσο η μέθοδος Newmark όσο και η ψευδοστατική μέθοδος χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ευστάθειας της πλαγιάς υπό σεισμικές συνθήκες, προσφέρουν ξεχωριστές αλλά συμπληρωματικές πληροφορίες: Ενώ τόσο η μέθοδος Newmark όσο και η ψευδοστατική μέθοδος χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ευστάθειας της πλαγιάς υπό σεισμικές συνθήκες, προσφέρουν ξεχωριστές αλλά συμπληρωματικές ιδέες:

1. Εστίαση σε διαφορετικές πτυχές:

- Ψευδοστατική μέθοδος: Πάνω από όλα, αξιολογεί τον παράγοντα ασφάλειας έναντι αστοχίας κλίσης και μετατρέπει τα δυναμικά σεισμικά φορτία σε ισοδύναμα στατικά φορτία. Αποφασίζουν εάν μια κλίση είναι πιθανό να αστοχήσει υπό σεισμική φόρτιση μέσω της ζύγισης της κινητήριας δύναμης και των δυνάμεων αντίστασης (Seed, 1979).
- Μέθοδος Newmark: Εστιάζει στην εκτίμηση του βαθμού μετεγκατάστασης των κατοίκων λόγω των δονήσεων του εδάφους. Δίνει έναν ρυθμό κίνησης της κλίσης που είναι πολύ σημαντικός για τον προσδιορισμό των πιθανών επιπτώσεων στις

εγκαταστάσεις και είναι χρήσιμος για τη σύσταση των απαραίτητων μέτρων που πρέπει να ληφθούν (Zhang et al., 2016).

2. Ανάλυση με βάση την ανάλυση έναντι της μετατόπισης:

- Αυτό είναι λιγότερο δραματικό από την ψευδοστατική μέθοδο, καθιστώντας έτσι ευκολότερη την ανάλυση και χρησιμοποιείται καλύτερα για την αρχική τεκμηρίωση και την επικύρωση σχεδιασμού.
- Ενώ το NMS ξεκινά από τις πρώτες αρχές, έχει ανάγκη από συγκεντρωμένα αρχεία σεισμικής επιτάχυνσης και αριθμητική ολοκλήρωση, και έτσι είναι πιο χρήσιμο για αναλύσεις υψηλότερου επιπέδου όπου η μέτρηση μετατόπισης είναι κρίσιμη.

3. Βελτιωμένη αξιοπιστία:

Η χρήση και των δύο μεθόδων σε συνδυασμό επομένως βελτιώνει την αξιοπιστία που επιτυγχάνεται κατά την αξιολόγηση της σταθερότητας των πρανών. Μέσω της ψευδοστατικής ανάλυσης πληρούνται τα κριτήρια ασφαλείας για κλίσεις ενώ μέσω της ανάλυσης Newmark ελέγχεται η αναμενόμενη μετατόπιση στα επιθυμητά επίπεδα (Mavrouli & Corominas, 2017).

Παράδειγμα ολοκληρωμένης προσέγγισης:

Για παράδειγμα, σε μια σεισμικά επιρρεπή περιοχή οι μηχανικοί μπορούν αρχικά να χρησιμοποιήσουν την ψευδοστατική μέθοδο για να επιβεβαιώσουν τον ελάχιστο απαιτούμενο συντελεστή ασφάλειας για την κλίση (για παράδειγμα, $FS > 1.3$). Στη συνέχεια, υπολογίζεται με τη μέθοδο Newmark και σε περίπτωση που απειλεί τις δομές ή τις υποδομές που βρίσκονται κοντά στον χώρο, προσαρμόζεται.

Έτσι, αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση παρέχει σταθερότητα και λειτουργία της πλαγιάς υπό συνθήκες σεισμικών φορτίων (Ghasemi et al., 2017).

3.5 Εφαρμογές σε πραγματικά έργα

Έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα πραγματικά έργα για την αξιολόγηση και τη διαχείριση της σεισμικής ευστάθειας των πρυνών μέσω της μεθόδου Newmark Sliding Block Method. Ακολουθούν μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα: Παρακάτω είναι μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα:

1. Φράγμα Belo Monte, Βραζιλία:

- Κατά την κατασκευή του φράγματος Belo Monte, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newmark για την αξιολόγηση της πιθανότητας μετακινήσεων πλαγιών που μπορεί να προκληθούν από την εμφάνιση ενός σεισμού. Η συμβολή βοήθησε στον καθορισμό των μέτρων ενίσχυσης των πρυνών που έπρεπε να υιοθετηθούν προκειμένου να ενισχυθεί η σταθερότητα του φράγματος και να αποτραπεί επίσης η εμφάνιση κατολισθήσεων (Lai et al., 2015).

2. Πυρηνικός Σταθμός Παραγωγής San Onofre, ΗΠΑ: Πυρηνικός Σταθμός Παραγωγής San Onofre, ΗΠΑ:

- Μετά τον σεισμό που συνέβη στην Καλιφόρνια το έτος 2011, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newmark για την εκτίμηση της μετατόπισης των πλαγιών γύρω από τον πυρηνικό σταθμό San Onofre. Αντίστοιχα, τα ευρήματα ενημέρωσαν την εγκατάσταση ενισχυτών και τεχνικών παρακολούθησης που βοήθησαν στην αντιμετώπιση περιοχών επιρρεπών σε αστοχίες πλαγιών που απειλούν την ασφάλεια της εγκατάστασης (Erguler & Ulusay, 2017).

3. Μετά τον σεισμό του Κόμπε, Ιαπωνία:

- Εκτενείς αναλύσεις ευστάθειας πρυνών με τη μέθοδο Newmark πραγματοποιήθηκαν μετά τον καταστροφικό σεισμό του Κόμπε το 1995. Τέτοιες αναλύσεις καθόρισαν τις ευάλωτες ζώνες στις πλαγιές και διευκόλυναν την καλλιέργεια καλύτερων μεθόδων και διαδικασιών για την πρόληψη των κατολισθήσεων και καλύτερα μέτρα και σχέδια χρήσης γης για την υποστήριξη της ανάπτυξης περιφερειακής βιωσιμότητας (Zhu et al., 2018).

4. Κατολισθήσεις που προκαλούνται από τσουνάμι στην Ινδονησία:

- Σε περιοχές επιρρεπείς σε τσουνάμι, συμπεριλαμβανομένης της Ινδονησίας, η μέθοδος Newmark έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των κινήσεων στην ξηρά που μπορεί να προκληθούν από σεισμικά θαλάσσια κύματα. Οι προβλέψεις από τη μέθοδο έχουν εφαρμοστεί στη διαμόρφωση δομών για την παράκτια άμυνα και την εκκένωση των ανθρώπων και ως εκ τούτου την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους παράκτιους πληθυσμούς (Huang et al., 2014).

5. Slope Stability in Urban Infrastructure Projects:Slope Stability in Urban Infrastructure Projects:

- Στην περιοχή όπου η πυκνότητα των υποδομών είναι μεγαλύτερη, η μέθοδος αναλύσεων Newmark βοηθά στον προσδιορισμό της σταθερότητας των κομμένων πρανών και των τοίχων αντιστήριξης που θα ενσωματωθούν στην κατασκευή οδών και σιδηροδρόμων.

Για παράδειγμα, στην κατασκευή του έργου Crossrail στο Λονδίνο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newmark για την αξιολόγηση της σταθερότητας των πρανών που σχηματίστηκαν μετά την εκσκαφή σηράγγων και άλλης ζωτικής σημασίας δομής (Ghasemi et al., 2017).

Ενδεικτικό Παράδειγμα:

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα έργο αυτοκινητόδρομου σε μια σεισμικά επιρρεπή περιοχή όπου είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί μια κομμένη πλαγιά σε μια οροσειρά. Η μέθοδος Newmark Sliding Block Method χρησιμοποιείται από μηχανικούς, σε αυτήν την περίπτωση, σε επίπεδο αστοχίας σε κλίση που μπορεί να υπάρχει. Τροφοδοτώντας τα πραγματικά αρχεία σεισμικής επιτάχυνσης από προηγούμενους σεισμούς, είναι σε θέση να προβλέψουν την αναμενόμενη μετατόπιση. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι αν δεν γινόταν ενίσχυση, θα υπήρχε μετατόπιση της κλίσης με επιπτώσεις στη σταθερότητα του αυτοκινητόδρομου. Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί εκτιμούν τις μετατοπίσεις που αναμένονται να συμβούν και αναπτύσσουν λύσεις ενίσχυσης πλαγιών σε μπουλόνια βράχου και γεωφάσματα για να επιτρέψουν τη συνεχή χρήση του αυτοκινητόδρομου μετά τον σεισμό (Zhang et al., 2016).

3.6 Μία από τις μεθόδους Newmark είναι η μέθοδος του φάσματος σχεδιασμού, η οποία παρακάτω δείχνει τα έξι πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της:

Φόντα:

1. Απλότητα και αποτελεσματικότητα:

- Αν και η εφαρμογή της μεθόδου αξιολόγησης ασφάλειας είναι απλή, τα απαιτούμενα δεδομένα είναι μάλλον περιορισμένα: αρχεία σεισμικής επιτάχυνσης και βασικές παράμετροι κλίσης. Λόγω αυτής της απλότητας είναι ευνοϊκό για αρχικές αξιολογήσεις και περιπτώσεις όπου είναι αδύνατη η διεξαγωγή λεπτομερούς δυναμικής ανάλυσης (Mavrouli & Corominas, 2017).

2. Εστίαση μετατόπισης:

- Ενώ τη συγκρίνουμε με την ψευδοστατική μέθοδο που ως επί το πλείστον λαμβάνει υπόψη τον παράγοντα ασφάλειας, η μέθοδος Newmark βγαίνει και πάλι με χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αναμενόμενη μετατόπιση. Τέτοιες πληροφορίες είναι απαραίτητες κατά τον σχεδιασμό δομών που μπορούν είτε να επιτρέψουν τέτοιες κινήσεις είτε ακόμη και να τις αντέξουν (Ghasemi et al., 2017).

3. Συμπληρωματική ανάλυση:

- Εκτός από άλλες μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών, η μέθοδος παρέχει μια άλλη προοπτική για την κατανόηση της συμπεριφοράς της πλαγιάς κάτω από σεισμική φόρτιση. Οι εκτιμήσεις ασφάλειας βελτιώνονται εάν χρησιμοποιηθούν μαζί με την ψευδοστατική μέθοδο. Ως εκ τούτου, προτιμάται (Zhang et al., 2016).

Περιορισμοί:

1. Υπόθεση άκαμπτου μπλοκ:

- Η μέθοδος υποθέτει την κλίση σε ένα ιδανικά άκαμπτο μπλοκ ενώ αγνοεί τις πιθανές παραμορφώσεις και παρεμβολές στη μάζα της κλίσης. Λόγω της απλοποίησης, η μέθοδος σε ορισμένες περιπτώσεις προσφέρει λιγότερη ακρίβεια, ιδιαίτερα για πλαγιές που σχηματίζονται από υλικό υψηλής παραμόρφωσης (Lai et al., 2015).

1. Εξάρτηση από ακριβή σεισμικά δεδομένα: Εξάρτηση από ακριβή σεισμικά δεδομένα:

- Τα αρχεία σεισμικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Newmark είναι κρίσιμα καθώς η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ποιότητα και την αντιπροσωπευτικότητά τους. Η έλλειψη ή η χαμηλή ποιότητα δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις μετατόπισης (Zhu et al., 2018).

2. Περιορίζεται σε μόνιμες μετατοπίσεις:

- Η μέθοδος περιορίζεται στην εκτίμηση των μόνιμων μετατοπίσεων μόνο ενώ δεν λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες όπως οι κυκλικές απώλειες ή οποιαδήποτε άλλη προσωρινή μετατόπιση που μπορεί να επηρεάσει τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα της κλίσης (Erguler & Ulusay, 2017).

3. Ευαισθησία στις παραμέτρους εισόδου:

- Διαφέρουν ανάλογα με τις παραμέτρους εισόδου και ιδιαίτερα με τον σεισμικό συντελεστή και τη γεωμετρία της κλίσης. Έχει παρατηρηθεί ότι μικρά λάθη στην εκτίμηση των παραμέτρων μπορεί να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στις προβλέψεις μετατόπισης και ότι πρέπει επομένως να δοθεί μεγάλη προσοχή στη βαθμονόμηση και επικύρωση τέτοιων μοντέλων (Mavrouli, & Corominas, 2017).

3. 7 Όψεις Βελτίωσης και Θεωρητικής Ανάπτυξης

Οι πρόσφατες εξελίξεις προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν ορισμένους από τους εγγενείς περιορισμούς της μεθόδου Newmark: Οι πρόσφατες εξελίξεις επιδίωξαν να αντιμετωπίσουν ορισμένους από τους εγγενείς περιορισμούς της μεθόδου Newmark:

1. Μοντέλα δυναμικών πεπερασμένων στοιχείων:

- Η επέκταση της μεθόδου Newmark επιτρέπει την καλύτερη εκτίμηση των συμπεριφορών των παραμορφώσεων των πρανών και επίσης των αλληλεπιδράσεων εντός της μάζας της κλίσης χρησιμοποιώντας δυναμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (Zhu et al., 2018).

2. Πιθανολογικές προσεγγίσεις:

- Οι εφαρμογές πιθανοτικών μεθόδων στην ανάλυση Newmark έδωσαν επίσης καλύτερες πιθανότητες αξιολόγησης των κινδύνων μετατόπισης με γενικότερο τρόπο.

3. Ενσωμάτωση παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο:

- Όταν η μέθοδος Newmark ενσωματώνεται με σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης κλίσης που προβλέπουν αστοχία κλίσης κατά τη διάρκεια σεισμών, τότε υπάρχει βελτίωση στην προοπτική και ανίχνευση προοδευτικής αστοχίας κλίσης κατά τη διάρκεια σεισμών (Huang et al., 2014).

4. Προηγμένη μοντελοποίηση υλικού:

- Ο εκσυγχρονισμός στις ιδιότητες των υλικών που αποτυπώνουν τη μη γραμμικότητα και τη χρονική εξάρτηση των εδαφών για δυναμική φόρτιση παρέχει καλύτερες εκτιμήσεις μετατόπισης (Lai et al., 2015).

3.8 Συμπέρασμα

Η μέθοδος Newmark Sliding Block Method εξακολουθεί να είναι μια βασική τεχνική ανάλυσης για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών υπό σεισμό φορτία. Δεδομένου ότι αξιολογεί τις αναμενόμενες μόνιμες μετατοπίσεις, παρέχει πρόσθετες πληροφορίες για τη συμβατική ανάλυση ευστάθειας και παρέχει καλύτερη εικόνα της συμπεριφοράς της κλίσης υπό σεισμό. Ωστόσο, η απλότητα και η ευελιξία της μεθόδου, ειδικά όταν εξετάζεται στο πλαίσιο των πολυάριθμων πρακτικών εφαρμογών στις οποίες έχει εφαρμοστεί όλα αυτά τα χρόνια, την καθιστούν άξια προσοχής.

Κεφάλαιο 4: Αριθμητική προσομοίωση στην ανάλυση ευστάθειας κλίσης

4.1 Εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους στην ανάλυση ευστάθειας κλίσης

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες εκτιμήσεις κλίσης. Είναι αποτελεσματικά στην ανάλυση της συμπεριφοράς των πρανών που υπόκεινται σε διαφορετικούς τύπους φορτίων, είτε στατικά είτε σε σεισμικά. Οι αριθμητικές μέθοδοι προσφέρουν προτιμότερο περιβάλλον από τα δύσκολα γεωτεχνικά προβλήματα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά αναλυτικά εργαλεία όπως οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την αξιολόγηση πολύπλοκων σχημάτων πλαγιών, παραλλαγών υλικών και φαινομένων που σχετίζονται με το χρόνο, όπως ο ερπυσμός, η διαρροή και η δυναμική φόρτιση (Griffiths & Lane, 2012).

Λόγω των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πλαγιών του εδάφους ή των βράχων και μιας ή περισσότερων εξωτερικών δυνάμεων όπως το νερό και ο σεισμός, τα ζητήματα ευστάθειας των πρανών συνήθως παρουσιάζουν έντονα μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις το αποτυπώνουν με διακριτοποίηση της κλίσης σε μικρότερα στοιχεία, έτσι ώστε να αποτυπώνεται η φυσική συμπεριφορά της κλίσης καταλληλότερα. Χάρη στους σύγχρονους υπολογισμούς, οι μηχανικοί μπορούν να αναγνωρίσουν πιθανούς τύπους αστοχιών και να εκτιμήσουν την απόδοση των μέτρων σταθεροποίησης.

4.2 Τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά στην αριθμητική μοντελοποίηση

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που σχετίζονται με την ανάλυση ευστάθειας πρανών και όλες είναι αριθμητικής φύσης. Μερικές από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και η μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM). Η εφαρμογή τους είναι μάλλον περιορισμένη καθώς καθεμία από τις μεθόδους που περιγράφονται έχει τα πλεονεκτήματά της και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην επίλυση συγκεκριμένων τύπων προβλημάτων σταθερότητας πρανών.

4.2.1 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτή που συχνά συντομεύεται ως FEM.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι γνωστή ως αριθμητική τεχνική μεγάλης χρήσης στη γεωτεχνική μηχανική για την ανάλυση ευστάθειας πρανών. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της κλίσης σε ένα δίκτυο μικρότερων επιμέρους στοιχείων

στο οποίο κάθε υποστοιχείο εξετάζεται για τάση, παραμόρφωση και μετατόπιση. Προτείνουν ότι μερικά από τα πλεονεκτήματα του FEM είναι ότι είναι κατάλληλο για καταστάσεις όπου η γεωμετρία της κλίσης είναι ακανόνιστη, τα υλικά είναι διαφορετικών τύπων ή τα στρώματα του εδάφους είναι στρωμένα. Το πρώτο πλεονέκτημα του FEM είναι φυσικά η δυνατότητα προσομοίωσης της συνεχούς παραμόρφωσης της κλίσης και η εκτίμηση της ελαστικής καθώς και της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού (Potts & Zdravković, 2001).

Όσον αφορά την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, τα μοντέλα FEM μπορούν να λάβουν υπόψη διαφορετικές οριακές συνθήκες και συνθήκες φορτίου, όπως η πίεση του νερού και τα σεισμικά φορτία μέσω της εφαρμογής των εξισώσεων ισορροπίας και συμβατότητας σε ολόκληρη την κλίση.

Σε αντίθεση με τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, το FEM επιτρέπει τον προσδιορισμό των μοτίβων παραμόρφωσης και τον εντοπισμό των επιπέδων αστοχίας με τη βοήθεια της συγκέντρωσης τάσης και παραμόρφωσης. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο όπου οι έλεγχοι μετατόπισης είναι κρίσιμος παράγοντας σχεδιασμού για ένα συγκεκριμένο έργο (Krahn, 2003).

4.2.2 Μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM)

Η άλλη τεχνική μοντελοποίησης είναι γνωστή ως Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (DEM) όπου η κλίση αναπαρίσταται ως μια συλλογή από διακριτά σωματίδια ή μπλοκ. Το DEM είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη μοντελοποίηση χαλαρών και συλλογικών μέσων όπως το έδαφος ή ο σπασμένος βράχος και όπου η δραστηριότητα μεταξύ των μεμονωμένων στοιχείων επηρεάζει τη συμπεριφορά της κλίσης. Το DEM χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κίνησης των σωματιδίων, των αλληλεπιδράσεων επαφής και δύναμης μεταξύ των σωματιδίων (Cundall & Strack, 1979).

Το κύριο πλεονέκτημα του DEM έγκειται στην εφαρμογή του σε πλαγιές που περιλαμβάνουν βραχώδεις μάζες με μεγάλη θραύση ή ενώσεις για τις οποίες η συμβατική προσέγγιση μοντελοποίησης συνεχούς όπως το FEM μπορεί να μην παρέχει σωστά αποτελέσματα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να προσομοιώσει τη διαδοχική αστοχία μιας πλαγιάς στην οποία μπλοκ ή σωματίδια αφήνουν τις επαφές τους και αρχίζουν να γλιστρούν ή να κυλιούνται. .

4.3 Πλεονεκτήματα της μαθηματικής μοντελοποίησης για περίπλοκες μορφές κλίσεων και το γέμισμα τους

Οι μέθοδοι FEM και DEM έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις κατά την ανάλυση πολύπλοκων διαμορφώσεων κλίσεων και ανομοιομορφίας των υλικών.

4.3.1 Χειρισμός σύνθετων γεωμετριών

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις μπορούν να φιλοξενήσουν πλαγιές με μη συστηματικά σχήματα όσον αφορά τη στρώση του εδάφους, του βράχου ή της επιφάνειας της πλαγιάς. Τέτοια χαρακτηριστικά συχνά δεν μπορούν να περιγραφούν σωστά με συμβατικές μεθόδους, η οριακή ισορροπία είναι μόνο ένα παράδειγμα που ορίζει ορισμένη ομοιογένεια και ομαλότητα της αστοχίας μάζας και των γύρω υλικών. Το FEM, ειδικά το FEM, αποδίδει καλά με πολλαπλές γεωμετρίες της κλίσης, όταν η κλίση χωρίζεται σε λεπτό πλέγμα, μπορεί να προσδιορίσει πώς λειτουργούν συντονισμένα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της πλαγιάς (Sivakugan and Das, 2010).

4.3.2 Μοντελοποίηση Ετερογενών Υλικών

Πολλές πλαγιές είναι κατασκευασμένες από υλικά διαφορετικής αντοχής, για παράδειγμα τα στρώματα διαφορετικών τύπων εδάφους, ταλαντώσεις που έχουν σπάσει ή απόθεση διαφορετικών υλικών. Τέτοια ετερογενή υλικά μπορούν να μοντελοποιηθούν στις αριθμητικές προσομοιώσεις αναθέτοντας διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε τμήμα του στοιχείου ή του μπλοκ εντός του μοντέλου. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για έργα που βρίσκονται σε περιοχές με ποικίλες συνθήκες εδάφους ή ακόμα και βράχων στις οποίες αναμένεται αστοχία κατά μήκος των επιπέδων αδυναμίας ή μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών (Duncan & Wright, 2005).

4.3.3 Συμπεριφορά εξαρτώμενη από τον χρόνο και δυναμικό φορτίο

Ένα από τα άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα των αριθμητικών προσομοιώσεων είναι η δυνατότητα περιγραφής διαδικασιών που εξαρτώνται από το χρόνο, για παράδειγμα, ερπυσμού, ενοποίησης και της επίδρασης από την κίνηση των υπόγειων υδάτων. Αυτές οι πτυχές μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τη σταθερότητα της πλαγιάς

μακροπρόθεσμα, ειδικά όπου υπάρχει υψηλή στάθμη επιτραπέζιου νερού ή πλαγιές που φορτίζονται συνεχώς (Zienkiewicz et al., 2005).

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι επίσης κατάλληλες για την πρόβλεψη δυναμικών φορτίων, για παράδειγμα μέσω σεισμικών φορτίων. Το FEM και το DEM μπορούν να δώσουν μια ένδειξη για το πώς συμπεριφέρονται οι κλίσεις ως απόκριση στις ταχύτητες και επιταχύνσεις επαγωγής σεισμού, δηλαδή πόσο ευαίσθητες είναι οι πλαγιές σε κατολισθήσεις ή αλλαγές κλίσης κατά τη διάρκεια και μετά τον σεισμό. Ενώ η ψευδοστατική ανάλυση διαταράσσει τις σεισμικές δυνάμεις σε στατικές δυνάμεις, η ανάλυση αριθμών κρούσης παρέχει μια επιπλέον πραγματική και ασύζευκτη ανάλυση της επιρροής του σεισμού που προσδιορίζεται από το get (Nash, 2013).

4.4 Ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης και εφαρμογή με βάση τέσσερα μεγάλα έργα

Σε πολλά άλλα σημαντικά έργα ευστάθειας πρανών, η αριθμητική προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλά έργα. Μερικά παραδείγματα που αποδεικνύουν ότι το FEM και το DEM μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά στην πράξη παρουσιάζονται περαιτέρω.

4.4.1 1 Μελέτη Περίπτωσης 1: Φράγμα Three Gorges, Κίνα

Το εργοτάξιο του φράγματος Three Gorges είναι ένα από τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα στον κόσμο, αλλά η κατασκευή παρουσίασε δυσκολίες λόγω του προβλήματος ευστάθειας των πρανών λόγω των απότομων κλίσεων και των ευάλωτων σε κατολισθήσεις. Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου σχεδιασμού, εφαρμόστηκε FEM για την πρόβλεψη των τύπων αστοχίας πλαγιάς και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας συγκεκριμένων μέτρων, όπως οι κοχλίες βράχου και οι τοίχοι αντιστήριξης. Η χρήση προσομοιώσεων FEM επέτρεψε στους μηχανικούς να προβλέψουν τις πιθανές παραμορφώσεις των πρανών κάτω από διάφορα σενάρια φόρτισης, όπως η αύξηση της πίεσης του νερού λόγω της πλήρωσης της δεξαμενής του φράγματος (Zhang et al., 2016).

4.4.2 Μελέτη περίπτωσης 2: Vajont Dam, Ιταλία

Παράδειγμα τέτοιας καταστροφής είναι το φράγμα Vajont στην Ιταλία, το οποίο κατακλύστηκε από μια ισχυρή κατολίσθηση το 1963 και ξεχείλισε τις όχθες του μετακινώντας έναν τεράστιο όγκο βράχων στο νερό και καταστρέφοντας όλες τις κατάντη πόλεις. Η κατολίσθηση συνέβη πριν αναπτυχθούν οι τεχνικές αριθμητικής προσομοίωσης για την πρόβλεψη του γεγονότος, ωστόσο, μεταγενέστεροι ερευνητές χρησιμοποίησαν το DEM για να προσομοιώσουν το συμβάν. Αυτές οι προσομοιώσεις ήταν χρήσιμες για την ανάλυση της προοδευτικής αστοχίας της κλίσης, των σχέσεων μεταξύ των μεμονωμένων μπλοκ λατομικών πετρωμάτων κατά τη διάρκεια της ολίσθησης και της κινηματικής αλυσίδας αστάθειας που παρατηρήθηκε κατά τη διαδικασία κατολίσθησης (Crosta et al., 2013).

4.4.3 Μελέτη περίπτωσης 3: Σταθερότητα κλίσης αυτοκινητόδρομου στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α

Στην Καλιφόρνια όπου κυρίως υπάρχει υψηλός κίνδυνος αυξημένου σεισμού και δύσκολα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, ειδικά δύσκολα ορεινά εδάφη για την κατασκευή αυτοκινητοδρόμων έχει χρησιμοποιηθεί FEM για τη σταθερότητα των πρανών σε εμφανείς αυτοκινητόδρομους. Χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις FEM κατά την εκτέλεση αυτού του έργου, ειδικά κατά την αξιολόγηση των επιπτώσεων των σεισμών σε κομμένες πλαγιές και αναχώματα Grapevine Interstate 5. Δηλαδή, μέσω των προσομοιώσεων, οι μηχανικοί ήταν σε θέση να προτείνουν μέτρα ενίσχυσης όπως τα καρφιά του εδάφους και τα γεωσυνθετικά στρώματα για τη μείωση των αστοχιών των πρανών κατά τη διάρκεια της σεισμικότητας (Bray & Travarasrou, 2011).

4.4.4 Οργάνωση της Μελέτης Περίπτωσης 4: Σταθερότητα Κλίσης Ορυχείου ανοιχτού λάκκου στην Αυστραλία

Όταν εφαρμόζεται στη βιομηχανία εξόρυξης, το DEM έχει εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της σταθερότητας μεγάλων πλαγιών βράχου ανοιχτού ορυχείου. Μια συγκεκριμένη απεικόνιση αυτού είναι στο χρυσωρυχείο Cadia Hill στην Αυστραλία όπου οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν DEM για να μοντελοποιήσουν τον τρόπο με τον οποίο οι σπασμένες βραχώδεις μάζες λειτουργούν κάτω από διαφορετικά φορτία. Διαπιστώθηκε ότι οι προσομοιώσεις DEM προσέφεραν τις προοπτικές της προοδευτικής αστοχίας, κάτι που ήταν χρήσιμο για τον σχεδιασμό της κλίσης και την παρακολούθηση των διαδικασιών (Hoek, 2012).

4. 5 Συμπέρασμα

Το FEM, και σε ένα βαθμό το DEM, άλλαξε τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να διεξαχθεί η ανάλυση ευστάθειας κλίσης μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και έχει κάνει νέες γεωμετρίες, υλικά και χρονικές εξαρτήσεις προσβάσιμες στην ανάλυση. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν στους μηχανικούς να εκτιμήσουν τις παραμορφώσεις της κλίσης, να εκτιμήσουν την πιθανή επιφάνεια αστοχίας και στη συνέχεια να αξιολογήσουν την αξία των μέτρων σταθεροποίησης υπό διαφορετικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της σεισμικής φόρτισης.

Μέρος 2: Παραδείγματα και εφαρμογές

Κεφάλαιο 5: Πετρινά φράγματα

5.1 Παράδειγμα 1 – Πετρινό Φράγμα 1

5.1.1 Περιγραφή του Έργου Φράγματος

Το πρώτο παράδειγμα που μπορεί να δοθεί σχετικά με το πετροχτισμένο φράγμα είναι το φράγμα Möhne που βρίσκεται στη Γερμανία. Κατασκευασμένο μεταξύ 1908 και 1913, το φράγμα Möhne είναι μια χρήσιμη κατασκευή κυρίως για τον έλεγχο των πλημμυρών, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και την παροχή νερού. Αυτό το φράγμα είναι ένα φράγμα βαρύτητας που σημαίνει ότι μόνο το μεγαλύτερο μέρος του φράγματος χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του νερού στη δεξαμενή. Στην κατασκευή του φράγματος χρησιμοποιήθηκε κυκλώπεια τοιχοποιία, αυτή στην κατασκευή μεγάλοι, χονδροειδείς λίθοι είναι τα υλικά που ενσωματώνονται σε μια βάση κονιάματος. Λόγω της ενσωμάτωσης της τεχνικής κατασκευής λιθοβολών και των αρχών του φράγματος βαρύτητας, η πίεση που ασκήθηκε από το νερό αντιμετώπισε καλά την κατασκευή (Hager & Boes 2014 p 307).

Το φράγμα Möhne έχει ύψος περίπου 40 μέτρα με συνολικό μήκος 650 μέτρα και σχηματίζει τη δεξαμενή Möhnesee με αποθήκευση νερού που ξεπερνά τα 135 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Εξάλλου, η δεξαμενή έχει πολλαπλούς σκοπούς. Είναι έλεγχος των πλημμυρών στην κοιλάδα του Ρουρ που έχει συχνά πλημμυρίσει. παροχή πόσιμου νερού· και υδάτινες ανέσεις για τους κατοίκους των γύρω περιοχών (Tayfur, 2013).

5.1.2 Γεωτεχνικές όψεις και ανάλυση ευστάθειας πρανών στις κατασκευές

Η κατασκευή πετρόχτιστων φραγμάτων εγείρει μια σειρά από γεωτεχνικά ζητήματα, ιδιαίτερα εάν το έδαφος όπου κατασκευάζονται τα φράγματα είναι οριακά σταθερό ή ετερογενές. Το φράγμα Möhne χτίστηκε στην περιοχή της ετερογενούς γεωλογίας που αποτελείται από βραχώδεις σχηματισμούς όπως πέτρες από άμμο και ασβεστόλιθους. Το κύριο ερώτημα που ανακύπτει όταν σχεδιάζεται μια τέτοια δομή αποθήκευσης νερού όπως ένα μεγάλο φράγμα είναι πώς να παρέχει τη σταθερή βάση του και τη σταθερότητα των πλαγιών που γειτνιάζουν με την κατασκευή. Σημαίνει ότι τα πρωτεύοντα φορτία που

χρησιμοποιούνται στα πετροχτισμένα φράγματα είναι η μάζα και η μορφή της πέτρας, επομένως η αστάθεια της βάσης ή των πρανών μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη καθίζηση και ακόμη και κατάρρευση της κατασκευής.

Ένα καλό παράδειγμα είναι κατά την κατασκευή του φράγματος Möhne κατά την κατασκευή αυτού του φράγματος δόθηκε μεγάλη προσοχή στη σταθερότητα των πρανών και στις συνθήκες της θεμελίωσης.

Οι προκαταρκτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τη διάνοιξη γεωτρήσεων με στόχο την αξιολόγηση της αντοχής και της ποιότητας της διαθέσιμης βάσης βράχου ώστε να καθοδηγηθεί η κατασκευή του φράγματος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανακάλυψη ασθενών ενδιάμεσων στρωμάτων ή επιπέδου αστοχίας εντός του βράχου θεμελίωσης που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές καθιζήσεις ή αστοχία της συγκεκριμένης βραχομάζας υπό το φορτίο του φράγματος. Αυτές οι προκλήσεις ξεπεράστηκαν με τη χρήση ενός μείγματος λίθων και κονιάματος, επομένως η βάση του φράγματος ενισχύθηκε για να έχει μια σταθερή βάση (Delgado et al., 2014).

Η σταθερότητα της πλαγιάς ήταν άλλος σημαντικός παράγοντας ανησυχίας κατά την κατασκευή. Η τοποθεσία του φράγματος βρίσκεται σε λοφώδη περιοχή. Ως εκ τούτου, οι κλίσεις του ταμιευτήρα πρέπει να διατηρηθούν για να αποφευχθεί η ολίσθηση ή η διάβρωση που θα διαβρώσει τη βασική δομή του φράγματος. Τοίχοι αντιστήριξης, αποχετεύσεις και βλάστηση χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των πρανών και τη μείωση της εισροής νερού στις πλαγιές, καθώς αυτό προκαλεί την αδυναμία των πρανών και μπορεί να αποτύχει. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, προσδιορίστηκε η ανάλυση ευστάθειας κλίσης όπου ο συντελεστής ασφάλειας υπό συνθήκες στατικής ή σεισμικής φόρτισης υπερέβη την ελάχιστη τιμή $F: S$ του 1,3 (Fell et al., 2015).

Εκτός από τη συμβατική μέθοδο ισορροπίας για την ανάλυση ευστάθειας πρανών, η σεισμική φόρτιση θεωρήθηκε για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του φράγματος κατά τις σεισμικές ενέργειες. Χρησιμοποιήθηκε ψευδοστατική ανάλυση και βγήκε το συμπέρασμα ότι η κατασκευή δεν θα αντιμετώπιζε κανένα πρόβλημα ακόμη και κάτω από μέτριους σεισμούς που ήταν καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος και τη σημασία του Φράγματος. Η σεισμική επιτάχυνση προσομοιώθηκε ως οι οριζόντιες δυνάμεις που δρουν στο φράγμα για να εκτιμηθεί ο παράγοντας ασφάλειας της κατασκευής να αστοχήσει κατά τη διάρκεια ενός σεισμού (Terzaghi & Peck, 2012).

5.1.3 Φωτογραφίες και σχέδια

Όταν πρόκειται για την κατασκευή του φράγματος Μόηνη, η χρήση ιστορικών φωτογραφιών και των τεχνικών σχεδίων είναι απαραίτητη για την κατανόηση των διαδικασιών κατασκευής του φράγματος και του σχεδιασμού. Αυτά περιλαμβάνουν:

- **Φωτογραφίες ιστορικών κατασκευών** που δείχνουν την ενσωμάτωση μεγάλων λίθων στη δομή του φράγματος, που αποτελεί παράδειγμα της τεχνικής της πέτρας.



Εικόνα 1



Εικόνα 2



Εικόνα 3

Τα παραπάνω σχήματα δείχνουν τη δομή του φράγματος Möhne (TracesOfWar.com)

Στα διαγράμματα είναι δυνατό να δούμε πώς η κατασκευή του φράγματος ενσωμάτωσε τις γεωγραφικές συνθήκες της περιοχής. Για παράδειγμα, η ανάντη όψη του φράγματος ήταν απότομη και ευθεία για να μπορεί να συγκρατεί τις πιέσεις που προκαλούνται από το νερό που συσσωρεύεται στη δεξαμενή του φράγματος. Ωστόσο, η κατάντη όψη ήταν κεκλιμένη και βαθμιδωτή και είχε την ικανότητα να μειώνει τις ενεργειακές εκροές από το υπερχειλισμένο νερό κατά τη διάρκεια πλημμυρών (Hager & Boes, 2014). Επιπλέον, στο φράγμα παρασχέθηκαν στοές αποστράγγισης για τον έλεγχο της διαρροής και για την ελαχιστοποίηση των εφαρμοζόμενων υδροστατικών πιέσεων στον πυρήνα του φράγματος, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Οι ιστορικές φωτογραφίες και τα σχέδια καλύπτουν επίσης τα στάδια που περιλαμβάνουν την κατασκευή του σταδίου θεμελίωσης, την τοποθέτηση μεγάλων λίθων και το τελευταίο μέρος των οικοδομικών εργασιών. Τρεις εικόνες προσφέρουν μια ιστορική καταγραφή του Griffin and Sons και των μηχανικών πρακτικών στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τις αρχές του εικοστού αιώνα μαζί με τους πραγματικούς τρόπους αντιμετώπισης των γεωτεχνικών ανησυχιών που συνοδεύουν μια τέτοια δομή.

5.1.4 Συμπέρασμα

Το φράγμα Möhne παραμένει ως παράδειγμα οποιαδήποτε πληροφορία για ένα πετροχτισμένο φράγμα που έχει ολοκληρωθεί παρά τις γεωτεχνικές προκλήσεις που θέτει η ένταση του περιβάλλοντος. Με τη βοήθεια λεπτομερών ερευνών τοποθεσίας, ανάλυσης ευστάθειας πλαγιάς και δημιουργικής κατασκευαστικής προσέγγισης που εφάρμοσαν οι μηχανικοί, πέτυχαν να κατασκευάσουν τη σταθερή και χρησιμοποιήσιμη επιβίβαση καναλιού που παραμένει χρήσιμη στην περιοχή ακόμα και σήμερα, όταν έχουν ήδη περάσει 100 χρόνια από την κατασκευή της. . Στο σχεδιασμό του φράγματος ενσωματώθηκαν διάφορα μέτρα για την αντιμετώπιση της αδυναμίας των πρανών και των υλικών θεμελίωσης και μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η απόδοση του φράγματος υπό στατικό και δυναμικό φορτίο θα υποστηρίξει την αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων.

Ενότητα 5.2: Παράδειγμα 2 – Φράγμα από πέτρες 2

5.2.1 Περιγραφή του Έργου Φράγματος

Το δεύτερο παράδειγμα πετροχτισμένου φράγματος είναι το Aswan Low Dam που βρίσκεται στην Αίγυπτο. Αυτό το είδος φράγματος βαρύτητας ολοκληρώθηκε μεταξύ 1899 και 1902 κατά μήκος του ποταμού Νείλου προκειμένου να ελεγχθούν οι πλημμύρες και να δημιουργηθεί ένα απόθεμα νερού για τις περιόδους άρδευσης και για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το χαμηλό φράγμα του Ασουάν ήταν μια από τις μεγαλύτερες πέτρινες τοιχοποιίες σε μια περίοδο με προσεγγίσεις πέτρας και τοιχοποιίας που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της κατασκευής (Owen, 2014).

Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε σε ύψος 30 μέτρων και κάλυψε 2140 μέτρα κατά μήκος του ποταμού Νείλου. Σχηματίστηκε μια σειρά από φυσικές δεξαμενές νερού μεταξύ των οποίων η μεγαλύτερη ήταν η λίμνη Moeris που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση της εκτεταμένης καλλιεργήσιμης γης στην κοιλάδα του Νείλου. Στόχος της κατασκευής του φράγματος ήταν η ρύθμιση της ροής του νερού σε αυτό το ποτάμι, καθώς αυτό θεωρήθηκε πολύ ζωτικής σημασίας για την παροχή νερού στην Αίγυπτο. Κάποια στιγμή, η κατασκευή της έλικας υποβλήθηκε σε έργα ανύψωσης, αλλά αυτό που ενοχλούσε ήταν η πρωτοτυπία της κατασκευής μέσω της τεχνικής της πέτρας που αντανάκλούσε την πρόωπη προέλευση της χρήσης υδροηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή της μηχανικής έλικας (Tvedt 2016, σελ. 15).

5.2.2 Εδαφικές Συνθήκες και Γεωτεχνικές Προκλήσεις

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, κατά την κατασκευή του Aswan Low Dam, οι μηχανικοί έπρεπε να δουλέψουν σε ένα οικοδόμημα από Νουβικό ψαμμίτη που είχε τις δικές του ευκαιρίες και επιπλοκές για τους μηχανικούς. Ο ψαμμίτης είναι ως επί το πλείστον ικανός βράχος που σημαίνει ότι έχει την ικανότητα να υποστηρίξει μεγάλες κατασκευές όπως τα φράγματα, όπως φαίνεται από την ανάλυση των γεωλογικών ιδιοτήτων του σχηματισμού βράχου, ωστόσο ο ψαμμίτης είναι επίσης ευαίσθητος στις καιρικές συνθήκες και τη διάβρωση, ιδιαίτερα σε περιοχές που μπορεί να παρουσιάσουν υψηλή ροή νερού (Hughes, 2014). Ένα άλλο πρόβλημα που εντόπισε ο Ngodosh ήταν ότι ο ποταμός Νείλος παρουσιάζει διακυμάνσεις της στάθμης του νερού εποχιακά και υπάρχει μια σταθερή ροή νερού στην κοίτη του ποταμού όλο το χρόνο, τα οποία επηρέασαν τη σταθερότητα της θεμελίωσης του φράγματος. Επιπλέον, η ποσότητα των ιζημάτων στον ποταμό από τον Νείλο ήταν επίσης

μια πρόκληση που εμπόδιζε τον σχεδιασμό της δεξαμενής καθώς θα μπορούσε να φράξει το νερό ασκώντας έτσι πίεση στην κατασκευή του φράγματος.

Οι έρευνες εδάφους έγιναν πολύ πριν από την κατασκευή των κατασκευών για την κατανόηση της αντοχής και της σταθερότητας του εδάφους. Πυρήνες τρυπήθηκαν για να αποφασιστεί η ικανότητα του ψαμμίτη να φέρει φορτία και πιθανά ελαττώματα στο βράχο ελήφθησαν υπόψη στην κατασκευή του φράγματος. Μια άλλη πρόκληση που επισημάνθηκε από τους μηχανικούς αφορούσε μεθόδους αποφυγής διαρροής μέσω του σώματος του φράγματος, καθώς η διαρροή καταστρέφει το θεμέλιο υπονομεύοντας τη δομή (Cole, 2013).

Σημειώθηκε ότι κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής διαδικασίας, ειδικές μελέτες για τη σταθερότητα των πρανών που εμπλέκονται στη διαμόρφωση του φράγματος ήταν βασικό στοιχείο της όλης διαδικασίας. Αλλά υπήρχε κίνδυνος από πλαγιές βράχων Κατά μήκος των απότομων πλευρών της κοιλάδας του Νείλου, το έδαφος ήταν χαλαρό και ρηχό και αυτή η κίνηση ήταν επικίνδυνη όταν η ροή του νερού ήταν υψηλή και το έδαφος ήταν υγρό. Για να αποφευχθεί αυτό, οι μηχανικοί αποφάσισαν να συμπεριλάβουν πέτρινα επιχώματα και τοίχους αντιστήριξης σε μια προσπάθεια να μειώσουν τον εν λόγω κίνδυνο. Τέτοια μέτρα θα μπορούσαν επίσης να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση της διάβρωσης των εδαφών στις πλαγιές και στην εμφάνιση αστοχιών, διασφαλίζοντας έτσι τη βιωσιμότητα του φράγματος. Περαιτέρω, τοποθετήθηκαν συστήματα αποστράγγισης για να ανακουφίσουν την είσοδο νερού για να εξουδετερώσουν προβλήματα που είχαν τάση με αστάθεια των πρανών (Fell et al., 2015).

5.2.3 Τεχνικές Κατασκευής και Δείκτες Ευστάθειας

Το Χαμηλό Φράγμα του Ασουάν αποτελείται από μεγάλους πέτρινους ογκόλιθους και κονίαμα που ήταν ίδιο με την πέτρα που πετάχτηκε για την κατασκευή φραγμάτων τοιχοποιίας. Λιθόστρωτα διαθέσιμα από άλλα κοντινά λατομεία μεταφέρθηκαν στην τοποθεσία και ενσωματώθηκαν στη μάζα του φράγματος παρέχοντας κάποιο μέτρο αντοχής. Οι πέτρες ήταν καλά διατεταγμένες σε σειρές, κυρίως, κάθε ράβδος ήταν συμπιεσμένο για να υπάρχουν κυστίδια μεταξύ των τεμαχίων. Ο τύπος κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή επιλέχθηκε επίσης με τρόπο που να μπορεί να αντέξει τις υδραυλικές πιέσεις που ασκούνται από τον ποταμό Νείλο, άλλες δυνάμεις που σχετίζονται με την εναπόθεση ιζημάτων και τις αυξομειούμενες ποσότητες νερού συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (Tvedt, 2016).

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του Χαμηλού Φράγματος του Ασουάν ήταν οι βαθμιδωτοί υπερχειλιστές που έλεγχαν την ποσότητα του νερού που επιτρέπεται να ρέει από τη δεξαμενή. Αυτά κατασκευάστηκαν όπως το προηγούμενο με ρίψη πετρών και σκοπός τους ήταν να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια του νερού μετά την έξοδο από το φράγμα, ώστε να μην προκαλέσουν διάβρωση στην περιοχή κάτω από το φράγμα. Η κωνική κατασκευή στους τοίχους παρείχε ένα μέσο βραδείας απελευθέρωσης νερού σε περιόδους υψηλότερων ρυθμών ροής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πίεση που θα μπορούσε να συσσωρευτεί στις κατασκευές και να αυξηθεί ο ρυθμός αστοχίας της κλίσης (Owen, 2014).

Για να ενισχύσουν τη σταθερότητα του φράγματος, οι μηχανικοί ενσωμάτωσαν πολλά βασικά χαρακτηριστικά: Για να ενισχύσουν τη σταθερότητα του φράγματος, οι μηχανικοί ενσωμάτωσαν πολλά βασικά χαρακτηριστικά:

- Τοίχοι αποκοπής: Κάτω από τον πυρήνα του φράγματος κατασκευάστηκαν αυτά τα κατακόρυφα εμπόδια για να διασφαλιστεί ότι το νερό δεν διεισδύει στους χώρους του υποστρώματος ψαμμίτη, διαβρώνοντας έτσι τα θεμέλια του φράγματος. Οι τοίχοι αποκοπής κατέβηκαν επίσης στον βράχο της κλίνης και έτσι έκαναν τους τοίχους στεγανούς για να περιορίσουν τη διάβρωση του θεμελίου (Hughes, 2014).

5.2.4 Φωτογραφίες και σχέδια

Αυτά περιλαμβάνουν:



Εικόνα 4.

- Ιστορικές φωτογραφίες κατασκευής: Φωτογραφίες, που χρονολογούνται από τις αρχές του 1900 απεικονίζουν άνδρες να σηκώνουν τεράστιες πέτρες στην κατασκευή του φράγματος. Η τεχνική της πέτρας μπορεί να παρατηρηθεί σε τέτοιες εικόνες επειδή οι εργάτες βασίστηκαν στις προσπάθειες του προσωπικού και της πρωτόγονης μηχανικής για να πάρουν τις πέτρες και να τις τοποθετήσουν στις επιθυμητές θέσεις. Αυτές οι φωτογραφίες απεικονίζουν επίσης τη διάσταση της κατασκευής αλλά και το μέγεθος που ήταν από τα μεγαλύτερα εκείνη την περίοδο.
- Τεχνικά σχέδια: Περιλαμβάνει λεπτομέρειες διατομής του Aswan Low Dam κατασκευαστικές λεπτομέρειες της θεμελίωσης της λιθοδομής και της οδού διαρροής. Αυτά τα σχέδια δείχνουν επίσης πώς οι σχεδιαστές του φράγματος συνέλαβαν την επίδραση του ρεύματος του ποταμού Νείλου και τις αδυναμίες του υλικού από πέτρα από άμμο. Τα σχεδιαγράμματα εμφανίζουν επίσης πού βρίσκονταν τα τοιχώματα αποκοπής, καθώς και οι ζώνες αρμολόγησης, προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή μέσω του θεμελίου (Tvedt, 2016).

Τα σχέδια τονίζουν επίσης το γεγονός ότι το φράγμα θα έχει υπερχειλιστή και για τη ροή του νερού. Οι βαθμιδωτοί υπερχειλιστές προβλέφθηκαν ως λύση για τη διακύμανση των

επιπέδων του ποταμού Νείλου, παρέχοντας έτσι στους μηχανικούς την κλίση του Νείλου και τις δυνατότητες διαχείρισης της εκροής του νερού από τη δεξαμενή αποφεύγοντας έτσι τις πλημμύρες κάτω από τον ποταμό. Τα σχέδια δείχνουν πώς οι υπερχειλιστές ενσωματώθηκαν στην κατασκευή του φράγματος και στόχος ήταν να σχεδιαστούν με πιο σταθερό και πολύ λειτουργικό τρόπο (Owen, 2014).

5.2.5 Συμπέρασμα

Ως παράδειγμα πρώιμης κατασκευής φράγματος, το Aswan Low Dam δείχνει πώς οι μετεωρολόγοι εκείνης της εποχής κατάφεραν να αντιμετωπίσουν τα μεγάλα γεωτεχνικά ζητήματα προκειμένου να χτίσουν μια σταθερή και λειτουργική κατασκευή. Οι έρευνες του χώρου, οι μη παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής και τα μέτρα ευστάθειας, συμπεριλαμβανομένων των τοίχων αποκοπής, των αρμολόγησης και των ενισχυμένων κλίσεων παρείχαν στους μηχανικούς αρκετό χώρο και μέσα για την κατασκευή του φράγματος που στέκεται σήμερα. Η συνεχιζόμενη λειτουργία του φράγματος με τις επακόλουθες αλλαγές στον σχεδιασμό του καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της ιδέας και την ανάγκη για λύσεις σε γεωτεχνικά ζητήματα για την κατασκευή του φράγματος.

Κεφάλαιο 6: Κάθετα στηρίγματα

6.1 Παράδειγμα κάθετης υποστήριξης: Το έργο Κεντρικής Αρτηρίας/Σήραγγας (The Big Dig) στη Βοστώνη

6.1.1 Περιγραφή έργου

Το Central Artery Tunnel Project που αναφέρεται επίσης ως Big Dig είναι ένα από τα μεγαλύτερα έργα δημοσίων έργων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τοποθετημένο στη Βοστώνη της Μασαχουσέτης, η πρόθεση του έργου ήταν να αποσυμφορήσει την κυκλοφορία που ήταν ενδημική στη Βοστώνη μέσω της αφαίρεσης της ανυψωμένης κεντρικής αρτηρίας - Interstate 93 και την αντικατάστασή της με μια υπόγεια σήραγγα. Ένα άλλο μηχανολογικό ζήτημα που αντιμετωπίστηκε σε αυτό το έργο ήταν η παροχή κάθετης στήριξης μέσω της παροχής υψηλών τοίχων αντιστήριξης, ιδιαίτερα καθώς η κατασκευή αναλήφθηκε στα συμφορημένα αστικά κέντρα όπου κατασκευάστηκε η σήραγγα κάτω από ήδη εγκατεστημένες κατασκευές (LeBlanc & O'Connor, 2015).

Άλλα στοιχεία της κάθετης υποδομής του Big Dig περιελάμβαναν μεγάλους τοίχους αντιστήριξης από σκυρόδεμα που αναπτύχθηκαν για να συγκρατούν το έδαφος προκειμένου να αποφευχθεί η δομική κατάρρευση κατά την εκσκαφή και την κατασκευή της σήραγγας. Αυτοί οι τοίχοι αντιστήριξης είχαν μεγάλη σημασία ειδικά όταν το εργοτάξιο βρισκόταν κοντά σε πολυώροφα κτίρια, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και άλλες υποδομές. Μερικοί από τους τοίχους είχαν ύψος πάνω από 20 μέτρα απαιτώντας γεωτεχνική εκτίμηση για να εξακριβωθεί η σταθερότητα των τοίχων (Holtz & Kovacs, 2011).

Το μεγαλύτερο μέρος των τοίχων αντιστήριξης για το έργο Big Dig κατασκευάστηκε με τη μέθοδο του τοίχου με πολτό. Αυτό είναι ένα είδος τεχνικής όπου μια τάφρος εκσκάπτεται και στη συνέχεια γεμίζεται με πολτό, συνηθέστερα μπετονίτη και νερό για να αποφευχθεί η αστάθεια του εδάφους και η κατάρρευση. Στη συνέχεια, η τάφρος στη συνέχεια γεμίζεται με πολτό και στη συνέχεια απλό σκυρόδεμα για την κατασκευή τοίχου αντιστήριξης σχεδιασμένο να αντέχει σε κατακόρυφα φορτία και σε ροπές ανατροπής που μπορεί να προκύψουν από τη φόρτωση του εδάφους κατά την εκσκαφή (Mitchell et al., 2002). Λόγω αυτής της τεχνικής κατασκευής, ήταν δυνατό για την ομάδα κατασκευής να επιτύχει κατακόρυφους τοίχους ως θεμέλιο σε ένα πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον ενώ προκαλούσε μικρές παρεμβολές στα γειτονικά κτίρια.

6.1.2 Γεωτεχνική Ανάλυση

Η κατασκευή αυτών των κατακόρυφων τοίχων συγκράτησης έθεσε μερικά από τα μεγάλα γεωτεχνικά προβλήματα που σχετίζονται με την κατασκευή στην αστική πόλη της Βοστώνης. Η κατασκευή προτάθηκε σε μια πυκνοκατοικημένη γειτονιά προηγούμενης κατασκευής σε μαλακό έδαφος, συμπεριλαμβανομένων γεμίσματος και θαλάσσιων αργίλων. Επίσης, λόγω του ότι η τοποθεσία ήταν στη Βοστώνη και κοντά στο λιμάνι της Βοστώνης, ο έλεγχος των υπόγειων υδάτων αποτελούσε πάντα πρόβλημα, επειδή η υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη μάζα του εδάφους και να οδηγήσει σε αστοχία των τοίχων (Clough & O'Rourke, 2016).

6.1.2.1 Συνθήκες εδάφους

Συγκεκριμένα κατά τον σχεδιασμό του έργου, πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική και λεπτομερής επισκόπηση γεωτεχνικού συμβούλου για την αξιολόγηση των υπόγειων συνθηκών σε όλο το μήκος του διαδρόμου της Κεντρικής Αρτηρίας. Μέσω αυτών των αξιολογήσεων, διαπιστώθηκε ότι το έργο αφορούσε διαφορετικούς τύπους εδαφών. παγετώνων, θαλάσσιος πηλός και τεχνητή γέμιση. Για παράδειγμα, ο θαλάσσιος πηλός της Βοστώνης που αναφέρεται επίσης ως «Μπλε άργιλος της Βοστώνης» είναι γνωστός ότι έχει τη χειρότερη φέρουσα ικανότητα και κακή σταθερότητα όταν υποβάλλεται σε βαριά φόρτωση και τείνει να καθιζάνει (Martin, 2013). Αυτό επέβαλε μια πρόκληση στην ομάδα μηχανικών να ελέγξει την ακεραιότητα των τοίχων αντιστήριξης και τον καλύτερο έλεγχο στις κάθετες και πλάγιες κινήσεις.

Επιστρέφοντας στην ανασκόπηση των γεωτεχνικών αποτελεσμάτων του σχεδιασμού του έργου, μία από τις συστάσεις ήταν να παρέχεται επαρκής υποστήριξη για τις πλευρικές πιέσεις της γης. Κατά την εκσκαφή, οι τοίχοι αντιστήριξης θα πρέπει να δέχονται την πίεση της γης από το παρακείμενο έδαφος και επίσης την πίεση από την πλευρά του υδροφόρου ορίζοντα σε περίπτωση παρουσίας νερού στο έδαφος. Στη συνέχεια, η γεωτεχνική ομάδα χρησιμοποίησε ένα FEM για να μοντελοποιήσει το SSI και να αναγνωρίσει τις διαμορφώσεις των τοίχων αντιστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν (Morgenstern et al., 2013). Μερικά από τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου περιλαμβάνουν: Οι μηχανικοί μπόρεσαν να καταλάβουν πώς θα συμπεριφέρονταν οι τοίχοι υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης και να παρατηρήσουν περιοχές που χρειάζονται ενίσχυση ή επιπλέον στήριξη.

6.1.2.2 Έλεγχος υπόγειων υδάτων

Υπάρχουν επίσης προβλήματα όπως υψηλά επίπεδα υπόγειων υδάτων κατά μήκος του έργου και ιδιαίτερα γύρω από το υδάτινο μέτωπο. Οι επιπτώσεις της διείσδυσης νερού στις θέσεις εκσκαφής προέρχονται κυρίως από τα ακόλουθα: Αύξηση της σταθερότητας του εδάφους που εκτίθεται στο νερό που δημοσιεύθηκε από τους Freise και Kreuser 2007, οι πλευρικές πιέσεις στους τοίχους αντιστήριξης αυξάνονται λόγω της ανόδου του υδροφόρου ορίζοντα και, τέλος, της υγραποίησης του εδάφους σε περίπτωση σεισμού. Υπό το πρίσμα αυτών των ανησυχιών, η ομάδα του έργου υιοθέτησε τα ακόλουθα μέτρα για να διασφαλίσει ότι η κατασκευή θα συνεχιστεί χωρίς φόβο υλοτόμησης νερού: Επιπλέον, οι τοίχοι με υδαρή λάσπη εξυπηρετούσαν δύο λειτουργίες: η κατασκευή χρησιμοποιήθηκε ως δομή αντιστήριξης για το έδαφος και οι ίδιοι οι τοίχοι επίσης χρησίμευε για την αναστολή της ροής του νερού με τη μορφή υπόγειων υδάτων (O'Rourke & O'Donnell, 2013).

Οι τοίχοι πολτού που χρησιμοποιήθηκαν επίσης σε αυτό το έργο συνέβαλαν ιδιαίτερα στην αποτροπή εισόδου υπόγειων υδάτων στις ζώνες εκσκαφής που μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση των εδαφών θεμελίωσης. Το μίγμα ιλύος χρησιμοποιήθηκε για προσωρινή στήριξη κατά τη στιγμή της εκσκαφής και μετά την έκχυση του σκυροδέματος, οι τοίχοι σχημάτισαν εμπόδια για τη διείσδυση του νερού, προσφέροντας μακροχρόνια στήριξη. Αυτό ήταν σημαντικό για να περιοριστεί η συσσώρευση της υδροστατικής πίεσης πίσω από τους τοίχους, η οποία αν φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο θα μπορούσε να ωθήσει εντελώς τους τοίχους (Holtz & Kovacs, 2011).

6.1.2.3 Πίεση πλευρικής γείωσης

Η πλευρική πίεση του εδάφους είναι ένα από τα κύρια μέλημα για τις κατασκευές αντιστήριξης, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα όπου ο χώρος είναι περιορισμένος και πρέπει να κατασκευαστούν ψηλοί κάθετοι τοίχοι για να συγκρατούν πολύ βαθιές εκσκαφές. Όσον αφορά το Big Dig, οι μηχανικοί πρέπει να λάβουν και τα δύο, την πίεση νεκρού βάρους του εδάφους που περιβάλλει τη δομή και τα δυναμικά φορτία που μπορούν να εφαρμοστούν στο δομικό στοιχείο κατά τη διάρκεια σεισμών. Αυτές οι πιέσεις αντιμετωπίστηκαν στους τοίχους αντιστήριξης μέσω οπλισμένου σκυροδέματος και χαλύβδινων στηριγμάτων (Mitchell et al, 2002).

Η ανάλυση με τη μεθοδολογία ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της κατανομής των πλευρικών πιέσεων γης κατά μήκος του ύψους των

τοιχών αντιστήριξης. Αυτοί οι υπολογισμοί έδωσαν στους μηχανικούς τις θέσεις των οπλισμών που χρειάζονται για τους τοίχους και κατέστησαν δυνατό τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας των τοίχων με περιορισμένες παραμορφώσεις. Επιπλέον, ελήφθη υπόψη η επιρροή του οικισμού που οδηγεί στην πλευρική κίνηση που είναι χαρακτηριστική για το μαλακό αργιλώδες έδαφος όπως στη Βοστώνη. Για τη διαχείριση αυτού του κινδύνου, οι τοίχοι έγιναν πιο άκαμπτοι. και το όργανο τοποθετήθηκαν για να ανιχνεύουν οποιαδήποτε κίνηση κατά τη διάρκεια και μετά την κατασκευή (Clough & O'Rourke, 2016).

6.1.3 Λήφθηκαν μέτρα σταθερότητας

Η ακεραιότητα των τοίχων αντιστήριξης κατά τη διάρκεια του έργου Big Dig διατηρήθηκε με προηγμένα σχέδια και διαδικασίες κατασκευής που προτάθηκαν και εφαρμόστηκαν. Αυτοί ήταν οι τοίχοι πολτού, τα χαλύβδινα δέματα και οι συσκευές παρακολούθησης για τον έλεγχο των σημάτων κίνησης κατά τη φάση της κατασκευής.

6.1.3.1 Τοίχοι πολτού

Μία από τις πιο σημαντικές τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση των κατακόρυφων στηρίξεων κατά τη διάρκεια του Big Dig ήταν τα τοιχώματα του πολτού. Η διαδικασία διαμόρφωσης τοίχων υδαρούς πολτού περιλαμβάνει την εκσκαφή μιας τάφρου, στη συνέχεια λιμάρωσή της με πολτό για να στηριχθεί και στη συνέχεια τοποθέτηση και σκυρόδεμα για την παροχή μόνιμου τοίχου. Αυτοί οι τοίχοι εφαρμόστηκαν ευρέως κατά τη διάρκεια των εργασιών στο περαιτέρω για να παρέχουν τη μηχανική σταθερή και κάθετη στήριξη των υπόγειων σηράγγων (Mitchell et al., 2002).

Τόσο η πλευρική πίεση γείωσης όσο και η υδροστατική πίεση του νερού λήφθηκαν υπόψη κατά το σχεδιασμό των τοιχωμάτων του πολτού και των χαλύβδινων ράβδων. Σε ορισμένα τμήματα προχώρησαν και έκαναν τους τοίχους 1. Με μέτρηση πασσάλου 2 μέτρα έτσι ώστε η κατασκευή να έχει επαρκή αντοχή και σταθερότητα για να εξυπηρετήσει το κέντρο. Οι τοίχοι ήταν επίσης αγκυρωμένοι στον πυθμένα του βράχου για να μειώσουν κάθε μορφή κίνησης που προέκυψε από την πίεση του νερού. Η τεχνική κατασκευής των τοίχων πολτού εφαρμόστηκε για να μπορέσει η ομάδα σχεδιασμού να κατασκευάσει βαθιά μέρη της σήραγγας χωρίς να προκαλέσει αστοχία των γύρω εδαφών και των κοντινών κατασκευών.

6.1.3.2 Δεσμοί

Στο πλαίσιο της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν τοίχοι από πολτό μαζί με χαλύβδινες δεσμίδες που χρησιμοποιήθηκαν για τη στερέωση των τοίχων αντιστήριξης στα υποκείμενα εδάφη / βράχο. Οι δεσμίδες είναι ένα ή περισσότερα τεντωμένα χαλύβδινα καλώδια ή ράβδοι που αρμολογούνται και αγκυρώνονται σε οπές προδιάτρησης μέσω του τοίχου αντιστήριξης σε ένα σταθερό πίσω έδαφος. Μόλις τεντωθεί, το δέσιμο προσφέρει περαιτέρω αγκύρωση έναντι της πλευρικής πίεσης γείωσης και δεν θα επιτρέψει στον τοίχο να σκύψει ή να αστοχήσει.

Για το Big Dig, τα πλευρικά φορτία παρέχονται με δεσμίδες σε πολλά ύψη στους τοίχους αντιστήριξης έτσι ώστε τα φορτία να είναι ισορροπημένα. Οι δεσμοί αναμενόταν να μοιράζονται το φορτίο με το βάρος και την ακαμψία του τοίχου προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι πιέσεις της γης και να ελαχιστοποιηθεί η παραμόρφωση. Η εφαρμογή θέσεων στερέωσης ήταν ως επί το πλείστον αποτελεσματική σε περιοχές όπου οι τοίχοι αντιστήριξης κατασκευάζονταν δίπλα στις υπάρχουσες κατασκευές και εγκαταστάσεις, καθώς η μέθοδος ελαχιστοποίησε τις πιθανότητες καταστροφής των κατασκευών (Holtz & Kovacs, 2011).

6.1.3.3 Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα των τοίχων αντιστήριξης μακροπρόθεσμα, προβλέφθηκε ένα σύστημα παρακολούθησης. Ένα σημαντικό μέρος αυτού του συστήματος ήταν η εκτροπή του τοίχου, η κίνηση του εδάφους και οι μετρητές πίεσης νερού πόρων. Τα δεδομένα που ελήφθησαν από αυτά τα όργανα επέτρεψαν στους μηχανικούς να εντοπίσουν λανθάνουσες συνθήκες για αστάθεια ή αυξημένες κινήσεις κατά την κατασκευή. Αυτό πρόσφερε την ευκαιρία να τροποποιηθεί η διαδικασία κατασκευής ή να εφαρμοστούν πρόσθετα μέτρα σταθεροποίησης εάν είναι απαραίτητο (Mitchell et al., 2002).

Το σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιήθηκε επίσης για τον στενό έλεγχο του κινδύνου καθίζησης και μετακίνησης των τοίχων, ειδικά σε αργιλικά υπέδαφα που υπάρχουν κατά μήκος ορισμένων τμημάτων της διαδρομής της σήραγγας. Τα αποτελέσματα των τοίχων αντιστήριξης σταθεροποιήθηκαν κατά συνέπεια πάνω από τα κάθετα στηρίγματα καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής του έργου και η ομάδα του έργου μπόρεσε να παρακολουθήσει την

απόδοση των τοίχων αντιστήριξης στις συνθήκες του εδάφους και των υπόγειων υδάτων (O'Rourke & O'Donnell, 2013).

6.1.4 Φωτογραφίες και σχέδια

Το Central Artery/Tunnel Project είναι μια πολύ καλή περίπτωση και μια σειρά από φωτογραφίες και σχέδια απεικονίζουν διαφορετικά στάδια της κατασκευής των τοίχων αντιστήριξης. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Φωτογραφίες κατασκευής: Οι όψεις των τοίχων πολτού που ανασκάπτονται και χύνονται προσφέρουν παραδείγματα των διαδικασιών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των τοίχων αντιστήριξης. Αυτές οι φωτογραφίες απεικονίζουν επίσης τον τρόπο τοποθέτησης των δεσμών και επίσης τη χρήση εξοπλισμού εκσκαφής για τα βαθιά χαρακώματα που χρειάζονταν οι τοίχοι.
- Τεχνικά σχέδια: Οι αριθμητικές και διατυπωμένες προδιαγραφές της σήραγγας και τα διαγράμματα των τοίχων αντιστήριξης αποκαλύπτουν την έννοια των κατακόρυφων στηρίξεων και των διατομών που δείχνουν τη θέση των οπλισμών για δεσμούς και τοίχους πολτού. Αυτά τα σχέδια αναδεικνύουν επίσης τις θέσεις των συστημάτων αφυδάτωσης και τον εξοπλισμό παρακολούθησης που χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι η κατασκευή είναι σταθερή.



Εικόνα 5.



Εικόνα 6.

Οι φωτογραφίες και τα σχέδια που συγκέντρωσα είναι χρήσιμα για την αξιολόγηση του μεγέθους και της έντασης των συστημάτων κάθετης στήριξης στο Big Dig. Δίνει μια κατανόηση του πώς οι μηχανικοί προσέγγισαν τα προβλήματα της γεωτεχνικής φέρουσας ικανότητας του αστικού περιβάλλοντος και του μαλακού εδάφους και πώς παρείχαν μόνιμη σταθερότητα των τοίχων αντιστήριξης.

6.1.5 Συμπέρασμα

Μια άλλη λεπτή χρήση πλευρικών στηριγμάτων όπως τοίχοι αντιστήριξης μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή από το Central Artery/Tunnel Project (Big Dig) Boston. Αυτή η εργασία αποκαλύπτει ότι με τη χρήση γεωτεχνικής ανάλυσης, επιλογής μεθόδων κατασκευής και περιοδικού ελέγχου των κατασκευών που έγιναν, κατέστη δυνατό για την ομάδα του έργου να κατασκευάσει ασφαλείς και βιώσιμες κατασκευές αντιστήριξης για την υποστήριξη της κύριας εκσκαφής της εξορυκτικής σήραγγας. Τα επιλεγμένα μέσα στήριξης, τα οποία περιλαμβάνουν τοίχους υδαρούς πολτού, χαλύβδινες συνδέσεις και συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο αποδείχθηκαν αποτελεσματικά στην καταπολέμηση των πλευρικών πιέσεων της γης, της επιρροής των υπόγειων υδάτων και άλλων παραγόντων που υπαγορεύονται από τις συνθήκες της τοποθεσίας. Τα συστήματα κάθετης στήριξης στο Big Dig δείχνουν ότι στην κατασκευή πόλεων όπου η σταθερότητα και η ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας, η επιτυχία των κάθετων κατασκευών απαιτεί σοβαρή εξέταση πριν από τη διαδικασία κατασκευής.

Κεφάλαιο 7: Κεκλιμένα στηρίγματα (τοίχοι αντιστήριξης)

7.1 Παράδειγμα κεκλιμένης υποστήριξης σε λιμενική υποδομή: Έργο επέκτασης του λιμένα του Ρότερνταμ

7.1.1 Περιγραφή της κεκλιμένης στήριξης (τοίχος αντιστήριξης)

Η πιο συγκρίσιμη και πρόσφατη εφαρμογή κεκλιμένων στηρίξεων εντός των λιμένων ήταν το Port of Rotterdam Expansion Project που βρίσκεται στην Ολλανδία. Το Ρότερνταμ είναι το μεγαλύτερο λιμάνι της Ευρώπης και η ByKey διακινώντας μεγάλα πλοία διατηρεί μια πολύ σημαντική θέση στις διεθνείς εμπορευματικές μεταφορές και ως αποτέλεσμα του έργου Maasvlakte 2 το λιμάνι του Ρότερνταμ κατασκευάστηκε για τη διακίνηση εξαιρετικά μεγάλων πλοίων. Το έργο Maasvlakte 2 περιλάμβανε έτσι την κατασκευή νέας γης από τη θάλασσα που χρειαζόταν εκτεταμένες λιμενικές δομές, όπως κεκλιμένους τοίχους αντιστήριξης κατά μήκος της πρόσφατα διαμορφωμένης προκυμιάς που υποστηρίζει τις θέσεις ελλιμενισμού των λιμανιών και τις τερματικές περιοχές (de Gijt & Broeken, 2012).

Οι επικλινείς τοίχοι αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το έργο ήταν ζωτικής σημασίας για το έργο, καθώς συνέβαλαν στη διατήρηση της δομής της νέας ανακτημένης γης του λιμανιού. Αυτοί οι τοίχοι αντιστήριξης είχαν σκοπό να υποστηρίξουν την πίεση ανατροπής του ανασυσταθέντος εδάφους και επίσης να αποφύγουν την υπερφόρτωση φορτίων όπως φορτία, εμπορευματοκιβώτια και μηχανήματα. Χρειάστηκαν επίσης να διατηρήσουν μεγάλες πλευρικές δυνάμεις της γης και τα υδάτινα φορτία λόγω της εγγύτητας του λιμανιού στη Βόρεια Θάλασσα (den Uijl, 2014 p127).

Οι τοίχοι αντιστήριξης του λιμανιού κατασκευάστηκαν από πασσάλους από λαμαρίνα και σκυρόδεμα για να παρέχουν την απαραίτητη προϋπόθεση και ευελιξία που αναμένεται με έμφαση στις μεγάλες εδαφικές μάζες που θα στηριχθούν και στην υδραυλική πίεση που θα ασκείται από το νερό. Οι τοίχοι είχαν την τάση να χρησιμοποιούν με τον καλύτερο τρόπο τη διαθέσιμη δύναμη και να αποτρέπουν τα πλευρικά φορτία που μπορεί να οδηγήσουν σε μη βιωσιμότητα ειδικά σε μέρη όπως τα λιμάνια με υψηλές πιέσεις νερού και δυναμικά φορτία. Αυτός ο κεκλιμένος σχεδιασμός κατέστησε δυνατή την επίτευξη λιγότερων συνολικών μεγεθών των δομών συγκράτησης και αυτό ήταν οικονομικό όσον αφορά το κόστος και τη χρήση των υλικών χωρίς να χρειάζεται να τεθεί σε κίνδυνο η πτυχή της ασφάλειας, όπως αναφέρεται από το CIRIA (2015).

7.1.2 Γεωτεχνικές Προκλήσεις και Ανάλυση Ευστάθειας Κλίσης κατά την Κατασκευή

7.1.2.1 Συνθήκες εδάφους και ειδικές προκλήσεις της τοποθεσίας

Το θέμα των μαλακών εδαφών σχετικά με τη θέση του Maasvlakte 2 απαιτούσε περαιτέρω επιπλοκές λόγω του υψηλού υδροφόρου ορίζοντα και του γεγονότος ότι βρίσκεται δίπλα στη Βόρεια Θάλασσα. Πολλά έργα αποκατάστασης εκτελούνται σε θεμελιωμένα εδάφη, όπως χαλαρή άμμος και λάσπη, τα οποία έχουν μεγάλη πιθανότητα διαφορικής καθίζησης ή αστοχίας πρανών ή αστοχίας τοίχων. Σε αυτή την περίπτωση, η πρόσφατα ανακτηθείσα γη αποτελούνταν από χαλαρή βυθοκορημένη άμμο με πολύ χαμηλή φέρουσα ικανότητα και χρησιμοποιήθηκε για να υποστεί καθίζηση και πλευρική κίνηση κάθε φορά που ασκούνταν φορτία σε αυτήν (Jamiolkowski et al., 2014).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, διεξήχθη λεπτομερής έρευνα του εδάφους μέσω εργασιών διάτρησης σε συνδυασμό με τη συλλογή δειγμάτων και τη διεξαγωγή της δοκιμής διείσδυσης κώνου (CPT) με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής και των επιπτώσεων καθίζησης του ανακυκλωμένου υλικού πλήρωσης. Αυτές οι έρευνες έδειξαν το γεγονός ότι για να εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη απόδοση των τοίχων αντιστήριξης, καθώς και των υποδομών κοντά στο λάφυρα, το έδαφος θα πρέπει να σταθεροποιηθεί περαιτέρω (Massarsch, 2013).

Ένα από τα σημαντικότερα γεωτεχνικά ζητήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ήταν η διαφορική διευθέτηση. μια κατάσταση εδάφους κατά την οποία ένα μέρος της νεοσύστατης ανακτημένης γης θα καθιζάνει περισσότερο ή λιγότερο από τα άλλα μέρη που οδηγεί σε ανισορροπίες των δυνάμεων στους τοίχους αντιστήριξης. Αυτό ίσχυε ιδιαίτερα σε σχέση με τους τοίχους της αποβάθρας, καθώς οι βαρείς γερανοί καθώς και το φορτίο τοποθετούσαν επιπλέον φορτίο στο υπέδαφος. Για τον έλεγχο αυτού του κινδύνου, μέτρα όπως η δυναμική συμπίκνωση και οι σωροί συμπίεσης άμμου χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπίκνωση της χαλαρής άμμου, ενισχύοντας έτσι την φέρουσα ικανότητα (Verduin & Jacobs, 2012).

Επίσης, αυτό που ήταν "άλλο πρόβλημα" ήταν ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας που επηρέασε τη δυνατότητα κατασκευής. Η υψηλή πίεση του νερού είναι μία από τις κύριες αιτίες αστάθειας των τοίχων στις κατασκευές αντιστήριξης, καθώς το επίπεδο πίεσης στον τοίχο μπορεί στην πραγματικότητα να αυξηθεί με αλλαγές στη στάθμη του νερού για λόγους όπως

παλίρροιες ή ακόμα και καταιγίδες. Στην περίπτωση του λιμένα του Ρότερνταμ, αυτή η υδραυλική πίεση σε συνδυασμό με τη χαμηλή αντοχή των ανακτηθέντων εδαφών έκανε την κατάσταση κρίσιμη, όπου η αστάθεια του πρανούς και η αστοχία του τοίχου ήταν πιθανή.

7.1.2.2 Ανάλυση ευστάθειας κλίσης

Στην προσπάθεια να διασφαλιστεί η σταθερότητα του τοίχου αντιστήριξης κάτω από αναμενόμενα φορτία και περιβαλλοντικές ρυθμίσεις, οι γεωτεχνικοί μηχανικοί που συμμετείχαν στο έργο Maasvlakte 2 πραγματοποίησαν εκτενείς αναλύσεις ευστάθειας πρανών. Η ανάλυση ευστάθειας πλαγιάς απαιτούσε την αξιολόγηση στατικών και δυναμικών σεναρίων, λαμβάνοντας υπόψη την έκθεση του λιμένα τόσο στη ναυτιλιακή δραστηριότητα όσο και στις διακυμάνσεις της παλίρροιας, καθώς και σε σπάνια σεισμικά συμβάντα (den Uijl, 2014).

Για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής και για την προσομοίωση της απόκρισης των τοίχων αντιστήριξης σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Τα μοντέλα FEA ενσωμάτωσαν την ακανόνιστη φύση της συμπεριφοράς του εδάφους, τις επιρροές της πίεσης του νερού και τις συμπληρωματικές καταπονήσεις από γερανούς και στοιβαγμένα δοχεία. Ο σκοπός αυτών των μοντέλων ήταν ο εντοπισμός πιθανών τρόπων αστοχίας, όπως η ολίσθηση ή η περιστροφική αστοχία, βοηθώντας παράλληλα τους μηχανικούς να βελτιώσουν τον σχεδιασμό του τοίχου προκειμένου να εξαλειφθούν τέτοιες αστοχίες (Schmertmann, 2016).

Εκτός από τη στατική ανάλυση, διεξήχθη ανάλυση δυναμικής ευστάθειας πρανών για να μετρηθεί ο τρόπος με τον οποίο θα ενεργούσαν οι τοίχοι αντιστήριξης σε σοβαρά σενάρια, όπως καταιγίδες ή σεισμικές διαταραχές. Καθώς οι σεισμοί είναι σπάνιοι στην Ολλανδία, ο κίνδυνος σεισμικής δραστηριότητας ήταν ωστόσο προτεραιότητα, ειδικά λόγω του ουσιαστικού ρόλου του λιμανιού στο διεθνές εμπόριο και των καταστροφικών επιπτώσεων που θα μπορούσε να έχει μια κατάρρευση τείχους. Η ψευδοστατική μέθοδος οδήγησε σε μια εκτίμηση που δείχνει ότι οι τοίχοι θα παρουσίαζαν σταθερότητα υπό μέτρια σεισμική φόρτιση (Jamiolkowski et al., 2014).

Πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση αποστράγγισης πίσω από τους τοίχους αντιστήριξης για τη μείωση της υδροστατικής πίεσης για βελτιωμένη σταθερότητα του τοίχου. Το σύστημα εγκατέστησε κάθετους σωλήνες αποστράγγισης και οριζόντια στρώματα αποστράγγισης που επέτρεπαν την αποστράγγιση του νερού πίσω από τον τοίχο, μειώνοντας τόσο τη συσσώρευση πίεσης νερού όσο και τον κίνδυνο που δημιουργεί η υδραυλική ανύψωση (Schmertmann, 2016).

7.1.3 Τεχνικές Κατασκευής και Μέτρα Ευστάθειας

7.1.3.1 Σωροί από λαμαρίνα χάλυβα και τοίχοι από σκυρόδεμα

Στο έργο Maasvlakte 2, η κύρια μέθοδος για την κατασκευή των κεκλιμένων τοίχων αντιστήριξης ήταν η τοποθέτηση πασσάλων από λαμαρίνα χάλυβα. Επειδή παρέχουν μια ευέλικτη και ανθεκτική επιλογή για τοίχους αντιστήριξης που διαστέλλονται από μεγάλες πιέσεις γης και νερού, οι σωροί από χαλύβδινα φύλλα είναι συχνά η προτιμώμενη επιλογή για τις λιμενικές υποδομές. Οδηγημένοι στο έδαφος σε βάθη που φτάνουν τα 40 μέτρα, οι σωροί φύλλων απλώς για να διασφαλίσουν ότι τρύπησαν τα ισχυρότερα υποκείμενα εδάφη, δίνοντας στον τοίχο πρόσθετη σταθερότητα (Verduin & Jacobs, 2012).

Μετά την τοποθέτηση των πασσάλων λαμαρίνας, χύθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα για να αναπτυχθεί ένα σύστημα σύνθετων τοίχων. Το σκυρόδεμα συνεισέφερε επιπλέον αντοχή και ακαμψία, γεγονός που έκανε τον τοίχο ικανό να αντιστέκεται τόσο στις πλευρικές πιέσεις της γης όσο και στις δυναμικές απαιτήσεις που προκύπτουν από τις λιμενικές εργασίες, ειδικά από τις μετακινήσεις γερανών και εμπορευματοκιβωτίων. Η κλίση σχεδιασμού του τοίχου αντιστήριξης μείωσε τις συνολικές ροπές κάμψης στην κατασκευή, βελτιώνοντας την απόδοση του υλικού, παρέχοντας παράλληλα ουσιαστική αντοχή (CIRIA, 2015).

Κατά την κατασκευή των κεκλιμένων τοίχων αντιστήριξης, χρησιμοποιήθηκαν προεντεταμένες αγκυρώσεις εδάφους για την παροχή συμπληρωματικής στήριξης σε πλάγια κατεύθυνση. Σε ίσα διαστήματα κατά μήκος του ύψους του τοίχου, μπήκαν άγκυρες και απλώνονταν κάτω στα στερεά στρώματα εδάφους πίσω από αυτόν. Η μεταφορά κάποιας πλευρικής πίεσης γης μακριά από τον τοίχο στο σταθερό έδαφος πίσω από αυτόν προέκυψε από την προένταση των αγκυρίων από τους μηχανικούς, η οποία μείωσε τη συνολική τάση στον τοίχο και βελτίωσε τη σταθερότητά του (Massarsch, 2013).

7.1.3.2 Τεχνικές βελτίωσης του εδάφους

Σημειώσαμε νωρίτερα ότι οι τεχνικές βελτίωσης του εδάφους έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία κατασκευής των κεκλιμένων τοίχων αντιστήριξης. Η δυναμική συμπίκνωση χρησίμευσε για την πύκνωση της χαλαρής ανακτημένης άμμου, αυξάνοντας την αντοχή τους και μειώνοντας τον κίνδυνο καθίζησης. (Jamolkowski et al., 2014).

Σε τοποθεσίες που χρειάζονται ενισχυμένη σταθεροποίηση του εδάφους, τοποθετήθηκαν σωροί συμπίεσης άμμου. Η άμμος, συμπιεσμένη μέσα σε έναν χαλύβδινο σωλήνα που γειώθηκε οδηγώντας σε αυτόν, έχτισε αυτούς τους σωρούς. Η ενίσχυση του εδάφους και η μείωση του κινδύνου πλευρικής μετακίνησης, ειδικά κοντά στα τοιχώματα της προκυμαίας όπου αναμένονταν γερανοί και βάρη δοχείων, ωφελήθηκαν από τους σωρούς συμπίεσης άμμου (Verduin & Jacobs, 2012).

7.1.3.3 είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση και τη διατήρηση.

Εγκαταστάθηκε ένα σύστημα παρακολούθησης για την ανάλυση οποιασδήποτε κίνησης ή καθίζησης συμβαίνει τόσο στους τοίχους αντιστήριξης όσο και στο παρακείμενο έδαφος με σκοπό τη διασφάλιση της σταθερότητας των τοίχων αντιστήριξης για μεγάλες αποστάσεις. Αυτό το σύστημα περιελάμβανε κλισόμετρα και μετρητές καθίζησης που έδιναν άμεσα δεδομένα για την απόδοση των τοίχων. Η παρακολούθηση των δεδομένων επέτρεψε στους μηχανικούς να αναγνωρίσουν και να αντιμετωπίσουν πρώιμα σημάδια αστάθειας, εάν προκύψει ανάγκη για διορθωτικά μέτρα (den Uijl, 2014).

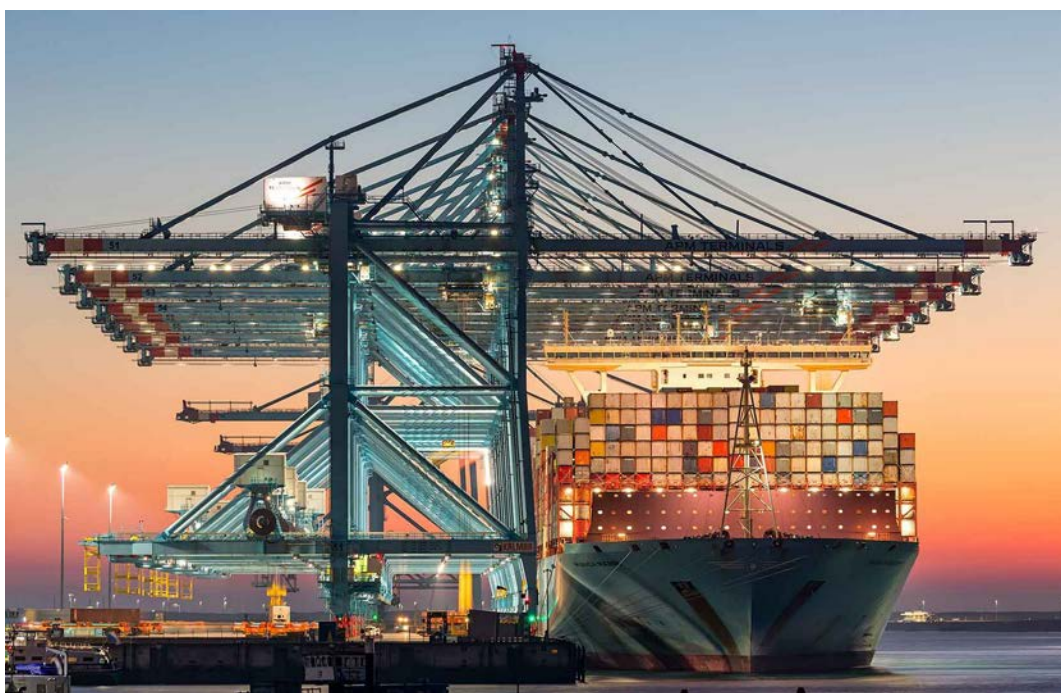
Η συντήρηση του συστήματος αποχέτευσης σε τακτική βάση ήταν απαραίτητη για τη διαρκή απόδοση του τοίχου εκτός από το σύστημα παρακολούθησης. Για να μειωθεί ο κίνδυνος συσσώρευσης υδροστατικής πίεσης, έπρεπε να διατηρηθεί η απόσταση των υπολειμμάτων στους σωλήνες και τα στρώματα αποστράγγισης έτσι ώστε το νερό να μπορεί να κινείται ελεύθερα έξω από πίσω από τον τοίχο. Χάρη στη συντήρηση του συστήματος αποχέτευσης, η ομάδα του έργου κατάφερε να αυξήσει το προσδόκιμο ζωής των τοίχων αντιστήριξης και να αποφύγει προβλήματα που σχετίζονται με την πίεση του νερού και την αστάθεια του εδάφους (Schmertmann, 2016).

7.1.4 Φωτογραφίες και σχέδια

Έργο επέκτασης του λιμανιού του Ρότερνταμ:



Εικόνα 7.



Εικόνα 8.

- Φωτογραφίες κατασκευής: Το έργο Maasvlakte 2 περιλαμβάνει φωτογραφίες που απεικονίζουν την εγκατάσταση πασσάλων από χαλύβδινα φύλλα και τη διαδικασία έκχυσης οπλισμένου σκυροδέματος για τους τοίχους αντιστήριξης. Οι εικόνες απεικονίζουν επίσης την εφαρμογή αγκυρώσεων εδάφους και τεχνικών για τη βελτίωση του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των πασσάλων δυναμικής συμπίκνωσης και συμπίεσης άμμου (Verduin & Jacobs, 2012).
- Τεχνικά σχέδια: Η πρόταση σκιαγραφεί τις θέσεις των αγκυρώσεων εδάφους μαζί με το βάθος οδήγησης πασσάλων, δίνοντας μια εικόνα για τις μηχανικές κρίσεις που διατήρησαν τη σταθερότητα του τοίχου υπό σημαντικά φορτία (CIRIA, 2015).

7.1.5 Συμπέρασμα

Ενδεικτικά, το έργο Maasvlakte 2 στο λιμάνι του Ρότερνταμ αντιπροσωπεύει τη γόνιμη σχεδίαση και κατασκευή κεκλιμένων τοίχων αντιστήριξης σε λιμενική υποδομή. Μέσω μιας λεπτομερούς γεωτεχνικής ανάλυσης σε συνδυασμό με στρατηγικές βελτίωσης του εδάφους και την εφαρμογή σύγχρονων κατασκευαστικών τεχνικών, οι μηχανικοί κατάφεραν να διαμορφώσουν σταθερούς και ελαστικούς τοίχους αντιστήριξης ικανούς να αντέχουν μεγάλες πλευρικές πιέσεις γης και δυναμική φόρτιση. Αυτό το έργο τονίζει την κρίσιμη φύση των κεκλιμένων στηρίξεων για την τρέχουσα υποδομή και απεικονίζει τη δημιουργικότητα της μηχανικής που απαιτείται για την αντιμετώπιση δύσκολων εδαφικών και περιβαλλοντικών προκλήσεων.

Κεφάλαιο 8: Έργο Προστασίας Περιβάλλοντος

8.1 Έργο χωματερής: Η χωματερή Mariannhill, Νότια Αφρική

8.1.1 Περιγραφή του έργου XYTA

Η χωματερή Mariannhill του Durban θεωρείται ευρέως ως κορυφαίο μοντέλο φιλικής προς το περιβάλλον διαχείρισης χωματερών. Η πρόθεση του σχεδιασμού του χώρου υγειονομικής ταφής ήταν να διαχειριστεί όχι μόνο τη διάθεση απορριμμάτων για την περιοχή, αλλά και να παραδειγματίσει βιώσιμες πρακτικές υγειονομικής ταφής εστιάζοντας στην προστασία του περιβάλλοντος, την ανάκτηση πόρων και τις αλληλεπιδράσεις της κοινότητας (Fourie, 2015).

Ο χώρος υγειονομικής ταφής καταλαμβάνει σχεδόν 50 εκτάρια και έχει ένα προβλεπόμενο προσδόκιμο ζωής για να εξυπηρετήσει την πόλη για αρκετές δεκαετίες, επεξεργάζοντας χιλιάδες τόνους απορριμμάτων ετησίως. Όχι όπως οι συμβατικοί χώροι υγειονομικής ταφής, το Mariannhill χρησιμοποιεί προηγμένα περιβαλλοντικά γεωτεχνικά μέτρα και μέτρα σταθερότητας πρανών για να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, θέτοντας ένα πρότυπο για την προστασία του περιβάλλοντος.

Επίσης, το έργο χρησιμοποιεί αποτελεσματικές στρατηγικές για να σταματήσει τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων, να ελέγξει την απορροή πάνω από το έδαφος και να διατηρήσει τη σταθερότητα της πλαγιάς μέσω μηχανικών κυψελών υγειονομικής ταφής που έχουν κατασκευαστεί για να ενθαρρύνουν την ασφαλή και ελεγχόμενη αποσύνθεση των αποβλήτων (Fourie & Morris, 2014).

Ο χώρος υγειονομικής ταφής Mariannhill ξεχωρίζει για μια σημαντική καινοτομία που συνδυάζεται με τη φύση, χαρακτηρίζοντας μια ουδέτερη ζώνη πλούσια σε γηγενή φυτά και ενδιαιτήματα για την άγρια ζωή. Οι φορείς εκμετάλλευσης του χώρου υγειονομικής ταφής έχουν καταβάλει προσπάθειες τόσο για τη μείωση της οπτικής επίδρασης του χώρου όσο και για τη βελτίωση της βιοποικιλότητας με την αποκατάσταση της έκτασης που περιβάλλει τον χώρο υγειονομικής ταφής. Ως αποτέλεσμα, η πρωτοβουλία έχει συγκεντρώσει μια ποικιλία βραβείων που γιορτάζουν την περιβαλλοντική ποιότητα και τη βιωσιμότητα (Blight, 2017).

8.1.2 Εστίαση στην περιβαλλοντική γεωτεχνική και τη σταθερότητα των πρανών για την πρόληψη της μόλυνσης

8.1.2.1 Γεωτεχνικές Προκλήσεις στο Σχεδιασμό ΧΥΤΑ

Ο σχεδιασμός των χωματερών αντιμετωπίζει πολλά γεωτεχνικά ζητήματα, ιδιαίτερα όσον αφορά την προσπάθεια να σταματήσει η μόλυνση των υπόγειων υδάτων και των τοπικών οικοσυστημάτων. Ο ΧΥΤΑ Mariannhill σε ένα μεταβλητό έδαφος εδάφους απαιτούσε λεπτομερή γεωτεχνικό σχεδιασμό για την εξασφάλιση της σταθερότητας των πρανών και τον περιορισμό των δυνητικά επικίνδυνων υλικών. Λόγω της ποικίλης διαπερατότητάς τους και της απειλής που θέτει η διείσδυση των υπόγειων υδάτων λόγω θραυσμάτων, η υποκείμενη γεωλογία της τοποθεσίας από ψαμμίτη και σχιστόλιθο δημιουργεί προκλήσεις για τη διαχείριση των στραγγισμάτων (Glanville & Fourie, 2016).

Ένα βασικό περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με το σχεδιασμό των χωματερών είναι η παραγωγή στραγγισμάτων - μια λύση που προκύπτει από το νερό που διέρχεται μέσα από

τα απόβλητα ενώ συλλέγει ρύπους. Σε περίπτωση ακατάλληλου χειρισμού, τα στραγγίσματα μπορεί να διαρρεύσουν στα υπόγεια ύδατα και να παρουσιάσουν σημαντικούς κινδύνους για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Μια πολυδιάστατη μεθοδολογία διασφαλίζει ότι τα στραγγίσματα συγκρατούνται και οδηγούνται προς ένα κέντρο επεξεργασίας για την απομάκρυνση των ρύπων πριν από την ασφαλή απόρριψη ή την επαναχρησιμοποίηση.

8.1.2.2 Σκέψεις σχετικά με τη σταθερότητα της κλίσης

Το επικλινές έδαφος της τοποθεσίας Mariannhill καθιστά τη σταθερότητα των πλαγιών βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό των χωματερών. Η διατήρηση της σταθερότητας της μάζας των απορριμμάτων, εκτός από τη διασφάλιση της ακεραιότητας του συστήματος επένδυσης, είναι απαραίτητη για την αποφυγή του κινδύνου κατολισθήσεων ή αστοχίας που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ευρεία μόλυνση. Ως απάντηση σε αυτή την πρόκληση, μηχανικοί από το Mariannhill πραγματοποίησαν εκτεταμένες αναλύσεις σταθερότητας πλαγιών για να εγγυηθούν ότι οι κυψέλες απορριμμάτων του XYTA σχεδιάστηκαν για να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα αστοχίας πλαγιάς (Glanville & Fourie, 2016).

Το εύρος της ανάλυσης ευστάθειας πρανών συνίστατο στην αξιολόγηση στατικών και δυναμικών σεναρίων, με ιδιαίτερη προσοχή στην πιθανή ρευστοποίηση ή κίνηση που προκαλείται από έντονη βροχή ή σεισμική δραστηριότητα.

Η μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της αντίδρασης της μάζας των αποβλήτων και του συστήματος επένδυσης σε απόκριση σε διαφορετικές καταστάσεις προφίλ, συμπεριλαμβανομένης της σταθερής συσσώρευσης αποβλήτων, των δυναμικών επιπέδων των υπόγειων υδάτων και των αλλαγών στις μηχανικές ιδιότητες των αποβλήτων λόγω αποσύνθεσης (Kumar & Sharma, 2015). Η μελέτη εντόπισε τις ελάχιστες γωνίες κλίσης για τα κύτταρα υγειονομικής ταφής, έτσι ώστε ο παράγοντας ασφάλειας να παραμένει πάνω από το κατώτερο όριο ακόμη και στα χειρότερα σενάρια.

Στο σχέδιο ενσωματώθηκαν μέτρα που στοχεύουν τόσο στη σταθερότητα των πρανών όσο και στη διαχείριση της απορροής των επιφανειακών υδάτων με παράλληλη πρόληψη της διάβρωσης. Ο σχεδιασμός του χώρου υγειονομικής ταφής περιελάμβανε μηχανική αποστράγγιση, με βέργες και κανάλια που οδηγούν τα επιφανειακά ύδατα μακριά από τα κυψέλες αποβλήτων και προς συγκεκριμένες περιοχές συλλογής. Αυτά τα συστήματα εμποδίζουν την είσοδο του νερού στη μάζα των αποβλήτων, μειώνοντας κατά συνέπεια την παραγωγή στραγγισμάτων και διατηρώντας τη σταθερότητα των πλαγιών (Fourie & Morris,

2014). κυμαινόμενα επίπεδα υπόγειων υδάτων και τα αποτελέσματα της αποσύνθεσης, τα οποία μπορούν να αλλάξουν τις μηχανικές ιδιότητες των αποβλήτων (Kumar & Sharma, 2015). Η ανάλυση προσδιόρισε τις βέλτιστες γωνίες κλίσης για τις κυψέλες χωματελής, διασφαλίζοντας ότι ο παράγοντας ασφάλειας παρέμεινε πάνω από τα ελάχιστα αποδεκτά όρια ακόμη και στα χειρότερα σενάρια.

Εκτός από τη σταθερότητα των πρανών, ο σχεδιασμός ενσωμάτωσε μέτρα για τον έλεγχο της απορροής των επιφανειακών υδάτων και την πρόληψη της διάβρωσης. Ο χώρος υγειονομικής ταφής κατασκευάστηκε με μηχανικά συστήματα αποστράγγισης, συμπεριλαμβανομένων των βέργων και των καναλιών, για να κατευθύνουν τα επιφανειακά ύδατα μακριά από τις κυψέλες απορριμμάτων και προς τα καθορισμένα σημεία συλλογής. Αυτά τα συστήματα βοηθούν στην πρόληψη της διείσδυσης του νερού στη μάζα των αποβλήτων, μειώνοντας την παραγωγή στραγγισμάτων και διατηρώντας τη σταθερότητα των πρανών (Fourie & Morris, 2014).

8.1.2.3 Συστήματα Liner μαζί με Διαχείριση στραγγισμάτων

Η διασφάλιση του περιορισμού των στραγγισμάτων με παράλληλη προστασία των υπόγειων υδάτων είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των χωματερών και το σύστημα τακτικών γραμμών στο Mariannhill είναι μια σημαντική πτυχή αυτής της στρατηγικής που διαχωρίζει τα απόβλητα από το περιβάλλον. Το κύριο συστατικό της επένδυσης είναι η μεμβράνη HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας), η οποία όχι μόνο είναι πολύ ανθεκτική στη χημική αποικοδόμηση, αλλά παρέχει επίσης ένα διαρκές φράγμα κατά της μετανάστευσης των στραγγισμάτων. Ένα συμπαγές στρώμα αργίλου δρα ως δευτερεύον φράγμα κάτω από την επένδυση HDPE, για τυχόν στραγγίσματα που μπορεί να διαπεράσουν την επένδυση (Glanville & Fourie, 2016).

Ο ΧΥΤΑ εφαρμόζει σύστημα συλλογής στραγγισμάτων πάνω από την επένδυση για αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος επένδυσης. Αυτό το σύστημα αποτελεί ένα διάτρητο δίκτυο σωλήνων μέσα σε ένα στρώμα χαλίκιου που συλλαμβάνει τα στραγγίσματα καθώς αναπτύσσονται και τα διοχετεύει σε μια ενιαία τοποθεσία συλλογής. Από εκείνο το σημείο, τα στραγγίσματα αντλούνται στην εγκατάσταση επεξεργασίας για μια σειρά χημικών και βιολογικών επεξεργασιών που έχουν σχεδιαστεί για την αφαίρεση επικίνδυνων ρύπων πριν από την ασφαλή απόρριψη (Blight, 2017).

Ο σχεδιασμός του χώρου υγειονομικής ταφής ενσωματώνει στοιχεία για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων εκτός από την επένδυση και το σύστημα συλλογής. Γύρω από τον χώρο υγειονομικής ταφής έχουν δημιουργηθεί φρεάτια παρακολούθησης για συνεχή έλεγχο για δείκτες μόλυνσης. Αυτή η προληπτική στρατηγική επιβεβαιώνει ότι τυχόν πιθανές αστοχίες στο σύστημα τακτικών γραμμών γίνονται γρήγορα αντιληπτές, επιτρέποντας την άμεση αποκατάσταση για τον αποκλεισμό πιθανής περιβαλλοντικής βλάβης (Fourie & Morris, 2014).

8. Η διαχείριση του αερίου μαζί με την ανάκτηση ενέργειας είναι μέρος του 1.2.4.

Όπως σε κάθε ΧΥΤΑ, η αποσύνθεση της οργανικής ύλης στο Mariannhill παράγει έναν τύπο αερίου που περιλαμβάνει μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το μεθάνιο είναι ένα αέριο θερμοκηπίου με μεγάλη ισχύ και η ανεξέλεγκτη εκπομπή στον αέρα μπορεί να αυξήσει σημαντικά την κλιματική αλλαγή. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι το επίκεντρο του ΧΥΤΑ, ο οποίος ενσωματώνει ένα πλήρες σύστημα διαχείρισης αερίου ικανό να δεσμεύει και να χρησιμοποιεί το μεθάνιο που παράγεται από τα απόβλητα (Kumar & Sharma, 2015).

Ένα σύστημα συλλογής αερίου περιλαμβάνει κατακόρυφα φρεάτια που διεισδύουν στις κυψέλες αποβλήτων και εξάγουν το αέριο όπως αυτό δημιουργείται. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνει δύο στόχους: μειώνει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τους χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ παρέχει επίσης μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο για να εξισορροπήσει τον οικολογικό αντίκτυπο του ΧΥΤΑ (Blight, 2017).

Εκτός από τη μείωση των εκπομπών, το σύστημα διαχείρισης αερίου υποστηρίζει τη σταθερότητα του ΧΥΤΑ. Με τη συλλογή αερίου από τη μάζα των αποβλήτων, το σύστημα μειώνει την πίεση που συσσωρεύεται κατά την αποσύνθεση. Αν αφεθεί χωρίς παρακολούθηση, αυτή η τάση μπορεί να προκαλέσει μετανάστευση αερίου μέσω του συστήματος επένδυσης ή μπορεί να προκαλέσει μικρές εκρήξεις που περιορίζονται στον χώρο υγειονομικής ταφής. Οι έλεγχοι στα επίπεδα αερίων επιτρέπουν στο σύστημα να διατηρήσει τη δομική ακεραιότητα των κυψελών αποβλήτων ενώ μειώνει τον κίνδυνο περιβαλλοντικής ρύπανσης (Fourie & Morris, 2014).

8.1.3 Φωτογραφίες και σχέδια

Το έργο της χωματερής Mariannhill:



Εικόνα 9.

- Φωτογραφίες κατασκευής: Σε μια εικόνα από τη χωματερή φαίνονται οι διαδικασίες εγκατάστασης για το σύστημα επένδυσης HDPE, οι σωλήνες συλλογής στραγγισμάτων και τα φρεάτια εξόρυξης αερίου. Αυτές οι εικόνες δείχνουν μια οπτική ερμηνεία των μηχανικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την αναστολή της μόλυνσης και την εξασφάλιση της σταθερότητας της πλαγιάς. Οι φωτογραφίες δείχνουν ιδιαίτερα την κατασκευή των κυψελών υγειονομικής ταφής σε επικλινές έδαφος, απεικονίζοντας τα εμπόδια που εμπλέκονται στη διαχείριση των απορριμμάτων σε ένα περίπλοκο γεωτεχνικά περιβάλλον (Glanville & Fourie, 2016).
- Τεχνικά σχέδια: Τα σχέδια για το Mariannhill περιλαμβάνουν λεπτομερείς διατομές των κυψελών υγειονομικής ταφής που αποδεικνύουν το πολυεπίπεδο σύστημα επένδυσης, την υποδομή συλλογής στραγγισμάτων και το σύστημα

εξόρυξης αερίου. Οι εικόνες σε αυτά τα σχέδια αντικατοπτρίζουν τα συστήματα αποστράγγισης που δημιουργήθηκαν για την επίβλεψη της απορροής των επιφανειακών υδάτων μαζί με τα φρεάτια παρακολούθησης που έχουν σχεδιαστεί για τον έλεγχο της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Τα σχέδια αποκαλύπτουν πώς ο σχεδιασμός του έργου συνδέει τις προσπάθειες προστασίας του περιβάλλοντος με τις λειτουργικές πολιτικές διαχείρισης απορριμμάτων (Fourie & Morris, 2014).

8.1.4 Συμπέρασμα

Η χωματερή Mariannhill δείχνει πώς συνδυάζονται οι περιβαλλοντικές γεωτεχνικές τεχνικές και η αειφόρος διαχείριση των απορριμμάτων στο σχεδιασμό των σύγχρονων χωματερών. Το έργο μειώνει επιτυχώς τον κίνδυνο μόλυνσης και περιβαλλοντικής ζημίας χρησιμοποιώντας προηγμένα συστήματα επένδυσης, τεχνικές διαχείρισης στραγγισμάτων και αερίων και ανάλυση ευστάθειας πρανών. Το έργο αποκαλύπτει τη σημασία της αξιολόγησης τόσο των γεωτεχνικών όσο και των περιβαλλοντικών προκλήσεων κατά την κατασκευή χωματερών, ιδιαίτερα σε περίπλοκα εδαφικά περιβάλλοντα και όπου τα υπόγεια ύδατα είναι άφθονα.

Σύναψη

8.2 Σύνοψη Θεωρητικών Ενοράσεων και Πρακτικών Εφαρμογών

Η συζήτηση σε αυτήν την έκθεση καλύπτει εκτενώς τη ζωτική σημασία της ευστάθειας των πρανών σε πολλά γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά έργα, που εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα θεωρητικών προσεγγίσεων και πρακτικών τεχνικών. Αυτή η ανάλυση ξεκίνησε με μια έρευνα σε μεθόδους για τη σταθερότητα της κλίσης, που περιλαμβάνει την ψευδοστατική προσέγγιση, τη μέθοδο Newmark sliding block και την αριθμητική προσομοίωση. Οι μέθοδοι που υπάρχουν δίνουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να προβλέψουν μελλοντικές αστοχίες κλίσης και να αξιολογήσουν τους κινδύνους, ειδικά σε περιοχές επιρρεπείς σε σεισμική δραστηριότητα, διείσδυση υπόγειων υδάτων ή κακές εδαφικές συνθήκες.

Η ψευδοστατική μέθοδος που ορίζεται στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει μια απλοποιημένη αλλά σημαντική μέθοδο για την εκτίμηση των σεισμικών δυνάμεων σε πρανές. Αυτή η τεχνική μετατρέπει μεταβλητές δυνάμεις τρόμου της γης σε ισοδύναμες στατικές δυνάμεις, επιτρέποντας στους μηχανικούς να εκτελούν συμβατικές τεχνικές οριακής ισορροπίας για μελέτες ευστάθειας πρανών (Rathje & Bray, 2013). Παρά τα μειονεκτήματά της στην αναπαράσταση της χρονικής εξάρτησης των σεισμικών γεγονότων, η ψευδοστατική μέθοδος είναι μια σημαντική πηγή για προκαταρκτικές εκτιμήσεις ευστάθειας πρανών μεγάλων έργων υποδομής σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα.

Όπως εισήχθη στο Κεφάλαιο 3, η μέθοδος του συρόμενου μπλοκ Newmark συμπληρώνει την ψευδοστατική μέθοδο επικεντρώνοντας τη μετατόπιση σε αντίθεση με τη σταθερότητα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει σημαντική κατανόηση των διαρκών αλλαγών στις θέσεις κλίσης κάτω από σεισμικά φορτία, οι οποίες είναι σημαντικές για την επινόηση υποδομών που μπορούν να φιλοξενήσουν επιδέξια την κίνηση και να παραμείνουν ασφαλείς από καταστροφές (Jibson, 2011). Οι εφαρμογές αυτής της μεθόδου, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που παρουσιάστηκαν στην ανάπτυξη του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής San Onofre στις ΗΠΑ, αποκαλύπτουν την κρίσιμη σημασία της στη μείωση των κινδύνων που προκαλούνται από τους σεισμούς και στην ασφάλεια των θεμελιωδών υποδομών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τεχνικές αριθμητικής προσομοίωσης που σχετίζονται με την ανάλυση ευστάθειας κλίσης, όπως μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και μέθοδοι διακριτών στοιχείων (DEM). Η χρήση αυτών των αναπτυγμένων τεχνικών επιτρέπει στους μηχανικούς να δημιουργούν ακριβή μοντέλα περίπλοκων γεωμετριών κλίσης και ετερογενών υλικών εδάφους με τρόπο ανώτερο από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επέτρεψε σε έργα, συμπεριλαμβανομένου του φράγματος Three Gorges στην Κίνα, να προσθέσουν αποτελεσματικά μέτρα για τη σταθερότητα των πρανών στο σχεδιασμό τους, διασφαλίζοντας έτσι τη σταθερότητα της πλαγιάς κάτω από ποικίλες στατικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης (Zienkiewicz et al., 2005).

Η έκθεση απεικονίζει την πρακτική χρήση των τεχνικών ευστάθειας πρανών σε ζωντανά έργα, καθώς και παρέχει θεωρητικά μοντέλα. Τα κεφάλαια 5 και 6 καταδεικνύουν πώς η ευστάθεια των πρανών είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή φραγμάτων από πέτρα. Για παράδειγμα, το φράγμα Möhne στη Γερμανία και το Aswan Low Dam στην Αίγυπτο

ασχολήθηκαν και τα δύο με σημαντικά γεωτεχνικά ζητήματα σχετικά με την κλίση και τη σταθερότητα του θεμελίου. Λόγω των ενδελεχών γεωτεχνικών ερευνών και της σχέσης των αναλύσεων ευστάθειας των πρανών, αυτά τα έργα μείωσαν με επιτυχία τους κινδύνους καθίζησης θεμελίωσης, κατολισθήσεων και δομικής αστοχίας (Hager & Boes, 2014; Owen, 2014).

Η ανάλυση των τοίχων αντιστήριξης σε έργα αστικών και λιμενικών έργων στα Κεφάλαια 6 και 7 υπογραμμίζει τη σημασία της ευστάθειας των πρανών σε καταστάσεις υψηλού κινδύνου. Ειδικότερα, οι τοίχοι αντιστήριξης που αναπτύχθηκαν για το έργο Central Artery/Tunnel Project (the Big Dig) στη Βοστώνη και το έργο Maasvlakte 2 στο λιμάνι του Ρότερνταμ δείχνουν πώς οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν κεκλιμένα στηρίγματα και σύγχρονες κατασκευαστικές τεχνικές για να κάνουν τις πλαγιές πιο σταθερές σε δυσμενές έδαφος. συνθήκες (Clough & O'Rourke, 2016; Verduin & Jacobs, 2012). Για αυτά τα έργα, ήταν απαραίτητη μια λεπτομερής γεωτεχνική ανάλυση για την κάλυψη παραγόντων όπως η πλευρική πίεση της γης, ο έλεγχος των υπόγειων υδάτων και η δυναμική φόρτιση είτε από σεισμικές δραστηριότητες είτε από κινήσεις πλοίων. Η αποτελεσματική επίτευξη αυτών των έργων καταδεικνύει τη χρησιμότητα των σύγχρονων τεχνικών σταθεροποίησης πρανών για την παροχή μακροπρόθεσμης ασφάλειας και αποτελεσματικότητας βασικών υποδομών.

Τέλος, το Κεφάλαιο 8 εξέτασε την περιβαλλοντική γεωτεχνική καθώς και τη σταθερότητα των πρανών που σχετίζονται με έργα υγειονομικής ταφής. Η υγειονομική ταφή Mariannhill στη Νότια Αφρική δείχνει πώς τα έργα που επικεντρώνονται στο περιβάλλον μπορούν να υιοθετήσουν επικερδώς μέτρα σταθερότητας πλαγιών για την πρόληψη της μόλυνσης και την υποστήριξη της βιωσιμότητας.

8. Η κρίσιμη σημασία της ευστάθειας των πρανών είναι εμφανής σε έργα που σχετίζονται με τη γεωτεχνική και περιβαλλοντική μηχανική.

Η επιτυχία μιας σειράς έργων γεωτεχνικής και περιβαλλοντικής μηχανικής εξαρτάται από τη σταθερότητα των πρανών. Οι αστοχίες πρανών μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές, με αποτέλεσμα θύματα, καταστροφή ιδιοκτησίας και μεγάλη περιβαλλοντική βλάβη. Ως αποτέλεσμα, η ευστάθεια των πρανών αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα για τους μηχανικούς που συμμετέχουν σε έργα που καλύπτουν τα πάντα, από την ανάπτυξη υποδομών έως τη διαχείριση του περιβάλλοντος.

Στη γεωτεχνική μηχανική, η σταθερότητα των πρανών είναι κρίσιμης σημασίας λόγω της θεμελιώδους μεταβλητότητας που υπάρχει στα υλικά του εδάφους και των πετρωμάτων. Σε αντίθεση με τα τεχνητά κατασκευασμένα υλικά όπως ο χάλυβας ή το σκυρόδεμα, τα χαρακτηριστικά των φυσικών υλικών μπορεί να αλλάζουν σημαντικά ανάλογα με το μακιγιάζ, τα επίπεδα υγρασίας και το ιστορικό φόρτισής τους. Αυτή η μεταβλητότητα επιβάλλει ένα στοιχείο αβεβαιότητας στον γεωτεχνικό σχεδιασμό, καθιστώντας απαραίτητο ότι οι μηχανικοί που διεξάγουν λεπτομερείς έρευνες τοποθεσίας χρησιμοποιούν διεξοδικές αναλυτικές προσεγγίσεις για τη μελέτη της ευστάθειας των πρανών (Duncan & Wright, 2005).

Η σταθερότητα των πρανών είναι εξαιρετικά σημαντική σε περιοχές επιρρεπείς σε σεισμική δραστηριότητα, καθώς οι σεισμοί θα μπορούσαν να προκαλέσουν τόσο κατολισθήσεις όσο και μεγάλες ζημιές στις υποδομές. Οι καταστάσεις που καλύπτονται σε αυτήν την έκθεση, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής της μεθόδου Newmark στην ανάλυση ευστάθειας σεισμικής πλαγιάς, καταδεικνύουν ότι οι μηχανικοί μπορούν να μειώσουν αυτούς τους κινδύνους με μηχανολογικές κλίσεις που μπορούν να επιτρέψουν μετατόπιση χωρίς να οδηγήσουν σε κρίσιμη αστοχία (Jibson, 2011).

Επιπλέον, η χρήση μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης επιτρέπει στους μηχανικούς να μοντελοποιούν τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ εδάφους, βράχου και σεισμικών δυνάμεων, παρέχοντας μια πιο ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κλίσης υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης (Zhu et al., 2018).

Το έργο Central Artery/Tunnel Project στη Βοστώνη καταδεικνύει ότι η σταθερότητα της πλαγιάς είναι σημαντική για την ασφάλεια συστημάτων αστικών υποδομών όπως κτίρια, δρόμοι και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Ο σχεδιασμός των συνήθως χρησιμοποιούμενων τοίχων αντιστήριξης για τη στήριξη εκσκαφής και την πρόληψη της κίνησης του εδάφους πρέπει να χειρίζεται τόσο τις πλευρικές δυνάμεις από το έδαφος όσο και τυχόν πρόσθετα φορτία από κοντινά κτίρια ή οχήματα (Clough & O'Rourke, 2016). Έργα όπως αυτά απαιτούν από τους μηχανικούς να λάβουν υπόψη παράγοντες όπως η καθίζηση, η διείσδυση των υπόγειων υδάτων και οι δυνατότητες σεισμικής φόρτισης, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τη σταθερότητα των τοίχων.

Τα έργα που περιλαμβάνουν χωματερές, φράγματα και αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων δείχνουν τη σαφή σημασία της σταθερότητας των πρανών. Η μελέτη περίπτωσης Mariannhill

Landfill δείχνει ότι η μη σωστή σχεδίαση για σταθερότητα πλαγιάς μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση των υπόγειων υδάτων, διαρροές μεθανίου και κατολισθήσεις, τα οποία δημιουργούν μεγάλους κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον (Blight, 2017). Η προσθήκη γεωτεχνικής ανάλυσης κατά τη φάση σχεδιασμού βοηθά τους μηχανικούς να μειώσουν την περιβαλλοντική υποβάθμιση και να προωθήσουν τη βιωσιμότητα της υποδομής για μεγάλες αποστάσεις.

Η ασφάλεια του φράγματος και του περιβάλλοντος περιβάλλοντος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σταθερότητα των πρανών κατά την κατασκευή. Ωστόσο, οι τρέχοντες σχεδιασμοί για τις πλαγιές των φραγμάτων ενσωματώνουν προηγμένες αναλύσεις ευστάθειας πλαγιών μαζί με συστήματα παρακολούθησης για τη διατήρηση της σταθερότητας σε απόκριση στις μεταβαλλόμενες πιέσεις του νερού και τη σεισμική δραστηριότητα (Crosta et al., 2013). Οι περιπτωσιολογικές μελέτες που εξετάζονται σε αυτήν την έκθεση, όπως τα φράγματα Möhne και Aswan Low, αποκαλύπτουν πώς οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν γεωτεχνικές αρχές για να αντιμετωπίσουν τους κινδύνους που προκύπτουν από την αστάθεια των πρανών κατά την κατασκευή του έργου φράγματος (Hager & Boes, 2014; Owen, 2014).

Η σταθερότητα της πλαγιάς είναι κρίσιμης σημασίας τόσο για την αειφόρο ανάπτυξη όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος. Καθώς η περιβαλλοντική κατάσταση γίνεται πιο πειστική στα έργα μηχανικής, το ίδιο ισχύει και για την απαίτηση για σταθερούς και φιλικούς προς το περιβάλλον σχέδια. Έργα που περιλαμβάνουν το Mariannhill Χωματερή μοντελοποιούν μελλοντικές πρωτοβουλίες στην υποδομή ενσωματώνοντας μέτρα για τη σταθερότητα των πρανών με πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων (Blight, 2017).

8.4 Οδηγίες σχετικά με το μέλλον της σταθερότητας των πρανών και της περιβαλλοντικής γεωτεχνικής

Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και υλικών πιθανότατα θα επηρεάσει μελλοντικές αναλύσεις σταθερότητας πρανών σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά έργα. Συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο που βασίζονται σε αισθητήρες για την παρακολούθηση των κινήσεων της κλίσης και των διακυμάνσεων της πίεσης του νερού στους πόρους εμφανίζονται συχνότερα σε σημαντικές εξελίξεις υποδομής. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν στους μηχανικούς να βρουν έγκαιρα στοιχεία αστάθειας και να λάβουν προληπτικά μέτρα για να σταματήσουν μια αστοχία πλαγιάς (Schmertmann, 2016).

Επιπλέον, τα γεωσυνθετικά - όπως τα γεωυφάσματα και οι γεωμεμβράνες - φέρνουν νέες επιλογές για την ενίσχυση των κλίσεων και την αναστολή της διάβρωσης του εδάφους, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η περιβαλλοντική ευαισθησία είναι υψηλή (Zhang et al., 2016).

Είναι συναρπαστικό να βλέπουμε τη μηχανική μάθηση και την τεχνητή νοημοσύνη (AI) να λειτουργούν στην ανάλυση ευστάθειας κλίσης. Αυτές οι τεχνολογίες υπόσχονται να αυξήσουν την ακρίβεια των προβλέψεων ευστάθειας των πλαγιών αναλύοντας μεγάλους όγκους γεωτεχνικών δεδομένων και βρίσκοντας μοτίβα που μπορεί να είναι δύσκολο να αναγνωριστούν με τις παραδοσιακές τεχνικές (Ghasemi et al., 2017). Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της δομής συγκράτησης από την τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να συμβάλει στη μείωση τόσο της χρήσης υλικών όσο και του κόστους, ενώ δίνει προτεραιότητα στην ασφάλεια.

Στα περιβαλλοντικά έργα, η έμφαση στη βιωσιμότητα θα προάγει επίμονα την καινοτομία στον σχεδιασμό της ευστάθειας των πρανών. Οι μελλοντικές προσπάθειες για την υγειονομική ταφή, την κατασκευή φραγμάτων και την ανάπτυξη υποδομών θα πρέπει να συμβιβάσουν τις απαιτήσεις οικονομικής ανάπτυξης με την ουσιαστική ανάγκη προστασίας των οικοσυστημάτων στη φύση. Η εφαρμογή συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως αυτά που βρίσκονται στα έργα αερίου σε ενέργεια στον XYTA Mariannhill, πιθανότατα θα είναι μέρος αυτού, μαζί με την ανάπτυξη νέων δομικών υλικών και τεχνικών που προσπαθούν να μειώσουν τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα (Kumar & Sharma, 2015).

Παραπομπές:

- Abramson, LW, Lee, TS, Sharma, S., & Boyce, GM (2001). Slope Stability and Stabilization Methods (2η έκδοση). John Wiley & Sons.
- Baker, R. (1981). Θεωρητική και Υπολογιστική Ανάλυση Ευστάθειας Κλίσης. Μέθοδοι ευστάθειας και σταθεροποίησης πρανών.
- Blight, GE (2017). Γεωτεχνική Μηχανική Εγκαταστάσεων Αποθήκευσης Απορριμμάτων Ορυχείων. Τύπος CRC.
- Blight, GE (2017). Γεωτεχνική Μηχανική Εγκαταστάσεων Αποθήκευσης Απορριμμάτων Ορυχείων. Τύπος CRC.
- Bromhead, EN (1992). The Stability of Slopes (2η έκδ.). Τύπος CRC.
- Brunsden, D., & Prior, DB (1984). Αστάθεια κλίσης. Wiley.
- Clough, GW, & O'Rourke, TD (2016). Κατασκευές αντιστήριξης και βαθιές ανασκαφές: Μελέτες περίπτωσης και μαθήματα από τη μεγάλη ανασκαφή. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(2), 123-135.
- Clough, GW, & O'Rourke, TD (2016). Κατασκευές αντιστήριξης και βαθιές ανασκαφές: Μελέτες περίπτωσης και μαθήματα από τη μεγάλη ανασκαφή. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(2), 123-135.
- Cole, DA (2013). Γεωτεχνικά μαθήματα από τα φράγματα των αρχών του 20ου αιώνα: Μια μελέτη περίπτωσης του χαμηλού φράγματος του Ασουάν. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(6), 923-933.
- Craig, RF (2013). Εδαφομηχανική (8η έκδ.). Τύπος CRC.
- Crosta, GB, Imposimato, S., & Roddeman, D. (2013). Αριθμητική μοντελοποίηση κατολισθήσεων και οι επιπτώσεις τους στα φράγματα: Μελέτη περίπτωσης του Vajont, Ιταλία. Μηχανική Γεωλογία, 167, 46-68.
- Duncan, JM, & Wright, SG (2005). Αντοχή εδάφους και σταθερότητα κλίσης. John Wiley & Sons.
- Duncan, JM, & Wright, SG (2005). Αντοχή εδάφους και σταθερότητα κλίσης. Wiley.
- Erguler, ZA, & Ulusay, R. (2017). Μηχανικός γεωλογικός χαρακτηρισμός των υλικών του υπερκείμενου φορτίου στην τοποθεσία της ορεινής σήραγγας Bolu, Τουρκία. Environmental Earth Sciences, 76(4), 146.

- Erguler, ZA, & Ulusay, R. (2017). Μηχανικός γεωλογικός χαρακτηρισμός των υλικών του υπερκείμενου φορτίου στην τοποθεσία της ορεινής σήραγγας Bolu, Τουρκία. *Environmental Earth Sciences*, 76(4), 146. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6592-1>
- Fell, R., MacGregor, P., & Stapledon, D. (2015). Γεωτεχνική Μηχανική Φραγμάτων. Τύπος CRC.
- Fourie, AB (2015). Σταθερότητα πρανών και περιβαλλοντική διαχείριση στο XYTA Mariannhill. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(2), 143-157.
- Fourie, AB, & Morris, D. (2014). Διαχείριση στραγγισμάτων και σταθερότητα πρανών σε έργα χωματερής: Μελέτες περίπτωσης από τη Νότια Αφρική. *Waste Management Journal*, 34(3), 987-1002.
- Ghasemi, H., Zeynali, M., & Chen, Z. (2017). Επίδραση του σεισμικού φορτίου στη σταθερότητα των πρανών. *Γεωτεχνική και Γεωλογική Μηχανική*, 35(1), 23-34.
- Ghasemi, H., Zeynali, M., & Chen, Z. (2017). Επίδραση του σεισμικού φορτίου στη σταθερότητα των πρανών. *Γεωτεχνική και Γεωλογική Μηχανική*, 35(1), 23-34. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0200-3>
- Ghasemi, H., Zeynali, M., & Chen, Z. (2017). Επίδραση του σεισμικού φορτίου στη σταθερότητα των πρανών. *Γεωτεχνική και Γεωλογική Μηχανική*, 35(1), 23-34.
- Glanville, WS, & Fourie, AB (2016). Περιορισμός και έλεγχος: Η γεωτεχνική του βιώσιμου σχεδιασμού χωματερών. *Journal of Environmental Geotechnics*, 7(1), 55-69.
- Gray, DH, & Leiser, AT (1982). Βιοτεχνική προστασία πρανών και έλεγχος διάβρωσης. Βαν Νόστραντ Ράινχολντ.
- Holtz, RD, & Kovacs, WD (2011). Εισαγωγή στη Γεωτεχνική Μηχανική. Pearson.
- Huang, RQ, Peng, ZQ, & Li, TH (2014). Κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό: Ανασκόπηση ιστορικών περιπτώσεων από την Κίνα. *Κατολισθήσεις*, 11(1), 141-157.
- Huang, RQ, Peng, ZQ, & Li, TH (2014). Κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό: Ανασκόπηση ιστορικών περιπτώσεων από την Κίνα. *Κατολισθήσεις*, 11(1), 141-157. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0303-8>
- Hughes, AC (2014). Έλεγχος διαρροής σε φράγματα τοιχοποιίας: Ανάλυση και εφαρμογές. *Geotechnical Journal*, 41(2), 211-230.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). Η ταξινόμηση Varnes των τύπων κατολισθήσεων, μια ενημέρωση. *Κατολισθήσεις*, 11(2), 167-194.
- Jibson, RW (2011). Μέθοδοι για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών κατά τη διάρκεια σεισμών-Μια αναδρομική. *Μηχανική Γεωλογία*, 122(1-2), 43-50.
- Jibson, RW (2011). Μέθοδοι για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών κατά τη διάρκεια σεισμών-Μια αναδρομική. *Μηχανική Γεωλογία*, 122(1-2), 43-50.
- Kramer, SL (2013). *Γεωτεχνική Αντισεισμική Μηχανική* (2η έκδ.). Prentice Hall.
- Kumar, S., & Sharma, P. (2015). Δέσμευση μεθανίου και ανάκτηση ενέργειας από χωματερές: Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*, 78(1), 482-490.
- Kumar, S., & Sharma, P. (2015). Δέσμευση μεθανίου και ανάκτηση ενέργειας από χωματερές: Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*, 78(1), 482-490.
- Lai, Y., Sun, Q., Hu, Z., & Sun, J. (2015). Αριθμητική μοντελοποίηση της ευστάθειας των πρανών λαμβάνοντας υπόψη τη διαρροή, τον σεισμό και τη βλάστηση. *Κατολισθήσεις*, 12(5), 1031-1043.
- Lai, Y., Sun, Q., Hu, Z., & Sun, J. (2015). Αριθμητική μοντελοποίηση της ευστάθειας των πρανών λαμβάνοντας υπόψη τη διαρροή, τον σεισμό και τη βλάστηση. *Κατολισθήσεις*, 12(5), 1031-1043. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0303-8>
- Lambe, TW, & Whitman, RV (1979). *Εδαφομηχανική*. John Wiley & Sons.
- LeBlanc, J., & O'Connor, C. (2015). Boston's Big Dig: The Central Artery/Tunnel Project. *Construction History Journal*, 30(1), 78-91.
- Martin, JP (2013). Geotechnical Properties of Boston Blue Clay: Implications for Urban Infrastructure. *Geotechnical Journal*, 42(3), 221-238.
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2017). Δυναμική ανάλυση ευαισθησίας σε κατολισθήσεις λόγω σεισμού. *Κατολισθήσεις*, 14(2), 407-422.
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2017). Δυναμική ανάλυση ευαισθησίας σε κατολισθήσεις λόγω σεισμού. *Κατολισθήσεις*, 14(2), 407-422. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0746-0>
- Mitchell, JK, Bray, JD, & Seed, HB (2002). Ρευστοποίηση εδάφους και σταθερότητα θεμελίωσης κατά τη διάρκεια σεισμών: Μελέτες περίπτωσης από το Big Dig. *Πηδών*.

- Morgenstern, NR, & Bjerrum, L. (2013). Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών Αντιστήριξης σε Αστικές Ανασκαφές. Wiley.
- *Mohne Dam Mhnesee - Mhnesee - TracesOfWar.com.* (v).<https://www.tracesofwar.com/sights/20041/M%C3%B6hne-Dam-M%C3%B6hnesee.htm>
- Newmark, NM (1965). Αστοχία εδάφους λόγω σεισμού. Bulletin of the Seismological Society of America, 55(5), 1573-1607. <https://doi.org/10.1785/0120000164>
- O'Rourke, MJ, & O'Donnell, S. (2013). Συστήματα αφυδάτωσης για το Big Dig: Σχεδιασμός και υλοποίηση. Journal of Construction Engineering and Management, 139(5), 230-242.
- Owen, LA (2014). Μηχανική του Νείλου: Το χαμηλό φράγμα του Ασουάν και η σύγχρονη Αίγυπτος. Oxford University Press.
- Pinyol, NM, & Alonso, EE (2013). Κριτήρια ταχείας ολίσθησης II: Θερμο-υδρομηχανικές και επιδράσεις κλίμακας σε αργιλώδη εδάφη. Κατολισθήσεις, 10(3), 397-414.
- Rathje, EM, & Bray, JD (2013). Σεισμική απόδοση πρανών και επιχώσεων. Στο RS Yeats (Επιμ.), Earthquake Engineering (σελ. 112-137). Πηδών.
- Rathje, EM, & Bray, JD (2013). Σεισμική απόδοση πρανών και επιχώσεων. Στο RS Yeats (Επιμ.), Earthquake Engineering (σελ. 112-137). Πηδών. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7104-7_5
- Rathje, EM, & Bray, JD (2013). Σεισμική απόδοση πρανών και επιχώσεων. Στο RS Yeats (Επιμ.), Earthquake Engineering (σελ. 112-137). Πηδών.
- Schmertmann, JH (2016). Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων τοίχων αντιστήριξης στην κατασκευή λιμένων. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(4), 131-142.
- Seed, HB (1979). Σκέψεις στον αντισεισμικό σχεδιασμό φραγμάτων χώματος και βράχων. Γεωτεχνική, 29(3), 215-263.
- Seed, HB (1979). Σκέψεις στον αντισεισμικό σχεδιασμό φραγμάτων χώματος και βράχων. Γεωτεχνική, 29(3), 215-263. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.3.215>
- Terzaghi, K., Peck, RB, & Mesri, G. (1996). Η Εδαφομηχανική στην Μηχανική Πρακτική (3η έκδ.). John Wiley & Sons.
- Tvedt, T. (2016). Ο Νείλος: Ο μεγαλύτερος ποταμός της ιστορίας. IB Tauris.

- Zhang, F., Zhang, Z., & Hu, D. (2016). Ψευδοστατική προσέγγιση για ανάλυση ευστάθειας σεισμικής πλαγιάς λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Εδαφοδυναμική και σεισμική μηχανική, 89, 115-123.
- Zhang, F., Zhang, Z., & Hu, D. (2016). Ψευδοστατική προσέγγιση για ανάλυση ευστάθειας σεισμικής πλαγιάς λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Εδαφοδυναμική και σεισμική μηχανική, 89, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.05.006>
- Zhang, F., Zhang, Z., & Hu, D. (2016). Ψευδοστατική προσέγγιση για ανάλυση ευστάθειας σεισμικής πλαγιάς λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Εδαφοδυναμική και σεισμική μηχανική, 89, 115-123.
- Zhu, Z., Zhang, L., & Chen, W. (2018). Μια γενικευμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών σε σεισμούς. Natural Hazards, 90(2), 689-708.
- Zhu, Z., Zhang, L., & Chen, W. (2018). Μια γενικευμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών σε σεισμούς. Natural Hazards, 90(2), 689-708. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3043-4>
- Zhu, Z., Zhang, L., & Chen, W. (2018). Μια γενικευμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών σε σεισμούς. Natural Hazards, 90(2), 689-708.