



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ
ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΣΘΕΤ)**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας (ΔΙΠ)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**Στατιστική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής
κάλυψης στην ευστάθεια πρανών οδικών έργων στο πλαίσιο
της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Ελένη Μπαλτζή

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ

Γεώργιος Μπαλωμένος

ΠΑΤΡΑ

Σεπτέμβριος 2026

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	5
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	7
ΕΣΩΣΕΛΙΔΟ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΚΡΙΣΗΣ	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
ABSTRACT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	14
1.2 Σημασία της Έρευνας και Σύνδεση με τη Διαχείριση Ποιότητας και Περιβάλλοντος .	15
1.3 Καινοτομία και Διαφοροποίηση από Προγενέστερες Μελέτες	16
1.4 Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	17
1.5 Ερευνητικά Ερωτήματα	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	18
2.1 Θεωρία Ευστάθειας Πρανών και Γεωτεχνικές Παράμετροι Αστοχίας	18
2.2 Επίδραση της Φυτικής Κάλυψης στην Ευστάθεια Πρανών.....	22
2.2.1 Μηχανική Συμβολή των Ριζικών Συστημάτων	22
2.2.2. Υδρολογικές Επίδρασεις της Βλάστησης	23
2.2.3 Συνολική Αποτίμηση και Ανάγκη Ποσοτικής Αξιολόγησης	25
2.3 Στατιστική Αξιολόγηση και Αβεβαιότητα σε Γεωτεχνικές Αναλύσεις.....	27
2.4 Συστήματα διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001 & ISO 14001) σε γεωτεχνικά έργα.....	28
2.4.1 ISO 9001: Διαχείριση Ποιότητας και Τεκμηρίωση Τεχνικών Αποφάσεων.....	28
2.4.2 ISO 14001: Περιβαλλοντική Διαχείριση και Βιώσιμες Τεχνικές Λύσεις	29
2.4.3 Ενοποίηση ISO 9001 και ISO 14001 σε Γεωτεχνικές Εφαρμογές.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	32
3.1 Ερευνητικός Σχεδιασμός και Γενική Μεθοδολογική Προσέγγιση.....	32
3.2 Περιγραφή και Προέλευση του Dataset Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων	34
3.2.1 Προέλευση dataset	35
3.2.2 Υπολογιστικές Παραδοχές.....	35
3.2.3 Περιορισμοί Dataset	36
3.3 Περιγραφή Εξεταζόμενων Σεναρίων	37
3.3.1 Σενάριο Α: Πρανές χωρίς Φυτική Κάλυψη.....	38
3.3.2 Σενάριο Β: Πρανές με Φυτική Κάλυψη	38

3.3.3. Ζευγαρωμένη Δομή Δεδομένων	38
3.4 Στατιστική Μεθοδολογία.....	39
3.4.1 Περιγραφική Στατιστική.....	39
3.4.2 Γραφική Απεικόνιση.....	40
3.4.3 Έλεγχος Κανονικότητας (Anderson-Darling)	41
3.4.4 Ζευγαρωμένοι Στατιστικοί Έλεγχοι (paired t-test/Wilcoxon).....	42
3.4.5 Επίπεδο Σημαντικότητας και Τεκμηρίωση ($\alpha = 0,05$)	43
3.5 Δείκτες Αξιοπιστίας και Ερμηνεία Αβεβαιότητας.....	44
3.5.1 Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV)	44
3.5.2 Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size - Cohen's d)	45
3.5.3 Τεχνικός Κίνδυνος και Ερμηνεία Αβεβαιότητας	46
3.5.4 Σύνδεση Αποτελεσμάτων με Συστήματα Διαχείρισης ISO	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	48
4.1 Παρουσίαση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων Ευστάθειας Πραγμάτων.....	48
4.2 Στατιστική αξιολόγηση.....	50
4.2.1 Περιγραφική στατιστική	50
4.2.2 Γραφική απεικόνιση.....	51
4.2.3 Έλεγχος Κανονικότητας	54
4.2.4 Στατιστικός Έλεγχος Υποθέσεων	55
4.2.5 Επίπεδο Σημαντικότητας	57
4.3 Δείκτες Αξιοπιστίας.....	58
4.3.1. Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV)	58
4.3.2 Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size – Cohen's d).....	59
4.4. Συζήτηση Αποτελεσμάτων	60
4.5 Σύνδεση με ISO	61
4.6 Υλοποίηση στο Minitab.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ. 64	
5.1 Γενικά	64
5.2 Κύρια τεχνικά και στατιστικά συμπεράσματα.....	64
5.3 Θεωρητική και πρακτική συμβολή της μελέτης	65
5.4 Περιορισμοί και Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	66
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	69
Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία	69

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MINITAB	70
Α.1 Γενικά	70
Α.2 Περιγραφικά Στατιστικά Μέτρα	70
Α.3 Έλεγχος Υποθέσεων (Paired t-test) για εξαρτημένα δείγματα.....	71
Α.4 Έλεγχος Κανονικότητας	73
Α.5 Γραφική Απεικόνιση	73
Α.6 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	76
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) σε σύγκριση γυμνού εδάφους με την ύπαρξη βλάστησης.	49
Πίνακας 4.2: Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με σεισμικά και υδραυλικά φορτία σε σύγκριση με την ύπαρξη βλάστησης και του γυμνού εδάφους.	50
Πίνακας 4.3: Περιγραφικά στατιστικά μέτρα για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.	51
Γράφημα 4.1: Διάγραμμα ατομικών τιμών για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.	52
Γράφημα 4.2: Θηκόγραμμα για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση. ...	53
Γράφημα 4.3: Γραφικός έλεγχος κανονικής κατανομής για τη διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των πρανών με και χωρίς βλάστηση.	54
Πίνακας 4.4: Περιγραφικά στατιστικά για τη μέση διαφορά.	55
Πίνακας 4.5: t-test για εξαρτημένα δείγματα.	56
Γράφημα 4.4: Θηκόγραμμα των διαφορών.	57
Πίνακας 4.6: Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.	59
Πίνακας 4.7: Σύνδεση των αποτελεσμάτων της μελέτης με τις αρχές των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015.	62
Πίνακας A.1: Περιγραφικά στατιστικά μέτρα του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση.	71
Πίνακας A.2α: Αποτελέσματα του ελέγχου <i>paired t-test</i> για την σύγκριση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με βλάστηση και χωρίς βλάστηση.	72
Πίνακας A.2β: Εκτίμηση της μέσης ζευγαρωμένης διαφοράς του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.	72
Πίνακας A.2γ: Αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου <i>paired t-test</i> για την διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.	72
Πίνακας A.2δ: Διατύπωση της μηδενικής και της εναλλακτικής υπόθεσης του ελέγχου <i>paired t-test</i> για την μεταβλητή ΔFOS.	72
Πίνακας A.3: Αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας <i>Anderson-Darling</i> για την μεταβλητή ΔFOS (Διαφορά Συντελεστή Ασφαλείας μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση). ...	73
Γράφημα A.1: Διάγραμμα ατομικών τιμών (<i>Individual Value Plot</i>) που παρουσιάζει την κατανομή των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση.	74
Γράφημα A.2: Θηκόγραμμα (<i>Boxplot</i>) της μεταβλητής ΔFOS, που παρουσιάζει την κατανομή των διαφορών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.	75
Γράφημα A.3: Διάγραμμα πιθανοτήτων κανονικής κατανομής (<i>Normal Probability Plot</i>) της μεταβλητής ΔFOS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της υπόθεσης κανονικότητας μέσω του ελέγχου <i>Anderson-Darling</i>	76

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Τυπικό γεωτεχνικό μοντέλο πρανούς με επιφάνεια ολίσθησης και δρώσες δυνάμεις. (Abramson et al., 2002; Duncan, Wright & Brandon, 2014).	19
Σχήμα 2.2: Ορισμός και ερμηνεία του συντελεστή ασφαλείας (FOS) στην ανάλυση πρανών (Abramson et al., 2002).	20
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ριζοενίσχυσης (root reinforcement) και της συμβολής των ριζικών συστημάτων στη διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος πιθανής επιφάνειας αστοχίας (Wu et. al., 1979; Stokes et al., 2021).	21
Σχήμα 2.4: Μηχανισμός ριζοενίσχυσης και συμβολή των ριζικών συστημάτων στην ευστάθεια πρανών (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).	23
Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών (βροχόπτωση, διήθηση, διαπνοή, μεταβολή πιέσεων των πόρων) και της επίδρασης τους στις ενεργές τάσεις και στο συντελεστή ασφαλείας (FOS) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020).	24
Σχήμα 2.6α: Σχηματική απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών (βροχόπτωση, διήθηση, διαπνοή, μεταβολή πιέσεων των πόρων) και της επίδρασης τους στις ενεργές τάσεις και στο συντελεστή ασφαλείας (FOS) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020).	25
Σχήμα 2.6β: Σύγκριση συντελεστή μεταβλητότητας (CV) του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη.	26
Σχήμα 2.7: Ενοποιημένο πλαίσιο ISO 9001/14001 για τη γεωτεχνική αξιολόγηση πρανών και τη στατιστική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων (ISO 9001:2015; ISO 14001:2015; Montgomery, 2019; Fenton & Griffiths, 2020).	31
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής του ερευνητικού σχεδιασμού και της γενικής μεθοδολογικής προσέγγισης της ΜΔΕ.	32
Πίνακας 3.1: Δομή ζευγαρωμένων δεδομένων (paired dataset) και υπολογισμός διαφορών ΔFOS μεταξύ σεναρίων.	34
Σχήμα 3.2: Σχηματική σύγκριση πρανούς χωρίς και με φυτική κάλυψη, με ένδειξη πιθανής επιφάνειας ολίσθησης και επίδρασης ριζικού συστήματος στη διατμητική αντοχή.	37
Σχήμα 3.3: Ενδεικτική γραφική απεικόνιση της σύγκρισης τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των σεναρίων με και χωρίς φυτική κάλυψη.	41
Σχήμα 3.4: Διαδικασία επιλογής στατιστικού ελέγχου με βάση τον έλεγχο κανονικότητας Anderson-Darling.	42

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Συντομογραφία	Περιγραφή
FOS	Factor of Safety
CV	Coefficient of Variation
SD	Standard Deviation
ISO	International Organization for Standardization

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας («Ελένης Μπαλτζή») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΕΣΩΣΕΛΙΔΟ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΚΡΙΣΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Μπαλωμένος

Μέλος Επιτροπής: Γεώργιος Χατζηγεωργίου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευστάθεια πρανών αποτελεί βασικό αντικείμενο της γεωτεχνικής μηχανικής, ιδιαίτερα σε έργα οδοποιίας και τεχνικές κατασκευές όπου η πιθανή αστοχία ενός πρανού μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για τη χρήση φυσικών τεχνικών ενίσχυσης, όπως η φυτική κάλυψη, καθώς το ριζικό σύστημα των φυτών μπορεί να επηρεάσει τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και να συμβάλλει στη βελτίωση της ευστάθειας πρανών. Παράλληλα, η ανάγκη για πιο βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση πρακτικών που συνδυάζουν γεωτεχνική ασφάλεια και περιβαλλοντική διαχείριση.

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety - FOS) πρανών οδικών έργων μέσω στατιστικής ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων. Η εργασία εξετάζει κατά πόσο η παρουσία βλάστησης επηρεάζει θετικά την ευστάθεια των πρανών, αλλά και πόσο αξιόπιστη και πρακτικά σημαντική είναι αυτή η επίδραση.

Η μεθοδολογία βασίστηκε στη συγκριτική ανάλυση δύο περιπτώσεων, με και χωρίς φυτική κάλυψη. Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε ζευγαρωμένες παρατηρήσεις ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες. Για την στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Minitab (έκδοση 22). Εφαρμόστηκαν περιγραφικά στατιστικά μέτρα, έλεγχος κανονικότητας Anderson-Darling και paired t-test για εξαρτημένα δείγματα. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV) και το μέγεθος επίδρασης Cohen's d, ώστε να διερευνηθεί όχι μόνο η στατιστική σημαντικότητα αλλά και η πρακτική σημασία των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της μέσης τιμής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), στην περίπτωση παρουσίας φυτικής κάλυψης. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) αυξήθηκε από 1,362 χωρίς βλάστηση σε 1,795 με βλάστηση, ενώ η μέση διαφορά μεταξύ των δύο συνθηκών ήταν 0,432. Επίσης, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διασπορά των τιμών στην περίπτωση παρουσίας βλάστησης, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις με φυτική κάλυψη, χωρίς να είναι δυνατή η πλήρης διερεύνηση των αιτιών της λόγω του περιορισμένου μεγέθους του δείγματος.

Ο στατιστικός έλεγχος paired t-test έδωσε p-value = 0,088, τιμή που δεν θεωρήθηκε στατιστικά σημαντική για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$. Το αποτέλεσμα αυτό σχετίζεται κυρίως με το περιορισμένο μέγεθος του δείγματος ($n = 4$), το οποίο μειώνει την στατιστική ισχύ ελέγχου. Ωστόσο, το μεγάλο μέγεθος επίδρασης (Cohen's d = 0,882) υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη ενδέχεται να έχει ουσιαστική πρακτική επίδραση στην ευστάθεια των πρανών, γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης με μεγαλύτερο δείγμα.

Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της συνδυαστικής αξιολόγησης γεωτεχνικών και στατιστικών δεδομένων για τη λήψη τεκμηριωμένων τεχνικών αποφάσεων.

Επιπλέον, αναδεικνύεται η δυνατότητα αξιοποίησης φυσικών τεχνικών ενίσχυσης στο πλαίσιο μιας περισσότερο βιώσιμης προσέγγισης στην γεωτεχνική μηχανική, καθώς και η συμβολή της στατιστικής τεκμηρίωσης στην λήψη τεχνικών αποφάσεων σύμφωνα με τις αρχές των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015.

Λέξεις – κλειδιά:

ευστάθεια πρανών, φυτική κάλυψη, Συντελεστής Ασφαλείας (Factor of Safety - FOS), γεωτεχνική μηχανική, στατιστική ανάλυση, βιώσιμη ανάπτυξη

ABSTRACT

Slope stability is a critical subject in geotechnical engineering, particularly in road construction projects and technical infrastructures where slope failure may lead to serious technical, economic and environmental consequences. In recent years, growing interest has been observed in the use of natural reinforcement techniques, such as vegetation cover, since plant root systems can influence the mechanical behavior of soil and contribute to the improvement of slope stability. At the same time, the increasing demand for sustainable and environmentally friendly engineering solutions has encouraged the adoption of practices that combine geotechnical safety with environmental management principles.

The aim of the present Master's Thesis is to investigate the effect of vegetation cover on the Factor of Safety (FOS) of road slopes through statistical analysis of the available data. The study examines whether the presence of vegetation has a positive influence on slope stability, while also evaluating the reliability and practical significance of this effect.

The research methodology was based on the comparative analysis of two different conditions, with and without vegetation cover. The data were organized into paired observations in order to enable direct comparison of the results under the same geotechnical conditions. Statistical processing and analysis were performed using Minitab software (version 22). Descriptive statistical measures, the Anderson-Darling normality test and paired t-test for paired samples were applied. In addition, the Coefficient of Variation (CV) and Cohen's d effect size were evaluated in order to assess not only the statistical significance but also the practical significance of the observed differences.

The results indicated an increase in the mean value of the Factor of Safety (FOS) in the presence of vegetation cover. More specifically, the mean Factor of Safety (FOS) value increased from 1.362 in the case without vegetation cover to 1.795 in the case with vegetation cover, while the mean difference between the two examined conditions was 0.432. Furthermore, greater variability of the results was observed in the presence of vegetation cover, indicating increased variability in the corresponding measurements. However, due to the limited sample size, it was not possible to further investigate the factors contributing to this variability.

The paired t-test produced a p-value of 0.088, which was not considered statistically significant at a significance level of $\alpha = 0.05$. This finding is mainly associated with the limited sample size ($n = 4$), which reduces the statistical power of the test. However, the large effect size (Cohen's $d = 0.882$), suggests that vegetation cover may have a practically meaningful effect on slope stability, a finding that warrants further investigation using a larger sample.

Overall, the study highlights the importance of combining geotechnical evaluation with statistical analysis in order to support evidence-based technical decision making. In addition, it emphasizes the potential contribution of natural reinforcement techniques to the implementation of more sustainable approaches in geotechnical engineering and underlines the role of statistical evidence in supporting technical

decision making in accordance with the principles of ISO 9001:2015 and ISO 14001:2015.

Keywords:

slope stability, vegetation cover, Factor of Safety (FOS), geotechnical engineering, statistical analysis, sustainable geotechnical engineering

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Η ευστάθεια πρανών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα των οδικών έργων, καθώς αστοχίες πρανών μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπή κυκλοφορίας, αυξημένο κόστος συντήρησης και αποκατάστασης και κίνδυνο για χρήστες και υποδομές (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Η γεωτεχνική μηχανική αντιμετωπίζει την ευστάθεια πρανών μέσω αναλυτικών και υπολογιστικών προσεγγίσεων, με αξιολόγηση της οριακής ισορροπίας και εκτίμηση του Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety - FOS) ως βασικού δείκτη αξιολόγησης (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

Αν και η διεθνής βιβλιογραφία έχει διερευνήσει εκτενώς την επίδραση της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών, περιορισμένος αριθμός μελετών προσεγγίζει το ζήτημα μέσω στατιστικής αξιολόγησης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και της σύνδεσής τους με συστήματα διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (Fenton & Griffiths, 2020; Stokes et al., 2021).

Παράλληλα, η σύγχρονη γεωτεχνική πρακτική δίνει έμφαση στην εφαρμογή τεχνικών λύσεων που συνδυάζουν μηχανική αποτελεσματικότητα και περιβαλλοντική βιωσιμότητα, ιδιαίτερα σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας (ISO 14001, 2015; Ng et al., 2021). Ως παρεμβάσεις χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος νοούνται τεχνικές που περιορίζουν την ανάγκη χρήσης βαρέων κατασκευαστικών υλικών (π.χ. σκυρόδεμα, συρματοκιβώτια), μειώνουν τις εκσκαφές/επιχώσεις και συμβάλλουν στην οικολογική αποκατάσταση του τοπίου (ISO 14001, 2015). Στο πλαίσιο αυτό, η φυτική κάλυψη έχει μελετηθεί ως μέσο βελτίωσης της ευστάθειας πρανών μέσω μηχανισμών όπως η ενίσχυση του εδάφους από τα ριζικά συστήματα (root reinforcement) και η μείωση της διάβρωσης (Stokes et al., 2021), καθώς και μέσω υδρολογικών επιδράσεων όπως η μείωση της διήθησης και η μεταβολή των πιέσεων πόρων που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση εδάφους - νερού (Liang, Knappett & Bengough, 2020; Ng et al., 2021). Ο όρος root reinforcement περιγράφει τη μηχανική λειτουργία των ριζών ως “φυσικού οπλισμού”, ο οποίος αυξάνει την εφελκυστική αντίσταση του εδάφους και συνεπώς την διατμητική αντοχή κατά μήκος πιθανών επιφανειών αστοχίας (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).

Παρότι η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σημασία της βλάστησης, η αποτίμηση της αποτελεσματικότητάς της συχνά παρουσιάζεται ως σύγκριση μεμονωμένων σεναρίων ή ως ποιοτική ερμηνεία, χωρίς να συνοδεύεται πάντα από συστηματική στατιστική τεκμηρίωση της σημαντικότητας των διαφορών (Fenton & Griffiths, 2020; Ng et al., 2021). Η περιορισμένη στατιστική τεκμηρίωση ενδέχεται να αυξήσει τον κίνδυνο εσφαλμένης ερμηνείας των αποτελεσμάτων, καθώς οι παρατηρούμενες

διαφορές μπορεί να οφείλονται σε φυσική μεταβλητότητα ή σε αβεβαιότητα των παραμέτρων και όχι σε πραγματική επίδραση της φυτικής κάλυψης (Field, 2018; Fenton & Griffiths, 2020).

Για τον λόγο αυτό, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η στατιστική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών οδικών έργων, με στόχο να υποστηριχθεί η λήψη τεχνικών αποφάσεων με μεγαλύτερη αξιοπιστία, στο πλαίσιο της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

Ειδικότερα, η εργασία επιδιώκει να αξιολογήσει την επίδραση της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) πρανών οδικών έργων, μέσω εφαρμογής περιγραφικών και επαγωγικών στατιστικών μεθόδων. Παράλληλα, εξετάζεται η συμβολή της στατιστικής τεκμηρίωσης στην λήψη τεχνικών αποφάσεων στο πλαίσιο των αρχών διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001, 2015; Field, 2018).

1.2 Σημασία της Έρευνας και Σύνδεση με τη Διαχείριση Ποιότητας και Περιβάλλοντος

Η σημασία της παρούσας ΜΔΕ έγκειται στη διεπιστημονική προσέγγιση που συνδυάζει γεωτεχνική ανάλυση, στατιστική τεκμηρίωση και αρχές διαχείρισης ποιότητας. Η διασφάλιση ποιότητας σε τεχνικά έργα προϋποθέτει τεκμηριωμένες διαδικασίες, τεχνική ιχνηλασιμότητα, αξιολόγηση κινδύνων και λήψη αποφάσεων με βάση δεδομένα (ISO 9001, 2015). Στο πλαίσιο τεχνικών έργων, η ιχνηλασιμότητα αφορά τη δυνατότητα αναδρομής στις παραδοχές, τα δεδομένα και τα βήματα ανάλυσης που οδήγησαν σε μία τεχνική απόφαση, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος, η επαλήθευση και η αναθεώρηση της επιλογής (ISO 9001, 2015). Στο ίδιο πνεύμα, η περιβαλλοντική διαχείριση απαιτεί αναγνώριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και υιοθέτηση κατάλληλων πρακτικών, με μετρήσιμους στόχους και συνεχή βελτίωση (ISO 14001, 2015).

Στο πεδίο της γεωτεχνικής, η αβεβαιότητα των παραμέτρων (π.χ. αντοχή εδάφους, υδρολογικές συνθήκες, μεταβλητότητα ιδιοτήτων), καθιστά σημαντική την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων και την τεκμηρίωση της “ισχύος” των διαφορών μεταξύ εναλλακτικών τεχνικών λύσεων (Fenton & Griffiths, 2020). Η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της μεταβλητότητας των δεδομένων και την διάκριση μεταξύ πραγματικών διαφορών και τυχαίας διακύμανσης (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Η καινοτομία της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στην συνδυαστική αξιολόγηση γεωτεχνικών και στατιστικών δεικτών αξιοπιστίας, όπως ο Συντελεστής

Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV) και το μέγεθος επίδρασης (Cohen's d), καθώς και στη σύνδεση της ευστάθειας πρυνών με τις αρχές των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015 (Cohen, 1988; Montgomery, 2019).

Συνεπώς, η παρούσα εργασία επιδιώκει να ενισχύσει την τεχνική τεκμηρίωσης, αξιολόγησης και βελτίωσης στο πλαίσιο ενός συστήματος διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

1.3 Καινοτομία και Διαφοροποίηση από Προγενέστερες Μελέτες

Στοιχείο καινοτομίας της παρούσας εργασίας αποτελεί η συστηματική στατιστική επεξεργασία υπολογιστικών αποτελεσμάτων ευστάθειας, με στόχο την τεκμηρίωση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ σεναρίων με και χωρίς φυτική κάλυψη (Field, 2018; Montgomery, 2019). Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τη λογική της “λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων” που συναντάται σε εφαρμογές διαχείρισης ποιότητας, ειδικά όταν απαιτείται τεκμηρίωση επιλογών και αξιολόγηση αποτελεσματικότητας παρεμβάσεων (ISO 9001, 2015).

Παρότι αξιοποιούνται υπολογιστικά δεδομένα από προγενέστερη διπλωματική εργασία (Μπαλτζή, 2019), η παρούσα εργασία αποτελεί δευτερογενή ανάλυση υφιστάμενων δεδομένων, με διαφορετικό ερευνητικό προσανατολισμό και διαφορετικά ερευνητικά ερωτήματα από εκείνα της αρχικής μελέτης (Field, 2018; Μπαλτζή, 2019). Με τον τρόπο αυτό, ένα υπάρχον dataset αξιοποιείται ώστε να παραχθούν περισσότερο τεκμηριωμένα και αξιόπιστα συμπεράσματα, περιορίζοντας την αβεβαιότητα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Fenton & Griffiths, 2020; Μπαλτζή, 2019).

Η μείωση της αβεβαιότητας επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης της διασποράς των αποτελεσμάτων και της εφαρμογής ελέγχων υποθέσεων, ώστε η ερμηνεία να βασίζεται σε συνολική στατιστική εικόνα και όχι σε μεμονωμένες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Επιπλέον, η παρούσα μελέτη εισάγει την ανάλυση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) ως συμπληρωματικού δείκτη αξιοπιστίας του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), στοιχείο που δεν εξετάστηκε στην προγενέστερη εργασία (Μπαλτζή, 2019).

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας δεν έγκειται στην παραγωγή νέων γεωτεχνικών δεδομένων, αλλά στην εφαρμογή στατιστικής τεκμηρίωσης σε υφιστάμενα αποτελέσματα ευστάθειας πρυνών, με στόχο την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της πρακτικής σημασίας της επίδρασης της φυτικής κάλυψης. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η λήψη τεχνικών αποφάσεων βάσει δεδομένων, σύμφωνα με

τις αρχές των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015; Field, 2018; Montgomery, 2019).

1.4 Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται το αντικείμενο, η σημασία και η καινοτομία της έρευνας. Στο Κεφάλαιο 2, αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο της ευστάθειας πρανών και η επίδραση της φυτικής κάλυψης, καθώς και η σχετική προσέγγιση της αβεβαιότητας και της στατιστικής αξιολόγησης. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μεθοδολογία και η στατιστική προσέγγιση που θα εφαρμοστεί. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα, καθώς και η σύνδεση τους με τις αρχές διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της έρευνας, παρουσιάζονται οι περιορισμοί της μελέτης και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Επιπλέον, στο Παράρτημα Α παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας και τα γραφήματα που προέκυψαν από το λογισμικό Minitab, με σκοπό την τεκμηρίωση και την δυνατότητα αναπαραγωγής της ανάλυσης.

1.5 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

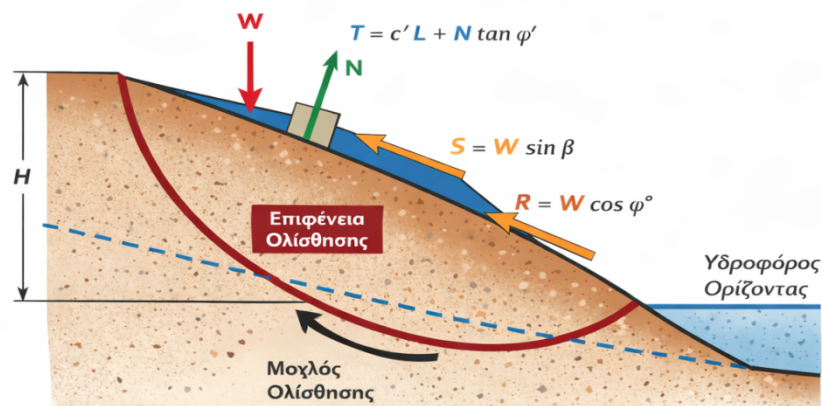
- 1)Επηρεάζει θετικά η φυτική κάλυψη τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) πρανών οδικών έργων;
- 2)Είναι η επίδραση της φυτικής κάλυψης στατιστικά και πρακτικά σημαντική;
- 3)Πώς επηρεάζει η φυτική κάλυψη την μεταβλητότητα και την αξιοπιστία των γεωτεχνικών αποτελεσμάτων;
- 4)Με ποιον τρόπο η στατιστική τεκμηρίωση μπορεί να υποστηρίξει την λήψη τεχνικών αποφάσεων σύμφωνα με τις αρχές των ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Θεωρία Ευστάθειας Πρανών και Γεωτεχνικές Παράμετροι Αστοχίας

Η ευστάθεια πρανών αποτελεί βασικό αντικείμενο της γεωτεχνικής μηχανικής και συνδέεται άμεσα με την ασφάλεια και την λειτουργικότητα τεχνικών έργων, όπως οδικά έργα, σιδηροδρομικά έργα, φράγματα και εκσκαφές. Αστοχία πρανούς ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία οι διαθέσιμες αντοχές του εδάφους δεν επαρκούν για να εξισορροπήσουν τις δρώσες τάσεις. Το αποτέλεσμα είναι η μετακίνηση εδαφικών μαζών κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

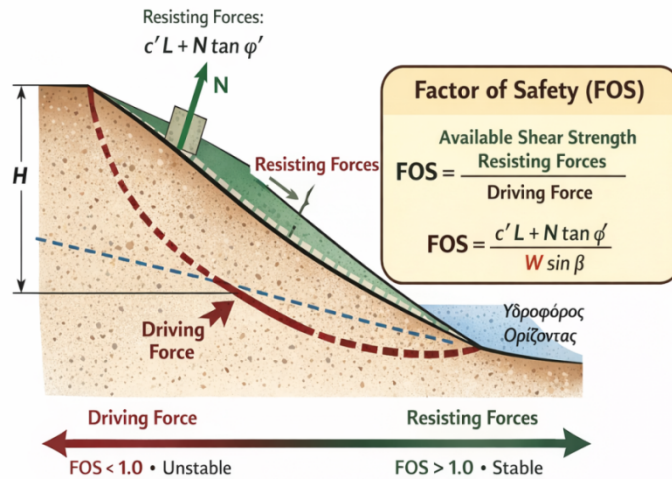
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, η ανάλυση ευστάθειας πρανών βασίζεται συνήθως στην αρχή της οριακής ισορροπίας, σύμφωνα με την οποία το πρανές θεωρείται σε κατάσταση ισορροπίας λίγο πριν την αστοχία. Στο πλαίσιο αυτό, η ευστάθεια εκφράζεται μέσω του Συντελεστή ασφαλείας (FOS), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των διαθέσιμων αντοχών προς τις απαιτούμενες αντοχές κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεγαλύτερες της μονάδας ($FOS > 1$) υποδηλώνουν σταθερότητα, ενώ τιμές μικρότερες ή ίσες της μονάδας υποδηλώνουν αστοχία. Στην πράξη για λόγους ασφαλείας συνήθως απαιτούνται τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, ανάλογα με το είδος του έργου και το επίπεδο κινδύνου που θεωρείται αποδεκτό (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Η γεωμετρία ενός τυπικού πρανούς και οι κύριες δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά μήκος πιθανής επιφάνειας ολίσθησης παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.1 (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014). Στο Σχήμα 2.1 αποτυπώνεται η ισορροπία μεταξύ αποσταθεροποιητικών και σταθεροποιητικών δυνάμεων, η οποία αποτελεί την βάση για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Duncan et al., 2014).



Σχήμα 2.1: Τυπικό γεωτεχνικό μοντέλο πρανούς με επιφάνεια ολίσθησης και δρώσες δυνάμεις. (Abramson et al., 2002; Duncan, Wright & Brandon, 2014).

Στην πράξη, οι απαιτούμενες τιμές Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) εξαρτώνται από το είδος του έργου, τις συνθήκες φόρτισης και το αποδεκτό επίπεδο κινδύνου, ενώ συχνά υιοθετούνται τιμές στόχου μεγαλύτερες της μονάδας για λόγους ασφαλείας και κανονιστικής συμμόρφωσης (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

Η σχηματική απεικόνιση του Σχήματος 2.2 αναδεικνύει τον λόγο της διαθέσιμης προς την απαιτούμενη διατμητική αντοχή, ο οποίος καθορίζει την κατάσταση ευστάθειας του πρανούς (Abramson et al., 2002). Η έννοια και η μαθηματική ερμηνεία του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μπορούν να αποδοθούν σχηματικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (Abramson et al., 2002, Duncan et al., 2014).

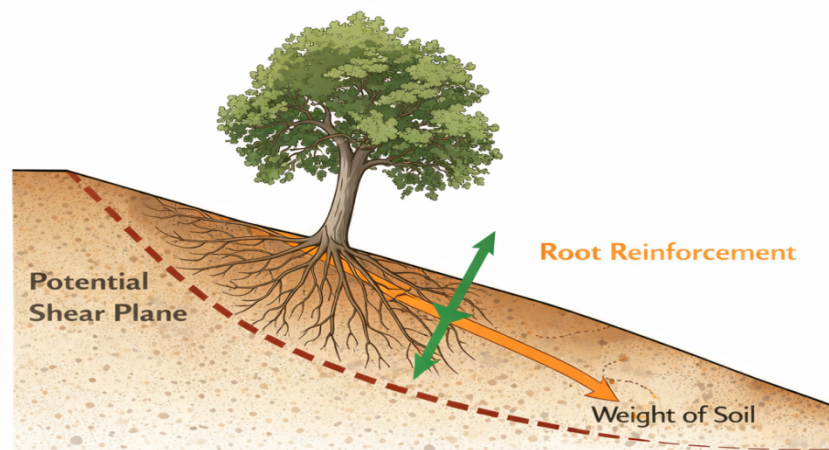


Σχήμα 2.2: Ορισμός και ερμηνεία του συντελεστή ασφαλείας (FOS) στην ανάλυση πρανών (Abramson et al., 2002).

Η διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης περιγράφεται συνήθως με το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb, το οποίο εκφράζει τη διατμητική αντοχή ως συνάρτηση της συνοχής c , της γωνίας τριβής (ϕ), και της ενεργού κάθετης τάσης (σ') (Terzaghi, Peck & Mersi, 1996). Οι συγκεκριμένοι παράμετροι επηρεάζονται από πλήθος παραγόντων, όπως η σύσταση εδάφους, η υγρασία, η αποστράγγιση και η παρουσία υπόγειου νερού (Das & Sobhan, 2018).

Το κριτήριο Mohr - Coulomb, αποτελεί γραμμική προσέγγιση της διατμητικής αντοχής και χρησιμοποιείται ευρέως για λόγους απλότητας, παρότι η πραγματική συμπεριφορά πολλών εδαφών μπορεί να παρουσιάζει μη γραμμικότητα και εξάρτηση από την κατάσταση τάσεων (Das & Sobhan, 2018).

Ο μηχανισμός ριζοενίσχυσης και η συμβολή των ριζών στη διατμητική αντοχή του εδάφους αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.3 (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2.3 οι ρίζες λειτουργούν ως φυσικοί οπλισμοί ενίσχυσης του εδάφους, γεφυρώνοντας πιθανές επιφάνειες αστοχίας κι αυξάνοντας την διατμητική αντοχή του εδάφους (Ali, Osman & Choy, 2012; Stokes et al., 2021).



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ριζοενίσχυσης (root reinforcement) και της συμβολής των ριζικών συστημάτων στη διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος πιθανής επιφάνειας αστοχίας (Wu et. al., 1979; Stokes et al., 2021).

Η παρουσία νερού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αποσταθεροποιητικούς παράγοντες για τα πρανή, καθώς αυξάνει τις πιέσεις στους πόρους και μειώνει τις ενεργές τάσεις, οδηγώντας σε μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους (Terzaghi, Peck & Mersi, 1996). Για τον λόγο αυτό, οι υδρολογικές συνθήκες λαμβάνονται ρητά υπόψη στις αναλύσεις ευστάθειας, είτε μέσω στατικών είτε μέσω δυναμικών προσεγγίσεων (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

Στη σύγχρονη γεωτεχνική πρακτική, η ανάλυση ευστάθειας πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, όπως οι μέθοδοι Bishop, Janbu, Morgenstern-Price και Spencer, οι οποίες διαφέρουν ως προς τις παραδοχές ισορροπίας και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Abramson et al., 2002). Παρά την διαφορά στις μαθηματικές διατυπώσεις, όλες οι μέθοδοι στοχεύουν στον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) και στην εκτίμηση της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης.

Ωστόσο, έχει επισημανθεί στην βιβλιογραφία ότι οι αναλύσεις ευστάθειας επηρεάζονται έντονα από την αβεβαιότητα των γεωτεχνικών παραμέτρων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική διασπορά των υπολογιζόμενων τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Fenton & Griffiths, 2020). Η αβεβαιότητα αυτή σχετίζεται τόσο με τη φυσική μεταβλητότητα των εδαφικών ιδιοτήτων όσο και με τις απλουστευτικές παραδοχές των μεθόδων ανάλυσης, γεγονός που καθιστά απαραίτητη

την αξιολόγηση όχι μόνο της μέσης τιμής αλλά και της διασποράς των αποτελεσμάτων (Fenton & Griffiths, 2020).

Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση στατιστικών, και πιθανολογικών προσεγγίσεων στην αξιολόγηση της ευστάθειας πρανών με στόχο την καλύτερη κατανόηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και την βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων (Fenton & Griffiths, 2020). Στο πλαίσιο αυτό, η σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων -όπως πρανή με και χωρίς φυτική κάλυψη- δεν περιορίζεται μόνο στην σύγκριση μεμονωμένων τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), αλλά επεκτείνεται στη στατιστική αξιολόγηση της σημαντικότητας των διαφορών.

Οι παραπάνω θεωρητικές παραδοχές και μηχανισμοί αποτελούν την βάση για την διερεύνηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια των πρανών, η οποία αναλύεται στις επόμενες ενότητες, με έμφαση στους μηχανικούς και υδρολογικούς μηχανισμούς της βλάστησης (Stokes et al., 2021; Ng et al., 2021).

2.2 Επίδραση της Φυτικής Κάλυψης στην Ευστάθεια Πρανών

Η φυτική κάλυψη έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία ως παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών μέσω σύνθετων μηχανικών και υδρολογικών διεργασιών. Η παρουσία βλάστησης μπορεί να λειτουργήσει τόσο ενισχυτικά όσο και αποσταθεροποιητικά, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των φυτών, το είδος του εδάφους και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Stokes et al., 2021).

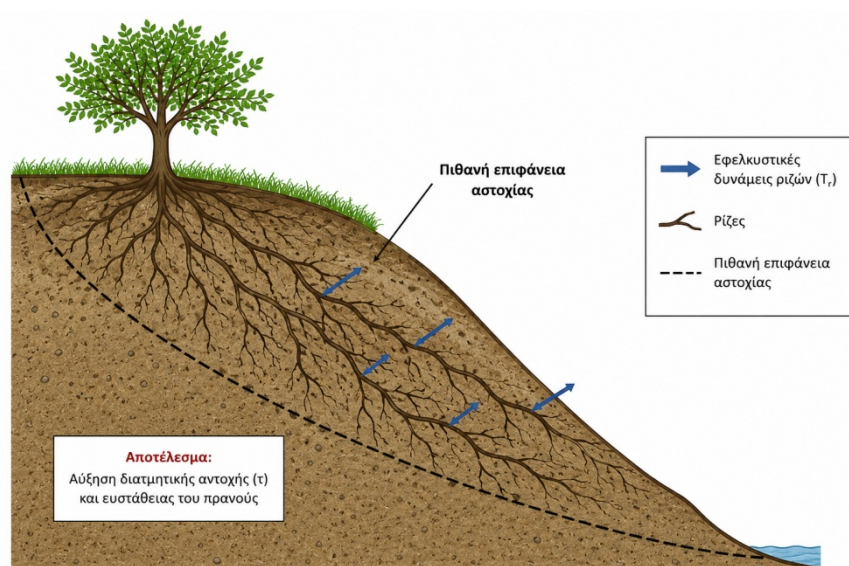
Ενδεικτικά, η βλάστηση μπορεί να αυξήσει τα φορτία στην επιφάνεια του πρανού ή να δημιουργήσει ευνοϊκές οδούς ροής κατά μήκος ριζικών καναλιών, αυξάνοντας την πιθανότητα ανάπτυξης πιέσεων των πόρων κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (Ng et al., 2021; Stokes et al., 2021).

2.2.1 Μηχανική Συμβολή των Ριζικών Συστημάτων

Η μηχανική επίδραση της βλάστησης αποδίδεται κυρίως στην δράση ριζικών συστημάτων, τα οποία αυξάνουν την διατμητική αντοχή του εδάφους μέσω του μηχανισμού της ριζοενίσχυσης (root reinforcement). Οι ρίζες λειτουργούν ως φυσικοί οπλισμοί, γεφυρώνοντας επιφάνειες αστοχίας και αυξάνοντας την αντίσταση του εδάφους σε διατμητικές παραμορφώσεις (Ali, Osman & Choy, 2012; Stokes et al., 2021).

Η μηχανική συμβολή των ριζικών συστημάτων στην ευστάθεια των πρανών αποδίδεται κυρίως στον μηχανισμό της ριζοενίσχυσης (root reinforcement), μέσω του

οποίου οι ρίζες λειτουργούν ως φυσικοί οπλισμοί που αυξάνουν την διατμητική αντοχή του εδάφους. Η σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).



Σχήμα 2.4: Μηχανισμός ριζοενίσχυσης και συμβολή των ριζικών συστημάτων στην ευστάθεια πρανών (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).

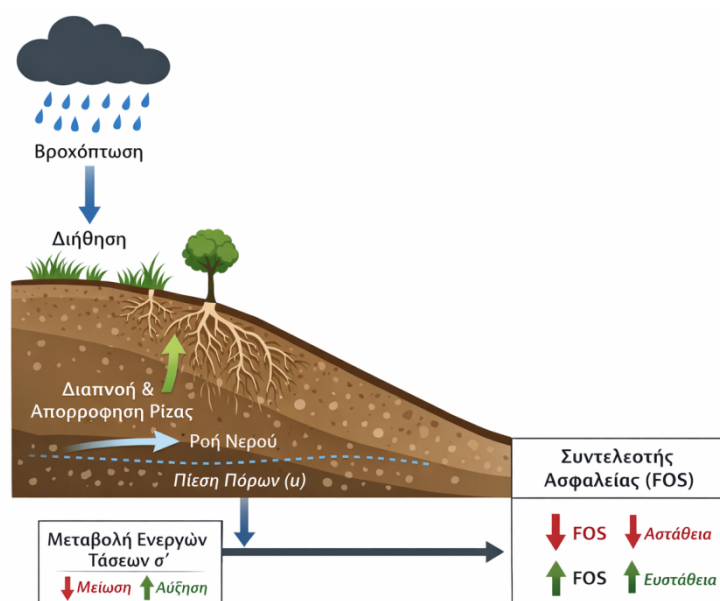
Πειραματικές και αναλυτικές μελέτες έχουν δείξει ότι η συμβολή της βλάστησης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ρηχές επιφάνειες αστοχίας, όπου η πυκνότητα των ριζών είναι μεγαλύτερη, ενώ μειώνεται σε βαθύτερες ολισθήσεις (Liang, Knappett & Bengough, 2020). Το γεγονός αυτό έχει άμεση σημασία για πρανή οδικών έργων, στα οποία παρατηρούνται συχνά επιφανειακές ή ρηχές αστοχίες (Ng et al., 2021).

2.2.2. Υδρολογικές Επιδράσεις της Βλάστησης

Πέραν της μηχανικής ενίσχυσης, η φυτική κάλυψη επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών μέσω υδρολογικών μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού στο έδαφος. Η βλάστηση συμβάλλει στη μείωση της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης μέσω της προστασίας της εδαφικής επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζει τις πιέσεις των πόρων μέσω της απορρόφησης νερού από τα ριζικά συστήματα (Ng et al., 2021).

Οι υδρολογικές διεργασίες που αναπτύσσονται σε ένα φυτεμένο πρανές επηρεάζουν άμεσα τις πιέσεις των πόρων και τις ενεργές τάσεις του εδάφους με αποτέλεσμα την μεταβολή της διατμητικής αντοχής και, κατ' επέκταση, του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS). Η συσχέτιση αυτή μεταξύ βροχόπτωσης, διήθησης, ριζικής απορρόφησης και

μεταβολής ενεργών τάσεων αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.5 (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020; Ng et al., 2021). Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει τις βασικές υδρολογικές διεργασίες μέσω των οποίων η φυτική κάλυψη μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια των πρανών (βροχόπτωση, διήθηση, διαπνοή και μεταβολή πιέσεων των πόρων), οι οποίες επηρεάζουν τις ενεργές τάσεις και συνεπώς τη διατμητική αντοχή του εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993; Ng et al., 2021). Εκτός από την μηχανική ενίσχυση του εδάφους, η φυτική κάλυψη επηρεάζει και τις υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός του πρανού. Οι βασικοί μηχανισμοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών (βροχόπτωση, διήθηση, διαπνοή, μεταβολή πιέσεων των πόρων) και της επίδρασης τους στις ενεργές τάσεις και στο συντελεστή ασφαλείας (FOS) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020).

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5, η αύξηση της πίεσης των πόρων (u), λόγω έντονης διήθησης μπορεί να μειώσει τις ενεργές τάσεις (σ'), και να οδηγήσει σε μείωση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ενώ η διαπνοή και η ριζική απορρόφηση δύνανται να περιορίσουν τις πιέσεις των πόρων, συμβάλλοντας στην αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020).

Η διαδικασία της διαπνοής οδηγεί σε μείωση της υγρασίας του εδάφους και κατά συνέπεια, σε αύξηση των ενεργών τάσεων και της διατμητικής αντοχής, ιδιαίτερα σε ακόρεστα εδάφη (Fredlund & Rahardjo 1993; Ng et al., 2021). Ωστόσο, η επίδραση αυτή είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες, τη

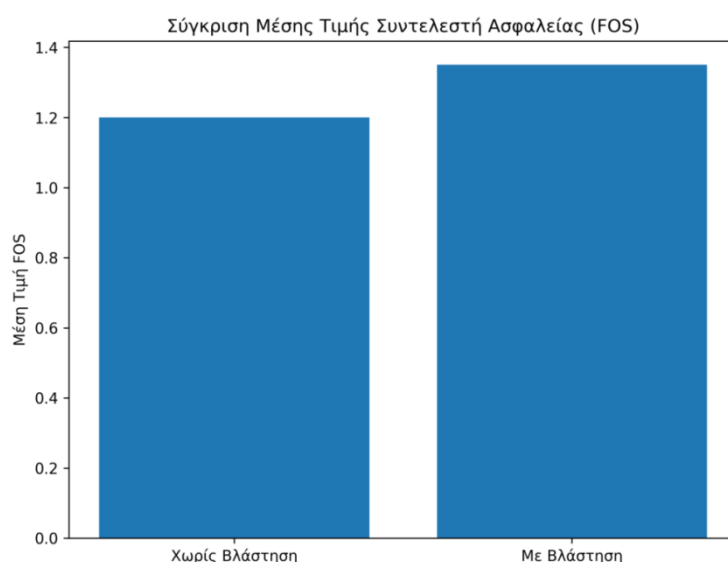
βλαστική περίοδο και τα χαρακτηριστικά των φυτών (Liang, Knappett & Bengough, 2020).

Παράλληλα, έχει επισημανθεί ότι η βλάστηση μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα, όπως αύξηση των φορτίων στην επιφάνεια του πρανούς ή δημιουργία ειδικών διαδρομών ροής μέσω των ριζικών καναλιών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των πιέσεων των πόρων κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (Ng et al., 2021; Stokes et al., 2021).

2.2.3 Συνολική Αποτίμηση και Ανάγκη Ποσοτικής Αξιολόγησης

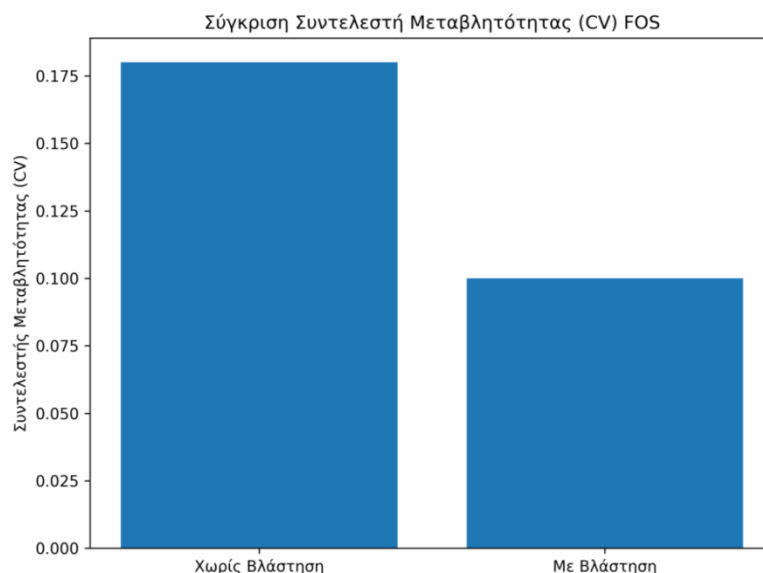
Η συνολική επίδραση της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών προκύπτει από την αλληλεπίδραση μηχανικών και υδρολογικών παραμέτρων και δεν μπορεί να αποτιμηθεί αξιόπιστα μέσω απλών ποιοτικών εκτιμήσεων (Stokes et al., 2021). Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει την ανάγκη ποσοτικής και στατιστικά τεκμηριωμένης αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας της βλάστησης, ιδιαίτερα όταν τα αποτελέσματα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τεχνικές αποφάσεις και σχεδιασμό έργων (Fenton & Griffiths, 2020).

Ενδεικτική απεικόνιση της στατιστικής σύγκρισης των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ πρανών με και χωρίς φυτική κάλυψη παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6α και στο Σχήμα 2.6β. (Field, 2018; Fenton & Griffiths, 2020). Για την καλύτερη κατανόηση της στατιστικής σύγκρισης των δύο συνθηκών, παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.6α η κατανομή των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς φυτική κάλυψη.



Σχήμα 2.6α: Σχηματική απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών (βροχόπτωση, διήθηση, διαπνοή, μεταβολή πιέσεων των πόρων) και της επίδρασης τους στις ενεργές τάσεις και στο συντελεστή ασφαλείας (FOS) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Fenton & Griffiths, 2020).

Η επίδραση της φυτικής κάλυψης μπορεί να αποτυπωθεί και μέσω της μεταβλητής ΔFOS , η οποία εκφράζει την διαφορά μεταξύ των δύο συνθηκών. Η ενδεικτική κατανομή της μεταβλητής αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6β.



Σχήμα 2.6β: Σύγκριση συντελεστή μεταβλητότητας (CV) του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη.

Η ταυτόχρονη αξιολόγηση μέσης τιμής και Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) επιτρέπει την πληρέστερη εκτίμηση τόσο του επιπέδου ευστάθειας όσο και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Πέραν της σύγκρισης των μέσων τιμών και της διασποράς, εξετάζεται και ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV), ο οποίος αποτυπώνει τη σχετική μεταβλητότητα του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) ως προς τη μέση τιμή και επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της αβεβαιότητας μεταξύ των σεναρίων με και χωρίς φυτική κάλυψη. (Fenton & Griffiths, 2020; Montgomery, 2019).

Η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων (π.χ. πρηνή με και χωρίς φυτική κάλυψη) και την αξιολόγηση της σημαντικότητας των διαφορών στο Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), λαμβάνοντας υπόψη την μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα των δεδομένων (Field, 2018; Montgomery, 2019). Η στατιστική αυτή προσέγγιση υιοθετείται στην παρούσα εργασία για την συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων και αναπτύσσεται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια (Field, 2018; Montgomery, 2019).

2.3 Στατιστική Αξιολόγηση και Αβεβαιότητα σε Γεωτεχνικές Αναλύσεις

Η γεωτεχνική μηχανική χαρακτηρίζεται από σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας η οποία απορρέει τόσο από τη φυσική μεταβλητότητα των εδαφικών ιδιοτήτων όσο και από τις αβεβαιότητες που εισάγονται κατά την δειγματοληψία, την δοκιμή και την μοντελοποίηση του εδάφους (Fenton & Griffiths, 2020). Οι αβεβαιότητες αυτές επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας πρανών και κατά συνέπεια, την αξιοπιστία των τεχνικών αποφάσεων που βασίζονται σε αυτές (Griffiths & Fenton, 2004).

Στην κλασική προσέγγιση της ευστάθειας των πρανών, η αξιολόγηση βασίζεται συχνά σε μεμονωμένες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), οι οποίες προκύπτουν από συγκεκριμένες παραδοχές για τις γεωτεχνικές παραμέτρους (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Ωστόσο, η πρακτική αυτή δεν αποτυπώνει τη διασπορά των αποτελεσμάτων ούτε επιτρέπει την εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ εναλλακτικών σεναρίων, όπως πρανή με και χωρίς φυτική κάλυψη (Fenton & Griffiths, 2020).

Η στατιστική αξιολόγηση εισάγεται ως εργαλείο για την ποσοτική διερεύνηση της μεταβλητότητας και της αξιοπιστίας των γεωτεχνικών αποτελεσμάτων. Μέσω της εφαρμογής περιγραφικής στατιστικής, ελέγχων κανονικότητας και ελέγχων υποθέσεων, καθίσταται δυνατή η συστηματική σύγκριση ομάδων δεδομένων και η τεκμηρίωση του κατά πόσο οι παρατηρούμενες διαφορές μπορούν να αποδοθούν σε πραγματικές επιδράσεις ή σε τυχαία διακύμανση (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Στο πλαίσιο των ελέγχων υποθέσεων, η επιλογή κατάλληλων στατιστικών ελέγχων εξαρτάται από την κατανομή των δεδομένων. Όταν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή, εφαρμόζονται παραμετρικοί έλεγχοι, όπως ο ζευγαρωμένος έλεγχος (paired t-test), ο οποίος χρησιμοποιείται για την σύγκριση μέσων τιμών δύο εξαρτημένων δειγμάτων (Field, 2018). Σε περιπτώσεις απόκλισης από την κανονικότητα προτείνονται μη παραμετρικοί έλεγχοι όπως ο έλεγχος Wilcoxon signed-rank, οι οποίοι δεν απαιτούν παραδοχές σχετικά με τη μορφή της κατανομής (Conover, 1999).

Η επιλογή του επιπέδου σημαντικότητας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της ανάλυσης. Το επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ χρησιμοποιείται ευρέως στις τεχνικές επιστήμες και στη στατιστική πρακτική, καθώς επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ του κινδύνου σφάλματος τύπου I (απόρριψη ορθής μηδενικής υπόθεσης) και της ικανότητας εντοπισμού ουσιαστικών διαφορών (Montgomery, 2019). Η επιλογή αυστηρότερου επιπέδου σημαντικότητας, π.χ. $\alpha = 0,01$ μειώνει την πιθανότητα σφάλματος τύπου I, αλλά αυξάνει τον κίνδυνο σφάλματος τύπου II, δηλαδή της μη ανίχνευσης πραγματικών διαφορών (Field, 2018). Η χρήση $\alpha = 0,05$ αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή στην μηχανική και στον στατιστικό έλεγχο ποιότητας, καθώς προσφέρει

αποδεκτή ισορροπία μεταξύ κινδύνου ψευδώς θετικού συμπεράσματος (Type I Error) και ισχύος του ελέγχου (power) (Field, 2018; Montgomery, 2019)

Η ενσωμάτωση στατιστικών εργαλείων στην ανάλυση ευστάθειας πρανών ευθυγραμμίζεται με τη σύγχρονη προσέγγιση της λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων (data-driven decision making), η οποία αποτελεί βασική αρχή των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας (ISO 9001, 2015). Η προσέγγιση αυτή, συνδέεται άμεσα με την απαίτηση του ISO 9001:2015, για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενεργειών μέσω δεδομένων και μετρήσιμων δεικτών (ISO 9001, 2015; Montgomery, 2015). Μέσω της στατιστικής τεκμηρίωσης τα γεωτεχνικά αποτελέσματα αποκτούν αυξημένη αξιοπιστία και μπορούν να υποστηρίξουν με μεγαλύτερη σαφήνεια την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών τεχνικών λύσεων, όπως η εφαρμογή φυτικής κάλυψης για την ενίσχυση της ευστάθειας πρανών (Fenton & Griffiths, 2020).

Συνεπώς, η στατιστική αξιολόγηση δεν λειτουργεί απλώς συμπληρωματικά προς την παραδοσιακή γεωτεχνική ανάλυση, καθώς αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και τη μείωση της αβεβαιότητας στις τεχνικές αποφάσεις. (Field, 2018; Fenton & Griffiths, 2020). Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τον πυρήνα της μεθοδολογίας που υιοθετείται στην παρούσα ΜΔΕ και αναπτύσσεται περαιτέρω στο κεφάλαιο μεθοδολογίας και ανάλυσης αποτελεσμάτων.

2.4 Συστήματα διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001 & ISO 14001) σε γεωτεχνικά έργα

Η εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος σε τεχνικά έργα αποσκοπεί στη συστηματική οργάνωση διαδικασιών, στη μείωση κινδύνων και στην λήψη αποφάσεων, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της συμμόρφωσης ενός διαχείριση οργανισμού (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015). Στα γεωτεχνικά έργα όπου οι αβεβαιότητες και οι επιπτώσεις αστοχιών μπορεί να είναι σημαντικές, η υιοθέτηση δομημένων διαδικασιών ελέγχου και τεκμηρίωσης θεωρείται κρίσιμη για την διαχείριση κινδύνου και την διασφάλιση της τεχνικής αξιοπιστίας (Fenton & Griffiths, 2020).

2.4.1 ISO 9001: Διαχείριση Ποιότητας και Τεκμηρίωση Τεχνικών Αποφάσεων

Το πρότυπο ISO 9001:2015 ορίζει απαιτήσεις για σύστημα διαχείρισης ποιότητας (QMS) με έμφαση στην προσέγγιση διεργασιών στη διαχείριση κινδύνων, στη συνεχή βελτίωση και στη λήψη αποφάσεων βάσει τεκμηριωμένων δεδομένων (ISO 9001,

2015). Κεντρική αρχή του προτύπου αποτελεί η ανάγκη για ακριβή πληροφορία ώστε οι αποφάσεις να μπορούν να ελεγχθούν, να αναπαραχθούν και να υποστηριχθούν με αποδείξεις (ISO 9001, 2015).

Στην γεωτεχνική πρακτική, η ποιότητα δεν περιορίζεται στην κατασκευή αλλά επεκτείνεται στη μελέτη, στην επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού, στην διαδικασία ελέγχου παραδοχών και στην διαχείριση αλλαγών που επηρεάζουν την ασφάλεια. Η ανάγκη τεκμηρίωσης είναι ιδιαίτερα έντονη στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών, όπου τα αποτελέσματα επηρεάζονται από μεταβλητότητα γεωτεχνικών παραμέτρων και μοντελοποιημένες παραδοχές (Duncan, Wright & Brandon, 2014; Fenton & Griffiths, 2020). Συνεπώς, η χρήση στατιστικής αξιολόγησης για την σύγκριση σεναρίων μπορεί να υποστηρίξει άμεσα την αρχή της τελικής απόφασης, καθώς επιτρέπει τον έλεγχο της σημαντικότητας των διαφορών και την μείωση του κινδύνου λανθασμένης ερμηνείας μεμονωμένων τιμών (Field, 2018; Montgomery, 2019).

2.4.2 ISO 14001: Περιβαλλοντική Διαχείριση και Βιώσιμες Τεχνικές Λύσεις

Το πρότυπο ISO 14001:2015 καθορίζει απαιτήσεις για σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης (EMS), με στόχο την αναγνώριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την αξιολόγηση επιπτώσεων και την εφαρμογή δράσεων ελέγχου, μέσα από κύκλο συνεχούς βελτίωσης (ISO 14001, 2015). Για έργα οδοποιίας και γεωτεχνικές παρεμβάσεις, περιβαλλοντικούς στόχους, περιλαμβάνουν τη διαχείριση εδαφών, την απορροή και διάβρωση, την παρέμβαση στη βλάστηση, καθώς και τον έλεγχο της ρύπανσης και της αποκατάστασης τοπίου (ISO 14001, 2015).

Στην κατεύθυνση αυτή, η φυτική κάλυψη μπορεί να αξιοποιηθεί ως φυσική τεχνική ενίσχυσης, η οποία συμβάλλει στη μείωση της διάβρωσης, στην ενίσχυση της διατμητικής αντοχής του εδάφους μέσω ριζικών συστημάτων και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής ενσωμάτωσης του έργου στο τοπίο (Stokes et al., 2021; Ng et al., 2021). Ωστόσο, η επιλογή μιας τέτοιας λύσης στο πλαίσιο περιβαλλοντικής διαχείρισης προϋποθέτει αξιολόγηση αποτελεσματικότητας και τεκμηρίωση ότι δεν υποβαθμίζει την τεχνική ασφάλεια, αλλά την ενισχύει (ISO 14001, 2015; Fenton & Griffiths, 2020).

2.4.3 Ενοποίηση ISO 9001 και ISO 14001 σε Γεωτεχνικές Εφαρμογές

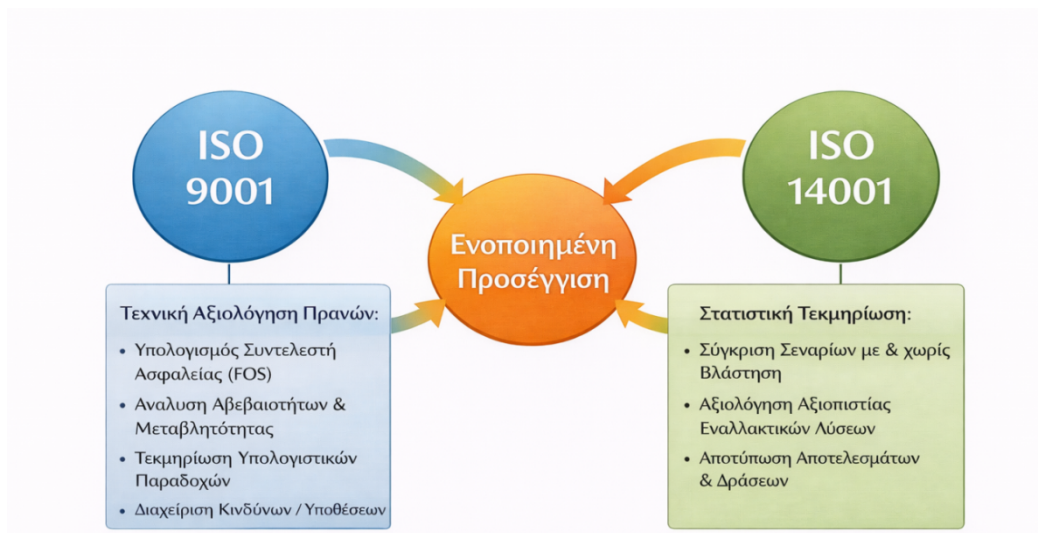
Η ταυτόχρονη εφαρμογή ISO 9001 και ISO 14001 σε τεχνικά έργα είναι εφικτή μέσω κοινών στοιχείων, όπως η πληροφορία, η προσέγγιση διεργασιών, η αξιολόγηση κινδύνων/ευκαιριών και η συνεχής βελτίωση (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015). Σε γεωτεχνικές εφαρμογές, η ενοποίηση αυτή μπορεί να μεταφραστεί σε τυποποίηση διαδικασιών συλλογής/ελέγχου γεωτεχνικών δεδομένων, αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων ευστάθειας, ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στη διαδικασία επιλογής λύσης, χωρίς έκπτωση στην ασφάλεια (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

Η στατιστική ανάλυση ως μέρος της παρούσας εργασίας, λειτουργεί ως εργαλείο που ενισχύει τη διασφάλιση ποιότητας, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και τη διαφανή τεκμηρίωση διαφορών μεταξύ σεναρίων, μειώνοντας τον κίνδυνο λήψης αποφάσεων στηριγμένων σε τυχαίες διακυμάνσεις δεδομένων (Field, 2018; Montgomery, 2019). Η παρούσα εργασία αναδεικνύει τη δυνατότητα σύνδεσης της γεωτεχνικής αξιολόγησης με τη στατιστική τεκμηρίωση και τις αρχές των προτύπων ISO, δημιουργώντας ένα πλαίσιο υποστήριξης τεκμηριωμένων τεχνικών αποφάσεων σε έργα ευστάθειας πρανών (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

Η ενσωμάτωση των αρχών των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015 στην διαδικασία αξιολόγησης ευστάθειας πρανών αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.7 (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015). Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει την σύνδεση μεταξύ τεχνικής ανάλυσης, στατιστικής τεκμηρίωσης και συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η φυτική κάλυψη μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια πρανών μέσω μηχανικών και υδρολογικών μηχανισμών, ενώ παράλληλα η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της επηρεάζεται από αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις γεωτεχνικές παραμέτρους και τις συνθήκες ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία υιοθετεί στατιστική προσέγγιση για την συγκριτική αξιολόγηση πρανών με και χωρίς φυτική κάλυψη, αξιοποιώντας εργαλεία περιγραφικής και επαγωγικής στατιστικής στο πλαίσιο τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων σύμφωνα με τις αρχές των ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015 (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015; Field, 2018; Fenton & Griffiths, 2020).

Με βάση τα παραπάνω, η στατιστική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία οργανώνεται σε διαδοχικά στάδια, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Ενοποιημένο πλαίσιο ISO 9001/14001 για τη γεωτεχνική αξιολόγηση πρανών και τη στατιστική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων (ISO 9001:2015; ISO 14001:2015; Montgomery, 2019; Fenton & Griffiths, 2020).

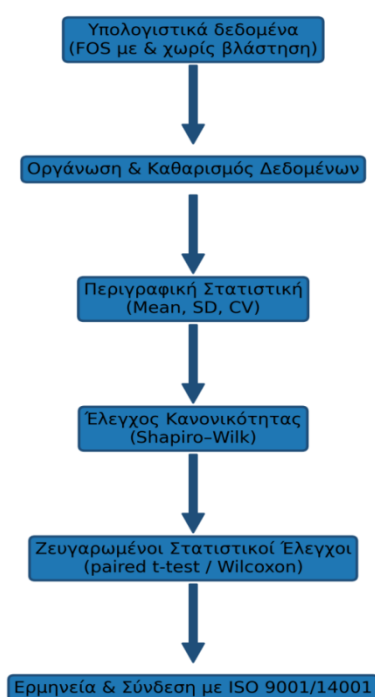
Η διασύνδεση τεχνικής ανάλυσης, στατιστικής τεκμηρίωσης και συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος, όπως αποτυπώθηκε στο Σχήμα 2.7, αποτελεί την θεωρητική βάση της μεθοδολογικής προσέγγισης που παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 Ερευνητικός Σχεδιασμός και Γενική Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εφαρμόζει συνδυαστική προσέγγιση γεωτεχνικής ανάλυσης και στατιστικής τεκμηρίωσης, με στόχο την ποσοτική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) πρανών (Duncan et al., 2014; Field, 2018). Ο Συντελεστής Ασφαλείας (FOS) όπως ορίστηκε στο Σχήμα 2.2, αποτελεί τη βασική μεταβλητή αξιολόγησης της ευστάθειας και εκφράζει τον λόγο της διαθέσιμης προς την απαιτούμενη διατμητική αντοχή (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014).

Ο ερευνητικός σχεδιασμός ακολουθεί διαδοχικά στάδια, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 3.1. Στο Σχήμα 3.1 αποτυπώνονται τα διαδοχικά στάδια επεξεργασίας των δεδομένων, από τη συλλογή των υπολογιστικών αποτελεσμάτων έως την στατιστική αξιολόγηση και την τελική σύνδεση των ευρημάτων με τις αρχές των προτύπων ISO.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής του ερευνητικού σχεδιασμού και της γενικής μεθοδολογικής προσέγγισης της ΜΔΕ.

Η μεθοδολογία βασίζεται στην σύγκριση δύο σεναρίων ανάλυσης:

1. Πρανές χωρίς φυτική κάλυψη

2. Πρανές με φυτική κάλυψη

Τα δύο σενάρια θεωρούνται ζευγαρωμένες συνθήκες (paired conditions), καθώς αφορούν την ίδια γεωμετρία πρανούς και τις ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους, διαφοροποιημένα αποκλειστικά ως προς την παρουσία ή μη φυτικής κάλυψης (Field, 2018). Η σύγκριση ζευγαρωμένων παρατηρήσεων επιτρέπει την απομόνωση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης, περιορίζοντας την συστηματική μεταβλητότητα (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Η επιλογή ζευγαρωμένου σχεδιασμού θεωρείται μεθοδολογικά καταλληλότερη από την σύγκριση ανεξάρτητων δειγμάτων, επειδή ελέγχει την ενδογενή μεταβλητότητα κάθε πρανούς και επιτρέπει ακριβέστερη αποτίμηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Η συνολική μεθοδολογική ροή της εργασίας περιλαμβάνει:

- Υπολογισμό τιμών Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για δύο σενάρια,
- Υπολογισμό μέσης τιμής (mean), τυπικής απόκλισης (SD), και διακύμανσης (variance),
- Υπολογισμό Συντελεστή Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation – CV),
- Έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων,
- Εφαρμογή κατάλληλου ελέγχου υποθέσεων (paired t-test ή Wilcoxon signed – rank test),
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων υπό το πρίσμα τεχνικού κινδύνου και συστημάτων διαχείρισης ποιότητας.

Η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στην παρούσα εργασία συνδέεται με την ανάγκη λήψης τεχνικών αποφάσεων (evidence-based decision making), σύμφωνα με τις αρχές του ISO 9001:2015 και την σύγχρονη προσέγγιση ποσοτικοποίησης της γεωτεχνικής αβεβαιότητας (ISO 9001, 2015; Fenton & Griffiths, 2020).

3.2 Περιγραφή και Προέλευση του Dataset Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων

Τα δεδομένα της παρούσας ανάλυσης προέρχονται από τα αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης ευστάθειας πρανών, όπως είχαν παραχθεί στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (Μπαλτζή, 2019) στην οποία πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις οριακής ισορροπίας για διαφορετικές γεωμετρίες και συνθήκες φόρτισης. Η αξιοποίησή τους στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται υπό νέα ερευνητική οπτική, με έμφαση στην στατιστική ανάλυση και στην αξιολόγηση μεταβλητότητας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί δευτερογενή στατιστική ανάλυση υφιστάμενων υπολογιστικών δεδομένων και δεν περιλαμβάνει νέες γεωτεχνικές προσομοιώσεις, εργαστηριακές δοκιμές ή επιτόπιες μετρήσεις.

Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε μορφή ζευγαρωμένων παρατηρήσεων (paired observations), ώστε να καταστεί δυνατή η άμεση σύγκριση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των δύο εξεταζόμενων συνθηκών για κάθε πρανές ξεχωριστά (Field, 2018). Κάθε πρανές εξετάστηκε υπό δύο συνθήκες (α) χωρίς φυτική κάλυψη και (β) με φυτική κάλυψη.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει την ζευγαρωμένη δομή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί στο ίδιο πρανές υπό δύο εξεταζόμενες συνθήκες (με και χωρίς φυτική κάλυψη), ενώ η διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (3.1):

$$\Delta FOS_i = FOS_i, \text{ με} - FOS_i, \text{ χωρίς} \quad (3.1)$$

όπου, i είναι ο δείκτης του εξεταζόμενου πρανούς ($i=1,2,\dots,n$) και n το συνολικό πλήθος των περιπτώσεων του δείγματος.

Πίνακας 3.1: Δομή ζευγαρωμένων δεδομένων (paired dataset) και υπολογισμός διαφορών ΔFOS μεταξύ σεναρίων.

Πρανές	FOS χωρίς βλάστηση	FOS με βλάστηση	ΔFOS
1	FOS_{10}	FOS_{11}	Δ_1
2	FOS_{20}	FOS_{21}	Δ_2
...	...	...	...
n	FOS_{n0}	FOS_{n1}	Δ_n

Η παραπάνω συμβολική αναπαράσταση επιτρέπει τη μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής ΔFOS, η οποία χρησιμοποιείται ως βασική μεταβλητή στους ζευγαρωμένους στατιστικούς ελέγχους. Για κάθε σενάριο (με και χωρίς φυτική κάλυψη), συλλέγονται οι αντίστοιχες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), οι οποίες αποτελούν το δείγμα της στατιστικής διερεύνησης.

Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Minitab (έκδοση 22), το οποίο παρέχει εξειδικευμένα εργαλεία για περιγραφική στατιστική, ελέγχους κανονικότητας και εφαρμογή παραμετρικών και μη παραμετρικών στατιστικών ελέγχων (Montgomery, 2019).

3.2.1 Προέλευση dataset

Το dataset που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία προέρχεται από προγενέστερη διπλωματική εργασία (Μπαλτζή, 2019), στην οποία πραγματοποιήθηκαν υπολογιστικές αναλύσεις ευστάθειας πρανών μέσω μεθόδων οριακής ισορροπίας.

Στην συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκαν διαφορετικές περιπτώσεις πρανών και υπολογίστηκε ο Συντελεστής Ασφαλείας (FOS) για δύο διαφορετικά σενάρια: χωρίς φυτική κάλυψη και με παρουσία βλάστησης. Η επίδραση της βλάστησης ενσωματώθηκε στην ανάλυση μέσω της πρόσθετης φαινομενικής συνοχής που αποδίδεται στο ριζικό σύστημα του εδάφους, σύμφωνα με την θεωρία της ριζοενίσχυσης (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης επαναχρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, όχι για γεωτεχνική επαναξιολόγηση της ανάλυσης ευστάθειας, αλλά για την εφαρμογή στατιστικών μεθόδων που επιτρέπουν την διερεύνηση της σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των δύο σεναρίων. Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα μελέτη διαφοροποιείται ουσιαστικά από την αρχική εργασία, καθώς εισάγει συστηματική στατιστική επεξεργασία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

3.2.2 Υπολογιστικές Παραδοχές

Οι υπολογιστικές τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) που χρησιμοποιούνται στο dataset, βασίζονται σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών που πραγματοποιήθηκαν με μεθόδους οριακής ισορροπίας (limit equilibrium methods). Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στην γεωτεχνική μηχανική για την εκτίμηση της ευστάθειας πρανών, καθώς επιτρέπουν τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μέσω της ισορροπίας δυνάμεων και ροπών κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας ολίσθησης (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Στις αναλύσεις θεωρήθηκε ότι οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι του εδάφους, όπως η συνοχή (c), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και το ειδικό βάρος (γ), παραμένουν σταθερές μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Η μοναδική μεταβλητή που διαφοροποιείται μεταξύ

των δύο περιπτώσεων είναι η παρουσία φυτικής κάλυψης, η οποία εισάγει πρόσθετη φαινομενική συνοχή στο έδαφος λόγω της δράσης των ριζικών συστημάτων.

Επιπλέον, θεωρήθηκαν σταθερές η γεωμετρία του πρανούς και οι συνθήκες φόρτισης, ώστε η διαφοροποίηση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) να αποδίδεται αποκλειστικά στην παρουσία ή μη φυτικής κάλυψης.

Η διατήρηση σταθερών των υπολοίπων γεωτεχνικών παραμέτρων μεταξύ των δύο σεναρίων είναι αναγκαία, ώστε η διαφοροποίηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) να αποδίδεται αποκλειστικά στην παρουσία της φυτικής κάλυψης και όχι σε μεταβολές άλλων παραγόντων.

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην θεωρία της ριζοενίσχυσης, σύμφωνα με την οποία οι ρίζες λειτουργούν ως φυσικός μηχανισμός ενίσχυσης του εδάφους, αυξάνοντας την διατμητική αντοχή κατά μήκος πιθανών επιφανειών αστοχίας (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021). Με τον τρόπο αυτό, η επίδραση της φυτικής κάλυψης ενσωματώνεται στην γεωτεχνική ανάλυση ως πρόσθετος όρος στην συνοχή του εδάφους.

3.2.3 Περιορισμοί Dataset

Παρότι το dataset παρέχει επαρκή βάση για στατιστική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών, παρουσιάζει ορισμένους μεθοδολογικούς περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία και γενίκευση των αποτελεσμάτων.

Πρώτον, τα δεδομένα προέρχονται από υπολογιστικές αναλύσεις και όχι από επιτόπιες μετρήσεις ή πειραματικά δεδομένα. Επομένως, οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) εξαρτώνται από τις παραδοχές του μοντέλου και τις γεωτεχνικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική μελέτη.

Δεύτερον, η επίδραση της φυτικής κάλυψης προσεγγίζεται μέσω της έννοιας της πρόσθετης φαινομενικής συνοχής, η οποία αποτελεί απλοποιημένη αναπαράσταση της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ ριζών, εδάφους και υδρολογικών διεργασιών (Stokes et al., 2021).

Τρίτον, το dataset αφορά συγκεκριμένες γεωμετρίες πρανών και συγκεκριμένες γεωτεχνικές παραμέτρους, γεγονός που περιορίζει την δυνατότητα εξαγωγής γενικευμένων συμπερασμάτων για το σύνολο των γεωτεχνικών συνθηκών.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων επιτρέπει την ποσοτική διερεύνηση της μεταβλητότητας των τιμών FOS και την αξιολόγηση της σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων.

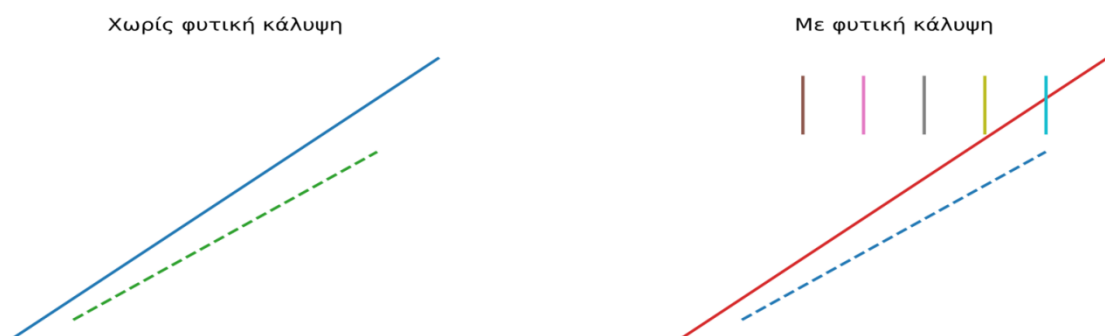
Επιπλέον, το σχετικά περιορισμένο μέγεθος του δείγματος ενδέχεται να μειώσει την στατιστική ισχύ των ελέγχων, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

3.3 Περιγραφή Εξεταζόμενων Σεναρίων

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο διακριτά σενάρια ευστάθειας πρανών, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την παρουσία φυτικής κάλυψης. Σκοπός της σύγκρισης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της βλάστησης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), μέσω της αξιολόγησης των διαφορών μεταξύ των δύο συνθηκών.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανού, καθώς και οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι του εδάφους, διατηρούνται σταθερά μεταξύ των δύο σεναρίων, ώστε να απομονωθεί η επίδραση της φυτικής κάλυψης.

Η γεωτεχνική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων, με και χωρίς φυτική κάλυψη, αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 3.2. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, η παρουσία ριζικού συστήματος επηρεάζει την διατμητική αντοχή του εδάφους και κατ' επέκταση τον υπολογιζόμενο Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), στοιχείο που αξιολογείται ποσοτικά στη στατιστική ανάλυση που ακολουθεί (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).



Σχήμα 3.2: Σχηματική σύγκριση πρανούς χωρίς και με φυτική κάλυψη, με ένδειξη πιθανής επιφάνειας ολίσθησης και επίδρασης ριζικού συστήματος στη διατμητική αντοχή.

3.3.1 Σενάριο Α: Πρανές χωρίς Φυτική Κάλυψη

Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η ευστάθεια πρανούς χωρίς την παρουσία φυτικής βλάστησης. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) βασίζεται αποκλειστικά στις βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δηλαδή στην συνοχή (c), στην γωνία τριβής (ϕ) και στο ειδικό βάρος του υλικού (γ).

Οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) υπολογίζονται μέσω των μεθόδων οριακής ισορροπίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωτεχνική μηχανική για την εκτίμηση της ευστάθειας πρανών (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Στο σενάριο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη καμία πρόσθετη ενίσχυση της διατμητικής αντοχής από ριζικά συστήματα.

3.3.2 Σενάριο Β: Πρανές με Φυτική Κάλυψη

Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση πρανούς με παρουσία φυτικής κάλυψης. Η επίδραση της βλάστησης λαμβάνεται υπόψη μέσω της έννοιας της ριζοενίσχυσης, σύμφωνα με την οποία τα ριζικά συστήματα λειτουργούν ως φυσικός οπλισμός του εδάφους και αυξάνουν την διατμητική αντοχή (Wu et al., 1979; Stokes et al., 2021).

Η επίδραση αυτή εκφράζεται μέσω μιας πρόσθετης φαινομενικής συνοχής (c_r), η οποία προστίθεται στην συνοχή του εδάφους. Κατά συνέπεια, ο Συντελεστής Ασφαλείας (FOS) στο σενάριο με φυτική κάλυψη υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την τροποποιημένη συνοχή του εδάφους.

Η μηχανιστική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο σεναρίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.3, όπου φαίνεται ότι η μοναδική μεταβλητή που μεταβάλλεται μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι η παρουσία ριζικού συστήματος.

3.3.3. Ζευγαρωμένη Δομή Δεδομένων

Για κάθε εξεταζόμενο πρανές υπολογίζονται δύο τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), μία για το σενάριο χωρίς φυτική κάλυψη και μία για το σενάριο με φυτική κάλυψη. Οι δύο αυτές τιμές αντιστοιχούν στην ίδια γεωμετρία πρανούς και στις ίδιες γεωτεχνικές παραμέτρους, γεγονός που δημιουργεί ζευγαρωμένες παρατηρήσεις (paired observations).

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την σύγκριση των δύο σεναρίων για κάθε πρανές ξεχωριστά και μειώνει την επίδραση εξωτερικών παραγόντων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η άμεση αξιολόγηση της μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) λόγω της φυτικής κάλυψης.

Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων εκφράζεται μέσω της μεταβλητής ΔFOS, η οποία υπολογίζεται ως η διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ της περίπτωσης χωρίς φυτική κάλυψη. Η μεταβλητή ΔFOS υπολογίζεται σύμφωνα με την Σχέση (3.1).

Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εφαρμογή ζευγαρωμένων στατιστικών ελέγχων, οι οποίοι παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα της εργασίας.

3.4 Στατιστική Μεθοδολογία

3.4.1 Περιγραφική Στατιστική

Η περιγραφική στατιστική αποτελεί το αρχικό στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων και χρησιμοποιείται για την συνοπτική παρουσίαση και την προκαταρκτική διερεύνηση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS). Μέσω της εφαρμογής της είναι δυνατή η εκτίμηση βασικών χαρακτηριστικών των δεδομένων, όπως η κεντρική τάση και η μεταβλητότητα, παρέχοντας μια πρώτη εικόνα των διαφορών μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων (Field, 2018).

Στην παρούσα εργασία η περιγραφική στατιστική εφαρμόζεται στις τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) που υπολογίζονται για τα δύο σεναρία πρηνών, δηλαδή χωρίς φυτική κάλυψη και με παρουσία βλάστησης. Για κάθε σύνολο δεδομένων υπολογίζονται βασικά στατιστικά μεγέθη, όπως:

- η μέση τιμή (mean), η οποία εκφράζει την κεντρική τάση των δεδομένων,
- η διακύμανση (variance),
- η τυπική απόκλιση (standard deviation-SD), η οποία αποτελεί μέτρο της μεταβλητότητας των δεδομένων,
- ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV), ο οποίος εκφράζει τη σχετική διασπορά των δεδομένων σε σχέση με τη μέση τιμή.

Η χρήση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη στην παρούσα εργασία, διότι επιτρέπει την συγκριτική εκτίμηση της σχετικής μεταβλητότητας των δύο σεναρίων ακόμη και όταν οι μέσες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) διαφέρουν.

Ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) υπολογίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή των δεδομένων και χρησιμοποιείται συχνά στη στατιστική ανάλυση για τη σύγκριση της μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών

συνόλων δεδομένων (Montgomery, 2019). Η σχέση υπολογισμού του δίνεται από την Σχέση (3.2):

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.2)$$

όπου, SD είναι η τυπική απόκλιση και $\bar{x}$ η μέση τιμή των δεδομένων.

Η εφαρμογή της περιγραφικής στατιστικής επιτρέπει την αρχική αξιολόγηση των διαφορών μεταξύ των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για τα δύο σενάρια πρανών και παρέχει ενδείξεις σχετικά με την πιθανή επίδραση της φυτικής κάλυψης στη σταθερότητα των πρανών.

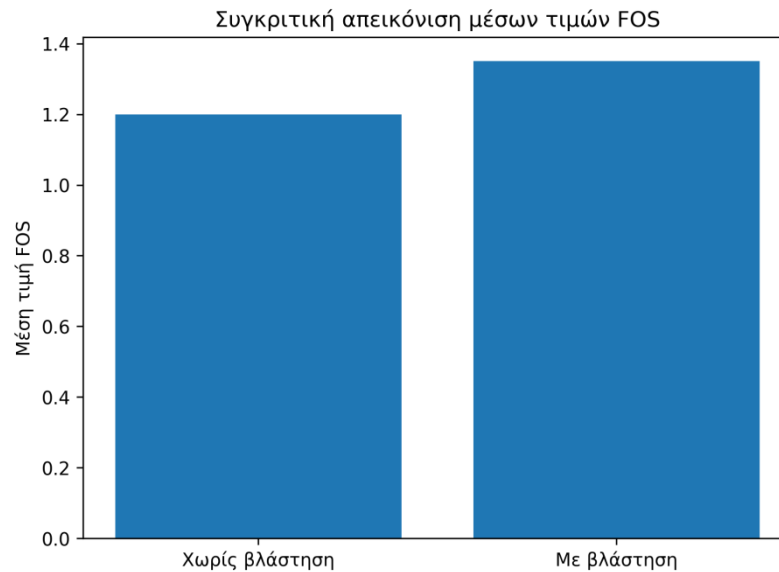
Οι υπολογισμοί των στατιστικών δεικτών πραγματοποιούνται με την χρήση του λογισμικού Minitab (έκδοση 22), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην στατιστική επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση μεταβλητότητας σε τεχνικές και επιστημονικές εφαρμογές.

3.4.2 Γραφική Απεικόνιση

Η γραφική απεικόνιση χρησιμοποιείται συμπληρωματικά προς τους αριθμητικούς στατιστικούς δείκτες, διευκολύνοντας την οπτική αξιολόγηση της κατανομής και της μεταβολής των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων (Montgomery, 2019). Μέσω των γραφημάτων είναι δυνατό να αναδειχθούν τάσεις, διαφορές μεταξύ ομάδων δεδομένων και πιθανές αποκλίσεις που δεν είναι άμεσα εμφανείς από τους αριθμητικούς δείκτες (Montgomery, 2019).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται γραφήματα που επιτρέπουν την οπτική διερεύνηση της κατανομής των δεδομένων και της μεταβλητότητας των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS). Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται το διάγραμμα ατομικών τιμών (Individual Value Plot) και το θηκόγραμμα (Boxplot), τα οποία διευκολύνουν τον εντοπισμό τάσεων, διαφορών μεταξύ των δύο συνθηκών και πιθανών ακραίων παρατηρήσεων (Field, 2018). Η γραφική απεικόνιση λειτουργεί συμπληρωματικά προς τους αριθμητικούς στατιστικούς δείκτες και υποστηρίζει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, η γραφική παρουσίαση των δεδομένων επιτρέπει την αρχική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια των πρανών και συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των διαφορών μεταξύ των δύο εξεταζόμενων συνθηκών.



Σχήμα 3.3: Ενδεικτική γραφική απεικόνιση της σύγκρισης τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των σεναρίων με και χωρίς φυτική κάλυψη.

3.4.3 Έλεγχος Κανονικότητας (Anderson-Darling)

Πριν την εφαρμογή των στατιστικών ελέγχων για την σύγκριση των δύο εξεταζόμενων σεναρίων, είναι απαραίτητο να εξεταστεί εάν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Η υπόθεση της κανονικότητας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή πολλών παραμετρικών στατιστικών μεθόδων, όπως ο ζευγαρωμένος έλεγχος t-test (Field, 2018).

Η εξέταση της κανονικότητας πραγματοποιείται με την χρήση του στατιστικού ελέγχου Anderson-Darling, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της προσαρμογής ενός συνόλου δεδομένων στην κανονική κατανομή και είναι διαθέσιμος στο λογισμικό Minitab που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Ο έλεγχος Anderson-Darling επιλέγεται διότι, επιτρέπει την αξιολόγηση της κανονικότητας μέσω της σύγκρισης της εμπειρικής και της θεωρητικής κατανομής των δεδομένων (Montgomery, 2019).

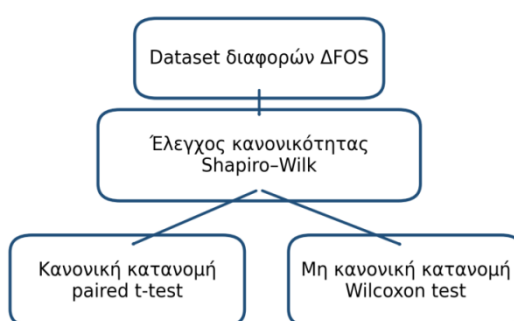
Στον έλεγχο Anderson-Darling διατυπώνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

H_0 : Τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή.

H_1 : Τα δεδομένα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή.

Εάν η τιμή p -value του ελέγχου είναι μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας, τότε δεν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και θεωρείται ότι τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Αντίθετα, όταν η τιμή p -value είναι μικρότερη από το επίπεδο σημαντικότητας, η υπόθεση της κανονικότητας απορρίπτεται.

Η επιλογή του κατάλληλου στατιστικού ελέγχου με βάση το αποτέλεσμα του ελέγχου κανονικότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Διαδικασία επιλογής στατιστικού ελέγχου με βάση τον έλεγχο κανονικότητας Anderson-Darling.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου κανονικότητας καθορίζει τον τύπο του στατιστικού ελέγχου που θα εφαρμοστεί για τη σύγκριση των δύο σεναρίων.

3.4.4 Ζευγαρωμένοι Στατιστικοί Έλεγχοι (paired t-test/Wilcoxon)

Για την στατιστική σύγκριση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων χρησιμοποιούνται ζευγαρωμένοι στατιστικοί έλεγχοι. Η επιλογή των ζευγαρωμένων ελέγχων βασίζεται στο γεγονός ότι για κάθε εξεταζόμενο πρანές υπάρχουν δύο αντίστοιχες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), μία για το σενάριο χωρίς φυτική κάλυψη και μία για το σενάριο με φυτική κάλυψη.

Η ζευγαρωμένη αυτή δομή των δεδομένων επιτρέπει την άμεση σύγκριση των δύο τιμών για το ίδιο πρανές, μειώνοντας την επίδραση εξωτερικών παραγόντων και αυξάνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Montgomery, 2019).

Ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου κανονικότητας εφαρμόζεται ένας από τους ακόλουθους στατιστικούς ελέγχους:

- Paired t-test

Εάν οι διαφορές των τιμών ΔFOS ακολουθούν κανονική κατανομή, εφαρμόζεται ο παραμετρικός ζευγαρωμένος έλεγχος paired t-test. Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται για την σύγκριση των μέσων τιμών δύο συσχετισμένων δειγμάτων και επιτρέπει την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας της διαφοράς μεταξύ τους (Field, 2018).

Στον έλεγχο paired t-test εξετάζεται εάν η μέση τιμή των διαφορών ΔFOS είναι στατιστικά διαφορετική από το μηδέν.

Οι υποθέσεις του ελέγχου είναι:

$$H_0: \mu\Delta FOS = 0$$

$$H_1: \mu\Delta FOS > 0$$

όπου, η μηδενική υπόθεση (H_0) υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη δεν επηρεάζει κατά μέσο όρο τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ενώ η εναλλακτική υπόθεση (H_1) υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη αυξάνει κατά μέσο όρο τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Field, 2018; Montgomery, 2019).

- Wilcoxon signed-rank test

Σε περίπτωση που οι διαφορές των δεδομένων δεν ακολουθούν κανονική κατανομή, εφαρμόζεται ο μη παραμετρικός έλεγχος Wilcoxon signed-rank test. Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται για την σύγκριση δύο συσχετισμένων δειγμάτων χωρίς την προϋπόθεση κανονικής κατανομής των δεδομένων (Conover, 1999).

Ο έλεγχος Wilcoxon signed-rank test βασίζεται στην σύγκριση των κατατάξεων των διαφορών μεταξύ των δύο δειγμάτων και επιτρέπει την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας της μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS).

Η εφαρμογή των παραπάνω στατιστικών ελέγχων πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Minitab, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές στατιστικής ανάλυσης δεδομένων και ελέγχου ποιότητας.

3.4.5 Επίπεδο Σημαντικότητας και Τεκμηρίωση ($\alpha = 0,05$)

Για την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$. Το επίπεδο σημαντικότητας εκφράζει την πιθανότητα σφάλματος τύπου I (Type I Error), δηλαδή την πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης ενώ αυτή είναι στην πραγματικότητα αληθής (Montgomery, 2019).

Η επιλογή του $\alpha = 0,05$ αποτελεί καθιερωμένη πρακτική στην στατιστική ανάλυση και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές, καθώς παρέχει ισορροπία μεταξύ της αυστηρότητας του στατιστικού ελέγχου και της δυνατότητας ανίχνευσης πραγματικών διαφορών στα δεδομένα (Field, 2018; Montgomery, 2019). Η τιμή αυτή θεωρείται επαρκής για την διαμόρφωση αξιόπιστων συμπερασμάτων χωρίς να αυξάνει υπερβολικά την πιθανότητα λανθασμένης απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης.

Στο πλαίσιο της παρούσα εργασίας, εάν η τιμή p-value που προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο είναι μικρότερη από επίπεδο σημαντικότητας $p\text{-value} < 0,05$, τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων θεωρείται στατιστικά σημαντική. Αντίθετα, όταν η τιμή $p\text{-value} \geq 0,05$, δεν υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης και η διαφορά δεν θεωρείται στατιστικά σημαντική (Field, 2018).

Η χρήση του επιπέδου σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) πρανών και συμβάλλει στην διαμόρφωση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

3.5 Δείκτες Αξιοπιστίας και Ερμηνεία Αβεβαιότητας

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων αποτελεί βασικό στοιχείο της επιστημονικής ανάλυσης, ιδιαίτερα σε γεωτεχνικές εφαρμογές όπου η αβεβαιότητα των παραμέτρων του εδάφους δύναται να επηρεάσει σημαντικά την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών. Στην παρούσα εργασία, εκτός από τη στατιστική σύγκριση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) εξετάζονται επίσης, δείκτες που σχετίζονται με την μεταβλητότητα των δεδομένων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της στατιστικής συμπεριφοράς των δεδομένων και συμβάλλουν στην ερμηνεία της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τις γεωτεχνικές αναλύσεις (Duncan, Wright & Brandon, 2014). Επιπλέον, η αξιολόγηση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων μπορεί να συνδεθεί με τις αρχές της διαχείρισης ποιότητας και της περιβαλλοντικής διαχείρισης που εφαρμόζονται σε τεχνικά έργα.

3.5.1 Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV)

Ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV), αποτελεί στατιστικό δείκτη που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σχετικής μεταβλητότητας ενός συνόλου δεδομένων. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την σχέση μεταξύ της τυπικής

απόκλισης και της μέσης τιμής και είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν συγκρίνονται σύνολα δεδομένων με διαφορετικές μέσες τιμές (Montgomery, 2019).

Στην παρούσα εργασία, ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) χρησιμοποιείται για την σύγκριση της σχετικής μεταβλητότητας των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων πρανών, δηλαδή με και χωρίς φυτική κάλυψη.

Η σύγκριση των τιμών του CV μεταξύ των δύο σεναρίων μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την σταθερότητα των αποτελεσμάτων και το βαθμό αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών. Υψηλότερες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν μεγαλύτερη σχετική διασπορά των δεδομένων γύρω από την μέση τιμή και κατ' επέκταση, αυξημένη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων.

3.5.2 Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size - Cohen's d)

Εκτός από τη στατιστική σημαντικότητα των διαφορών μεταξύ των δύο σεναρίων, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί και το μέγεθος της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στο Συντελεστή Ασφαλείας (FOS). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο δείκτης Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size - Cohen's d), ο οποίος επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση της έντασης της επίδρασης ενός παράγοντα στα δεδομένα (Cohen, 1988).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο όρος «Μέγεθος Επίδρασης» (Effect Size), ο οποίος αναφέρεται στον στατιστικό δείκτη Cohen's d και εκφράζει το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ δύο συνθηκών ανεξάρτητα από το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας (Cohen, 1988). Ο όρος αυτός δεν θα πρέπει να συγχέεται με το "Size Effect", το οποίο στην μηχανική και στα γεωτεχνικά έργα χρησιμοποιείται για την περιγραφή φαινομένων κλίμακας.

Ο δείκτης αυτός παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πρακτικό μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των δύο συνθηκών, και συμπληρώνει την πληροφορία που παρέχουν οι στατιστικοί έλεγχοι σημαντικότητας. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ο δείκτης αυτός επιτρέπει την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο η φυτική κάλυψη επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών.

Η χρήση του Effect Size θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική σε επιστημονικές αναλύσεις, καθώς επιτρέπει την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πέρα από την απλή ένδειξη στατιστικής σημαντικότητας. Σύμφωνα με τον Cohen (1988), τιμές $d \approx 0,20$ θεωρούνται μικρές, $d \approx 0,50$ μέτριες και $d \geq 0,80$ μεγάλες, παρέχοντας μία ενδεικτική κλίμακα ερμηνείας της πρακτικής σημασίας των αποτελεσμάτων (Cohen, 1988).

Στην παρούσα εργασία ο δείκτης Cohen's d χρησιμοποιείται συμπληρωματικά προς την στατιστική σημαντικότητα, ώστε να αξιολογηθεί όχι μόνο αν η επίδραση της φυτικής κάλυψης είναι στατιστικά ανιχνεύσιμη, αλλά και αν είναι πρακτικά ουσιαστική για τη γεωτεχνική αξιολόγηση. Επιπλέον, ο δείκτης Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size) υπολογίζεται μέσω του δείκτη Cohen's d, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την ποσοτικοποίηση της πρακτικής σημασίας των διαφορών μεταξύ δύο συνθηκών (Cohen, 1988).

3.5.3 Τεχνικός Κίνδυνος και Ερμηνεία Αβεβαιότητας

Η εκτίμηση της ευστάθειας των πρυνών βασίζεται σε γεωτεχνικές παραμέτρους που συχνά παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα, όπως η συνοχή του εδάφους, η γωνία εσωτερικής τριβής και το ειδικό βάρος του υλικού. Η μεταβλητότητα αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα στην εκτίμηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) και συνεπώς στην αξιολόγηση του τεχνικού κινδύνου.

Η ανάλυση της μεταβλητότητας των τιμών Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) και η αξιολόγηση των διαφορών μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τις γεωτεχνικές αναλύσεις. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συσχέτιση των στατιστικών αποτελεσμάτων με την έννοια του τεχνικού κινδύνου, ο οποίος αποτελεί βασικό στοιχείο στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αυξημένη μεταβλητότητα των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) υποδηλώνει μεγαλύτερη αβεβαιότητα ως προς τη γεωτεχνική συμπεριφορά του πρυνού και συνεπώς μικρότερη ευστοχία των αποτελεσμάτων.

3.5.4 Σύνδεση Αποτελεσμάτων με Συστήματα Διαχείρισης ISO

Η αξιολόγηση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων και η εκτίμηση της αβεβαιότητας των γεωτεχνικών αναλύσεων, μπορούν να συνδεθούν με τις αρχές των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος που εφαρμόζονται σε τεχνικά έργα.

Με βάση την βιβλιογραφία του προτύπου ISO 9001:2015, η συστηματική ανάλυση των δεδομένων και η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων αποτελούν βασικά στοιχεία της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και της συνεχούς βελτίωσης των τεχνικών διαδικασιών (ISO 9001, 2015).

Παράλληλα, το πρότυπο ISO 14001:2015 ενθαρρύνει την εφαρμογή περιβαλλοντικά βιώσιμων πρακτικών στον σχεδιασμό και την υλοποίηση τεχνικών έργων (ISO 14001, 2015). Η διερεύνηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια των

πρανών μπορεί να συμβάλλει στην προώθηση λύσεων, που συνδυάζουν τεχνική ασφάλεια και περιβαλλοντική προστασία.

Με βάση τα παραπάνω, η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας συνδυάζει γεωτεχνικές έννοιες, στατιστικά εργαλεία και αρχές διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος, με στόχο την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας παρουσιάζονται και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

4.1 Παρουσίαση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων Ευστάθειας Πρανών

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση προέρχονται από τις υπολογιστικές αναλύσεις ευστάθειας πρανών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη διπλωματική εργασία της (Μπαλτζή, 2019). Στις αναλύσεις αυτές εφαρμόστηκαν μέθοδοι οριακής ισορροπίας για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ο οποίος αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της ευστάθειας πρανών (Duncan et al., 2014).

Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση πρανούς υπολογίστηκαν τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για δύο διαφορετικά σενάρια:

- χωρίς φυτική κάλυψη
- με παρουσία φυτικής κάλυψης

Η επίδραση της φυτικής κάλυψης ενσωματώθηκε μέσω της έννοιας της ριζοενίσχυσης, η οποία αυξάνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους μέσω της πρόσθετης φαινομενικής συνοχής (Liang et al., 2020; Stokes et al., 2021).

Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε μορφή ζευγαρωμένων παρατηρήσεων, γεγονός που επιτρέπει την άμεση σύγκριση των δύο συνθηκών για το ίδιο πρανές και τη μείωση της επίδρασης εξωτερικών παραμέτρων (Field, 2018).

Η ανάλυση βασίζεται σε σύνολο τεσσάρων περιπτώσεων πρανών που προέρχονται από την προπτυχιακή διπλωματική εργασία (Μπαλτζή, 2019), οι οποίες καλύπτουν διαφορετικούς τύπους μηχανισμών αστοχίας και συνθήκες φόρτισης.

Οι περιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- βαθιούς και επιφανειακούς μηχανισμούς ολίσθησης
- συνθήκες με και χωρίς σεισμικά και υδραυλικά φορτία

Η επιλογή των περιπτώσεων αυτών επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης σε διαφορετικά γεωτεχνικά σενάρια. Η επίδραση της φυτικής κάλυψης δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι εξαρτάται από τον τύπο του μηχανισμού αστοχίας και τις συνθήκες φόρτισης (Ng et al., 2021).

Οι πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζουν τις τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την αρχική αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών, ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις γυμνού εδάφους με βλάστηση, καθώς και την αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή.

Πίνακας 4.1: Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) σε σύγκριση γυμνού εδάφους με την ύπαρξη βλάστησης.

	Χωρίς βλάστηση	Με βλάστηση	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
FOS βαθιού κύκλου ολίσθησης	1,75	1,724	-1,49 %
FOS επιφανειακού κύκλου ολίσθησης	1,634	2,587	58,32 %

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 προκύπτει ότι η επίδραση της φυτικής κάλυψης δεν είναι ίδια για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Στον βαθύ κύκλο ολίσθησης παρατηρείται μικρή μείωση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ενώ στον επιφανειακό κύκλο ολίσθησης καταγράφεται σημαντική αύξηση της τιμής του. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι η επίδραση της φυτικής κάλυψης ενδέχεται να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου μηχανισμού αστοχίας.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της φυτικής κάλυψης υπό δυσμενέστερες συνθήκες φόρτισης, ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις με σεισμικά και υδραυλικά φορτία, τόσο χωρίς όσο και με φυτική κάλυψη, καθώς και την αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή.

Πίνακας 4.2: Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με σεισμικά και υδραυλικά φορτία σε σύγκριση με την ύπαρξη βλάστησης και του γυμνού εδάφους.

	Χωρίς βλάστηση	Με βλάστηση	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
FOS βαθιού κύκλου ολίσθησης	1,04	1,096	5,38 %
FOS επιφανειακού κύκλου ολίσθησης	1,026	1,772	72,70 %

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2 δείχνουν αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις όταν λαμβάνεται υπόψη η φυτική κάλυψη. Η αύξηση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του επιφανειακού κύκλου ολίσθησης σε σύγκριση με τον βαθύ κύκλο ολίσθησης. Τα ευρήματα αυτά αποτελούν μια πρώτη ένδειξη ότι η φυτική κάλυψη συνδέεται με μεταβολές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), οι οποίες θα αξιολογηθούν περαιτέρω μέσω της στατιστικής ανάλυσης που ακολουθεί.

Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1 αξιολογούνται μέσω στατιστικής ανάλυσης, προκειμένου να διερευνηθεί η σημαντικότητα και η αξιοπιστία των διαφορών που παρατηρούνται.

4.2 Στατιστική αξιολόγηση

4.2.1 Περιγραφική στατιστική

Η περιγραφική στατιστική χρησιμοποιείται για την αρχική διερεύνηση των χαρακτηριστικών των δεδομένων και την κατανόηση της κεντρικής τάσης και της διασποράς των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Προκειμένου να διερευνηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των δεδομένων, ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα περιγραφικά στατιστικά μέτρα του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις με και χωρίς φυτική κάλυψη.

Πίνακας 4.3: Περιγραφικά στατιστικά μέτρα για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.

Μεταβλητή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Διασπορά	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)
Χωρίς βλάστηση	1,362	0,383	0,147	28,14 %
Με βλάστηση	1,795	0,611	0,374	34,07 %

Η μέση τιμή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) αυξάνεται από 1,362 στην περίπτωση χωρίς βλάστηση σε 1,795 με φυτική κάλυψη. Η διαφορά αυτή αποτελεί μια πρώτη ένδειξη ότι η παρουσία βλάστησης συνδέεται με υψηλότερες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS).

Παράλληλα, η τυπική απόκλιση αυξάνεται από 0,383 σε 0,611, ενώ ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) από 28,14% σε 34,07%. Η μεταβολή αυτή υποδηλώνει μεγαλύτερη σχετική διασπορά των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις περιπτώσεις με φυτική κάλυψη. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου μεγέθους του δείγματος, δεν είναι δυνατή η ασφαλής διερεύνηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην μεταβλητότητα αυτή.

Συνολικά, τα περιγραφικά στατιστικά μέτρα υποδεικνύουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων, οι οποίες αξιολογούνται περαιτέρω στις επόμενες ενότητες μέσω στατιστικών ελέγχων.

4.2.2 Γραφική απεικόνιση

Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων αποτελεί βασικό εργαλείο διερεύνησης της κατανομής και των διαφορών μεταξύ μεταβλητών (Field, 2018).

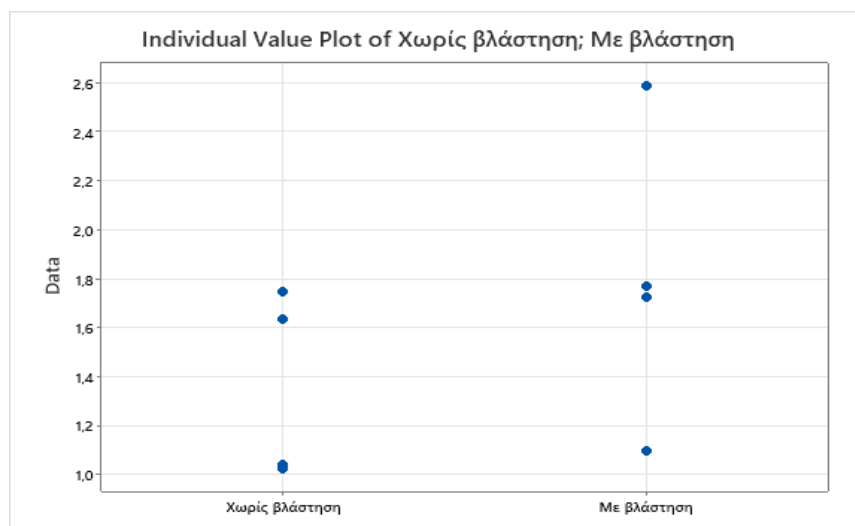
Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν διάγραμμα ατομικών τιμών (individual value plot) και θηκόγραμμα (boxplot).

Η επιλογή των συγκεκριμένων διαγραμμάτων πραγματοποιήθηκε διότι παρέχουν συμπληρωματικές πληροφορίες για τα δεδομένα και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για μικρά δείγματα. Το διάγραμμα ατομικών τιμών επιτρέπει την άμεση απεικόνιση κάθε παρατήρησης ξεχωριστά και διευκολύνει την σύγκριση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των δύο συνθηκών. Παράλληλα, το θηκόγραμμα παρέχει συνοπτική εικόνα της κατανομής των δεδομένων, παρουσιάζοντας την διάμεσο, τα τεταρτημόρια και την έκταση της διασποράς, ενώ συμβάλλει και στον εντοπισμό πιθανών ακραίων τιμών (Field, 2018).

Όπως φαίνεται στα Γράφηματα 4.1 και 4.2, οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με βλάστηση τείνουν να είναι υψηλότερες σε σχέση με την περίπτωση απουσίας της βλάστησης, χωρίς όμως η αύξηση αυτή να εμφανίζεται με τον ίδιο βαθμό σε όλες τις παρατηρήσεις. Η συνδυαστική χρήση των δύο διαγραμμάτων επιτρέπει την πληρέστερη κατανόηση των διαφορών μεταξύ των εξεταζόμενων συνθηκών και υποστηρίζει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την στατιστική ανάλυση.

Για την οπτική διερεύνηση της κατανομής των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις δύο εξεταζόμενες συνθήκες, το Γράφημα 4.1 παρουσιάζει το διάγραμμα ατομικών τιμών για τις περιπτώσεις με και χωρίς φυτική κάλυψη.

Γράφημα 4.1: Διάγραμμα ατομικών τιμών για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.

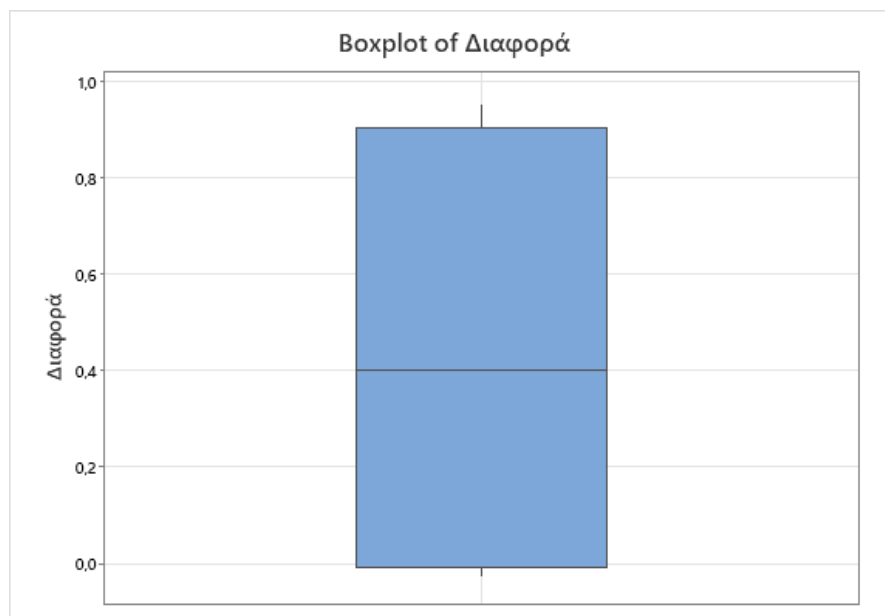


Στο Γράφημα 4.1 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση. Παρατηρείται ότι οι περισσότερες

τιμές στην περίπτωση με φυτική κάλυψη εμφανίζονται υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές χωρίς βλάστηση. Παράλληλα, μία παρατήρηση με τιμή $FOS = 2,587$ διαφοροποιείται αισθητά από τις υπόλοιπες τιμές του δείγματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επίδραση της φυτικής κάλυψης δεν εμφανίζεται με τον ίδιο βαθμό σε όλες τις περιπτώσεις.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της κατανομής των διαφορών μεταξύ των δύο συνθηκών, το Γράφημα 4.2 παρουσιάζει το θηκόγραμμα της μεταβλητής ΔFOS.

Γράφημα 4.2: Θηκόγραμμα για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.



Στο Γράφημα 4.2, παρουσιάζεται η κατανομή της μεταβλητής ΔFOS, η οποία εκφράζει την διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη. Παρατηρείται ότι, η διάμεσος και το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων βρίσκονται πάνω από το μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) τείνουν να είναι υψηλότερες στην περίπτωση παρουσίας φυτικής κάλυψης. Επιπλέον, δεν εντοπίζονται ακραίες παρατηρήσεις σύμφωνα με τα κριτήρια του θηκογράμματος.

Η γραφική ανάλυση λειτουργεί συμπληρωματικά προς την στατιστικής αξιολόγηση των δεδομένων και δεν επαρκεί από μόνη της για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

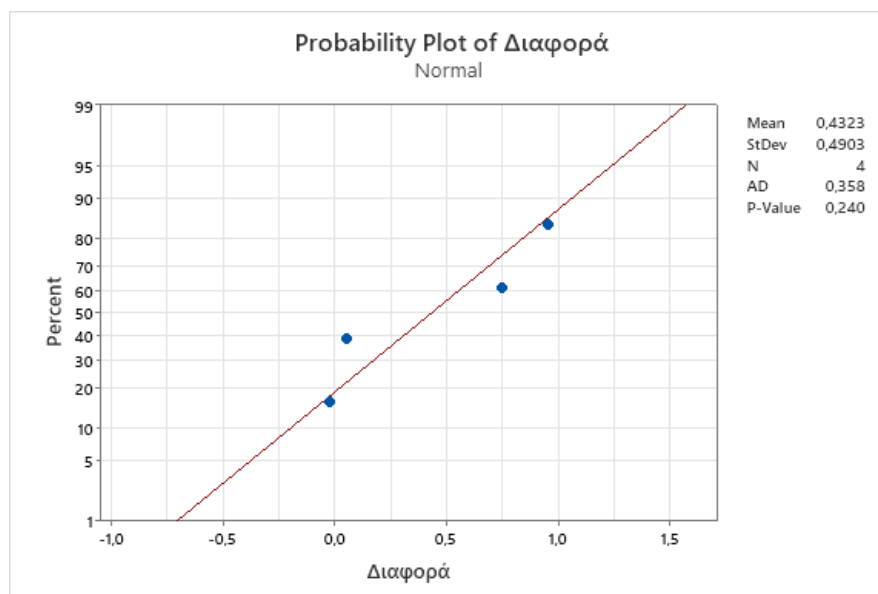
4.2.3 Έλεγχος Κανονικότητας

Η διερεύνηση της κανονικότητας των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή παραμετρικών στατιστικών ελέγχων (Field, 2018).

Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκε το τεστ Anderson-Darling, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση του κατά πόσο ένα σύνολο δεδομένων είναι συμβατό με την κανονική κατανομή (Stephens, 1974). Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται εάν οι διαφορές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη ακολουθούν κανονική κατανομή.

Για την οπτική αξιολόγηση της κανονικότητας των δεδομένων, το Γράφημα 4.3 παρουσιάζει το διάγραμμα πιθανοτήτων κανονικής κατανομής (Normal Probability Plot) που προέκυψε από το έλεγχο Anderson-Darling.

Γράφημα 4.3: Γραφικός έλεγχος κανονικής κατανομής για τη διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των πρανών με και χωρίς βλάστηση.



Από το γράφημα 4.3 προκύπτει ότι το p-value του ελέγχου ισούται με 0,24. Καθώς η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$, δεν υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις για την απόρριψη της υπόθεσης κανονικότητας των δεδομένων (Field, 2018).

Συνεπώς, η παραδοχή της κανονικής κατανομής των διαφορών θεωρείται αποδεκτή και μπορεί να εφαρμοστεί ο παραμετρικός έλεγχος paired t-test στην επόμενη ενότητα ανάλυσης.

4.2.4 Στατιστικός Έλεγχος Υποθέσεων

Για την σύγκριση των δύο συνθηκών χρησιμοποιήθηκε ο έλεγχος paired t-test, ο οποίος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εξαρτημένων δειγμάτων (Field, 2018; Montgomery, 2019), καθότι πρόκειται για μετρήσεις στα ίδια πρηνή, με και χωρίς βλάστηση.

Ο έλεγχος βασίζεται στη διαφορά των ζευγαρωμένων παρατηρήσεων και αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για εξαρτημένα δείγματα (Field, 2018).

Οι υποθέσεις του ελέγχου είναι:

- $H_0: \mu_{\Delta FOS} = 0$
- $H_1: \mu_{\Delta FOS} > 0$

όπου, $\mu_{\Delta FOS}$ είναι η πληθυσμιακή μέση τιμή της μεταβλητής ΔFOS .

Η μηδενική υπόθεση (H_0) υποδηλώνει ότι, η μέση διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη είναι μηδενική, δηλαδή ότι η παρουσία βλάστησης δεν επηρεάζει τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των εξεταζόμενων πρηνών. Αντίθετα, η εναλλακτική υπόθεση (H_1) υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη συμβάλλει στην αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) και κατ' επέκταση, στην βελτίωση της ευστάθειας πρηνών.

Για την αρχική περιγραφή των διαφορών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη, ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τα βασικά περιγραφικά στατιστικά μέτρα της μεταβολής ΔFOS .

Πίνακας 4.4: Περιγραφικά στατιστικά για τη μέση διαφορά.

Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Τυπικό σφάλμα του μέσου
0,432	0,490	0,245

όπου, $\mu\Delta FOS$ είναι η πληθυσμιακή μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με βλάστηση και χωρίς βλάστηση.

Η μέση τιμή της μεταβλητής ΔFOS είναι ίση με 0,432, γεγονός που δείχνει ότι οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) τείνουν να είναι υψηλότερες στην περίπτωση παρουσίας φυτικής κάλυψης. Παράλληλα, η τυπική απόκλιση των διαφορών είναι 0,490, ενώ το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής ανέρχεται σε 0,245, υποδηλώνοντας την μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει τις παρατηρούμενες διαφορές.

Για την διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας της παρατηρούμενης διαφοράς εφαρμόστηκε ο έλεγχος paired t-test. Τα αποτελέσματα του ελέγχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: t-test για εξαρτημένα δείγματα.

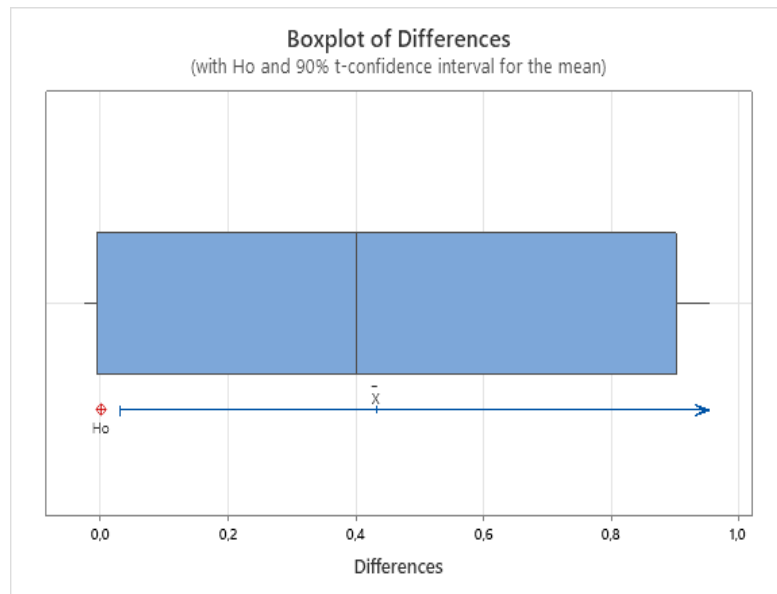
T-Value	P-Value
1,76	0,088

Εφόσον ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις εφαρμογής του παραμετρικού ελέγχου (κανονικότητα των διαφορών και απουσία ακραίων παρατηρήσεων), εφαρμόστηκε το paired t – test για εξαρτημένα δείγματα. Ο έλεγχος έδωσε τιμή $t = 1,76$ και $p - value = 0,088$. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι στατιστικά σημαντικό στο συμβατικό επίπεδο σημαντικότητα $\alpha = 0,05$ και συνεπώς, δεν επιτρέπει την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης. Ωστόσο, με βάση το επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,10$ που υιοθετήθηκε συμπληρωματικά για την διερευνητική αξιολόγηση των δεδομένων, η παρατηρούμενη διαφορά μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριακά στατιστικά σημαντική.

Η θετική μέση διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας ($\Delta FOS = 0,432$), σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος επίδρασης που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη ενδέχεται να συμβάλλει στην βελτίωση της ευστάθειας των πρανών. Ωστόσο, το περιορισμένο μέγεθος του δείγματος δεν επιτρέπει την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων και καθιστά αναγκαία την επιβεβαίωση των ευρημάτων με μεγαλύτερο αριθμό παρατηρήσεων.

Για την οπτική απεικόνιση της κατανομής των διαφορών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), το Γράφημα 4.4 παρουσιάζει το θηκόγραμμα της μεταβλητής ΔFOS .

Γράφημα 4.4: Θηκόγραμμα των διαφορών.



Από το Γράφημα 4.4 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των τιμών της μεταβλητής ΔFOS βρίσκεται πάνω από το μηδέν, γεγονός που είναι συμβατό με την θετική μέση διαφορά που προέκυψε από την περιγραφική στατιστική ανάλυση. Παράλληλα, δεν εντοπίζονται ακραίες παρατηρήσεις, στοιχείο που υποστηρίζει την αξιοπιστία της εφαρμογής του paired t-test. Η γραφική απεικόνιση λειτουργεί συμπληρωματικά προς τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου και συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της κατανομής των διαφορών μεταξύ των δύο συνθηκών.

4.2.5 Επίπεδο Σημαντικότητας

Στην παρούσα εργασία ως βασικό επίπεδο σημαντικότητας χρησιμοποιείται το $\alpha = 0,05$, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική στις τεχνικές αναλύσεις (Field, 2018; Montgomery, 2019). Με βάση το επίπεδο αυτό αξιολογείται η στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων και λαμβάνονται οι σχετικές αποφάσεις για την αποδοχή ή την απόρριψη των ερευνητικών υποθέσεων.

Ωστόσο, λόγω του μικρού μεγέθους δείγματος (4 παρατηρήσεις), η εφαρμογή ενός αυστηρού επιπέδου σημαντικότητας ενδέχεται να αυξήσει την πιθανότητα Σφάλματος Τύπου II (Type II Error), δηλαδή της μη ανίχνευσης μιας πραγματικής διαφοράς μεταξύ των εξεταζόμενων συνθηκών (Field, 2018).

Για τον λόγο αυτό η τιμή p-value εξετάζεται συμπληρωματικά και σε σχέση με το επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,10$, αποκλειστικά για ερμηνευτικούς σκοπούς και για την ανάδειξη πιθανών τάσεων στα δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή δεν μεταβάλλει το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της στατιστικής σημαντικότητας, το οποίο παραμένει

το $\alpha = 0,05$, αλλά συμβάλλει στην πληρέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και στην ανάδειξη ζητημάτων που μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω σε μελλοντικές μελέτες με μεγαλύτερο αριθμό παρατηρήσεων.

4.3 Δείκτες Αξιοπιστίας

Στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιούνται οι Δείκτες Αξιοπιστίας, οι οποίοι εστιάζουν στο μέγεθος και στη σταθερότητα της διαφοράς που εντοπίστηκε μεταξύ των εξεταζόμενων συνθηκών. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στη στατιστική σημαντικότητα, αλλά επεκτείνεται και στην αξιολόγηση της πρακτικής σημασίας και της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων.

Η χρήση του Συντελεστή Μεταβλητότητας – CV και του Μεγέθους Επίδρασης (Cohen's d) επιτρέπει:

- Τη διερεύνηση της σταθερότητας της επίδρασης της βλάστησης υπό διαφορετικές συνθήκες,
- Την αξιολόγηση της ισχύος της παρέμβασης, απομονώνοντας την πραγματική συμβολή της βλάστησης από τις τυχαίες διακυμάνσεις των μετρήσεων (Montgomery, 2019; Fenton & Griffiths, 2020).

4.3.1. Συντελεστής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV)

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, πέραν της ανάλυσης της κεντρικής τάσης, είναι απαραίτητη και η διερεύνηση της Σχετικής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation – CV). Αυτός αποτελεί ένα μέτρο διασποράς, το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών συνόλων δεδομένων ανεξαρτήτως κλίμακας, καθώς εκφράζει τη διασπορά σε σχέση με τη μέση τιμή (Montgomery, 2019).

Η χρήση της Σχετικής Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation – CV), είναι ιδιαίτερα σημαντική σε γεωτεχνικές εφαρμογές, όπου η αβεβαιότητα και η μεταβλητότητα των παραμέτρων επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των τεχνικών συμπερασμάτων (Fenton & Griffiths, 2020).

Για την συγκριτική αξιολόγηση της σχετικής διασποράς των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τις τιμές του Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) για τις περιπτώσεις χωρίς και με φυτική κάλυψη.

Πίνακας 4.6: Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση.

Μεταβλητή	CV
Χωρίς βλάστηση	28,14 %
Με βλάστηση	34,07 %

Από τον Πίνακα 4.6 παρατηρείται αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) από 28,14% στην περίπτωση χωρίς βλάστηση σε 34,07% στην περίπτωση με βλάστηση. Η μεταβολή αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση περίπου 5,93 ποσοστιαίων μονάδων και υποδηλώνει μεγαλύτερη σχετική διασπορά των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις περιπτώσεις με φυτική κάλυψη. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου μεγέθους του δείγματος, η αύξηση αυτή θα πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή και δεν επιτρέπει την ασφαλή διερεύνηση των αιτιών της μεταβλητότητας.

4.3.2 Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size – Cohen’s d)

Πέραν της στατιστικής σημαντικότητας, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απαιτεί και τη διερεύνηση της πρακτικής σημασίας της επίδρασης της φυτικής κάλυψης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το Μέγεθος Επίδρασης (Effect Size), το οποίο παρέχει πληροφορία σχετικά με το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των εξεταζόμενων συνθηκών, ανεξάρτητα από το μέγεθος του δείγματος, συμπληρωματικά της στατιστικής σημαντικότητας (Cohen, 1988; Field, 2018).

Ο δείκτης Cohen’s d αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους δείκτες μέτρησης του μεγέθους επίδρασης. Στην παρούσα εργασία, ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των πρανών και υπολογίζεται από την σχέση:

$$d = \frac{D}{s_D} \quad (3.3)$$

όπου, d είναι το Μέγεθος Επίδρασης (Cohen’s d), D είναι η μέση τιμή των διαφορών μεταξύ των δύο συνθηκών (ΔFOS), s_D είναι η τυπική απόκλιση των διαφορών.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης προκύπτει:

$$d = \frac{D}{s_D} = \frac{0,432}{0,490} = 0,882$$

Σύμφωνα με τον Cohen (1988), οι τιμές του δείκτη d περίπου ίσες με 0,20 θεωρούνται μικρές, περίπου ίσες με 0,50 μέτριες και μεγαλύτερες ή ίσες του 0,80 μεγάλες. Επομένως, η τιμή $d = 0,882$ υποδηλώνει μεγάλο μέγεθος επίδρασης, γεγονός που δείχνει ότι η φυτική κάλυψη έχει ουσιαστική πρακτική επίδραση στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των εξεταζόμενων πρανών (Cohen, 1988; Field, 2018).

Αν και η διαφορά δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ ($p = 0,088$), το μεγάλο μέγεθος επίδρασης υποδηλώνει ότι η επίδραση της φυτικής κάλυψης είναι πρακτικά σημαντική από γεωτεχνική άποψη και συνδέεται με την βελτίωση της ευστάθειας πρανών (Cohen, 1988; Field, 2018).

4.4. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη συμβάλλει θετικά στην ευστάθεια των πρανών, εύρημα το οποίο είναι συνεπές με τους μηχανισμούς που περιγράφονται στη σχετική βιβλιογραφία (Μπαλτζή, 2019). Επιπλέον, τα ποώδη φυτά προσφέρουν ριζοενίσχυση σε βάθος έως 0,50m (Μπαλτζή, 2019), αυξάνοντας τη διατμητική αντοχή του εδάφους μέσω της πρόσθετης φαινομενικής συνοχής.

Η επίδραση αυτή αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης, όπου ο Συντελεστής Ασφαλείας (FOS), παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα υπό συνθήκες σεισμικών και υδραυλικών φορτίσεων, με μέγιστη βελτίωση έως 72,7 %. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η φυτική κάλυψη μπορεί να λειτουργεί ως ενισχυτικός παράγοντας της ευστάθειας, ιδίως σε δυσμενείς συνθήκες φόρτισης.

Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι η διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς φυτική κάλυψη δεν είναι στατιστικά σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ ($p = 0,088$). Ωστόσο, η τιμή του p -value βρίσκεται κοντά στο προκαθορισμένο όριο σημαντικότητας, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη τάσης βελτίωσης της ευστάθειας των πρανών λόγω της παρουσίας βλάστησης.

Η ερμηνεία του αποτελέσματος δεν θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στη στατιστική σημαντικότητα. Το μέγεθος επίδρασης (Cohen's $d = 0,882$) κατατάσσεται στην κατηγορία των μεγάλων επιδράσεων (Cohen, 1988), υποδεικνύοντας ότι η διαφορά μεταξύ των δύο συνθηκών είναι ουσιαστική από τεχνική άποψη.

Το εύρημα αυτό είναι συμβατό με τη μηχανική λειτουργία της ριζοενίσχυσης, καθώς η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος αυξάνει τη φαινομενική συνοχή του εδάφους και

ενισχύει τη διατηρητική του αντοχή. Η επίδραση αυτή είναι εντονότερη σε επιφανειακούς μηχανισμούς αστοχίας, όπου οι ρίζες αλληλεπιδρούν άμεσα με τη ζώνη ολίσθησης, ενώ τείνει να μειώνεται σε βαθύτερους μηχανισμούς ολίσθησης. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποστηρίζουν ότι η φυτική κάλυψη μπορεί να συμβάλλει θετικά στην ευστάθεια των πρανών, παρότι το περιορισμένο μέγεθος του δείγματος δεν επιτρέπει την εξαγωγή ισχυρών στατιστικών συμπερασμάτων.

Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (Coefficient of Variation – CV) από 28,14 % σε 34,07 %, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη διασπορά των τιμών με παρουσία βλάστησης. Η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη φυσική μεταβλητότητα των γεωτεχνικών και βιολογικών παραμέτρων, όπως ο τύπος του φυτού, το βάθος και η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, καθώς και οι τοπικές εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες (Ng et al., 2021).

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδηλώνουν ότι, η φυτική κάλυψη αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα ενίσχυσης της ευστάθειας πρανών, ωστόσο η ερμηνεία των ευρημάτων θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, λόγω του περιορισμένου μεγέθους δείγματος και της αβεβαιότητας που συνυπάρχει στις γεωτεχνικές παραμέτρους.

4.5 Σύνδεση με ISO

Η εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης στην παρούσα εργασία ευθυγραμμίζεται με τις αρχές του προτύπου ISO 9001:2015, και ειδικότερα με την απαίτηση για λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων (evidence-based decision making) (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015). Η χρήση στατιστικών δεικτών, όπως το p-value, ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV) και το Μέγεθος Επίδρασης (Cohen's d), επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της φυτικής κάλυψης ως τεχνικής παρέμβασης, μειώνοντας την αβεβαιότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (ISO 9001, 2015).

Παράλληλα, η στατιστική προσέγγιση συνδέεται με την αρχή της διαχείρισης κινδύνου (risk-based thinking), καθώς παρέχει τη δυνατότητα ποσοτικής εκτίμησης τόσο της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων όσο και της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων. Με τον τρόπο αυτό, η επιλογή της ριζοενίσχυσης δεν βασίζεται αποκλειστικά σε εμπειρικά ή ποιοτικά κριτήρια, αλλά σε τεκμηριωμένα δεδομένα που ενισχύουν την αξιοπιστία της τεχνικής απόφασης.

Σε σχέση με το πρότυπο ISO 14001:2015, η διερεύνηση της φυτικής κάλυψης ως μέσου ενίσχυσης της ευστάθειας πρανών εντάσσεται στο πλαίσιο της προώθησης

χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η ριζοενίσχυση αποτελεί μια ήπια και φιλική προς το περιβάλλον παρέμβαση, η οποία συμβάλλει στη μείωση της ανάγκης για βαριές τεχνικές κατασκευές, περιορίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ενεργειακή κατανάλωση (ISO 14001, 2015).

Η στατιστική τεκμηρίωση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης ενισχύει την αξιολόγησή της ως τεχνικά αξιόπιστης και περιβαλλοντικά συμβατής λύσης. Συνεπώς, η παρούσα προσέγγιση συνδέει τη γεωτεχνική ανάλυση με τις αρχές της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων, αποδοτικών και βιώσιμων τεχνικών αποφάσεων.

Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα εργασία δεν περιορίζεται στην τεχνική αξιολόγηση της ευστάθειας πρανών, αλλά συμβάλλει στη γεφύρωση της γεωτεχνικής μηχανικής με τα σύγχρονα πρότυπα διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος, ενισχύοντας την εφαρμογή ολοκληρωμένων και βιώσιμων τεχνικών λύσεων.

Πέραν της στατιστικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, η παρούσα εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο τα ευρήματα της ανάλυσης μπορούν να υποστηρίξουν την λήψη τεχνικών αποφάσεων στο πλαίσιο της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος. Για τον σκοπό αυτό, ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει την σύνδεση των βασικών αποτελεσμάτων της μελέτης με επιλεγμένες αρχές των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015, αναδεικνύοντας την συμβολή της στατιστικής τεκμηρίωσης στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας, της αβεβαιότητας και της περιβαλλοντικής διάστασης των τεχνικών παρεμβάσεων (ISO 9001, 2015; 14001, 2015; Montgomery, 2019).

Πίνακας 4.7: Σύνδεση των αποτελεσμάτων της μελέτης με τις αρχές των προτύπων ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015.

Εύρημα της μελέτης	Υποστήριξη τεχνικής απόφασης	Σύνδεση με ISO
Αύξηση μέσης τιμής FOS	Ένδειξη βελτίωσης ευστάθειας πρανών	ISO 9001: τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων
Αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV)	Αξιολόγηση μεταβλητότητας και αβεβαιότητας	ISO 9001: risk-based thinking
Μεγάλο μέγεθος επίδρασης (Cohen's $d = 0,882$)	Εκτίμηση πρακτικής σημασίας της παρέμβασης	ISO 9001: αξιολόγηση αποτελεσματικότητας
Χρήση φυτικής κάλυψης	Λύση χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος	ISO 14001: περιβαλλοντική βελτίωση

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδεικνύουν ότι η αξιολόγηση τεχνικών παρεμβάσεων δεν θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), αλλά να συμπληρώνεται από την αξιολόγηση της στατιστικής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στην μείωση της αβεβαιότητας κατά την διαδικασία λήψης αποφάσεων και ενισχύει την τεχνική τεκμηρίωση των επιλεγόμενων λύσεων, σύμφωνα με τις αρχές της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος (ISO 9001:2015; 14001:2015; Field, 2018; Montgomery, 2019).

4.6 Υλοποίηση στο Minitab

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Minitab (έκδοση 22). Τα επιμέρους βήματα της διαδικασίας και τα πλήρη αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά τεχνικά και στατιστικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια πρανών οδικών έργων. Παράλληλα, αναλύεται η θεωρητική και πρακτική συμβολή της μελέτης, ενώ παρουσιάζονται οι βασικοί περιορισμοί της έρευνας και οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση του αντικειμένου (Field, 2018).

5.2 Κύρια τεχνικά και στατιστικά συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη συμβολή της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια των πρανών οδικών έργων, μέσω της ανάλυσης του Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety – FOS) και της εφαρμογής στατιστικών μεθόδων. Η σύνθεση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε συμπεράσματα που αφορούν τόσο την τεχνική συμπεριφορά των πρανών όσο και την αξιοπιστία της στατιστικής ερμηνείας.

Σε τεχνικό επίπεδο, διαπιστώνεται σαφής τάση βελτίωσης της ευστάθειας των πρανών με την παρουσία φυτικής κάλυψης, όπως προκύπτει από την αύξηση της μέσης τιμής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), από 1,362 σε 1,795. Η μεταβολή αυτή υποδηλώνει ενίσχυση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, η οποία μπορεί να αποδοθεί στον μηχανισμό της ριζοενίσχυσης, μέσω της αύξησης της φαινομενικής συνοχής. Η επίδραση αυτή είναι συμβατή με τον μηχανισμό της ριζοενίσχυσης που περιγράφεται στην βιβλιογραφία (Ng et al., 2021; Stokes et al., 2021).

Ωστόσο, η επίδραση της φυτικής κάλυψης δεν είναι ομοιόμορφη. Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων υποδηλώνει ότι η αποτελεσματικότητα της ριζοενίσχυσης εξαρτάται από γεωτεχνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το βάθος του μηχανισμού ολίσθησης, ο τύπος του εδάφους, οι συνθήκες φόρτισης και η αλληλεπίδρασή τους με το εδαφικό υλικό. Συνεπώς, η φυτική κάλυψη δεν μπορεί να θεωρηθεί ως απόλυτα προβλέψιμη και γενικεύσιμη τεχνική λύση, αλλά ως παράγοντας που λειτουργεί υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Σε επίπεδο στατιστικής ανάλυσης, ο έλεγχος paired t-test έδειξε ότι η διαφορά μεταξύ των δύο συνθηκών δεν κρίθηκε στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ ($p\text{-value} = 0,088$). Το αποτέλεσμα αυτό σχετίζεται κυρίως με το περιορισμένο μέγεθος δείγματος ($n = 4$), το οποίο μειώνει τη στατιστική ισχύ του ελέγχου. Ωστόσο, η τιμή του $p\text{-value}$ υποδηλώνει τάση θετικής επίδρασης της φυτικής κάλυψης, ιδιαίτερα όταν συνεκτιμάται με τους δείκτες πρακτικής σημαντικότητας και τη μηχανική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η στατιστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν περιορίζεται στο p-value, αλλά ενισχύεται από την ανάλυση του μεγέθους επίδρασης. Η ανάλυση του μεγέθους επίδρασης υποδηλώνει ότι η επίδραση της φυτικής κάλυψης μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σημαντική, ακόμη και αν δεν κατέστη δυνατή η πλήρης στατιστική τεκμηρίωσή της λόγω του περιορισμένου μεγέθους δείγματος. Το αποτέλεσμα αυτό, υπογραμμίζει ότι σε μελέτες μικρού δείγματος, η αποκλειστική χρήση του p-value μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της πραγματικής επίδρασης. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση συμπληρωματικών δεικτών, όπως το Μέγεθος Επίδρασης (Cohen's d) (Cohen, 1988), ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV), και η αξιολόγηση της μέσης διαφοράς του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ώστε να επιτευχθεί πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Παράλληλα, η αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) από 28,14% σε 34,07% υποδηλώνει αυξημένη διασπορά των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις με φυτική κάλυψη, χωρίς όμως να είναι δυνατή η πλήρης διερεύνηση των αιτιών της λόγω του περιορισμένου μεγέθους δείγματος. Επομένως, ενώ η ριζοενίσχυση συμβάλλει στη βελτίωση της ευστάθειας, η απόδοσή της συνοδεύεται από αυξημένη αβεβαιότητα.

Συνολικά τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η φυτική κάλυψη αποτελεί έναν σημαντικό, αλλά όχι απόλυτα προβλέψιμο, παράγοντα ενίσχυσης της ευστάθειας πρανών. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της απαιτεί συνδυαστική προσέγγιση, η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο τα στατιστικά κριτήρια όσο και τη μηχανική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εξαγωγή πιο αξιόπιστων και τεχνικά χρήσιμων συμπερασμάτων για την εφαρμογή της φυτικής κάλυψης σε έργα πολιτικού μηχανικού (Field, 2018; Montgomery, 2019).

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης απαντούν στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στο Κεφάλαιο 1. Ειδικότερα, η φυτική κάλυψη φαίνεται να συνδέεται με αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), ενώ η επίδραση αυτή, παρότι δεν τεκμηριώθηκε στατιστικά σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$, κρίθηκε πρακτικά σημαντική λόγω του μεγάλου μεγέθους επίδρασης (Cohen's d = 0,882). Παράλληλα, η αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) υποδηλώνει μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις με φυτική κάλυψη. Τέλος, η εφαρμογή στατιστικών εργαλείων και η σύνδεσή τους με τις αρχές των ISO 9001:2015 και ISO 14001:2015 ανέδειξαν την συμβολή της στατιστικής τεκμηρίωσης στην λήψη τεχνικών αποφάσεων βάσει δεδομένων.

5.3 Θεωρητική και πρακτική συμβολή της μελέτης

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει θεωρητική και πρακτική συμβολή στο αντικείμενο της ευστάθειας πρανών και της αξιοποίησης της φυτικής κάλυψης ως τεχνικής παρέμβασης.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία ενισχύει την κατανόηση του μηχανισμού της ριζοενίσχυσης ως παράγοντα βελτίωσης της ευστάθειας των πρανών, υποστηρίζοντας και ποσοτικοποιώντας την συμβολή της μέσω της μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS). Η παρούσα εργασία δεν περιορίστηκε σε ποιοτική περιγραφή της

επίδρασης της φυτικής κάλυψης, αλλά επιχείρησε την ποσοτική αποτίμησή της μέσω του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) των διαθέσιμων δεδομένων. Παράλληλα, αναδεικνύει ότι η επίδραση της βλάστησης δεν είναι σταθερή ή καθολική, αλλά εξαρτάται από γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που προσθέτει βάθος στην ερμηνεία των σχετικών μηχανισμών.

Ιδιαίτερη θεωρητική συμβολή της εργασίας, αποτελεί η μεθοδολογική της προσέγγιση, μέσω της συνδυαστικής χρήσης στατιστικών δεικτών. Η ταυτόχρονη αξιοποίηση του p-value, του μεγέθους επίδρασης (Cohen's d) και του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) επιτρέπει μια πολυδιάστατη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, υπερβαίνοντας τους περιορισμούς της αποκλειστικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων μέσω της στατιστικής σημαντικότητας. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ανάλυση της αβεβαιότητας και προτείνει ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης σε γεωτεχνικές εφαρμογές.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η φυτική κάλυψη μπορεί να αποτελέσει μια δυνητικά αξιόπιστη και βιώσιμη λύση για την βελτίωση της ευστάθειας πρανών, ιδίως σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται ήπιες παρεμβάσεις. Η δυνατότητα αύξησης του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS), σε συνδυασμό με τη χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση, καθιστά τη ριζοενίσχυση μια ελκυστική εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση έναντι συμβατικών τεχνικών ενίσχυσης.

Παράλληλα, η μελέτη συμβάλλει στην γεφύρωση της γεωτεχνικής μηχανικής με τις αρχές διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος. Η χρήση στατιστικών μεθόδων για την τεκμηρίωση των τεχνικών επιλογών ενισχύει τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων, ενώ η ανάδειξη της φυτικής κάλυψης ως αποτελεσματικής λύσης υποστηρίζει την ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών στον σχεδιασμό τεχνικών έργων. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τις αρχές του ISO 9001:2015 για λήψη αποφάσεων και του ISO 14001:2015 για την προώθηση βιώσιμων τεχνικών λύσεων (ISO 9001, 2015; ISO 14001, 2015).

Τέλος, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της διάκρισης μεταξύ στατιστικής και πρακτικής σημαντικότητας, ιδίως σε περιπτώσεις περιορισμών δεδομένων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει πληρέστερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς λαμβάνει υπόψη τόσο την στατιστική σημαντικότητα όσο και την μεταβλητότητα και την πρακτική σημασία των παρατηρούμενων διαφορών.

Η κύρια συνεισφορά της παρούσας εργασίας δεν έγκειται στην παραγωγή νέων γεωτεχνικών δεδομένων, αλλά στην εφαρμογή στατιστικής τεκμηρίωσης σε υφιστάμενα αποτελέσματα ευστάθειας πρανών και στην σύνδεση της γεωτεχνικής αξιολόγησης με τις αρχές της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος.

5.4 Περιορισμοί και Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας

Η παρούσα μελέτη, παρά τα σημαντικά ευρήματα που προκύπτουν, συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν τόσο τη στατιστική τεκμηρίωση όσο και τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων. Η αναγνώριση των περιορισμών

αυτών είναι απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των ευρημάτων και τη διαμόρφωση αξιόπιστων κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα.

Ο σημαντικότερος περιορισμός της μελέτης αφορά το περιορισμένο μέγεθος δείγματος ($n = 4$), το οποίο επηρεάζει άμεσα τη στατιστική ισχύ των ελέγχων. Το μικρό δείγμα αυξάνει την πιθανότητα Σφάλματος Τύπου II (Type II Error), δηλαδή της μη ανίχνευσης μιας πραγματικής διαφοράς όταν αυτή υπάρχει (Field, 2018). Το γεγονός αυτό εξηγεί τη μη στατιστική σημαντικότητα σε επίπεδο $\alpha = 0,05$ ($p = 0,088$), παρά την ύπαρξη μεγάλου μεγέθους επίδρασης (Cohen's $d = 0,882$). Η απόκλιση αυτή μεταξύ στατιστικής και πρακτικής σημαντικότητας αναδεικνύει τη σημασία της πολυπαραγοντικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα σε συνθήκες περιορισμένων δεδομένων.

Επιπλέον, η αύξηση του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV) υποδηλώνει ενίσχυση της διασποράς των αποτελεσμάτων με την παρουσία φυτικής κάλυψης, γεγονός που σχετίζεται με την εγγενή αβεβαιότητα των γεωτεχνικών και βιολογικών παραμέτρων. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η συμπεριφορά της ριζοενίσχυσης δεν είναι πλήρως προβλέψιμη και ότι απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής τεχνικής ευθύνης.

Από τη σκοπιά της διαχείρισης ποιότητας, οι παρακάτω περιορισμοί συνδέονται άμεσα με τις αρχές του προτύπου ISO 9001:2015, και ειδικότερα με την απαίτηση για λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων (evidence-based decision making) και τη διαχείριση κινδύνου (risk-based thinking) (ISO 9001:2015; ISO 14001:2015). Το περιορισμένο δείγμα και η αυξημένη μεταβλητότητα αποτελούν παράγοντες αβεβαιότητας, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη λήψη τεχνικών αποφάσεων, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ποιότητα των εφαρμοσμένων λύσεων.

Παράλληλα, από περιβαλλοντική σκοπιά, σύμφωνα με τις αρχές του ISO 14001:2015, η εφαρμογή της φυτικής κάλυψης ως τεχνικής παρέμβασης θα πρέπει να αξιολογείται όχι μόνο ως προς την αποτελεσματικότητά της, αλλά και ως προς την περιβαλλοντική της απόδοση υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων υποδηλώνει ότι η εφαρμογή της ριζοενίσχυσης απαιτεί προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη περιβαλλοντική και τεχνική απόδοση.

Επιπρόσθετα, η παρούσα ανάλυση βασίστηκε σε δευτερογενή επεξεργασία υφιστάμενων δεδομένων και όχι σε πρωτογενή πειραματική ή επιτόπια έρευνα. Ως εκ τούτου, οι δυνατότητες ελέγχου και επαλήθευσης των αρχικών παραδοχών ήταν περιορισμένες. Παράγοντες όπως η γεωμετρία του πρηνούς, η υδρολογική κατάσταση, ο τύπος του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της φυτικής κάλυψης ενδέχεται να επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος.

Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς, προκύπτουν σαφείς κατευθύνσεις για τη μελλοντική έρευνα. Αρχικά, κρίνεται απαραίτητη η αύξηση του μεγέθους δείγματος και η συλλογή δεδομένων από ευρύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών, ώστε να ενισχυθεί η στατιστική ισχύς των ελέγχων και η αξιοπιστία των συμπερασμάτων. Παράλληλα, προτείνεται η εφαρμογή περισσότερο σύνθετων στατιστικών και

πιθανοτικών μεθόδων, όπως αναλύσεις αξιοπιστίας (reliability analysis) και προσομοιώσεις Monte Carlo (Fenton & Griffiths, 2020).

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση διαφορετικών τύπων φυτικής κάλυψης και η ανάλυση της επίδρασής τους σε διαφορετικά βάθη ολίσθησης και συνθήκες φόρτισης. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποιημένες τεχνικές εφαρμογές.

Επίσης, προτείνεται η ενσωμάτωση της παρούσας μεθοδολογίας σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης τεχνικών έργων, το οποίο θα συνδυάζει τη γεωτεχνική ανάλυση με τις αρχές της ποιότητας και της περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η κατεύθυνση αυτή μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της λήψης αποφάσεων και στην προώθηση βιώσιμων και τεκμηριωμένων τεχνικών λύσεων.

Συνολικά, τα ευρήματα της παρούσας εργασίας υποστηρίζουν ότι η φυτική κάλυψη μπορεί να συμβάλλει θετικά στην ευστάθεια πρανών, υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνονται υπόψη οι γεωτεχνικές ιδιαιτερότητες κάθε περίπτωσης και η αβεβαιότητα που συνοδεύει την συμπεριφορά του εδάφους. Η συνδυαστική αξιολόγηση γεωτεχνικών και στατιστικών δεδομένων παρέχει ένα τεκμηριωμένο πλαίσιο υποστήριξης τεχνικών αποφάσεων και μπορεί να συμβάλλει στην ανάπτυξη αποτελεσματικότερων και περισσότερο βιώσιμων λύσεων για έργα πολιτικού μηχανικού.

Η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η συνδυαστική αξιολόγηση γεωτεχνικών και στατιστικών δεδομένων μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την τεκμηριωμένη λήψη τεχνικών αποφάσεων, συμβάλλοντας στην εφαρμογή αποτελεσματικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων λύσεων σύμφωνα με τις αρχές της διαχείρισης ποιότητας και περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω ανάπτυξη ολοκληρωμένων πλαισίων αξιολόγησης και διαχείρισης γεωτεχνικών έργων.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Ali, F. H., Osman, N., & Choy, C. K. (2012). Stabilizing effects of vegetation on slope instability. *Ecological Engineering*, 36(4), 1-9.

Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.

Fenton, G. A. & Griffiths, D. V. (2020). Risk assessment in geotechnical engineering: uncertainty and reliability. *Georisk*, 14(1), 1-15.

Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2004). Probabilistic slope stability analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(5), 507-518.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015. Environmental Management Systems - Requirements with guidance for use*.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015. Quality management systems - Requirements*.

Liang, T., Knappett, J. A., & Bengough, A. G. (2020). Mechanical and hydrological effects of plant roots on slope stability. *Geotechnique*, 1-14.

Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Wiley.

Ng, C. W. W., Leung, A. K., & Ni, J. J. (2021). Effects of vegetation on slope stability and soil-water interaction. *Computers and Geotechnics*, 131, 103-123.

Stokes, A., Norris J. E., Greenwood, J. R., & Coppin, N.J. (2021). Review of the mechanical role of plant roots in slope stability. *Earth-Science Reviews*, 203, 103-135.

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Μπαλτζή, Ε. (2019). *Εκτίμηση της συμβολής των φυτών στη σταθερότητα των πρανών*. [Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MINITAB

A.1 Γενικά

Στο παρόν Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Minitab (έκδοση 22). Τα αποτελέσματα παρατίθενται σε μορφή πινάκων, όπως παρήχθησαν από το λογισμικό Minitab, με σκοπό την διασφάλιση της διαφάνειας της μεθοδολογίας και της αναπαραγωγής της στατιστικής ανάλυσης.

Οι πίνακες και τα γραφήματα που ακολουθούν παρατίθενται σε μορφή που προσεγγίζει την μορφή των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν από το λογισμικό Minitab, με περιορισμένες παρεμβάσεις στην διάταξη και την παρουσίαση για λόγους σαφήνειας και ευκρίνειας.

A.2 Περιγραφικά Στατιστικά Μέτρα

Για τον υπολογισμό των περιγραφικών στατιστικών μέτρων του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση εφαρμόστηκε η ακόλουθη διαδικασία στο Minitab.

Υλοποίηση στο Minitab:

Stat → Basic Statistics → Display Descriptive Statistics

Variables: 'Χωρίς βλάστηση', 'Με βλάστηση'

Statistics: Mean, Standard Deviation, Variance, Coefficient of Variation

Αποτελέσματα (Minitab Output):

Τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1.

Πίνακας Α.1: Περιγραφικά στατιστικά μέτρα του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) για τις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση.

Variable	Statistics			
	Mean	StDev	Variance	CoefVar(%)
Χωρίς βλάστηση	1,362	0,383	0,147	28,14
Με βλάστηση	1,795	0,611	0,374	34,07

Τα αποτελέσματα δείχνουν αύξηση της μέσης τιμής του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στην περίπτωση παρουσίας βλάστησης, καθώς και μεγαλύτερη διασπορά των τιμών, όπως προκύπτει από την αύξηση της τυπικής απόκλισης και του Συντελεστή Μεταβλητότητας (CV).

A.3 Έλεγχος Υποθέσεων (Paired t-test) για εξαρτημένα δείγματα

Υλοποίηση στο Minitab:

Stat → Basic Statistics → Paired t-test

Each sample is in its own column

Sample 1: 'Με βλάστηση'

Sample 2: 'Χωρίς βλάστηση'

Options: Hypothesized difference: 0

Alternative hypothesis: Difference>hypothesized difference

Graphs: Boxplot of differences

OK

Αποτελέσματα (Minitab Output):

Πίνακας Α.2α: Αποτελέσματα του ελέγχου *paired t-test* για την σύγκριση του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με βλάστηση και χωρίς βλάστηση.

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Με βλάστηση	4	1,795	0,611	0,306
Χωρίς βλάστηση	4	1,362	0,383	0,192

Πίνακας Α.2β: Εκτίμηση της μέσης ζευγαρωμένης διαφοράς του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.

Estimation for Paired Difference			
			95% Lower Bound
Mean	StDev	SE Mean	for $\mu_{\text{difference}}$
0,432	0,490	0,245	-0,145

$\mu_{\text{difference}}$: population mean of (Με βλάστηση - Χωρίς βλάστηση)

Πίνακας Α.2γ: Αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου *paired t-test* για την διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.

T-Value	P-Value
1,76	0,088

Πίνακας Α.2δ: Διατύπωση της μηδενικής και της εναλλακτικής υπόθεσης του ελέγχου *paired t-test* για την μεταβλητή ΔFOS.

Test	
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} > 0$

Όπου, $\mu_{\text{difference}}$ είναι η πληθυσμιακή μέση διαφορά του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάβηση.

Από τα αποτελέσματα του ελέγχου προκύπτει ότι:

- Η μέση διαφορά είναι θετική (0,432)
- Το p-value = 0,088

Το διάστημα εμπιστοσύνης περιλαμβάνει το μηδέν, γεγονός που είναι συμβατό με το αποτέλεσμα του ελέγχου υποθέσεων και εξηγεί γιατί η μηδενική υπόθεση δεν απορρίφθηκε σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

A.4 Έλεγχος Κανονικότητας

Αποτελέσματα (Minitab Output):

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα A.3.

Πίνακας A.3: Αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας Anderson-Darling για την μεταβλητή ΔFOS (Διαφορά Συντελεστή Ασφαλείας μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάβηση).

Test for Normality (Anderson–Darling)

Variable	p-value
Διαφορά	0,24

Η τιμή p-value = 0,24 υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις για την απόρριψη της υπόθεσης κανονικότητας των δεδομένων. Επομένως, η χρήση παραμετρικών στατιστικών μεθόδων θεωρήθηκε αποδεκτή.

A.5 Γραφική Απεικόνιση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα γραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την γραφική απεικόνιση των δεδομένων στο Κεφάλαιο 4. Τα γραφήματα αυτά έχουν ήδη αξιοποιηθεί για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και παρατίθενται εκ νέου στο Παράρτημα Α, για λόγους πληρότητας και τεκμηρίωσης της ανάλυσης.

Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται:

- Διάγραμμα ατομικών τιμών (Individual Value Plot) για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της κατανομής των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις δύο εξεταζόμενες συνθήκες.

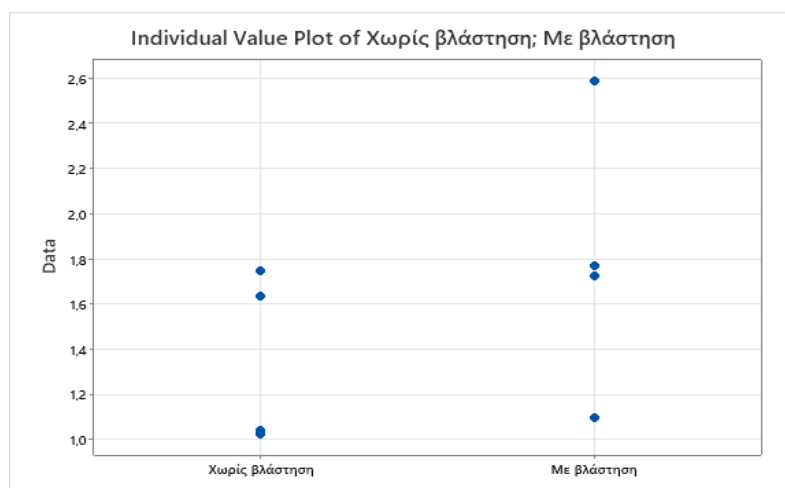
Υλοποίηση στο Minitab:

Graph → Individual value plot → One Y - Simple

Graph variables: 'Χωρίς βλάστηση' 'Με βλάστηση'

OK

Γράφημα A.1: Διάγραμμα ατομικών τιμών (Individual Value Plot) που παρουσιάζει την κατανομή των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) στις περιπτώσεις με και χωρίς βλάστηση.



- Θηκόγραμμα για τον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με και χωρίς βλάστηση (Boxplot), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της διασποράς και των βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών των δεδομένων.

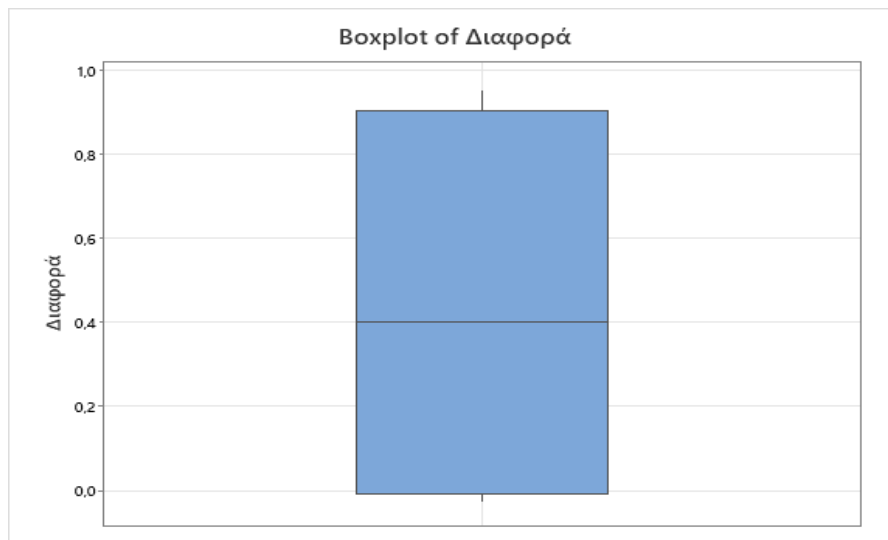
Υλοποίηση στο Minitab:

Graph → Boxplot → One Y – Simple

Graph variables: “Διαφορά”

OK

Γράφημα Α.2: Θηκόγραμμα (Boxplot) της μεταβλητής ΔFOS, που παρουσιάζει την κατανομή των διαφορών του Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς βλάστηση.



- Διαγράμματα πιθανοτήτων κανονικής κατανομής (Normal Probability Plot) για την μεταβλητή ΔFOS.

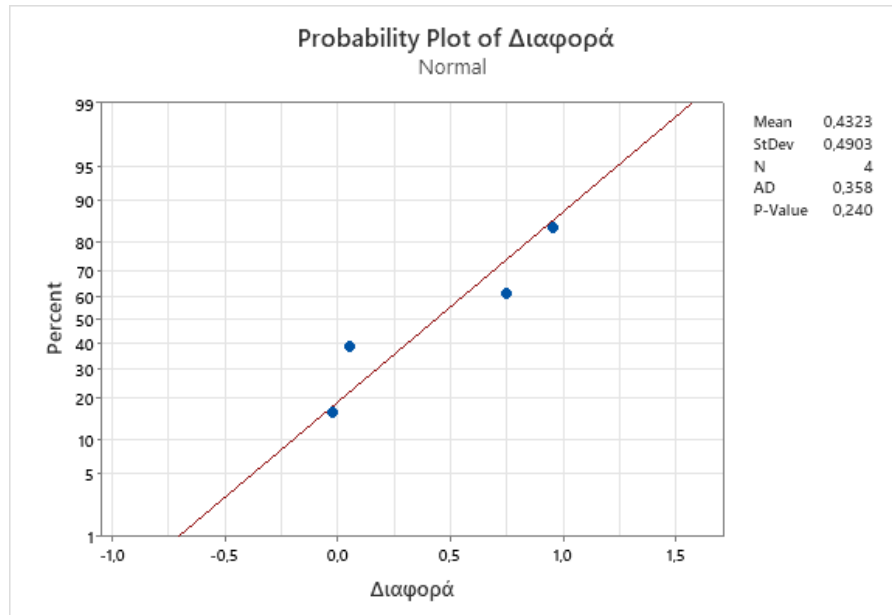
Υλοποίηση στο Minitab:

Stat → Basic Statistics → Normality test

Variable: 'Διαφορά'

Tests for Normality: Anderson-Darling

Γράφημα Α.3: Διάγραμμα πιθανοτήτων κανονικής κατανομής (Normal Probability Plot) της μεταβλητής ΔFOS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της υπόθεσης κανονικότητας μέσω του ελέγχου Anderson-Darling.



Τα γραφήματα αυτά υποστηρίζουν την ερμηνεία των στατιστικών αποτελεσμάτων και συμβάλλουν στην πληρέστερη κατανόηση της επίδρασης της φυτικής κάλυψης στον Συντελεστή Ασφαλείας (FOS).

Α.6 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται ως εξής:

- Μέση τιμή Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) χωρίς βλάστηση: 1,362
- Μέση τιμή Συντελεστή Ασφαλείας (FOS) με βλάστηση: 1,795
- Μέση διαφορά: 0,432
- Τυπική απόκλιση διαφοράς: 0,490
- Τιμή t: 1,76
- p-value: 0,088
- Συντελεστής μεταβλητότητας (CV):
 - Χωρίς Βλάστηση: 28,14%
 - Με Βλάστηση: 34,07%

Τα αποτελέσματα αυτά είναι συνεπή με την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 και υποστηρίζουν την ύπαρξη τάσης θετικής επίδρασης της φυτικής κάλυψης στην ευστάθεια των πρανών, χωρίς ωστόσο η επίδραση αυτή να τεκμηριώνεται στατιστικά σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.