



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ/ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΡΓΙΛΩΝ
ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΓΕΝΙΚΩΝ
ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΕΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΕΩΡΓΙΑ Μ. ΛΑΖΑΡΟΥ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020



**Πανεπιστήμιο
Κύπρου**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ/ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΡΓΙΛΩΝ
ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΓΕΝΙΚΩΝ
ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΕΩΝ**

ΓΕΩΡΓΙΑ Μ. ΛΑΖΑΡΟΥ

**Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση διδακτορικού
τίτλου σπουδών στο Πανεπιστήμιο Κύπρου**

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΓΕΩΡΓΙΑ Μ. ΛΑΖΑΡΟΥ

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

Υποψήφιος Διδάκτορας: Γεωργία Λαζάρου

Τίτλος Διατριβής: Μελέτη επίδρασης της διόγκωσης/συρρίκνωσης των αργίλων στην ανάλυση και σχεδιασμό γενικών κοιτοστρώσεων.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος και εγκρίθηκε στις 21^η Δεκεμβρίου 2020 από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

Εξεταστική Επιτροπή:

Ερευνητικός Σύμβουλος:

Δημήτριος Λουκίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής:

Πάνος Παπαναστασίου, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής:

Ιωάννης Ιωάννου, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής:

Μιχάλης Καββαδάς, Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μέλος Επιτροπής:

Αικατερίνη Τσιαμπούση, Senior Lecturer, Imperial College London

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ

Η παρούσα διατριβή υποβάλλεται προς συμπλήρωση των απαιτήσεων για απονομή Διδακτορικού Τίτλου του Πανεπιστημίου Κύπρου. Είναι προϊόν πρωτότυπης εργασίας αποκλειστικά δικής μου, εκτός των περιπτώσεων που ρητώς αναφέρονται μέσω βιβλιογραφικών αναφορών, σημειώσεων ή και άλλων δηλώσεων.

Γεωργία Λαζάρου

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάται η επίδραση της διογκωσιμότητας των αργλικών εδαφών στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε γενικές κοιτοστρώσεις. Τα διογκώσιμα εδάφη εξακολουθούν να είναι πηγή προβλημάτων σε ολόκληρο τον κόσμο εξαιτίας της διόγκωσης ή συρρίκνωσης που αναπτύσσουν κατά τη διαβροχή ή την ξήρανσή τους, αντίστοιχα. Οι ογκομετρικές αυτές παραμορφώσεις επιβάλλουν στη θεμελίωση που εδράζεται σε τέτοια εδάφη επιπλέον καταπονήσεις, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων μορφών αστοχίας στην ανωδομή. Το κόστος των ζημιών που προκαλούνται στις κατασκευές εξαιτίας αυτού του φαινομένου εκτιμάται ότι ανέρχεται σε ετήσια βάση τα δεκάδες δισεκατομμύρια ευρώ παγκοσμίως. Στην Κύπρο, το αντίστοιχο ετήσιο κόστος, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας αξίας ακινήτου, εκτιμάται σήμερα στα 10 με 20 εκ. ευρώ. Το γεγονός αυτό, καθώς και η έλλειψη εμπειρίας και αξιόπιστων μεθοδολογιών για τη διαστασιολόγηση των θεμελιώσεων που επηρεάζονται από αυτό το φαινόμενο, αποτέλεσαν το κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας έρευνας.

Για την υλοποίηση της έρευνας έγινε αρχικά δειγματοληψία και εγκατάσταση αισθητήρων για καταγραφή δεδομένων μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας εδάφους σε θέση της Πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Κύπρου, όπου η διογκώσιμη μάργα Λευκωσίας εμφανίζεται επιφανειακά. Στη συνέχεια, εκτελέστηκε μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών, ώστε να προσδιοριστούν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της μάργας που σχετίζονται με το μηχανισμό ανάπτυξης ογκομετρικών παραμορφώσεων λόγω μεταβολών της περιεχόμενης υγρασίας. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα, μαζί με τα αποτελέσματα καταγραφών ενός πειράματος διαβροχής που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο, παρείχαν τις πληροφορίες για τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών της μάργας στο πεδίο. Αυτό επετεύχθη με εκτέλεση αντίστροφων αναλύσεων δοκιμής-σφάλματος του πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ροής υπό συνθήκες μερικού κορεσμού, έτσι ώστε να μελετηθεί το φαινόμενο της μετανάστευσης υγρασίας κάτω από γενική κοιτόστρωση, εισάγοντας κλιματικά δεδομένα της υπό μελέτη περιοχής. Σε αυτές τις αναλύσεις εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως το πάχος και το σχήμα της θεμελίωσης, η υδραυλική διαπερατότητα

του εδάφους, η παρουσία ή μη υδροφόρου ορίζοντα σε μικρό βάθος, καθώς και η εφαρμογή μεθόδων βελτίωσης (προδιαβροχή και αντικατάσταση εδάφους με αμμοχάλικο).

Στη συνέχεια, καταστρώθηκε ένα απλό καταστατικό προσομοίωμα για χρήση σε συζευγμένες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη αλληλεπίδρασης διογκώσιμου εδάφους-θεμελίωσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει ένα μη-γραμμικό ελαστικό νόμο με ένα μηχανισμό ο οποίος προβλέπει πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις λόγω μεταβολών της εδαφικής μύζησης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών διόγκωσης/κατάρρευσης σε οιδήμετρο που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας. Έχοντας βαθμονομήσει το καταστατικό προσομοίωμα, εκτελέστηκε σειρά παραμετρικών συζευγμένων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων μηχανικής παραμόρφωσης-μερικώς κορεσμένης ροής, με στόχο τη μελέτη των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε γενικές κοιτοστρώσεις λόγω διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους θεμελίωσης. Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι οι ογκομετρικές μεταβολές που αναπτύσσονται εξαιτίας της μετανάστευσης υγρασίας από/προς την κοιτόστρωση δύνανται να προκαλέσουν σημαντική αύξηση στις καμπτικές ροπές, ειδικά σε ξηρές περιόδους. Τέλος, γνωρίζοντας τα προφίλ διαφορικών μετατοπίσεων της πλάκας (ανυψώσεων/καθιζήσεων) που προέκυψαν από τις συζευγμένες παραμετρικές αναλύσεις, έγινε εξαγωγή της κατανομής των ισοδύναμων ελατηρίων Winkler που θα επιτρέπουν τη σωστή πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών εντός μιας κοιτόστρωσης επί διογκώσιμου εδάφους σε κοινά προγράμματα στατικής ανάλυσης κατασκευών (π.χ. SAP2000).

ABSTRACT

This dissertation investigates the effects of the swelling/collapse behavior of clayey soils to the moments and forces developing in mat foundations. Expansive soils still remain today a source of problems to structures around the world due to their swelling/shrinkage upon wetting or drying. These volumetric deformations impose additional stresses on the foundations, resulting in the development of various forms of failure in the superstructures. The cost of damages caused by this phenomenon is estimated to reach on an annual basis tens of billions of euros worldwide. In Cyprus, the respective cost, including loss of property value, is estimated at 10 to 20 million euros. This fact, along with the lack of reliable methods and experience in designing foundations affected by such soils, constitutes the main motive for undertaking the present research study.

In the context of the present study, sampling and installation of field sensors monitoring matric suction and volumetric water content were done at a site in the new campus of the University of Cyprus, where expansive Nicosia marl outcrops. A series of laboratory tests followed in order to determine the physical and mechanical characteristics of the marl that pertain to the development of volumetric deformations caused by moisture content changes. The laboratory results and the time-history data obtained from a field wetting experiment provided important information for the determination of the in-situ hydraulic characteristics of the soil. This was achieved through trial and error back-calculation analyses of the wetting experiment in a finite element program.

Subsequently, parametric unsaturated flow analyses were performed in order to study the moisture migration under a mat foundation having as input the climatic data of the study area. The parametric analyses examined the effects of different parameters in the absence or presence of a shallow water table, such as the thickness and the shape of the foundation, the hydraulic and water retention characteristics of the soil, and the application of two common soil improvement strategies, namely prewetting and soil replacement with sand and gravel.

A simple constitutive model was then established to be used in coupled parametric analyses examining the interaction between expansive soil and mat foundation. The model combines a non-linear elastic law with a mechanism that predicts plastic volumetric deformations due to changes in soil suction. The model has been implemented in a finite element program and calibrated against experimental data from oedometer

swelling/collapse tests on medium expansive Nicosia marl. Having calibrated the model, a series of coupled mechanical-unsaturated flow parametric finite element simulations was performed in order to study the deformations developing in mats due to swelling/shrinkage of the foundation soil. The analyses showed that soil volume changes caused by moisture migration in the vicinity of the foundation can generate significant increase in the bending moments, especially during the dry season. Finally, the distributions of equivalent Winkler springs across the mat were extracted by using the profile of differential deformations (uplifts/settlements) resulting from the coupled finite element analyses. These spring distributions will allow the accurate prediction of bending moments in mats lying on expansive soils in commonly used structural analysis software (e.g. SAP2000).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*“Πάντα στον νου σου να 'χεις την Ιθάκη.
Το φθάσιμον εκεί είν' ο προορισμός σου.
Αλλά μη βιάζεις το ταξίδι διόλου.
Καλύτερα χρόνια πολλά να διαρκέσει·
και γέρος πια ν' αράξεις στο νησί,
πλούσιος με όσα κέρδισες στον δρόμο,
μη προσδοκώντας πλούτη να σε δώσει η Ιθάκη.” Κ. Π. Καβάφης*

Κάπως έτσι ξεκινούν και ολοκληρώνονται όλα τα ταξίδια, γνωρίζοντας τον προορισμό αλλά αγνοώντας τι θα αποκομίσεις μέχρι να φτάσεις εκεί. Ποιες θα είναι οι εμπειρίες από το ταξίδι σου. Φθάνοντας όμως στην Ιθάκη γίνεσαι πλουσιότερος σε γνώσεις, σοφότερος. Γεμίζει η φαρέτρα σου με εμπειρίες και γνώσεις που λαμβάνεις μέσω της έρευνάς σου. Γιατί η έρευνα απαιτεί συνεργασία, κατανόηση, υπομονή, εμπιστοσύνη, μεταλαμπάδευση γνώσης. Και όλα αυτά δεν θα υπήρχαν εσώκλειστα σε αυτό τον τόμο χωρίς την καθοδήγηση του Δρ. Δημήτριου Λουκίδη. Δέκα χρόνια συνεργασίας επιδεικνύοντας εμπιστοσύνη προς το πρόσωπό μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ είναι πολύ μικρό για όλες τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Μιχάλη Μπαρδάνη του οποίου η συνεισφορά και καθοδήγηση στην εργαστηριακή διερεύνηση της μάργας Λευκωσίας και στα πειράματα πεδίου ήταν καθοριστικής σημασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Π. Παπαναστασίου, Ι. Ιωάννου, Μ. Καββαδά και Α. Τσιαμπούση για τον χρόνο που αφιέρωσαν, τις συμβουλές τους και τη συνεισφορά τους στη βελτίωση της διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Λούκα Πέτρου και τον Μιχάλη Μιχαήλ για την παροχή τεχνικής υποστήριξης για την εκπόνηση των πειραματικών δοκιμών.

Το μεγαλύτερο ίσως ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, για όλα τα χρόνια που με υπομονή μου συμπαραστάθηκε στις προσπάθειές μου για την υλοποίηση ενός προσωπικού ονείρου και την αμέριστη στήριξη που είχα από αυτήν σε κάθε δύσκολη μου στιγμή. Ευχαριστώ τον σύζυγό μου που όλα αυτά τα χρόνια στάθηκε βράχος στο πλάι μου βοηθώντας με να ξεπεράσω όλες μου τις ανησυχίες.

Στον υιό μου Παναγιώτη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	3
2.1 Περιγραφή του προβλήματος	3
2.2 Σκοπός της Έρευνας – Καινοτομία	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	8
3.1 Μηχανισμοί ανάπτυξης βλαβών στα κτίρια	8
3.2 Εκτίμηση Διογκωσιμότητας	12
3.2.1 Εμπειρικές μέθοδοι.....	13
3.2.2 Πειραματικές μέθοδοι με τη χρήση συμβατικού οιδημέτρου	15
3.2.3 Υπολογισμός διογκωσιμότητας μέσω της εδαφικής μύζησης	15
3.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Soil-Water Characteristic Curve SWCC)	17
3.2.5 Μέτρηση διόγκωσης στο πεδίο	20
3.3 Διαπερατότητα μη Κορεσμένων Εδαφών.....	23
3.4 Κατασκευαστικές Πρακτικές και Σχεδιασμός Θεμελιώσεων σε Διογκώσιμα Εδάφη	26
3.4.1 Εισαγωγή.....	26
3.4.2 Αβαθείς θεμελιώσεις.....	26
3.4.3 Υπάρχουσες μέθοδοι για τον υπολογισμό θεμελιώσεων σε διογκώσιμα εδάφη	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΑ ΕΔΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ	32
4.1 Ακολουθία Αυτόχθονων Ιζηματογενών Πετρωμάτων	32
4.2 Γεωλογία της Ευρύτερης Περιοχής της Λευκωσίας.....	36
4.2.1 Σχηματισμός Λευκωσίας.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	41
5.1 Περιοχή Μελέτης.....	41
5.2 Δειγματοληψίες.....	44
5.3 Κατάταξη Υλικού με Βάση τα Όρια Atterberg	45
5.4 Κοκκομετρική Διαβάθμιση.....	46
5.5 Προσδιορισμός Περιεκτικότητας σε Ανθρακικά.....	49
5.6 Δοκιμές Οιδημέτρου	53
5.7 Τριαξονικές Δοκιμές.....	61
5.7.1 Μεθοδολογία	61
5.7.2 Αποτελέσματα	66
5.8 Δοκιμές Υδραυλικής Διαπερατότητας.....	68
5.8.1 Μεθοδολογία-Αποτελέσματα	69
5.9 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους – Νερού (SWCC).....	70

5.9.1 Εισαγωγή	70
5.9.2 Ολική Μύζηση	71
5.9.3 Μετρήσεις Μύζησης Εδαφικού Ιστού και Ωσμωτικής Μύζηση με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου	74
5.9.4 Βαθμονόμηση Καμπύλης SWCC.....	77
6.1 Εγκατάσταση Αισθητήρων	78
6.2 Πείραμα Διαβροχής	79
6.3 Μακροχρόνιες Μετρήσεις Πεδίου	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ	88
7.1 Γεωμετρία Μοντέλου και Ιδιότητες Εδαφικών Στρωμάτων	88
7.2 Αντίστροφη ανάλυση πειράματος διαβροχής (Back-calculation analysis)	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΓΕΝΙΚΗ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ	97
8.1 Εισαγωγή	97
8.2 Αριθμητικό Μοντέλο και Συνοριακές Συνθήκες.....	98
8.3 Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	102
8.4 Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων	108
8.4.1 Εξέλιξη Βαθμού Κορεσμού με τον Χρόνο	108
8.4.2 Επίδραση Χαρακτηριστικής Καμπύλης και Διαπερατότητας.....	111
8.4.3 Προδιαβροχή Εδάφους.....	115
8.4.4 Βάθος Σκυροδέτησης και Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους από Χονδρόκοκκο Υλικό	116
8.5 Συμπεράσματα	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	121
9.1 Διαμόρφωση Προσομοιώματος.....	121
9.2 Βαθμονόμηση Καταστατικού Προσομοιώματος.....	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 - ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ..	129
10.1 Εισαγωγή	129
10.2 Μεθοδολογία.....	129
10.3 Αποτελέσματα αναλύσεων	134
10.3.1 Επίδραση Υδρολογικού έτους και Περιόδου Εγκατάστασης της Πλάκας	138
10.3.2 Επίδραση Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού (SWCC)	145
10.3.3 Επίδραση Χαρακτηριστικών Διαπερατότητας	146
10.3.4 Βάθος Σκυροδέτησης και Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους με Χονδρόκοκκο Υλικό	148
10.3.5 Σχήμα γενικής κοιτόστρωσης	150
10.3.6 Προδιαβροχή του Εδάφους.....	151
10.3.7 Επιδράσεις Φορτίων Θεμελίωσης	151
10.4 Συμπεράσματα	156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 - ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ WINKLER.....	158
11.1 Εισαγωγή.....	158
11.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	158
11.3 Μεθοδολογία.....	161
11.4 Αποτελέσματα.....	164
11.4.1 Βέλτιστη κατανομή.....	164
11.4.2 Διζωνική κατανομή.....	172
11.4.2.1 Επίδραση Φορτίων Πλάκας.....	175
11.4.2.2 Επίδραση Περιόδου Εγκατάστασης της Πλάκας.....	184
11.4.2.3 Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους με Χονδρόκοκκο Υλικό.....	185
11.4.3 Ομοιογενοποιημένη κατανομή.....	195
11.5 Συμπεράσματα.....	200
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 - ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	201
12.1 Συμπεράσματα.....	201
12.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	204
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	207
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΟΝΤΑΙ ΣΕ ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΑ ΕΔΑΦΗ.....	221
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ.....	225
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ.....	246
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΓΕΝΙΚΗ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ.....	278
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΠΛΑΚΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ.....	312

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελ.
Σχήμα 2.1: Παράδειγμα αστοχίας σε κτήριο του παλαιού campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.	4
Σχήμα 2.2: Ρηγματώση δομικού στοιχείου σε κτήριο του παλαιού campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.	5
Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές ρηγματώσεις και εμφάνιση υγρασίας σε τοίχο πλήρωσεως σε οικία σε περιοχή της Λευκωσίας.	5
Σχήμα 3.1: Μηχανισμός ανάπτυξης αστοχιών σε κτίρια με αβαθή θεμελίωση τα οποία εδράζονται επί διογκώσιμης αργίλου: α) αρχική κατάσταση, β) κατά τη διογκωση του εδάφους στη διάρκεια των χειμερινών μηνών και γ) κατά την ξήρανση του εδάφους στη διάρκεια των θερινών μηνών.	10
Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της ενεργού ζώνης και του εύρους διακύμανσης του βαθμού κορεσμού εντός αυτής.	11
Σχήμα 3.3: Εμπειρικό γράφημα χαρακτηρισμού της διογκωσιμότητας των εδαφών σύμφωνα με τον van der Merwe (1975).	14
Σχήμα 3.4: Υστέρηση χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (SWCC) (από Vanapalli et al., 2004).	19
Σχήμα 3.5: Εδαφικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν σε ένα ελαφρύ βιομηχανικό κτήριο από τους Yoshida et al. (1983).	21
Σχήμα 3.6: Κατακόρυφη κίνηση του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για άργιλο υψηλής πλαστικότητας (Johnson, 1980, Day, 1994).	22
Σχήμα 3.7: Περιβάλλουσες εδαφικής μετακίνησης σε σχέση με το βάθος στο α) ελεύθερο πεδίο και β) κέντρο επιφάνειας 10mx10m καλυμμένης από αδιαπέρατη μεμβράνη (Fityus et al., 2004).	23
Σχήμα 3.8: Ενδεικτική τομή πλάκας θεμελίωσης τύπου “βάφλας”.	27
Σχήμα 3.9: Αντικατάσταση φυσικού διογκώσιμου εδάφους σε βάθος τουλάχιστον 1m.	28
Σχήμα 3.10: Εφαρμογή αδιαπέρατης μεμβράνης και κατασκευή πρανών για την απορροή των ομβρίων υδάτων (από US Army Technical Manual, 1983).	28
Σχήμα 3.11: Σχήμα παραμορφωμένου εδάφους όπως προτείνεται από διάφορες μεθόδους διαστασιολόγησης γενικής κοιτόστρωσης: α) περίπτωση center heave β) περίπτωση edge heave (από Li, 1996).	31
Σχήμα 4.1: Στρωματογραφική στήλη των αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων στην Κύπρο (Constantinou et al., 2002α).	34

	Σελ.
Σχήμα 4.2: Χάρτης επιφανειακών εμφανίσεων μάργας του Σχηματισμού Λευκωσίας στην ευρύτερη περιοχή της Λευκωσίας (από Hobbs et al., 1986).	37
Σχήμα 4.3: Στρώμα ασβεσταρενίτη (από Constantinou et al., 2002α).	37
Σχήμα 4.4: Κατακόρυφο πρηνές μάργας του Σχηματισμού Λευκωσίας.	38
Σχήμα 5.1: Χάρτης επιφανειακών εμφανίσεων μάργας Λευκωσίας στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης και θέσεις δειγματοληψίας BH1 και P1.	41
Σχήμα 5.2: Προφίλ βαθμού κορεσμού τον Ιούλιο 2015.	43
Σχήμα 5.3: Στρωματογραφία εδάφους στην περιοχή μελέτης.	43
Σχήμα 5.4: Μάργες Σχηματισμού Λευκωσίας α) καφέ-χακί και β) γκριζα.	44
Σχήμα 5.5: Τα στάδια μεταβολής της φυσικής κατάστασης ενός γεωύλικου καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας (από Καββαδάς, 1996).	45
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande και κατάταξη δειγμάτων μάργας Λευκωσίας.	46
Σχήμα 5.7: Διογκωσιμότητα δειγμάτων μάργας Λευκωσίας σύμφωνα με το South African chart.	49
Σχήμα 5.8: Ονοματολογία αργιλοασβεστιτικών εδαφών σύμφωνα με το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (από Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).	50
Σχήμα 5.9: Σύγκριση επίδοσης μεθόδων για τον προσδιορισμό των ανθρακικών με βάση διάφορα κριτήρια (από Lamas et al., 2005).	51
Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών Bernard σε δείγματα μάργας που λήφθηκαν από την Πανεπιστημιούπολη και το παλιό campus.	53
Σχήμα 5.11: Πειραματική διάταξη δοκιμών οιδημέτρου για τον προσδιορισμό ογκομετρικών παραμορφώσεων διόγκωσης/κατάρρευσης.	56
Σχήμα 5.12: Ογκομετρική παραμόρφωση λόγω διαβροχής συναρτήσει της αρχικής επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης για α) αδιατάρακτα δείγματα σκληρής μάργας και β) επανασυμπυκνωμένα δείγματα πλαστικής μαλακής μάργας Λευκωσίας.	59
Σχήμα 5.13: Καμπύλες στερεοποίησης για α) αδιατάρακτα δείγματα και β) επανασυμπυκνωμένα δείγματα μάργας Λευκωσίας.	60
Σχήμα 5.14: Λεπτότοιχος πυρηνοληπτικός δειγματολήπτης κυλινδρικών δοκιμών τριαξονικών δοκιμών.	62
Σχήμα 5.15: Αδιατάρακτο δείγμα μετά την εξόλκευση και τοποθέτησή του σε πλαστική μεμβράνη.	62
Σχήμα 5.16: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης τριαξονικών δοκιμών (από Barnes, 2010).	63
Σχήμα 5.17: Μεθοδολογία υπολογισμού του χρόνου πλήρους στερεοποίησης t_{100} .	65

	Σελ.
Σχήμα 5.18: Σύστημα τριαξονικών δοκιμών του Εργαστηρίου Γεωμηχανικής Πανεπιστημίου Κύπρου.	65
Σχήμα 5.19: Τριαξονικές δοκιμές CUPP για δοκίμια σκληρής μάργας Λευκωσίας από τα 0.85m βάθος: α) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων.	66
Σχήμα 5.20: Τριαξονικές δοκιμές CUPP για δοκίμια μάργας Λευκωσίας από τα 6m βάθος: α) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων.	67
Σχήμα 5.21: Κύκλοι Mohr για τα δοκίμια σκληρής-στιφρής μάργας του σκάμματος.	67
Σχήμα 5.22: Κύκλοι Mohr για τα δοκίμια μαλακής μάργας της γεώτρησης.	68
Σχήμα 5.23: α) Συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού και β) μείωση του δείκτη πόρων της σκληρής μάργας για διαφορετικές τάσεις περισφιζής.	70
Σχήμα 5.24: Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου WP4C (Decagon Devices, Inc.).	72
Σχήμα 5.25: Χαρακτηριστική καμπύλη (SWCC) της σκληρής μάργας Λευκωσίας.	73
Σχήμα 5.26: Δείκτης πόρων σκληρής μάργας συναρτήσει της ολικής μύζησης.	74
Σχήμα 5.27: Χαρτιά φίλτρου διαμέτρου 55mm No. 42 της εταιρείας Whatman.	75
Σχήμα 5.28: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης μεθόδου διηθητικού χαρτιού.	76
Σχήμα 6.1: Εγκατάσταση αισθητήρων GS3 και MPS-6 στο σκάμμα: α) σχηματική τομή και β) φωτογραφία κατακόρυφου πρηνούς σκάμματος με τους αισθητήρες εγκατεστημένους και πριν την επανατοποθέτηση του εδάφους που αφαιρέθηκε.	79
Σχήμα 6.2: Συμπύκνωση εδαφικού υλικού του σκάμματος.	80
Σχήμα 6.3: Στάδια εκτέλεσης του πειράματος διαβροχής στο πεδίο.	81
Σχήμα 6.4: Καταγραφή ιστορίας βαθμού κορεσμού σε βάθη 0.75m και 1.5m κατά τη διάρκεια του πειράματος διαβροχής.	83
Σχήμα 6.5: Ρωγμές συρρίκνωσης στην επιφάνεια της μάργας Λευκωσίας κατά τη διάρκεια ξηρής περιόδου.	84
Σχήμα 6.6: Σταθμός μετρήσεων στην Πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Κύπρου: α) μύζηση εδαφικού ιστού, β) βαθμός κορεσμού και γ) διορθωμένος βαθμός κορεσμού.	86
Σχήμα 6.7: Παρουσία οξειδώσεων σε φυσική ασυνέχεια δείγματος μάργας Λευκωσίας.	87

	Σελ.
Σχήμα 7.1: Γεωμετρία του μοντέλου και συνοριακές συνθήκες για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής.	89
Σχήμα 7.2: Καταγραφή ιστορίας βαθμού κορεσμού σε βάθη 0.75m και 1.5m και αποτελέσματα βέλτιστης δυνατής προσέγγισης με προσομοίωση σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.	92
Σχήμα 7.3: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-2$, $k_x=0.004\text{m/day}$, $k_y=0.04\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και $k_{y,sat}/k_{x,sat}$ 100, 70, 2 και 1 για τα στρώματα 2-5 αντίστοιχα.	94
Σχήμα 7.4: Εξέλιξη του πεδίου του βαθμού κορεσμού εντός του υπεδάφους όπως προέκυψε από προσομοίωση του πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.	95
Σχήμα 8.1: Εδαφικό προφίλ και συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις ροής παρουσία γενικής κοιτόστρωσης.	99
Σχήμα 8.2: Εδαφικά προφίλ κατακόρυφης και οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις ακόρεστης ροής.	100
Σχήμα 8.3: Δεδομένα βροχόπτωσης για το υδρολογικό έτος 2013/14 – 2014/15.	103
Σχήμα 8.4: Επιφανειακή εξάτμιση λεκάνης (και εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους για τα υδρολογικά έτη 2013/14 και 2014/15 για παραμέτρους εδάφους $g_a=0.016$, $g_l=-5$ και προφίλ διαπερατότητας A: α) παρουσία ρηχού υδροφόρου και β) απουσία υδροφόρου.	105
Σχήμα 8.5: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.	109
Σχήμα 8.6: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από ανάλυση με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα, $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.	109
Σχήμα 8.7: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας και εδάφους θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο ορίζοντα, με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.	111
Σχήμα 8.8: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας-εδάφους θεμελίωσης από την ανάλυση με ρηχό υδροφόρο, $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.	112

Σχήμα 8.9: Επίδραση της παραμέτρου g_a στην κατανομή υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης για τιμές $g_i=-5$, $d=0.5m$ και προφίλ διαπερατοτήτων A: α) απουσίας ρηχού Υ.Ο. και β) παρουσία ρηχού Υ.Ο.	113
Σχήμα 8.10: Επίδραση της διαπερατότητας του εδάφους στην κατανομή υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης για τιμές $g_a=0.016$ και $d=0.5m$ για α) διαφορετικές τιμές g_i , και διαφορετικά προφίλ διαπερατοτήτων με β) απουσία και γ) παρουσία υδροφόρου ορίζοντα	114
Σχήμα 8.11: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από ανάλυση με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα και προδιαβροχή εδάφους, $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.	115
Σχήμα 8.12: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους - πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση με ρηχό υδροφόρο και προδιαβροχή του εδάφους, $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.	117
Σχήμα 8.13: Κατανομή του βαθμού κορεσμού S_r κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας θεμελίωσης-εδάφους από τις προσομοιώσεις με προδιαβροχή εδάφους: α) επίδραση των παραμέτρων του g_a και g_i και β) επίδραση του προφίλ υδραυλικής διαπερατότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού.	118
Σχήμα 8.14: Κατανομή του βαθμού κορεσμού S_r κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας θεμελίωσης-εδάφους για διαφορετικά πάχη πλάκας θεμελίωσης και αντικατάστασης φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό (άμμο και χαλίκι): α) απουσία ρηχού Υ.Ο. και β) παρουσία ρηχού Υ.Ο.	118
Σχήμα 9.1: Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού δοκιμίων υπό διάφορες τιμές κατακόρυφης τάσης: πειραματικά δεδομένα και προβλέψεις καταστατικού προσομοιώματος.	126
Σχήμα 9.2: Εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης συναρτήσει της μύζησης για ένα πλήρη κύκλο ύγρανσης-ξήρανσης από προσομοιώσεις πειραμάτων οιδημέτρου χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα.	128
Σχήμα 10.1: Συνοριακές συνθήκες συζευγμένων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων.	130
Σχήμα 10.2: Δεδομένα βροχόπτωσης για τα υδρολογικά έτη α) 2013/14 – 2014/15 και β) 2017/18 – 2018/19.	131
Σχήμα 10.3: Επιφανειακή εξάτμιση λεκάνης (και εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19 για παραμέτρους εδάφους $g_a=0.016$, $g_i=-5$ και προφίλ διαπερατότητας A: α) παρουσία ρηχού υδροφόρου και β) απουσία υδροφόρου.	132
Σχήμα 10.4: Παραμορφωμένο πλέγμα στο τέλος α) της χειμερινής περιόδου και β) στο τέλος της θερινής περιόδου του υδρολογικού έτους 2014/15 χωρίς την παρουσία ρηχού Υ.Ο.	135

Σχήμα 10.5: Κατανομή βαθμού κορεσμού από αναλύσεις με απουσία υδροφόρου ορίζοντα για $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ Α και $d=0.5\text{m}$ για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19.	137
Σχήμα 10.6: Κατανομή βαθμού κορεσμού από αναλύσεις με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα για $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ Α και $d=0.5\text{m}$ για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19.	137
Σχήμα 10.7: Διαγράμματα καμπτικών ροπών για διαφορετικές περιόδους εγκατάστασης κυκλικής πλάκας και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ από αναλύσεις α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.	139
Σχήμα 10.8: Επίδραση της παραμέτρου g_a στις καμπτικές ροπές της πλάκας θεμελίωσης για αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.	146
Σχήμα 10.9: Επίδραση παραμέτρου g_l στις καμπτικές ροπές για την ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5\text{ m}$, προφίλ διαπερατοτήτων Α και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ με απουσία υδροφόρου ορίζοντα για τα υδρολογικά έτη: α) 2014/15 και β) 2018/19.	147
Σχήμα 10.10: Επίδραση του προφίλ διαπερατότητας στις καμπτικές ροπές για αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.	148
Σχήμα 10.11: Επίδραση του βάθους σκυροδέτησης της πλάκας και της αντικατάστασης του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό στις καμπτικές ροπές για αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ το υδρολογικό έτος 2014/15.	149
Σχήμα 10.12: Επίδραση του σχήματος της πλάκας για ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5\text{ m}$, προφίλ διαπερατοτήτων Α και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ για το υδρολογικό έτος 2014/15 στην α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	150
Σχήμα 10.13: Επίδραση προδιαβροχής εδάφους στις καμπτικές ροπές για ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5\text{ m}$, προφίλ διαπερατοτήτων Α και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ για το υδρολογικό έτος 2014/15: α) απουσία και β) παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα.	152
Σχήμα 10.14: Επίδραση μεγέθους φορτίων θεμελίωσης στις καμπτικές ροπές: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.	153

	Σελ.
Σχήμα 10.15: Επιβολή α) 3 συγκεντρωμένων φορτίων και β) 5 συγκεντρωμένων φορτίων τα οποία ισοδυναμούν με ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 12kPa.	154
Σχήμα 10.16: Επίδραση μεγέθους φόρτισης στις καμπτικές ροπές πλάκας που φορτίζεται με συγκεντρωμένα φορτία στο κέντρο και στα άκρα της: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15.	155
Σχήμα 10.17: Επίδραση μεγέθους φόρτισης στις καμπτικές ροπές πλάκας που φορτίζεται με 5 συγκεντρωμένα φορτία (κέντρο, άκρα και ενδιάμεσα): α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15.	156
Σχήμα 11.1: Στατικό ανάλογο γενικής κοιτόστρωσης πάνω σε ελατήρια Winkler.	159
Σχήμα 11.2: Σχηματική απεικόνιση υπόθεσης παραμορφωμένης δοκού Timoshenko.	161
Σχήμα 11.3: Σχηματική απεικόνιση στατικού αναλόγου απειρομήκους πλάκας πάνω σε ελατήρια Winkler.	162
Σχήμα 11.4: Ανάλυση με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	167
Σχήμα 11.5: Ανάλυση με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	168
Σχήμα 11.6: Ανάλυση με τρία σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	169
Σχήμα 11.7: Ανάλυση με τρία σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	170
Σχήμα 11.8: Ανάλυση με πέντε σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	171
Σχήμα 11.9: Ανάλυση με πέντε σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	172

	Σελ.
Σχήμα 11.10: Σχηματική απεικόνιση της διζωνικής (2-step function) κατανομής ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης.	173
Σχήμα 11.11: Ανάλυση 38 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	174
Σχήμα 11.12: Ανάλυση 41 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	176
Σχήμα 11.13: Ανάλυση 76 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	177
Σχήμα 11.14: Ανάλυση 78 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	178
Σχήμα 11.15: Ανάλυση 77 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	179
Σχήμα 11.16: Ανάλυση 79 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	180
Σχήμα 11.17: Ανάλυση 80 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	181
Σχήμα 11.18: Ανάλυση 82 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	182
Σχήμα 11.19: Ανάλυση 81 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	183

Σχήμα 11.20: Ανάλυση 83 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	184
Σχήμα 11.21: Ανάλυση 84 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	185
Σχήμα 11.22: Ανάλυση 87 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	186
Σχήμα 11.23: Ανάλυση 89 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	187
Σχήμα 11.24: Ανάλυση 88 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.	188
Σχήμα 11.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας αρχικής κατάστασης για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.	192
Σχήμα 11.26: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας για το τέλος της υγρής περιόδου για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.	193
Σχήμα 11.27: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας για το τέλος της ξηρής περιόδου για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.	194
Σχήμα 11.28: Ομοιογενοποιημένη διζωνική (βαθμιδωτή) κατανομή δείκτη εδάφους.	196
Σχήμα 11.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας αρχικής κατάστασης με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.	197

Σχήμα 11.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για το τέλος της υγρής περιόδου για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.

198

Σχήμα 11.31: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για το τέλος της ξηρής περιόδου για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.

199

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

	Σελ.
Πίνακας 3.1: Παραδείγματα εμπειρικών σχέσεων για εκτίμηση της διογκωσιμότητας.	13
Πίνακας 3.2: Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης.	16
Πίνακας 3.3: Εξισώσεις των πιο διαδεδομένων μαθηματικών προσομοιωμάτων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (από Μπαρδάνης, 2016).	18
Πίνακας 5.1: Φυσικά χαρακτηριστικά της μάργας Λευκωσίας και κατάταξη σύμφωνα με το USCS.	48
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ανάλυσης αλατότητας για τη σκληρή μάργα Λευκωσίας.	76
Πίνακας 6.1: Φάσεις πειράματος διαβροχής.	82
Πίνακας 7.1: Τιμές υδραυλικών ιδιοτήτων που προέκυψαν από τις αντίστροφες αναλύσεις.	92
Πίνακας 7.2: Τιμές υδραυλικών ιδιοτήτων που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής του Σχήματος 7.3.	93
Πίνακας 8.1: Παράμετροι χαρακτηριστικής καμπύλης και υδραυλικές ιδιότητες χονδρόκοκκου υλικού εξυγίανσης.	101
Πίνακας 8.2: Μειωτικός συντελεστής επιφανειακής εξάτμισης λεκάνης για κάθε υδρολογικό έτος για διαφορετικές τιμές g_a .	104
Πίνακας 8.3: Κατάλογος αναλύσεων ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.	106
Πίνακας 9.1 Τιμές παραμέτρων καταστατικού προσομοιώματος.	127
Πίνακας 10.1: Μειωτικός συντελεστής επιφανειακής εξάτμισης λεκάνης για κάθε υδρολογικό έτος για διαφορετικές τιμές g_a .	133
Πίνακας 10.2: Συζευγμένες αναλύσεις μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.	140
Πίνακας 10.3: Παραμορφώσεις στο τέλος της χειμερινής (Μάρτιος) και στο τέλος της θερινής (Σεπτέμβριος) περιόδου.	136
Πίνακας 11.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για την αρχική κατάσταση (εγκατάσταση πλάκας).	189
Πίνακας 11.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για το τέλος της χειμερινής περιόδου (Μάρτιος).	190

Πίνακας 11.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για το τέλος της θερινής περιόδου (Σεπτέμβριος).

ΓΕΩΡΓΙΑ Μ. ΛΑΖΑΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διογκώσιμα αργιλικά εδάφη χαρακτηρίζονται τα εδάφη των οποίων ο όγκος τους δύναται να μεταβληθεί σημαντικά εξαιτίας της αύξησης ή της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας τους. Αυτές οι ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις μεταβολές μύζησης όταν τα εδάφη είναι μερικώς κορεσμένα. Μερικώς κορεσμένο εδαφικό υλικό ονομάζεται ένα υλικό του οποίου ο λόγος του όγκου των κενών που καταλαμβάνεται από νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών (δηλ. ο βαθμός κορεσμού) είναι μικρότερος της μονάδας και μεγαλύτερος του μηδενός. Εξαιτίας του κλίματος που επικρατεί στην Κύπρο, το οποίο χαρακτηρίζεται από βροχερούς χειμώνες και πολύ ξηρά καλοκαίρια, τα αργιλικά εδάφη απορροφούν και αποβάλλουν υγρασία αντίστοιχα σε σημαντικό βαθμό κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους, με αποτέλεσμα όσα από αυτά εμφανίζουν πλαστικότητα να διογκώνονται και να συρρικνώνονται σημαντικά, με αποτέλεσμα να επιβάλλουν διαφορικές μετατοπίσεις στις θεμελιώσεις. Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η ανάπτυξη ζημιών στις κατασκευές, οι οποίες ποικίλουν από αστοχίες αισθητικής φύσεως, που υποβαθμίζουν ταυτόχρονα τη λειτουργικότητά τους, μέχρι βλάβες στον φέροντα οργανισμό.

Ο μηχανισμός γένεσης των ογκομετρικών παραμορφώσεων των πλαστικών αργίλων σχετίζεται με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τις δυνάμεις van der Waals που κυριαρχούν στη μικροκλίμακα των αργιλικών πλακιδίων και των κατιόντων που περιέχονται στο νερό. Έτσι, όταν μια μη κορεσμένη άργιλος διαβραχεί, τα πλακιδιά της δεσμεύουν την επιπλέον ποσότητα νερού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του διπλού στρώματος, οδηγώντας κατ' επέκταση στην αύξηση του εδαφικού όγκου. Αντίθετα, όταν το υλικό ξηραίνεται, ο όγκος του διπλού στρώματος μικραίνει και ως αποτέλεσμα σημειώνεται μείωση του όγκου του εδάφους. Τα εδάφη που εμφανίζουν σημαντική τάση για διόγκωση κατά τη διαβροχή και συρρίκνωση κατά την ξήρανση ονομάζονται γενικά διογκώσιμα.

Οι ιδιαιτερότητες και πολυπλοκότητες που παρουσιάζουν τα διογκώσιμα εδάφη όσον αφορά τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες, σε συνδυασμό με την απουσία κατανόησης και αξιοποίησης της γνώσης του κλάδου της μηχανικής των μη κορεσμένων εδαφών στην πρακτική του πολιτικού μηχανικού, τα καθιστούν μέχρι και σήμερα σημαντική πηγή προβλημάτων στα έργα πολιτικού μηχανικού και ειδικότερα στις

κτιριακές κατασκευές. Αυτό το κενό γνώσης επεκτείνεται και στην τυποποίηση των πειραματικών μεθόδων προσδιορισμού των διαφόρων ιδιοτήτων των μη κορεσμένων εδαφών (τόσο εργαστηριακών όσο και επιτόπιων).

Για την αντιμετώπιση όλων αυτών, η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί τις τελευταίες δεκαετίες στη διερεύνηση των προβλημάτων που προκαλούνται εξαιτίας της φύσης των διογκώσιμων εδαφών. Εντούτοις, η εφαρμογή καταστατικών προσομοιωμάτων μερικώς κορεσμένων εδαφών βρίσκεται σε πρώιμα στάδια ακόμη, αφού πολλά από αυτά που υπάρχουν ήδη αφορούν εδάφη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή απαιτούν πολλές παραμέτρους οι οποίες δύσκολα προσδιορίζονται πειραματικά. Συνέπεια αυτού είναι και η σχετική ένδεια σε μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των επιπλέον εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στις πλάκες θεμελίωσης εξαιτίας της διόγκωσης/συρρίκνωσης των εδαφών.

Τα πιο πάνω, σε συνδυασμό με τις σχετικά εκτεταμένες επιφανειακές εμφανίσεις διογκώσιμων αργίλων στην Κύπρο, και ειδικά στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας Λευκωσίας, αποτέλεσαν το κίνητρο για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας. Στα πλαίσια της μελέτης, πραγματοποιήθηκε αρχικά συλλογή εδαφικών δειγμάτων μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας, έτσι ώστε να προσδιοριστούν πειραματικά οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές της. Στη συνέχεια έγινε αντίστροφη ανάλυση ενός πειράματος διαβροχής στο πεδίο σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για να εξαχθούν τα επιτόπου υδραυλικά χαρακτηριστικά της μάργας. Ακολούθως, καταστρώθηκε ένα απλό καταστατικό προσομοίωμα που συνδυάζει ένα μη-γραμμικό ελαστικό νόμο με ένα μηχανισμό ο οποίος προβλέπει πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις που οφείλονται στις μεταβολές του βαθμού κορεσμού (και ως εκ τούτου της μύζησης) και που βαθμονομήθηκε με βάση πειραματικά δεδομένα από τα δείγματα μάργας Λευκωσίας. Το καταστατικό προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια σε προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων της αλληλεπίδρασης διογκώσιμου εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και της εντατικής κατάστασης που προκαλούνται στην πλάκα από τη διόγκωση/συρρίκνωση του εδάφους θεμελίωσης κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Τελικό στόχο της έρευνας αποτελεί η εξαγωγή της ισοδύναμης κατανομής σταθεράς ελατηρίων Winkler μέσω της οποίας θα επιτρέπεται η σωστή πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε μια πλάκα θεμελίωσης που εδράζεται επί διογκώσιμου εδάφους σε κοινά προγράμματα δομοστατικής ανάλυσης κατασκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 Περιγραφή του προβλήματος

Τα διογκώσιμα εδάφη αποτελούν σημαντικότατο πρόβλημα για τους μηχανικούς σε πολλά μέρη του κόσμου, αφού το ετήσιο παγκόσμιο κόστος των ζημιών που προκαλούν στις κατασκευές που εδράζονται σε αυτά είναι της τάξεως των δεκάδων δισεκατομμυρίων ευρώ. Μια εκ των χωρών που βρίσκεται διαχρονικά αντιμέτωπη με αυτό το πρόβλημα είναι και η Κύπρος. Το μέσο ετήσιο κόστος ζημιών της περιόδου 1974-2006 σύμφωνα με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, μόνο για την περιοχή της Λευκωσίας, ανέρχεται στα 2.1 εκατομμύρια ευρώ, ενώ ανηγμένο για ολόκληρη την Κύπρο το κόστος, συμπεριλαμβάνοντας και την συνεπαγόμενη απώλεια αξίας ακινήτου, εκτιμάται σήμερα στα 10 με 20 εκατομμύρια ευρώ ετησίως, πολύ μεγαλύτερο από το κόστος ζημιών που προκαλούνται λόγω φυσικών καταστροφών.

Στην Κύπρο η διογκωση των εδαφών παρατηρείται κατά τους βροχερούς-χειμερινούς μήνες, η οποία ακολουθείται από τη συρρίκνωσή τους κατά τους ξηρούς-καλοκαιρινούς μήνες. Οι εποχιακές διακυμάνσεις στον βαθμό κορεσμού του εδάφους λαμβάνουν χώρα εντός της ονομαζόμενης ενεργού ζώνης (active zone), το βάθος της οποίας κυμαίνεται μεταξύ 2m και 8m από την επιφάνεια του εδάφους. Οι μεταβολές στον βαθμό κορεσμού δεν περιορίζονται μόνο στις εποχικές αλλαγές, αλλά και σε αυτές που οφείλονται σε διαρροές σωληνώσεων καθώς επίσης και στην εξατμισοδιαπνοή βλάστησης παρακείμενης στην κατασκευή. Αποτέλεσμα των πιο πάνω εποχικών και μακροπρόθεσμων μεταβολών της υγρασίας του εδάφους είναι η ανάπτυξη διαφόρων μορφών βλαβών σε αρκετές κατασκευές που εδράζονται σε διογκώσιμα εδάφη. Οι βλάβες στις περισσότερες περιπτώσεις περιορίζονται σε ρηγματώσεις που αναπτύσσονται στους τοίχους πληρώσεως, ενώ σε πιο σπάνιες περιπτώσεις η διογκωσιμότητα του εδάφους δύναται να οδηγήσει ακόμη και σε αστοχία των στοιχείων του φέροντος οργανισμού.

Αξιοσημείωτες περιπτώσεις σοβαρών βλαβών που επεκτάθηκαν στον φέροντα οργανισμό είναι αυτές των κτιριακών εγκαταστάσεων στο παλαιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου (Σχήμα 2.1 και 2.2) και των κτιρίων του γειτονικού Γυμνασίου Αγλαντζιάς, τα οποία είναι κατασκευασμένα επί εξαιρετικά διογκώσιμης μάργας του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας. Βλάβες παρατηρούνται επίσης και στα κτίρια της νέας

πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Κύπρου, που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της πόλης, καθώς και σε οικιστικές αναπτύξεις στην ευρύτερη περιοχή. Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζει χαρακτηριστική διαγώνια ρωγμή ανοίγματος 1mm περίπου, η οποία αναπτύχθηκε σε τοίχο πληρώσεως οικίας στην εν λόγω περιοχή κατά τον εξαιρετικά βροχερό χειμώνα 2018/2019 (μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης των τελευταίων 100 χρόνων). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της εμφάνισης υγρασίας στο εσωτερικό του σπιτιού εξαιτίας της ευκολίας διοχέτευσής της από το εξωτερικό περιβάλλον διαμέσου των ρωγμών. Οι ζημιές αυτές παρατηρούνται κυρίως σε κτίρια που εδράζονται σε αβαθείς θεμελιώσεις, όπως για παράδειγμα μεμονωμένα πέδιλα ή εσχάρα πεδιλοδοκών (Constantinou et al., 2002β). Στο Παράρτημα Α παρατίθεται επιπλέον φωτογραφικό υλικό με περιπτώσεις αστοχιών που οφείλονται στον μηχανισμό διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα αστοχίας σε κτίριο του παλαιού campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεδομένου ότι η διόγκωση των εδαφών είναι φθίνουσα συνάρτηση της πίεσης επαφής θεμελίωσης, γενικά θεωρείται ότι τα κτίρια που είναι πιο ευαίσθητα στην ανάπτυξη αστοχιών είναι τα χαμηλά (κτίρια 1-2 ορόφων) και γενικότερα οι ελαφρές κατασκευές. Ωστόσο, ζημιές έχουν παρατηρηθεί και σε πολυώροφα κτίρια, ιδιαίτερα αν αυτά εδράζονται σε ελαφρώς κεκλιμένο έδαφος, όπως για παράδειγμα η περίπτωση ενός 6-όροφου κτιρίου στο ανατολικό τμήμα της Λευκωσίας. Πρανή που αποτελούνται από διογκώσιμα εδάφη, έστω και με πολύ μικρή κλίση, αναπτύσσουν μια καθοδική κίνηση που οφείλεται στους εποχικούς κύκλους παραμόρφωσης, οι οποίοι είναι άμεσα συνδεδεμένοι

με τις μεταβολές υγρασίας. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης εξετάζεται η αλληλεπίδραση εδάφους-αβαθούς θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση) επί επίπεδου εδάφους. Θεμελιώσεις οι οποίες εδράζονται σε κεκλιμένα διογκώσιμα εδάφη καθώς και βαθιές θεμελιώσεις, (πασσαλοθεμελιώσεις) δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 2.2: Ρηγματώση δομικού στοιχείου σε κτίριο του παλαιού campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές ρηγματώσεις και εμφάνιση υγρασίας σε τοίχο πληρώσεως σε οικία σε περιοχή της Λευκωσίας.

2.2 Σκοπός της Έρευνας – Καινοτομία

Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι τα διογκώσιμα εδάφη είναι ένα από τα σημαντικότερα γεωτεχνικά προβλήματα (αν όχι το σημαντικότερο) στην Κύπρο. Οι μηχανικοί στην Κύπρο, αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο, εξακολουθούν να στερούνται αξιόπιστων υπολογιστικών μεθοδολογιών για τον σχεδιασμό θεμελιώσεων που θα ανθίστανται αποτελεσματικά στις δράσεις των διογκώσιμων εδαφών (Nelson et al., 2017). Οι υπάρχουσες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί εδώ και τουλάχιστον 4 δεκαετίες έχουν βαθμονομηθεί για κλιματικές συνθήκες και εδάφη συγκεκριμένων περιοχών (Τέξας, Αυστραλία, Νότιος Αφρική) και κατά συνέπεια στερούνται γενικής εφαρμοσιμότητας. Ένα άλλο μειονέκτημα των υπαρχουσών μεθόδων είναι ότι λόγω την παλαιότητάς τους δεν συνάδουν πλέον με τη σύγχρονη πρακτική του σχεδιασμού των θεμελιώσεων σε προγράμματα H/Y στατικής ανάλυσης κτιριακών κατασκευών. Επιπλέον, η απουσία δεδομένων για τη μάργα Λευκωσίας αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για την ανάπτυξη σχεδιαστικών μεθόδων αβαθών θεμελιώσεων (π.χ. γενική κοιτόστρωση) στοχευμένων για την περίπτωση της Κύπρου. Η παρούσα έρευνα είχε ως σκοπό την ανάπτυξη μιας απλής και εύκολα εφαρμοζόμενης υπολογιστικής μεθοδολογίας για την ορθή διαστασιολόγηση γενικών κοιτοστρώσεων που κατασκευάζονται σε μάργα Λευκωσίας, με απώτερο στόχο τη μείωση του συνολικού ετήσιου κόστους βλαβών στην Κύπρο.

Για τον σκοπό αυτό, αρχικά πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα μάργας Λευκωσίας, έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που έχουν να κάνουν με τη μεταβολή του όγκου του όταν αυτό απορροφά ή αποβάλλει νερό. Πιο συγκεκριμένα, κύριος στόχος των πειραμάτων ήταν ο άμεσος ή έμμεσος προσδιορισμός των ιδιοτήτων που σχετίζονται με τον μηχανισμό ανάπτυξης παραμορφώσεων (διόγκωση/συρρίκνωση) που οφείλονται στις μεταβολές της υγρασίας του εδάφους, όπως για παράδειγμα η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) και η καμπύλη ποσοστιαίας παραμόρφωσης σε διόγκωση/κατάρρευση κατά τη διαβροχή συναρτήσει της ορθής κατακόρυφης τάσης. Πραγματοποιήθηκε επίσης πείραμα διαβροχής στο πεδίο με συνεχή καταγραφή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και της μύζησης εδαφικού ιστού, χάρη στην εγκατάσταση ηλεκτρονικών αισθητήρων στο υπέδαφος.

Οι καταγραφές του πειράματος διαβροχής παρείχαν σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών της μάργας σε συνθήκες πεδίου. Η εγκατάσταση αυτού του σταθμού μετρήσεων ήταν η πρώτη που πραγματοποιήθηκε στην

Κύπρο και, πέρα από την εκτέλεση του πειράματος διαβροχής, επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση, μέχρι σήμερα αλλά και στο προσεχές μέλλον, των μεταβολών της υγρασίας και της μύζησης του φυσικού εδάφους λόγω των καιρικών συνθηκών.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα εργαστηρίου και πεδίου, μελετήθηκε η μετανάστευση της υγρασίας κάτω από μια πλάκα θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση), εξετάζοντας διάφορους παράγοντες που δυνητικά επηρεάζουν το πρόβλημα (π.χ. σχήμα θεμελίωσης, υδραυλική διαπερατότητα και χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους, παρουσία ή όχι υδροφόρου ορίζοντα) και λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούν στην περιοχή. Στη συνέχεια καταστρώθηκε ένα απλό καταστατικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε συζευγμένες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της κατανομής των ισοδύναμων ελατηρίων Winkler που θα επιτρέπουν τη σωστή πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών εντός μιας κοιτόστρωσης επί διογκώσιμου εδάφους σε κοινά προγράμματα στατικής ανάλυσης, όπως το SAP2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Μηχανισμοί ανάπτυξης βλαβών στα κτίρια

Οι βλάβες που προκαλούν τα διογκώσιμα εδάφη στις κτιριακές κατασκευές παγκοσμίως κοστολογούνται σε δεκάδες δισεκατομμύρια δολαρίων σε ετήσια βάση (Charlie et al. 1984, Nuhfer 1994, Driscoll & Crilly 2000, Jones & Jefferson 2012), δηλαδή το κόστος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από ζημιές που προκαλούνται λόγω άλλων φυσικών καταστροφών, όπως για παράδειγμα οι σεισμοί, οι κατολισθήσεις, οι πλημμύρες κ.α. (Chen 1975, Nelson & Miller 1992). Αστοχίες στις κατασκευές εξαιτίας της συμπεριφοράς αυτών των εδαφών συμβαίνουν εκτενώς σε πολλές χώρες, μεταξύ αυτών οι ΗΠΑ (κυρίως οι νοτιοδυτικές πολιτείες), η Αυστραλία, ο Καναδάς, το Μεξικό, το Ισραήλ, η Τουρκία, η Ισπανία, η Νότιος Αφρική, οι οποίες αποτελούν τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων προκαλούνται ζημιές κυρίως αισθητικής/λειτουργικής φύσεως, όπως για παράδειγμα ρωγμές στην τοιχοποιία, μπλοκάρισμα θυρών και παραθύρων ή ακόμη και αστοχία των σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης, υποβαθμίζοντας έτσι τη λειτουργικότητα των κτιρίων. Σε ακραίες δε περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις του εδάφους είναι πολύ μεγάλες, οι ζημιές δύναται να επεκταθούν ακόμη και στον φέροντα οργανισμό (Σχήμα 2.2).

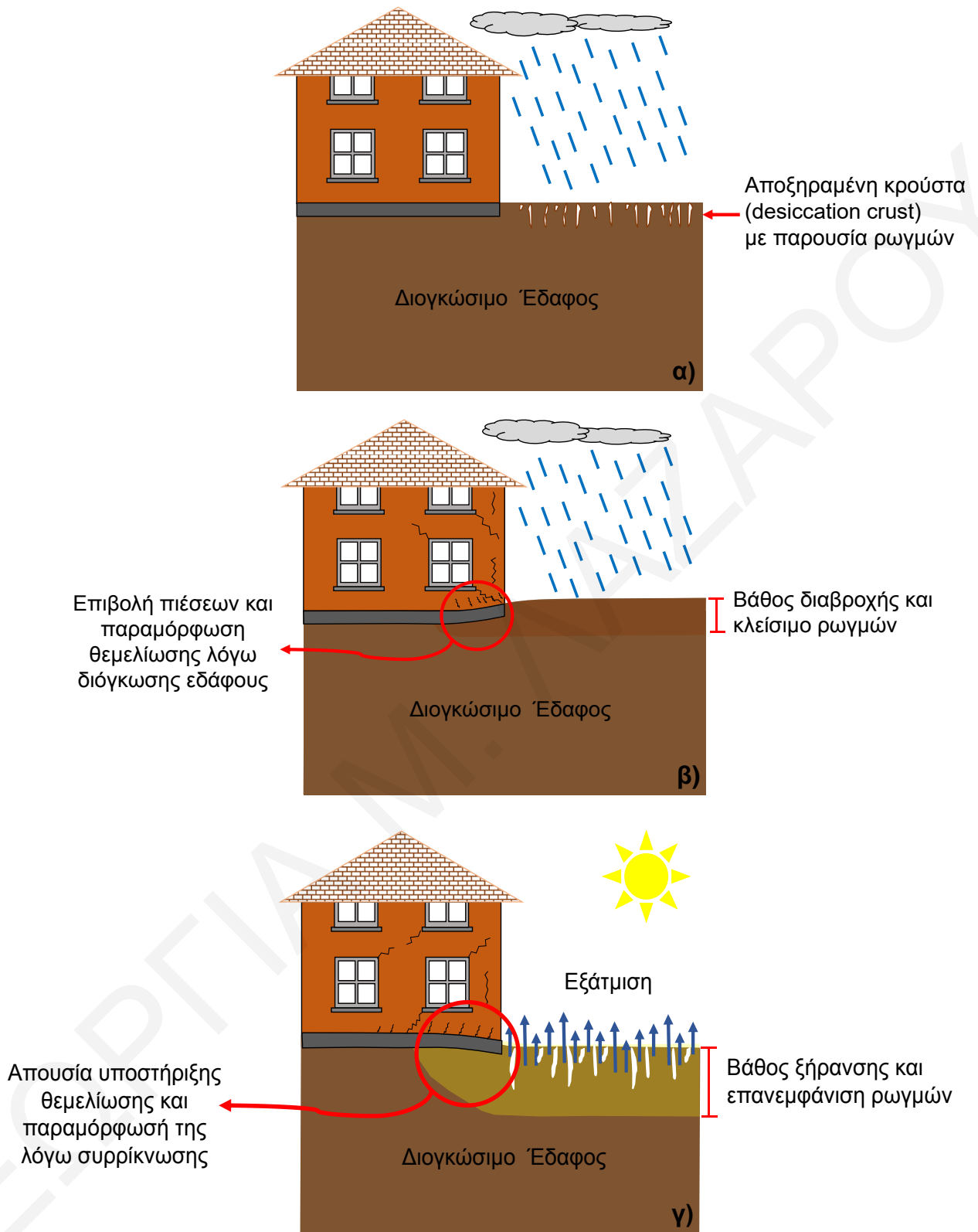
Το πρόβλημα των διογκώσιμων εδαφών είναι απόρροια της αλλαγής του όγκου τους καθώς απορροφούν (διόγκωση) ή αποβάλλουν νερό (συρρίκνωση). Αύξηση του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας μπορεί να συμβεί λόγω κατείσδυσης του νερού της βροχής, άρδευσης βλάστησης παρακείμενης στην κατασκευή, διαρροών νερού από σωληνώσεις ύδρευσης ή αποχέτευσης, από πισίνες και σηπτικές δεξαμενές. Επίσης, διόγκωση μπορεί να συμβεί λόγω μείωσης της επιφάνειας εξατμισοδιαπνοής εξαιτίας κάλυψης της επιφάνειας του εδάφους από κτίρια ή πεζοδρόμια. Οι διαρροές νερού από τα δίκτυα μπορούν να δημιουργήσουν μάλιστα έναν φαύλο κύκλο στον μηχανισμό ανάπτυξης βλαβών. Μια πρώτη διαρροή θα προκαλέσει αύξηση του όγκου του παρακείμενου εδάφους, το οποίο με τη σειρά του θα ασκήσει πιέσεις (συνήθως ανομοιόμορφα) στις σωληνώσεις, με αποτέλεσμα την περαιτέρω παραμόρφωσή τους και την αύξηση της

διαρροής (ιδιαίτερα αν η διαρροή πηγάζει από τις συνδέσεις των σωλήνων), η οποία ακολούθως θα οδηγήσει σε περαιτέρω διογκωση του εδάφους.

Μείωση του ποσοστού υγρασίας του εδάφους προκύπτει λόγω εξάτμισης στην ελεύθερη επιφάνεια, αλλά και εντός του εδάφους, μέχρι ένα περιορισμένο βάθος, όπως στο δίκτυο ρωγμών συρρίκνωσης, οι οποίες ενδέχεται να έχουν σημαντικό άνοιγμα μέχρι και τα 0.5m-1m βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια. Απώλεια υγρασίας από το έδαφος προκύπτει επίσης από την απορρόφηση νερού από τις ρίζες των φυτών (διαπνοή). Όπως η αύξηση της εδαφικής υγρασίας λόγω βροχοπτώσεων, η μείωση του ποσοστού υγρασίας λόγω εξάτμισης, η οποία εξαρτάται από καιρικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική σχετική υγρασία, ο άνεμος και η ηλιοφάνεια, εμφανίζει έντονη εποχιακή περιοδικότητα. Το ίδιο ισχύει εν μέρει για τη διαπνοή, ειδικά αν πρόκειται για χαμηλή βλάστηση. Εντούτοις, οι ρίζες των δέντρων που φυτεύονται πέριξ ενός έργου μετά την κατασκευή μπορούν να προκαλέσουν, μακροπρόθεσμα και μονοτονικά, σημαντική μείωση στο ποσοστό υγρασίας του εδάφους.

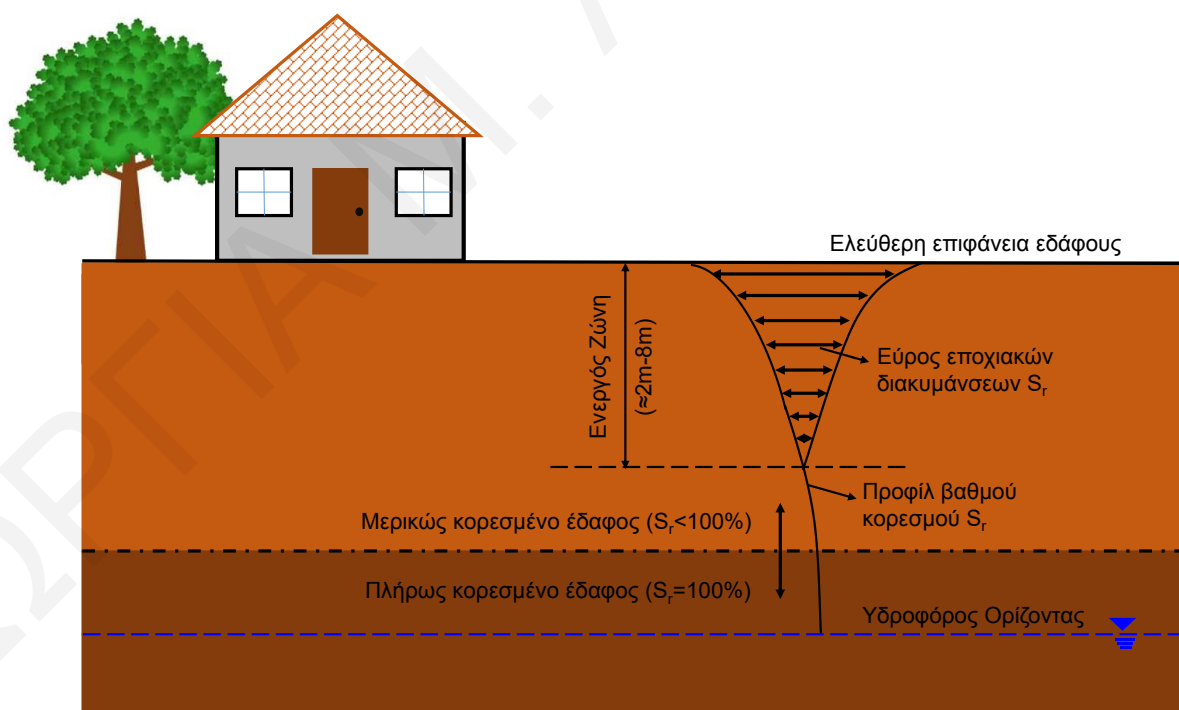
Οι ογκομετρικές μεταβολές του εδάφους προκαλούν διαφορικές παραμορφώσεις (ανυψώσεις/βυθίσεις) στη θεμελίωση, οι οποίες μεταφέρονται και στην ανωδομή υπό τη μορφή διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων. Στο Σχήμα 3.1, δίνεται σχηματικά ο μηχανισμός ανάπτυξης βλαβών στα κτίρια λόγω αύξησης της εδαφικής υγρασίας τους βροχερούς μήνες (Σχήμα 3.1β) και μείωσης της υγρασίας κατά την ξηρά περίοδο (Σχήμα 3.1γ). Ρωγμές εμφανίζονται επίσης πολύ συχνά στα οδοστρώματα (Dafalla & Al-Shamrani, 2011).

Όλα τα εδάφη τείνουν να μεταβάλουν τον όγκο τους, έστω και σε απειροελάχιστο βαθμό, καθώς προστίθεται ή αφαιρείται υγρασία από αυτά. Διογκώσιμα εδάφη καλούνται αυτά στα οποία οι εν λόγω ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές (σε βαθμό που να απασχολούν τον μηχανικό). Πρόκειται για λεπτόκοκκα εδάφη υψηλού δείκτη πλαστικότητας, που συνήθως περιέχουν, εκτός από ιλλίτη, και σημαντικές ποσότητες του αργλικού ορυκτού μοντμοριλλονίτης. Η ιδιότητά τους να δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες νερού κατά τη διαβροχή τους οφείλεται στην ενεργητικότητα (activity) του μοντμοριλλονίτη, αλλά και αυτής του ιλλίτη, δηλαδή στην έντονη έλξη και δέσμευση νερού γύρω από τα αργλικά πλακίδια (ανάπτυξη διπλού στρώματος). Όσο μεγαλύτερη είναι η παρουσία των αργλικών ορυκτών στο έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η διογκωσιμότητά του.



Σχήμα 3.1: Μηχανισμός ανάπτυξης αστοχιών σε κτίρια με αβαθή θεμελίωση τα οποία εδράζονται επί διογκώσιμης αργίλου: α) αρχική κατάσταση, β) κατά τη διόγκωση του εδάφους στη διάρκεια των χειμερινών μηνών και γ) κατά την ξήρανση του εδάφους στη διάρκεια των θερινών μηνών.

Στα διογκώσιμα εδάφη, η διάχυση της υγρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους προκύπτει κυρίως από τη μεγάλη υδραυλική κλίση που δημιουργεί η εδαφική μύζηση (suction), παρά λόγω της βαρύτητας. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί η κατείσδυση του νερού της βροχής διαμέσου των ρωγμών συρρίκνωσης που αναπτύσσονται στο έδαφος κατά την ξηρά περίοδο. Οι εποχιακές μεταβολές υγρασίας είναι πιο έντονες κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, όπου το έδαφος επηρεάζεται άμεσα από κλιματολογικούς παράγοντες, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο καθώς αυξάνεται το βάθος. Σε μεγαλύτερα βάθη, το πλάτος της εποχιακής διακύμανσης υγρασίας (και κατ' επέκταση του βαθμού κορεσμού S_r και της εδαφικής μύζησης) είναι μικρότερο (Σχήμα 3.2). Το τμήμα εδάφους από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι και το βάθος στο οποίο το ποσοστό υγρασίας παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους ονομάζεται ενεργός ζώνη (active zone). Ο βαθμός κορεσμού κάτω από την ενεργό ζώνη εκτιμάται ότι αυξάνεται σταδιακά με το βάθος μέχρι τη ζώνη όπου, λόγω του φαινομένου της τριχοειδούς ανύψωσης της υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα, το έδαφος καθίσταται πρακτικά πλήρως κορεσμένο.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση της ενεργού ζώνης και του εύρους διακύμανσης του βαθμού κορεσμού εντός αυτής.

3.2 Εκτίμηση Διογκωσιμότητας

Η ιδιότητα ενός διογκώσιμου υλικού να απορροφά νερό είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μύζηση (suction) που μπορεί να αναπτυχθεί στο εδαφικό υλικό όταν αυτό βρίσκεται σε μερικώς κορεσμένη (ή «ακόρεστη») κατάσταση. Η μύζηση μπορεί να μετρηθεί σε όρους μερικής πίεσης των υδρατμών του νερού (σχετική υγρασία) που περιέχονται στο έδαφος. Η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της εδαφικής μύζησης και της μερικής πίεσης του νερού των πόρων δίδεται από τον νόμο του Kelvin και εκφράζεται ως ακολούθως (Fredlund & Rahardjo, 1993):

$$\psi = -\frac{RT}{u_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}}\right) \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

όπου ψ η μύζηση, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία, u_{w0} ο ειδικός όγκος του νερού, ω_v η μοριακή μάζα των υδρατμών, \bar{u}_v η μερική πίεση του νερού των πόρων και u_{v0} η πίεση κορεσμού των υδρατμών πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια καθαρού νερού που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία.

Η εδαφική μύζηση, ποσοτικοποιημένη σε όρους σχετικής υγρασίας, αναφέρεται ως ολική μύζηση (total suction) και αποτελείται από δύο συνιστώσες, την ωσμωτική μύζηση (osmotic suction) και τη μύζηση εδαφικού ιστού (matric suction). Βάσει αυτού, η μύζηση μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

όπου $u_a - u_w$ η μύζηση εδαφικού ιστού (matric suction), u_a η πίεση του αέρα των πόρων, u_w η πίεση του νερού των πόρων και π η ωσμωτική μύζηση. Η μύζηση εδαφικού ιστού είναι άμεσα συνυφασμένη με το φαινόμενο της επιφανειακής τάσης που αναπτύσσεται όταν το νερό βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα, όπως γίνεται στους πόρους ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους. Στην περίπτωση που το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο, δηλαδή δεν υπάρχει αέρας στους πόρους του εδάφους και όλος ο όγκος των πόρων καταλαμβάνεται από νερό, η εδαφική μύζηση μηδενίζεται. Η ωσμωτική μύζηση έχει να κάνει με την παρουσία αλάτων εν διαλύσει εντός του νερού των πόρων (κατιόντων και ανιόντων).

Η διογκωσιμότητα των αργιλικών εδαφών μπορεί να προσδιοριστεί μέσω διαφόρων τεχνικών που χρησιμοποιούνται στη γεωτεχνική μηχανική. Αυτές οι τεχνικές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τις εμπειρικές μεθόδους, τις πειραματικές μεθόδους με χρήση

συμβατικού οιδημέτρου και τις μεθόδους όπου ο υπολογισμός της διογκωσιμότητας γίνεται μέσω της εδαφικής μύζησης.

3.2.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές σχέσεις συστάθηκαν από ερευνητές σε μια προσπάθεια εξοικονόμησης του χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρωθούν οι πειραματικές μέθοδοι οιδημέτρου. Έτσι, συλλέγοντας δεδομένα από αυτές τις μεθόδους, συσχέτισαν τη διόγκωση που καταγραφόταν πειραματικά με φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών (π.χ. όριο υδαρότητας, δείκτη πλαστικότητας, φυσικό ποσοστό υγρασίας, κλπ). Οι Seed et al. (1962) και ο Chen (1975) προτείνουν εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας διόγκωσης (κατακόρυφης παραμόρφωσης υπό σχεδόν μηδενική κατακόρυφη τάση) συναρτήσεως του δείκτη πλαστικότητας του υλικού (Πίνακας 3.1). Βασισμένες στην ίδια φιλοσοφία είναι και οι εμπειρικές μέθοδοι που προτείνονται από τους Nayak & Christensen (1971), Schneider & Poor (1974), Johnson (1978) και Dhowian (1990β), οι οποίες εκτός από τον δείκτη πλαστικότητας χρησιμοποιούν επιπλέον παραμέτρους, όπως για παράδειγμα το φυσικό ποσοστό υγρασίας, το ποσοστό αργίλου (και το βάθος στην περίπτωση του Johnson, 1978).

Οι Holtz & Gibbs (1954) εισηγήθηκαν ότι το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας μπορούν να δώσουν μια ένδειξη της διογκωσιμότητας των αργιλικών εδαφών, οπότε πρότειναν μια μέθοδο η οποία βασίζεται σε ταυτόχρονη αξιολόγηση διαφόρων εδαφικών παραμέτρων (δείκτης πλαστικότητας, όριο συρρίκνωσης, περιεκτικότητα σε κολλοειδή). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται σε μετρήσεις διογκωσιμότητας που πραγματοποιήθηκαν σε 45 δείγματα.

Πίνακας 3.1: Παραδείγματα εμπειρικών σχέσεων για εκτίμηση της διογκωσιμότητας.

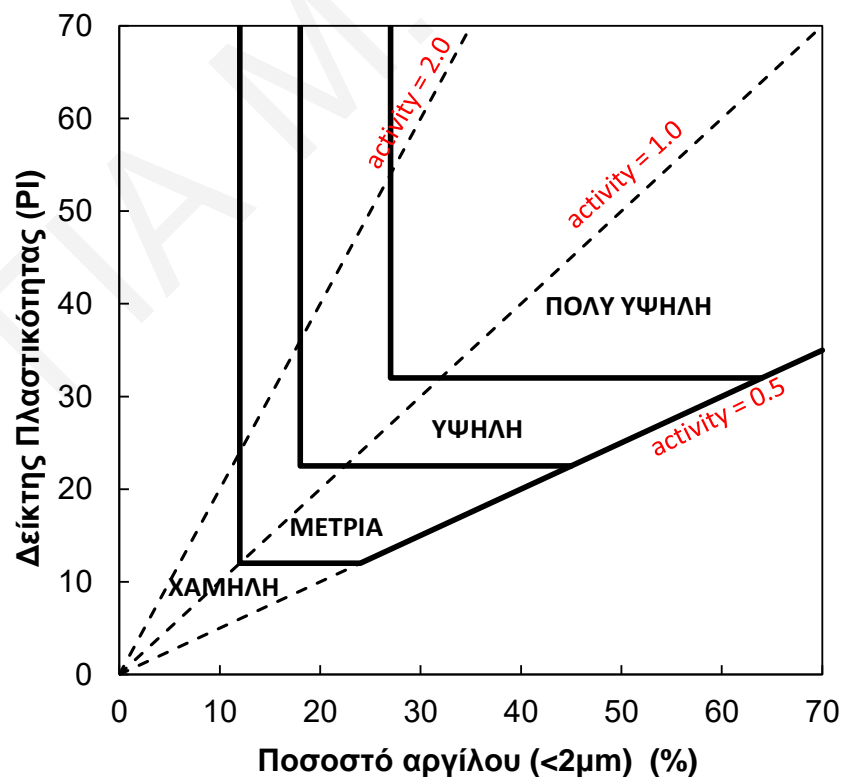
Εξίσωση	Πηγή
$S_p = 0.00216PI^{2.44}$	Seed et al., 1962
$S_p = 0.00229PI^{2.67}(1.45c)/w_i + 6.38$	Nayak & Christensen., 1971
$\log S_p = 0.9(PI/w_i) - 1.19$	Schneider & Poor, 1974
$S_p = 0.2558e^{0.08381PI}$	Chen, 1975
$S_p = 23.82 + 0.7346PI - 0.1458H - 1.7w_o - 0.0088PI \times H$	Johnson, 1978

S_p : παραμόρφωση διόγκωσης
 PI : δείκτης πλαστικότητας
 H : βάθος σε ft

c : ποσοστό αργίλου
 w_i ή w_o : φυσικό ποσοστό υγρασίας

Ο van der Merwe (1975) πρότεινε το αρκετά δημοφιλές ομώνυμο διάγραμμα (ή αλλιώς Νοτιοαφρικανικό διάγραμμα) που φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σύμφωνα με αυτό, ένα υλικό χαρακτηρίζεται από χαμηλής έως εξαιρετικά υψηλής διογκωσιμότητας ανάλογα με τον δείκτη πλαστικότητάς του και το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος ορισμένο ως ισοδύναμη διάμετρος κόκκου μικρότερη από 2 μm . Για παράδειγμα, εδάφη με περιεκτικότητα αργίλου μεγαλύτερη από 27% και δείκτη πλαστικότητας μεγαλύτερο από 32 χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά διογκώσιμα.

Πέραν από τις σχέσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω υπάρχει πληθώρα άλλων εξισώσεων στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι US Department of the Army (1983), Dhowian (1990α), Elarabi (2004) και Nelson et al. (2015) παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τις διαθέσιμες εμπειρικές μεθόδους με τις οποίες μπορεί να προσδιοριστεί η διογκωσιμότητα ενός εδαφικού υλικού. Το κύριο μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι οι περισσότερες βασίζονται σε δεδομένα που αφορούν εδάφη μιας συγκεκριμένης περιοχής και καμιά από αυτές τις προσεγγίσεις δεν παρέχει ευρέως αποδεκτά κριτήρια για τον προσδιορισμό και την ταξινόμηση της συμπεριφοράς των εδαφών όσον αφορά τις ογκομετρικές μεταβολές.



Σχήμα 3.3: Εμπειρικό γράφημα χαρακτηρισμού της διογκωσιμότητας των εδαφών σύμφωνα με τον van der Merwe (1975).

3.2.2 Πειραματικές μέθοδοι με τη χρήση συμβατικού οιδημέτρου

Οι πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της διογκωσιμότητας με τη χρήση συμβατικού οιδημέτρου είναι ευρέως διαδεδομένες και μπορεί κανείς να τις κατατάξει σε δύο κατηγορίες· σε αυτές που μετράται η παραμόρφωση διόγκωσης (δοκιμές διόγκωσης-swelling strain tests) και σε αυτές που μετράται η πίεση που απαιτείται να επιβληθεί στο δοκίμιο έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η όποια παραμόρφωση εξαιτίας της διόγκωσης (δοκιμές πίεσης διόγκωσης-swelling pressure tests) (Fityus et al., 2005). Οι Feng et al. (1998) και Fredlund et al. (2012) πραγματοποίησαν εκτενή σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων προσδιορισμού της πίεσης διόγκωσης με τη χρήση συμβατικού οιδημέτρου. Για να υπολογιστεί η διογκωσιμότητα μιας πλαστικής αργίλου, οι δοκιμές πρέπει να γίνουν σε αδιατάρακτα δείγματα που λαμβάνονται από γεωτρήσεις, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι δεν θα μεταβληθεί το φυσικό ποσοστό υγρασίας τους. Οι πειραματικές δοκιμές οιδημέτρου προϋποθέτουν περιορισμό των πλευρικών παραμορφώσεων του υλικού με την εφαρμογή άκαμπτου μεταλλικού δακτύλιου και την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης με ελεύθερη πρόσβαση σε νερό.

3.2.3 Υπολογισμός διογκωσιμότητας μέσω της εδαφικής μύζησης

Η δυνατότητα μέτρησης της μύζησης (ή αναρρόφησης) του εδάφους, τόσο εργαστηριακά όσο και επιτόπου, είναι πρωταρχικής σημασίας και τα προβλήματα που αφορούν σε μερικώς κορεσμένα υλικά είναι στενά συνδεδεμένα με αυτήν. Οι μέθοδοι προσδιορισμού μύζησης διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Στις άμεσες μεθόδους η μύζηση μετράται απευθείας ενώ στις έμμεσες μετράται κάποιο άλλο μέγεθος το οποίο συσχετίζεται με τη μύζηση και μέσω αυτού υπολογίζεται η τιμή της. Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης ολικής μύζησης, μύζησης εδαφικού ιστού και ωσμωτικής μύζησης και το εύρος τιμών που η κάθε μέθοδος έχει τη δυνατότητα να καλύψει.

Από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για τον προσδιορισμό της μύζησης εδαφικού ιστού (matric suction) είναι η μέθοδος μετατόπισης άξονα (Bardanis & Grifiza 2012, Vanapalli et al. 2008, Sitarenios et al. 2012, Hong et al. 2016, Sreedeeep & Singh 2006, Tinjum et al. 1997). Για τον προσδιορισμό της ωσμωτικής μύζησης οι Fredlund & Rahardjo (1993) προτείνουν τη μέτρησή της απευθείας στο νερό των πόρων μετά την εξαγωγή από το έδαφος με τη μέθοδο της συμπίεσης του δοκιμίου και συλλογής του αποβαλλόμενου νερού (squeezing technique). Πιο συχνά, η ωσμωτική μύζηση προσδιορίζεται έμμεσα από τη διαφορά της συνολικής μύζησης και της μύζησης εδαφικού ιστού (matric suction). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα με τη μέθοδο διηθητικού χαρτιού (filter paper), με

την οποία μετρούνται ταυτόχρονα στο ίδιο δείγμα η ολική μύζηση και η μύζηση εδαφικού ιστού (Bulut, 2001). Εκτενή αναφορά στους τρόπους μέτρησης της μύζησης κάνουν οι Fredlund & Rahardjo (1993), Lu & Likos (2004), Fredlund et al. (2012) και Μπαρδάνης (2016).

Πίνακας 3.2: Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης.

Μέθοδος	Εύρος τιμών (kPa)	Μετρούμενη συνιστώσα
Ψυχομέτρου (Psychrometer-Peltier type)	100-8000	Ολική
Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (Chilled mirror hygrometer)	100-450000	Ολική
Χαρτιού φίλτρου (Filter paper method)	Ολόκληρο	Ολική και Εδαφικού ιστού
Τενσιομέτρου (Tensiometer)	0-90	Εδαφικού ιστού
Μετατόπισης άξονα με τη χρήση θαλάμου μύζησης (Null-type pressure plate)	0-1500 ¹	Εδαφικού ιστού
Αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας (Thermal conductivity sensors)	10-1500	Εδαφικού ιστού
Μέτρηση μύζησης μέσω της σχετικής υγρασίας (Humidity measurement method)	Ολόκληρο	Ολική
Συμπίεσης του υγρού των πόρων (Pore fluid squeezer)	Ολόκληρο	Ωσμωτική
Πορώδους τεμαχίου	10-10000	Εδαφικού ιστού

Ο Aitchison (1973) ήταν από τους πρώτους μελετητές που ανέπτυξε μια μεθοδολογία υπολογισμού ογκομετρικών μεταβολών βασισμένη σε τιμές εδαφικής μύζησης, η οποία δίδεται από την Εξίσωση 3.3:

$$\Delta H = \frac{1}{100} \int_0^{H_s} I_{Pt} \Delta s \Delta h \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

όπου ΔH η ανύψωση/καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους, I_{Pt} μια παράμετρος υλικού που ονομάστηκε δείκτης αστάθειας εδάφους, Δs η αναμενόμενη μεταβολή της μύζησης σε

¹ Το εύρος τιμών εξαρτάται από την τιμή εισόδου αέρα (air entry value) του πωρόλιθου.

βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους, Δh το πάχος του εδαφικού στρώματος και H_s το συνολικό βάθος μεταβολής της μύζησης. Για τους τρόπους υπολογισμού του δείκτη I_p γίνεται εκτενής αναφορά στο Αυστραλιανό πρότυπο AS 2870-1996 (Standards Australia 1996), ενώ συσχέτιση μεταξύ δείκτη πλαστικότητας και δείκτη αστάθειας ανέπτυξαν οι Mitchell & Avalue (1984).

Ο Fredlund (1979) προτείνει τη χρήση της Εξίσωσης 3.4 για υπολογισμό των ογκομετρικών αλλαγών εξαιτίας των μεταβολών μύζησης με βάση τη σχέση:

$$\Delta e = C_t \Delta \log(\sigma - u_\alpha) + c_m \Delta \log(u_\alpha - u_w) \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

όπου C_t και c_m είναι παράμετροι του υλικού (που ονομάζονται συντελεστής συμπίεσης και συντελεστής αναρρόφησης, αντίστοιχα), και σ η ολική κατακόρυφη τάση.

Οι Hamberg & Nelson (1984) ακολούθησαν μια διαφορετική τακτική και επεκτείνοντας τη φιλοσοφία ότι “η διόγκωση σχετίζεται με την αλλαγή της εδαφικής μύζησης και η εδαφική μύζηση εξαρτάται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, επομένως η διόγκωση μπορεί να προσδιοριστεί με μέτρηση των μεταβολών υγρασίας” πρότειναν μια εξίσωση (Εξίσωση 3.5) για τον προσδιορισμό της διόγκωσης των εδαφών χρησιμοποιώντας ένα μέτρο C_w που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή του όγκου των δειγμάτων εδάφους σε σχέση με την περιεκτικότητα σε νερό:

$$\Delta H = H \frac{C_w}{1+e_0} \Delta w \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

όπου C_w το επιλεγόμενο μέτρο μύζησης που ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής του δείκτη πόρων προς τη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας ($\Delta e/\Delta w$), H το πάχος του εδαφικού στρώματος και e_0 ο αρχικός δείκτης πόρων.

Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικές μεθοδολογίες προσδιορισμού των ογκομετρικών μεταβολών του εδάφους, οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές του βαθμού κορεσμού (και κατ’ επέκταση της μύζησης), όπως για παράδειγμα οι Snethen (1980), Dhowian (1990β), Fityous & Smith (1998) και Briaud et al. (2003). Εκτενής αναφορά στις μεθοδολογίες αυτές γίνεται από τους Vanapalli & Lu (2012).

3.2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Soil-Water Characteristic Curve SWCC)

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (SWCC) είναι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει τα φαινόμενα ροής εντός μερικώς κορεσμένων εδαφών. Η μαθηματική έκφραση

της σχέσης μεταξύ μύζησης και βαθμού κορεσμού δίδεται από διάφορα μοντέλα, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, με το εάν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα έχουν φυσικό νόημα ή όχι, καθώς και ως προς το εύρος τιμών μύζησης στο οποίο επιτρέπουν την προσομοίωση. Ο Μπαρδάνης (2016) συνοψίζει τις διάφορες εξισώσεις που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τη μαθηματική απόδοση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού σε όρους βαθμού κορεσμού (S_r) συναρτήσεως της μύζησης (s), οι οποίες μπορεί να γραφούν και σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (θ) συναρτήσεως της μύζησης (s) (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Εξισώσεις των πιο διαδεδομένων μαθηματικών προσομοιωμάτων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (από Μπαρδάνης, 2016).

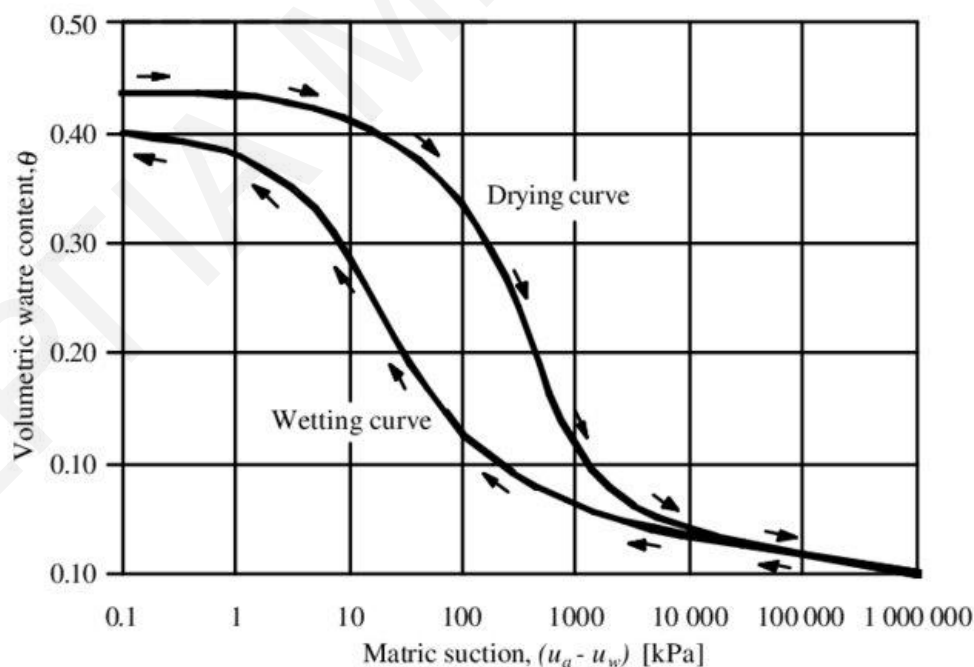
Πηγή	Εξίσωση καμπύλης προσομοίωσης (S_r-s)	Εξίσωση καμπύλης προσομοίωσης ($\theta-s$)
Burdine (1953)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^{1-2/n}}$, (4.3)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + as^n)^{1-2/n}}$, (4.4)
Gardner (1956)	$S_r = \frac{1}{1 + as^n}$, (4.5)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + as^n}$, (4.6)
Brooks & Corey (1964)	$\begin{cases} S_r = 100\% & s < a \\ S_r = \left(\frac{s}{a}\right)^{-n} & s > a \end{cases}$ (4.7)	$\begin{cases} \theta = 1 & s < a \\ \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{s}{a}\right)^{-n} & s > a \end{cases}$ (4.8)
Brutsaert (1966)	$S_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n}$, (4.9)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n}$, (4.10)
Mualem (1976β)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^{1-1/n}}$, (4.11)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + as^n)^{1-1/n}}$, (4.12)
van Genuchten (1980)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^m}$, (4.13)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{[1 + (as)^n]^m}$, (4.14)
Boltzman (1984)	$\begin{cases} S_r = 100\% & s < a \\ S_r = \exp\left(\frac{a-s}{n}\right) & s > a \end{cases}$ (4.15)	$\begin{cases} \theta = 1 & s < a \\ \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp\left(\frac{a-s}{n}\right) & s > a \end{cases}$ (4.16)
Fermi (1987)	$S_r = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{s-a}{n}\right)}$, (4.17)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{s-a}{n}\right)}$, (4.18)
Fredlund & Xing (1994)	$S_r = \frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)\right)^m}$, (4.19)	$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)}\right) \frac{1}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)\right]^m}$, (4.20)

Το πλέον διαδεδομένο μοντέλο είναι αυτό του van Genuchten (1980), το οποίο χρησιμοποιείται επίσης από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D με την πιο κάτω μορφή:

$$S_r(s) = S_{r,res} + (1 - S_{r,res}) \left[1 + \left(g_a \left|\frac{s}{\gamma_w}\right|\right)^{g_n}\right]^{g_c} \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

όπου S_r ο βαθμός κορεσμού, s η εδαφική μύζηση, γ_w το ειδικό βάρος του νερού, $S_{r,res}$ ο παραμένον (residual) βαθμός κορεσμού και g_a , g_c και g_n οι παράμετροι βαθμονόμησης. Ο Mualem (1976) προτείνει όπως η παράμετρος g_c οριστεί ίση με $(1-g_n)/g_n$, γεγονός που μετατρέπει την Εξ. 3.6 σε εξίσωση τριών παραμέτρων.

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού δεν είναι σταθερή και αμετάβλητη για ένα δεδομένο έδαφος, αλλά εξαρτάται από το αν το έδαφος βρίσκεται σε φάση διαβροχής ή ξήρανσης και από τον δείκτη πόρων (Τσιαμπούση, 2019). Αύξηση του λόγου κενών μετατοπίζει την καμπύλη προς τα αριστερά στο διάγραμμα βαθμού κορεσμού – μύζησης. Επιπλέον, η χαρακτηριστική καμπύλη που προσδιορίζεται με διαβροχή του εδάφους είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά στο διάγραμμα σε σχέση με αυτή που αντιστοιχεί σε διαδικασία ξήρανσης του εδάφους (Σχήμα 3.4). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται υστέρηση και αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες της SWCC. Η υστέρηση οφείλεται στη διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων όταν τα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων γεμίζουν και αδειάζουν από νερό. Συγκεκριμένα, κατά την ξήρανση του εδαφικού υλικού οι μηνίσκοι που σχηματίζονται έχουν μικρή καμπυλότητα και ως εκ τούτου σημειώνεται μεγάλη μύζηση. Αντίθετα, κατά τη διαβροχή, η ακτίνα καμπυλότητας είναι μεγαλύτερη, με συνέπεια η μύζηση να είναι μειωμένη.



Σχήμα 3.4: Υστέρηση χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (SWCC) (από Vanapalli et al., 2004).

Παρά το γεγονός ότι είναι το πλέον διαδεδομένο, το προσομοίωμα van Genuchten δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της υδραυλικής υστέρησης. Αντίθετα, προσομοιώματα που έχουν προταθεί πρόσφατα, όπως αυτά των Li (2005), Pedroso & Williams (2010), Tsiamprousi et al. (2013) και Gallipoli et al. (2015), συμπεριλαμβάνουν αναλυτικά την προσομοίωση της υδραυλικής υστέρησης.

3.2.5 Μέτρηση διόγκωσης στο πεδίο

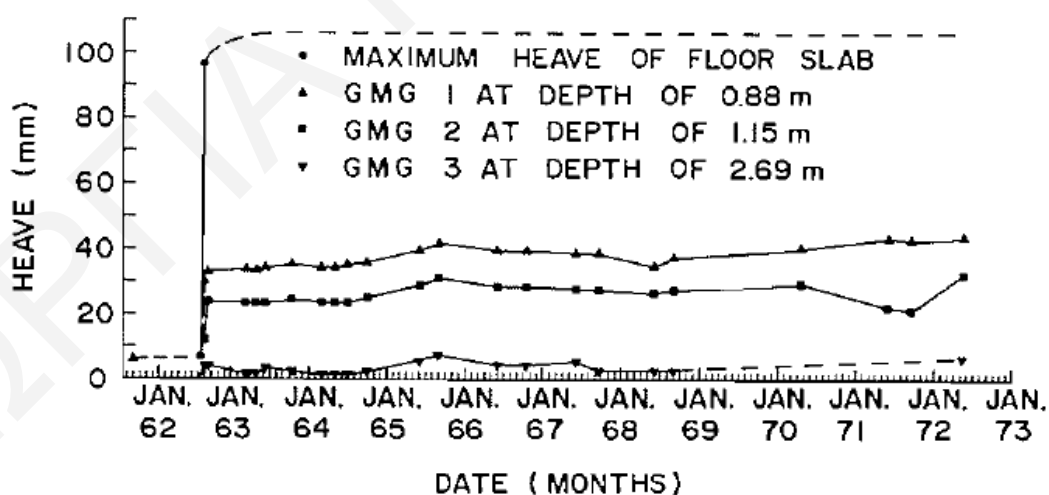
Παρόλο που υπάρχουν αρκετές πειραματικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της διόγκωσης του εδάφους στο εργαστήριο, οι τιμές που λαμβάνονται είναι προτιμότερο να επαληθεύονται και από δοκιμές που πραγματοποιούνται επιτόπου, έτσι ώστε να αποτυπώνονται αποτελέσματα πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας που θα ισχύσει σε ένα έργο πολιτικού μηχανικού. Αυτή η πρακτική δυστυχώς δεν ακολουθείται τόσο συχνά από τους μελετητές, οι οποίοι καταφεύγουν σε εργαστηριακές μεθόδους και εμπειρικές σχέσεις και στη συνέχεια συνυπολογίζουν στον σχεδιασμό επιμέρους παράγοντες και συνθήκες που αγνοούνται στην πειραματική διαδικασία ώστε να προσδιορίσουν την “πραγματική” διόγκωση του υλικού.

Στο US Department of the Army (1983) γίνεται αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της παραμόρφωσης στο πεδίο. Αυτοί οι παράγοντες αφορούν τη συγκέντρωση αλάτων στους πόρους του υλικού, τη σύνθεση του υγρού, την ξηρή πυκνότητα, την εδαφική δομή, το κλίμα της περιοχής, τα υπόγεια νερά, την κάλυψη από βλάστηση, την επιτόπου διαπερατότητα και τη στράγγιση του νερού της βροχής. Επίσης, σε μια πρακτική εφαρμογή θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι επιδράσεις της γεωμετρίας της κατασκευής, το βάθος θεμελίωσης και η κατανομή του φορτίου της ανωδομής στο έδαφος.

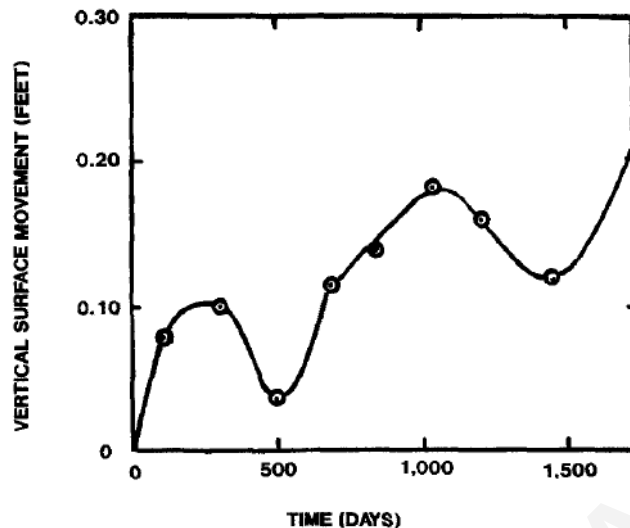
Οι επιτόπου δοκιμές αφορούν την παρακολούθηση της καθίζησης και ανύψωσης του εδάφους (settlement and heave monitoring) για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών παραμορφώσεων, την εγκατάσταση πιεζόμετρων για την καταγραφή του φρεατίου ορίζοντα, καθώς και αισθητήρων μύζησης στην ακόρεστη ζώνη (Jones και Jefferson, 2012). Το 1961 η Διεύθυνση Κτιριακών Ερευνών του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας του Καναδά παρακολούθησε την κατασκευή μιας ελαφριάς βιομηχανικής μονάδας στην κεντρική Regina. Οι Yoshida et al. (1983) παρουσιάζουν λεπτομερώς τη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο. Τρεις σπειροειδείς μετρητές εδαφικής μετακίνησης (Ground

Movement Gauges-GMG) τοποθετήθηκαν κοντά σε ένα δείκτη αναφοράς (benchmark) σε διαφορετικά βάθη κάτω από το επίπεδο της πλάκας δαπέδου. Ένας μετρητής υγρασίας νετρονίων (neutron moisture meter) εγκαταστάθηκε δίπλα από τους αισθητήρες μέτρησης εδαφικής κίνησης, επιτρέποντας τη μέτρηση των μεταβολών υγρασίας χωρίς να απαιτείται δειγματοληψία για τον προσδιορισμό της. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η πλάκα σημείωσε μονοτονική ανύψωση αρκετών εκατοστών λόγω της ανάδυσσης υγρασίας από τον ρηχό υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής και συγκέντρωσής της κάτω από την πλάκα. Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τις εδαφικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν για διάστημα δέκα χρόνων, καθώς και μια προσεγγιστική τιμή της μέγιστης μετακίνησης της πλάκας θεμελίωσης. Παρατηρείται ότι η ανύψωση του εδάφους μειώνεται σημαντικά με το βάθος και σχεδόν μηδενίζεται κάτω από τα 2.7m.

Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει την κατακόρυφη κίνηση του εδάφους κάτω από το άκρο μιας πλάκας, η οποία κατασκευάστηκε πάνω σε μια άργιλο υψηλής πλαστικότητας (Johnson, 1980). Και σε αυτή την περίπτωση, σημειώθηκε ανύψωση η οποία αυξάνεται σταδιακά με τον χρόνο εξαιτίας της παρουσίας ενός ρηχού επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα (2.4m βάθος). Παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις στην κατακόρυφη μετακίνηση του εδάφους, οι οποίες όμως δεν έχουν περιοδικότητα ενός έτους, όπως θα αναμενότανε, αλλά 2-3 ετών.



Σχήμα 3.5: Εδαφικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν σε ένα ελαφρύ βιομηχανικό κτίριο από τους Yoshida et al. (1983).

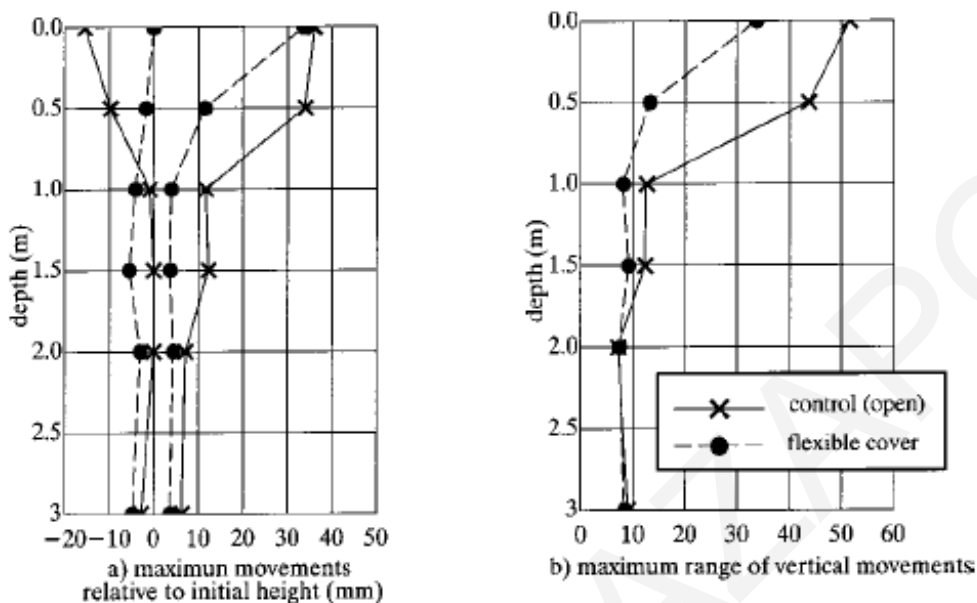


Σχήμα 3.6: Κατακόρυφη κίνηση του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για άργιλο υψηλής πλαστικότητας (Johnson, 1980, Day, 1994).

Οι Abduljauwad et al. (1998) για να μελετήσουν την επίδραση στα δομικά στοιχεία της εδαφικής μετακίνησης που προκαλείται λόγω των μεταβολών της υγρασίας κατασκεύασαν ένα πειραματικό μονώροφο οικίσκο σε διογκώσιμη άργιλο στη Σαουδική Αραβία και τοποθέτησαν μετρητές μετακίνησης εδάφους περίξ της κατασκευής και αισθητήρες παραμόρφωσης σε δοκούς και υποστύλωματα. Επίσης, δύο όργανα (Test Measurements Instruments-TMI) μέτρησης εδαφικής πίεσης τύπου KD-54 τοποθετήθηκαν κάτω από την κατασκευή, έτσι ώστε να μετρηθεί η πίεση διόγκωσης. Στη συνέχεια πλημμύρησαν τον περιβάλλοντα χώρο και κατέγραψαν τις ανυψώσεις του περιβάλλοντος εδάφους και των θεμελίων, καθώς και τις ζημιές που αναπτύχθηκαν στους τοίχους πληρώσεως και στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού.

Σε μια εγκατάσταση στο Newcastle της Αυστραλίας πραγματοποιήθηκε πείραμα πεδίου όπου εγκαταστάθηκε πειραματικός εξοπλισμός για μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας και της μύζησης του εδάφους, καθώς και των εδαφικών μετακινήσεων, για μια περίοδο επτά ετών, από το 1993 μέχρι το 2000 (Fityus et al., 2004). Για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων εγκαταστάθηκαν ράβδοι καταγραφής της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους και σε διάφορα βάθη. Οι περιβάλλουσες της εδαφικής κίνησης σε σχέση με το βάθος για μια ανοικτή περιοχή ελέγχου και για το κέντρο μιας εύκαμπτης καλυμμένης επιφάνειας 10m x 10m παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7. Το Σχήμα 3.7α παρουσιάζει τη μέγιστη μετακίνηση που καταγράφηκε σε διάφορα βάθη σε σχέση με το αρχικό ύψος του εδάφους, ενώ το Σχήμα 3.7β δείχνει το συνολικό εύρος της εδαφικής μετατόπισης. Το πλάτος της κατακόρυφης μετατόπισης στο ελεύθερο πεδίο είναι 5cm, ενώ κάτω από το

αδιαπέρατο κάλυμμα, δηλαδή απουσία απευθείας εισροής ή εξάτμισης του νερού από την ατμόσφαιρα, το πλάτος της μετατόπισης μειώνεται σε 3cm.



Σχήμα 3.7: Περιβάλλουσες εδαφικής μετακίνησης σε σχέση με το βάθος στο α) ελεύθερο πεδίο και β) κέντρο επιφάνειας 10mx10m καλυμμένης από αδιαπέρατη μεμβράνη (Fityus et al., 2004).

3.3 Διαπερατότητα μη Κορεσμένων Εδαφών

Η υδραυλική διαπερατότητα ενός εδαφικού υλικού ποσοτικοποιείται μέσω της παραμέτρου k (m/sec ή cm/sec) που ονομάζεται συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας και αποτελεί την παράμετρο υλικού στον νόμο του Darcy (1856). Όσον αφορά τα κορεσμένα εδάφη, η τιμή αυτού του συντελεστή εξαρτάται ισχυρώς σχεδόν μόνο από τον δείκτη πόρων του εδάφους. Αντίθετα για τα μερικώς κορεσμένα εδάφη, το k είναι συνάρτηση κυρίως της εδαφικής μύζησης. Συγκεκριμένα, είναι μια έντονα φθίνουσα συνάρτηση της μύζησης.

Δεδομένου ότι το ποσοστό υγρασίας (και ο βαθμός κορεσμού) συνδέεται άμεσα με την εδαφική μύζηση μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (SWCC), συνεπάγεται ότι η διάχυση της υγρασίας σε ένα μερικώς κορεσμένο έδαφος διέπεται από δυο εξισώσεις, τον νόμο του Darcy και την εξίσωση της SWCC (Fredlund et al., 2012). Η υδραυλική διαπερατότητα παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο και μειώνεται γρήγορα (μείωση πολλών τάξεων μεγέθους) όσο ξηραίνεται. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές στατιστικές/εμπειρικές συσχετίσεις του

συντελεστή διαπερατότητας (της υγρής φάσης) με τη μύζηση σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και την τιμή του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας πλήρως κορεσμένου εδάφους (π.χ. Fredlund & Xing, 1994, και van Genuchten, 1980).

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να προσδιοριστεί με άμεσες ή έμμεσες μεθόδους. Οι άμεσες μέθοδοι είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν είτε εργαστηριακά, ή στο πεδίο. Μειονέκτημα των άμεσων μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι είναι δαπανηρές και δύσκολο να διεξαχθούν στο πεδίο. Οπότε, έγιναν προσπάθειες ώστε να εκτιμάται θεωρητικά ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας, χρησιμοποιώντας είτε τη σχέση βαθμού κορεσμού-μύζησης ή τη σχέση ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Αυτές οι εκτιμήσεις αναφέρονται ως έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της υδραυλικής διαπερατότητας των εδαφικών υλικών. Οι έμμεσες μέθοδοι χρησιμοποιούν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (μάζα και όγκο), καθώς και τη χαρακτηριστική καμπύλη του. Οι έμμεσες μέθοδοι μπορούν να πραγματοποιηθούν με δοκιμές διάχυσης (diffusivity) και υδραυλικού δυναμικού (hydraulic potential) (Hall & Hoff, 2012).

Οι επιτόπου δοκιμές δίδουν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα διότι λαμβάνουν υπόψη την παρουσία ρωγμών και τη συνεισφορά της παρακείμενης χλωρίδας (όπως για παράδειγμα οι ρίζες των δέντρων), γεγονός που δεν μπορεί να συνυπολογιστεί κατά τη διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών, αφού αυτές πραγματοποιούνται σε δείγματα μικρότερης κλίμακας, τα οποία υποβάλλονται επίσης σε διαταραχές κατά τη δειγματοληψία. Αντίθετα, οι επιτόπου δοκιμές απαιτούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να ολοκληρωθούν και δεν είναι τόσο προηγμένες και τυποποιημένες όπως οι εργαστηριακές δοκιμές.

Οι Benson & Gribb (1997) παρουσιάζουν δεκατέσσερις μεθόδους προσδιορισμού της υδραυλικής διαπερατότητας των ακόρεστων εδαφών (δέκα εργαστηριακές μεθόδους και τέσσερις μετρήσεις πεδίου). Από αυτές, συστήνουν τη χρήση της παραδοσιακής μεθόδου υπό σταθερές χρονικά συνθήκες μύζησης (steady state method), αλλά και τη μέθοδο της χρονικά σημειακής κατανομής (instantaneous profile method) και τη μέθοδο των πολλαπλών σταδίων εκροής (multi-step outflow method) όσον αφορά τη μέτρηση διαπερατότητας στο εργαστήριο. Για τις μετρήσεις της διαπερατότητας στο πεδίο, η μέθοδος διηθητόμετρου τάσης (ή διαπερατόμετρο δίσκου) (tension infiltrometer or disc permeameter) προτείνεται για επιφανειακά εδάφη με σχετικά χαμηλές τιμές μύζησης, και

για χονδρόκοκκα εδάφη ή εδάφη με μεγαλύτερες τιμές μύζησης προτείνεται η μέθοδος της χρονικά σημειακής κατανομής (instantaneous profile method).

Οι McCartney et al. (2007) χρησιμοποίησαν δεδομένα σταθερής και παροδικής διήθησης που συμπλήρωναν το ένα το άλλο, έτσι ώστε να οριστεί ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας μιας αργίλου χαμηλής πλαστικότητας, χρησιμοποιώντας το μοντέλο van Genuchten, σε ένα ευρύ φάσμα τιμών περιεχόμενης υγρασίας. Οι Messing & Jarvis (1990) πραγματοποίησαν δοκιμές πεδίου, εφαρμόζοντας τη μέθοδο inverse auger hole, για δύο διαφορετικά εδάφη κατά την περίοδο άνοιξη-φθινόπωρο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας στη φάση του κορεσμού δεν ήταν σταθερός, αλλά διέφερε ανάλογα με το αρχικό ποσοστό υγρασίας και τη δομή του εδάφους κατά τη στιγμή λήψης των μετρήσεων. Στη συνέχεια πραγματοποίησαν σύγκριση μεταξύ εργαστηριακών αποτελεσμάτων και δοκιμών πεδίου. Οι δύο δοκιμές έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα για 0.3m βάθος, ενώ στα 0.5m και 0.8m βάθος παρατηρήθηκε αισθητή διαφορά με τα εργαστηριακά αποτελέσματα να δίνουν δύο με τέσσερις φορές μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην παρουσία μακροπόρων, οι οποίοι αφθονούν στην κάθετη διεύθυνση στα 0.5m και 0.8m και πιθανώς είναι υδραυλικά παθητικοί (hydraulic passive), ειδικά μετά τη διαβροχή του εδάφους, οπότε μπορεί να αποτελούν αδιέξοδο στη ροή του νερού. Αντίθετα, στις εργαστηριακές δοκιμές αυτοί οι πόροι ευνοούν περισσότερο τη ροή του νερού, αφού διατρέχουν τα δοκίμια σε όλο το ύψος τους. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στα επιφανειακά στρώματα, αφού η εμφάνιση μακροπόρων εκεί είναι περιορισμένη, και ως εκ τούτου υπάρχει συμφωνία μεταξύ εργαστηριακών τιμών και τιμών πεδίου.

Οι Benson et al. (1992) πραγματοποίησαν δοκιμές στο εργαστήριο και επιτόπου. Η υδραυλική διαπερατότητα στο πεδίο μετρήθηκε με τη μέθοδο σφραγισμένου διηθητόμετρου διπλού δακτυλίου (sealed double-ring infiltrometers-SRDIs) και τη μέθοδο διαπερατομέτρου εισόδου αέρα (air-entry permeameters-AEPs), ενώ στο εργαστήριο οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μικρά δείγματα που λήφθηκαν από σωλήνες Shelby και σε μεγαλύτερα δείγματα μπλοκ. Τα μεγάλα δοκίμια μπλοκ έδειξαν ότι η διαπερατότητά τους είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτή που μετρήθηκε με τη μέθοδο SRDI και AEP, όταν η μύζηση ήταν μηδενική στο μέτωπο διαβροχής, ενώ αντίθετα, όταν η πίεση μύζησης υπολογίστηκε με βάση την πίεση εισόδου αέρα (air-entry pressure), οι τιμές διαπερατότητας ήταν χαμηλότερες. Γενικότερα, η υδραυλική διαπερατότητα των δοκιμών που λήφθηκαν από τους σωλήνες Shelby ήταν περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από

τη διαπερατότητα των μπλοκ και τη διαπερατότητα που μετρήθηκε επιτόπου με τη μέθοδο SDRI.

3.4 Κατασκευαστικές Πρακτικές και Σχεδιασμός Θεμελιώσεων σε Διογκώσιμα Εδάφη

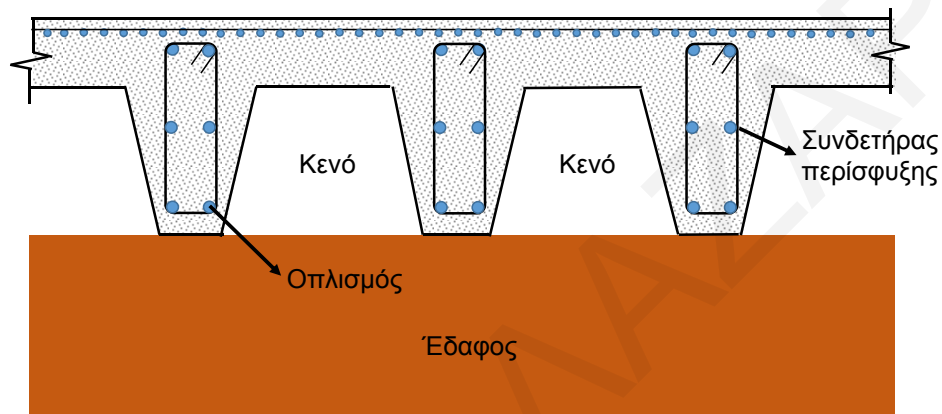
3.4.1 Εισαγωγή

Παρόλο που αποτελεί ένα παλαιό και σύνθητες πρόβλημα της γεωτεχνικής μηχανικής, ο σχεδιασμός κατασκευών επί διογκώσιμων εδαφών εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε εμπειρικές μεθόδους με τη χρήση ελάχιστης ή καμίας αναλυτικής βάσης στους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν αυτά τα εδάφη και την αλληλεπίδρασή τους με τα στοιχεία θεμελίωσης. Οι υπολογιστικές μέθοδοι που έχουν προταθεί εδώ και δεκαετίες για τη διαστασιολόγηση γενικών κοιτοστρώσεων έχουν βρει ελάχιστη εφαρμογή εκτός των περιοχών στις οποίες αναπτύχθηκαν (π.χ. Τέξας, Αυστραλία). Το γεγονός αυτό οφείλεται στις εγγενείς και ομολογουμένως μεγάλες δυσκολίες ενσωμάτωσης των εννοιών της μηχανικής των μερικώς κορεσμένων εδαφών στην πρακτική του πολιτικού μηχανικού. Έτσι, οι επαγγελματίες μηχανικοί στην Κύπρο αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της διόγκωσης των εδαφών χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τη δική τους εμπειρία σε επίπεδο σχεδιαστικής διαμόρφωσης της θεμελίωσης και στρατηγικών κατασκευής (πάχος κοιτόστρωσης ή διάμετρος και πλήθος πασσάλων), χωρίς να βασίζονται σε υπολογιστικές μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη τις εντάσεις που προκαλούνται στη θεμελίωση εξαιτίας της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους.

3.4.2 Αβαθείς θεμελιώσεις

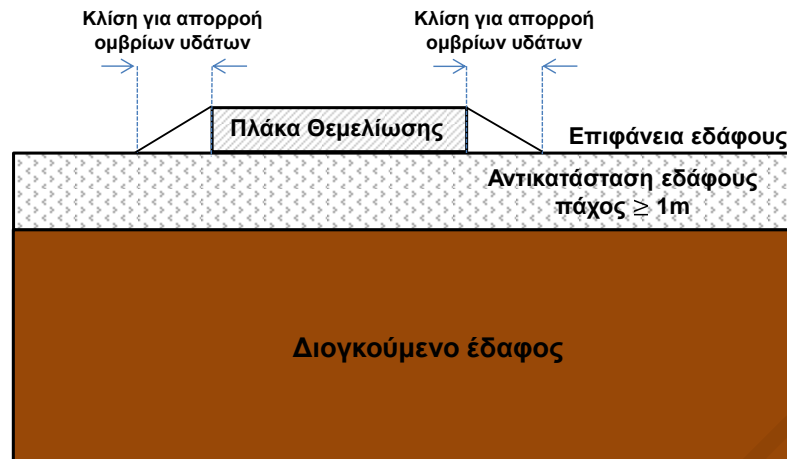
Είναι ευρέως γνωστό σήμερα ότι η κατασκευή μεμονωμένων πεδίων είναι μια πολύ κακή πρακτική (Bowles 1996, Abduljawad et al. 1998, Coduto 2015) εξαιτίας της απουσίας της συνέχειας που απαιτείται για την ανακατανομή των διαφορικών μετατοπίσεων και πιέσεων. Ως εκ τούτου, προτιμάται η κατασκευή αβαθούς πλάκας θεμελίωσης, η οποία οφείλει να είναι δύσκαμπτη και ανθεκτική για να μπορεί να αναλαμβάνει τις επιπρόσθετες καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους. Για να επιτευχθεί αυτό, υπάρχει η λύση να εφαρμοστεί προένταση στην πλάκα θεμελίωσης, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την αντοχή της έναντι μεγάλων καμπτικών ροπών. Αυτή η μέθοδος αποτελεί συνήθη πρακτική σε

αρκετές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Μια εναλλακτική και αρκετά διαδεδομένη πρακτική είναι η διαμόρφωση πλάκας τύπου “βάφλας” (Σχήμα 3.8), αφήνοντας κατασκευαστικά κενά με τις δοκούς στραμμένες προς τα κάτω. Τα καλούπια που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κενών είναι φτιαγμένα από χαρτόνι ή πολυστερίνη, τα οποία διασπώνται με την πάροδο του χρόνου, ή από πλαστικό. Αυτή η κατασκευαστική προσέγγιση θεωρείται πολλά υποσχόμενη λόγω των μεγάλων κενών που αφήνονται ανάμεσα στις δοκούς, επιτρέποντας έτσι στο έδαφος να εκτονώνει τις διογκώσεις του χωρίς να ασκεί επιπλέον πιέσεις στην πλάκα θεμελίωσης.



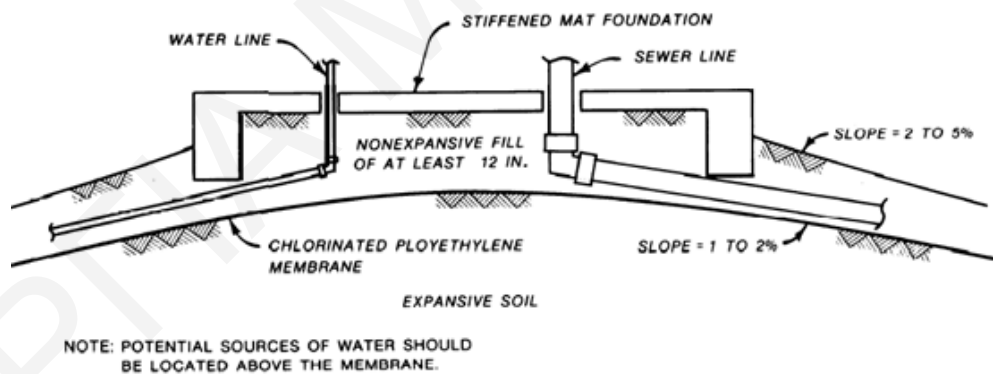
Σχήμα 3.8: Ενδεικτική τομή πλάκας θεμελίωσης τύπου “βάφλας”.

Μια επιλογή για να γίνει ανακατανομή των πιέσεων που προκαλούνται λόγω των μεταβολών υγρασίας στο έδαφος θεμελίωσης, είναι η αντικατάσταση του φυσικού διογκώσιμου εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό σε βάθος 1m ή και περισσότερο, από την πλάκα θεμελίωσης (Σχήμα 3.9). Η επιφάνεια εκσκαφής του φυσικού εδάφους μπορεί να καλυφθεί με μια αδιαπέρατη μεμβράνη (π.χ. χλωριούχο πολυβινύλιο-PVC, πολυαιθυλένιο, φύλλα ασφαλτικού υαλοβάμβακα, πίσσα η οποία ψεκάζεται στην επιφάνεια της εκσκαφής) με σκοπό να αποφευχθεί η διήθηση υγρασίας στο φυσικό έδαφος διαμέσου του χονδρόκοκκου εδάφους. Η μεμβράνη αποτελεί μέρος του αδιαπέρατου φράγματος που τοποθετείται γύρω από τα κτίρια έτσι ώστε να αποτραπεί η εισχώρηση των ομβρίων υδάτων στο έδαφος της θεμελίωσης. Αυτό γίνεται σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση ενός πρανού που διευκολύνει την απορροή του νερού μακριά από την περίμετρο του κτιρίου για να γίνει συλλογή του σε διάτρητους σωλήνες και τάφρους αποστράγγισης (US Department of the Army 1983, Dohwian 1990a, Zumrawi 2015). Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής μεμβράνης φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.9: Αντικατάσταση διογκώσιμου φυσικού εδάφους σε βάθος τουλάχιστον 1m.

Η μέθοδος τοποθέτησης αδιαπέρατης μεμβράνης κάτω και γύρω από τη θεμελίωση συνδυάζεται σε αρκετές περιπτώσεις με την τεχνική της προδιαβροχής, η οποία συνίσταται στη διαβροχή του εδάφους μέχρι τον πλήρη κορεσμό του προτού κατασκευαστεί η θεμελίωση. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, πιστεύεται ότι το αδιαπέρατο φράγμα θα εμποδίσει την απώλεια του μεγάλου ποσοστού υγρασίας που προκαλείται στη φάση της προδιαβροχής και συνεπώς το δυναμικό της ογκομετρικής μεταβολής του εδάφους θα είναι ελάχιστο.



Σχήμα 3.10: Εφαρμογή αδιαπέρατης μεμβράνης και διαμόρφωση πρανών για την απορροή των ομβρίων υδάτων (από US Department of the Army, 1983).

Παρ' όλα αυτά η συγκεκριμένη τεχνική εμπεριέχει πολλές ασάφειες και προβλήματα. Για παράδειγμα, ο χρόνος που απαιτείται για την προδιαβροχή του εδάφους μέχρι να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης κορεσμός σε ικανοποιητικό βάθος μπορεί να είναι της τάξεως των πολλών εβδομάδων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο πιο πλαστικό και αργιλικό (και άρα διογκώσιμο) είναι ένα έδαφος τόσο μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα αναμένεται να έχει. Οι αβεβαιότητες έχουν να κάνουν τόσο με το βάθος διείσδυσης του

μετώπου πλήρους κορεσμού όσο και με τη μακροπρόθεσμη διάχυση υγρασίας στην κάθετη και οριζόντια διεύθυνση με αποτέλεσμα τη σταδιακή απώλεια του πλήρους κορεσμού.

Στα πλαίσια των πρακτικών βελτίωσης του εδάφους, έχει προταθεί να αφαιρείται το έδαφος θεμελίωσης μέχρι ένα βάθος, να του γίνεται επεξεργασία με πρόσμικτα και να επανασυμπυκνώνεται στην αρχική του θέση με νέα πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας. Το επεξεργαζόμενο έδαφος είναι ένα μείγμα ασβέστη ή τσιμέντου, έτσι ώστε να μειωθεί η πλαστικότητα και η διογκωσιμότητα του αρχικού εδάφους, ή ακόμη και ασφάλτου ή λαδιού, για να σταθεροποιηθεί το έδαφος επιβραδύνοντας την απορρόφηση υγρασίας (Byer 1980, Charlie et al. 1984, Marei et al. 2000; Petry & Little 2002, Chen 2004). Άλλες πιο σύγχρονες πρακτικές παρέμβασης στο διογκώσιμο έδαφος, οι οποίες εμπίπτουν στην κατηγορία της βαθιάς εδαφικής ανάμειξης (deep soil mixing), είναι η μέθοδος ιπτάμενης τέφρας ή τέφρας πυθμένα (fly or bottom ash) με συνθετικές ίνες (Pupalla et al., 2006), διογκούμενης πολυουρεθάνης (Buzzi et al., 2010), στήλης ασβέστη (Broms, 1991) και η μέθοδος στήλης ασβέστη-τσιμέντου (Madhyannapu et al., 2009). Σύμφωνα με τον Coduto (2015), η επεξεργασία του εδάφους με ασβέστη χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή δρόμων και άλλων έργων τα οποία δεν απαιτούν την κατασκευή θεμελιώσεων (π.χ αεροδιάδρομοι, σιδηρόδρομοι, κ.α.). Οι παραπάνω μέθοδοι, παρόλο το ότι είναι ευοίωνες, βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως.

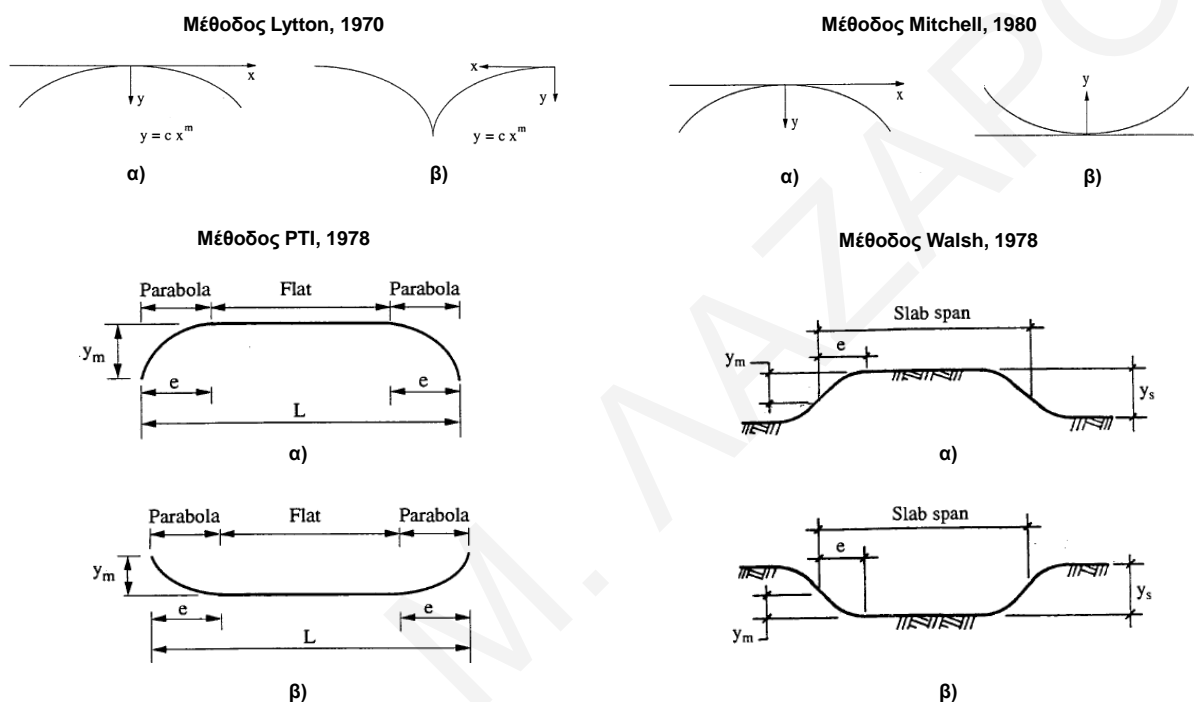
3.4.3 Υπάρχουσες μέθοδοι για τον υπολογισμό θεμελιώσεων σε διογκώσιμα εδάφη

Η διαστασιολόγηση του οπλισμού των γενικών κοιτοστρώσεων που κατασκευάζονται σε διογκώσιμα εδάφη στην Κύπρο γίνεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους και οι επιπλέον δυνάμεις και ροπές που προκαλούνται εντός της πλάκας θεμελίωσης. Δηλαδή, οι στατικοί υπολογισμοί της κοιτόστρωσης γίνονται σε ένα κοινό πρόγραμμα στατικής ανάλυσης θεωρώντας το κλασσικό μοντέλο εδαφικού ελατηρίου Winkler. Ωστόσο, στο παρελθόν (δεκαετίες '70 και '80) έχει προταθεί ένας αριθμός διαφορετικών αναλυτικών μεθόδων για τον υπολογισμό θεμελιώσεων σε διογκώσιμα εδάφη, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Αυστραλία (Lytton 1970, Fraser & Wardle 1975, PTI 1978, Walsh 1978, Mitchell 1980, Wray 1980, 1989, Poulos 1984). Μάλιστα, οι μέθοδοι Walsh (1978) και Mitchell (1980) συγκεκριμένα, ενσωματώθηκαν στο αυστραλιανό πρότυπο (AS2870.2, 1990). Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων είναι ότι βασίζονται στον υπολογισμό των πρόσθετων εντάσεων λόγω εδαφικής διόγκωσης/συρρίκνωσης με το να φορτίζεται η

πλάκα σε ένα υπολογιστικό προσομοίωμα όπου η επιφάνεια έδρασης δεν είναι αρχικά επίπεδη και σε πλήρη επαφή με την πλάκα. Στην περίπτωση που η πλάκα σχεδιάζεται έναντι διόγκωσης του εδάφους στο περιμετρικό της τμήμα (edge heave, π.χ. περίπτωση διείσδυσης νερού της βροχής τον χειμώνα), η πλάκα βρίσκεται αρχικά σε επαφή με το έδαφος μόνο σε μια περιμετρική ζώνη, ενώ στην κεντρική περιοχή υπάρχει διάκενο (gap) μεταξύ πλάκας και εδάφους. Όπως φορτίζεται η πλάκα στο στατικό προσομοίωμα με τα φορτία της ανωδομής και το ίδιο βάρος της, η πλάκα, όντας αστήρικτη αρχικά στο κέντρο και μέχρι να κλείσει το διάκενο, αναπτύσσεται πρόσθετη κάμψη με τα κοίλα προς τα πάνω από ότι αν η πλάκα ήταν αρχικώς σε επαφή σε όλη την κάτοψή της. Αντίθετα, στην περίπτωση που η πλάκα σχεδιάζεται έναντι συρρίκνωσης του εδάφους στην περίμετρο του κτιρίου ή για διόγκωση του εδάφους στην κεντρική περιοχή λόγω ανόδου υγρασίας από ένα ρηχό υδροφόρο ορίζοντα (center heave), η πλάκα θεωρείται αρχικώς σε επαφή με το έδαφος μόνο στο κεντρικό της τμήμα, και το διάκενο τίθεται στην περιμετρική περιοχή. Με αυτό τον τρόπο, με την επιβολή φορτίων στην πλάκα, αυτή κάμπτεται με τα κοίλα προς τα κάτω. Οι μέθοδοι που έχουν προταθεί μέχρι τώρα διαφέρουν κυρίως στην αρχική μορφή της γεωμετρίας της επιφάνειας του εδάφους (Σχήμα 3.11) και στο μέγεθος του διακένου. Επίσης, οι μέθοδοι θεωρούν ότι το μέγεθος του διακένου y_m και το πλάτος της περιμετρικής ζώνης e_m είναι συναρτήσεις των κλιματικών χαρακτηριστικών ή της αναμενόμενης διόγκωσης/συρρίκνωσης στο ελεύθερο πεδίο.

Πιο πρόσφατα, έγιναν μελέτες που στηρίχθηκαν σε συζευγμένες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μηχανικής παραμόρφωσης-ροής από πολλούς ερευνητές, έτσι ώστε να ερευνηθεί τόσο η μετανάστευση υγρασίας κάτω από γενική κοιτόστρωση, όσο και οι επιπτώσεις της διαφορικής διόγκωσης/καθίζησης που προκύπτει. Στις περισσότερες μελέτες, το έδαφος θεωρείται ελαστικό με την πρόσθετη ικανότητα να αναπτύσσει ογκομετρικές παραμορφώσεις μετά από αλλαγές του βαθμού κορεσμού ή της εδαφικής μύζησης (Li et al. 1995, Bulut 2001, Vu & Fredlund 2004, Abdelmalak 2007, Briaud et al. 2016). Εξαιρέσεις αποτελούν οι μελέτες των Jahangir et al. (2012, 2013), στις οποίες οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούν το μοντέλο Βαρκελώνης (Barcelona Expansive Model-BExM). Αυτό είναι ένα προηγμένο ελαστο-πλαστικό καταστατικό μοντέλο για διογκώσιμες αργίλους που αναπτύχθηκε από τους Alonso et al. (1999). Οι Jahangir et al. (2012, 2013) έδειξαν ότι οι προηγμένες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την πλήρη και λεπτομερή μελέτη των προβλημάτων αλληλεπίδρασης θεμελιώσεων-διογκώσιμων εδαφών. Οι Jahangir et al. (2013) πρότειναν επίσης μια λεπτομερή αναλυτική διαδικασία για την εκτίμηση των

παραμορφώσεων μιας επίπεδης πλάκας εξαιτίας της συρρίκνωσης του εδάφους και έδειξαν ότι οι αναλυτικές εκτιμήσεις συμφωνούν με τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, ο Abdelmalak (2007) και οι Briaud et al. (2016) πρότειναν μια απλή υπολογιστική διαδικασία που βασίζεται στη χρήση σχεδιαστικών γραφημάτων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.11: Σχήμα παραμορφωμένου εδάφους όπως προτείνεται από διάφορες μεθόδους διαστασιολόγησης γενικής κοιτόστρωσης: α) περίπτωση center heave β) περίπτωση edge heave (από Li, 1996).

Η πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη από τους Fardipour et al. (2016), διερεύνησε την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής για πλάκα θεμελίωσης τύπου «βάφλας» που στηρίζει κατοικίες, οι οποίες εδράζονται σε διογκώσιμα εδάφη, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους των Walsh (1978) και Mitchell (1980). Οι Fardipour et al. (2016) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η θεώρηση ενός προκαθορισμένου κρίσιμου σεναρίου ανάλυσης και η παράλειψη του ιστορικού φόρτισης δεν αποτελούν απαραίτητα μια συντηρητική προσέγγιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΑ ΕΔΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο δίδεται το γεωλογικό πλαίσιο που αφορά στα διογκώσιμα εδάφη της Κύπρου. Διογκώσιμα εδάφη απαντώνται σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων υπό δυο διακριτές μορφές: μπεντονιτικές άργιλοι και μάργες. Με τον όρο αυτόχθονα ιζηματογενή χαρακτηρίζονται τα πετρώματα που έχουν μετακινηθεί ελάχιστα έως καθόλου από την αρχική θέση εναπόθεσης των ιζημάτων.

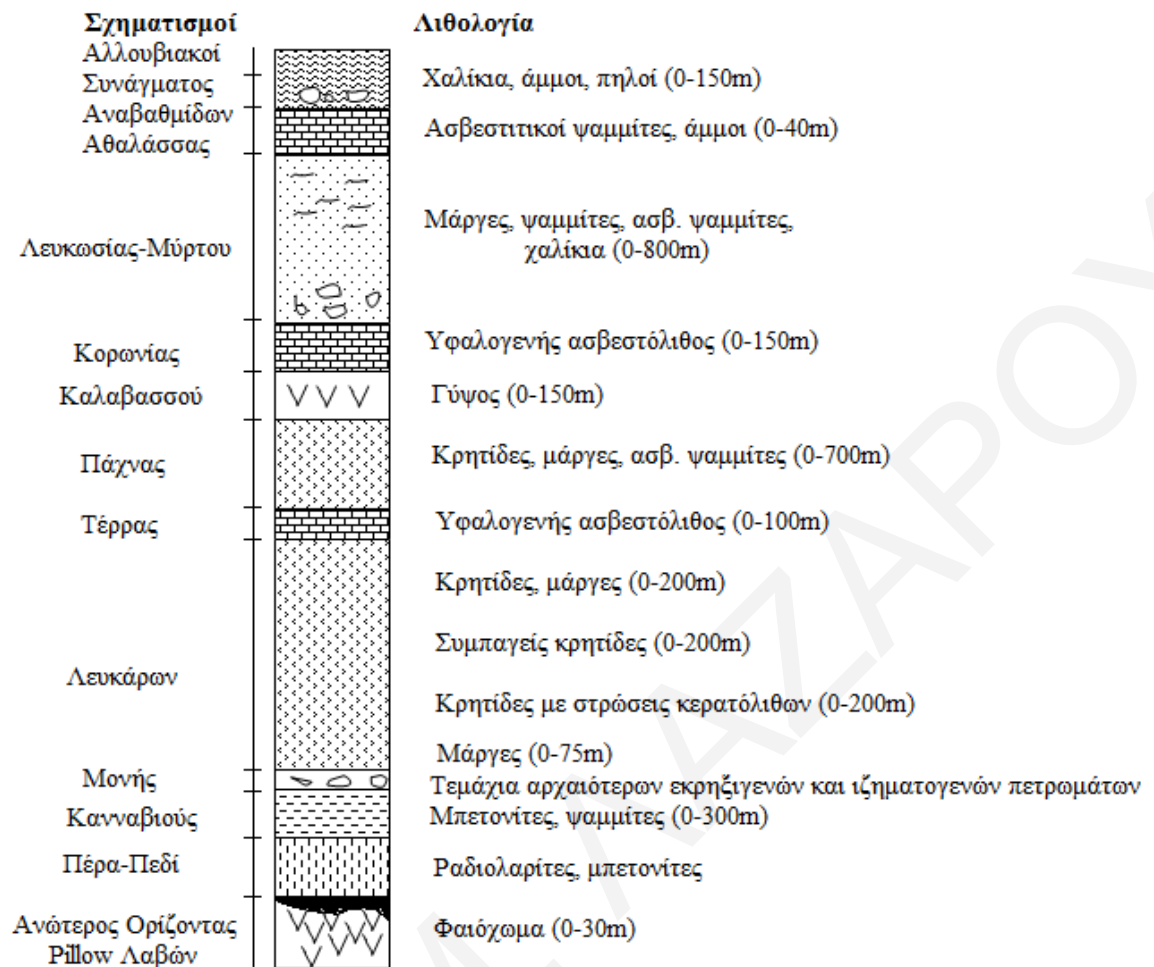
4.1 Ακολουθία Αυτόχθονων Ιζηματογενών Πετρωμάτων

Με το τέλος του μέσου Μαιστρίχιου (περίπου 70 εκατομμύρια χρόνια πριν) έπαψε η ηφαισιότητα που έδωσε τα πυριγενή του Τροόδους και στην περιοχή της Κύπρου επικράτησαν συνθήκες τεκτονικής ηρεμίας. Έτσι, άρχισε η απόθεση αυτόχθονων ιζημάτων (Σχήμα 4.1) που κάλυψαν τα πυριγενή (οφιολιθικά) πετρώματα του Τροόδους, αλλά και τα αλλόχθονα εναποτεθειμένα από το νότο πετρώματα (σύμπλεγμα Μαμωνιών). Η ζώνη των αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων αποτελεί μια εκ των τεσσάρων γεωλογικών ζωνών της Κύπρου¹. Τα πετρώματα που ανήκουν στην κατηγορία αυτή έχουν ηλικία από το Ανώτερο Κρητιδικό (περίπου 76 εκατομμύρια χρόνια) μέχρι και το Πλειστόκαινο (περίπου 2 εκατομμύρια χρόνια) και έχουν τις κύριες επιφανειακές τους εμφανίσεις στην κοιλάδα της Μεσαορίας και στο νότιο τμήμα της Κύπρου. Η ιζηματογένεση ξεκίνησε με την απόθεση του Σχηματισμού Κανναβιού, ο οποίος αποτελείται από μια ακολουθία μπεντονιτικών αργίλων με ενστρώσεις ηφαιστειοκλαστικών ιλυολίθων, ραδιολαριτών και μαγγανιούχων πηλίων. Στο ανώτερο τμήμα του Σχηματισμού Κανναβιού βρίσκονται ανοικτόχρωμοι ηφαιστειοκλαστικοί ψαμμίτες οι οποίοι είναι εναποτεθειμένοι σε παχιές στρώσεις. Ο σχηματισμός εκτιμάται ηλικίας 75 - 70 εκατομμυρίων χρόνων. Το πάχος του σχηματισμού φτάνει μέχρι και τα 300m.

¹ Οι τέσσερις γεωλογικές ζώνες της Κύπρου είναι: (α) η Ζώνη Πενταδακτύλου ή Κερύνειας, (β) η Ζώνη ή ο Οφιόλιθος Τροόδους, (γ) η Ζώνη ή το Σύμπλεγμα Μαμωνιών, και (δ) η Ζώνη των Αυτόχθονων Ιζηματογενών Πετρωμάτων.

Η δημιουργία των μπεντονιτικών αργίλων οφείλεται στις σημαντικές ποσότητες μοντμοριλλονίτη που παρήχθησαν από την υποθαλάσσια διάβρωση των βασαλτικών πετρωμάτων του οφιολίθου του Τροόδους, λόγω της υδροθερμικής δραστηριότητας που συνέχισε να υπάρχει έως και μερικά εκατομμύρια χρόνια από την παύση της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Οι μπεντονιτικές άργιλοι έχουν περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη που υπερβαίνει το 40%, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά διογκώσιμα υλικά. Επιφανειακά εμφανίζονται στους πρόποδες του Τροόδους, σε πολλά σημεία καθ' όλη την έκταση της επαρχίας Πάφου, στην περιοχή μεταξύ Λεμεσού και Λάρνακας, και στην περιοχή της ελεύθερης Αμμοχώστου. Υπάρχουν μάλιστα και ορυχεία στα οποία εξορύσσεται προς βιομηχανική εκμετάλλευση και εξαγωγές. Οι μπεντονιτικές άργιλοι, που εμφανίζονται ιδιαίτερα στις νοτιοδυτικές περιοχές του νησιού, είναι έντονα διαταραγμένες και τεκτονισμένες. Στην πεδιάδα της Μεσαορίας τα πετρώματα του Σχηματισμού Κανναβιού καλύπτονται από νεότερα ιζήματα.

Στη συνέχεια ακολούθησε η απόθεση των Σχηματισμών Μονής και Κάθηκα, γνωστά και ως *mélange*. *Mélange* ονομάζονται τα πετρώματα που αποτελούνται από συνονθύλευμα τεμαχίων διαφόρων μεγεθών που περιβάλλονται από ένα ιστό μπεντονιτικής αργίλου. Το *mélange* προέκυψε από την ανάμειξη των μπεντονιτικών αργίλων με τεμάχια αλλόχθονων πετρωμάτων λόγω έντονων οριζοντίων τεκτονικών κινήσεων. Ακολούθησε η ανθρακική ιζηματογένεση που ξεκίνησε κατά το Παλαιόκαινο (περίπου 65 εκατομμύρια χρόνια πριν) με την απόθεση του Σχηματισμού Λευκάρων. Ο σχηματισμός περιλαμβάνει πελαγικές μάργες και άσπρες κρητίδες, με παρουσία ή μη κερατόλιθων, το πάχος των οποίων εκτείνεται σε εκατοντάδες μέτρα. Η κλασική ανάπτυξη του Σχηματισμού χωρίζεται σε τέσσερα στρωματογραφικά μέλη (Gass, 1960): i) τις Κατώτερες Μάργες, ii) τις Κρητίδες και τους Κερατόλιθους, iii) τις Κρητίδες και iv) τις Ανώτερες Μάργες. Σε διάφορες περιπτώσεις, μέλη του Σχηματισμού Λευκάρων απουσιάζουν, είτε λόγω τεκτονικής μετακίνησης ή λόγω του ότι δεν εναποτέθηκαν ποτέ. Οι μάργες του Σχηματισμού Λευκάρων εμφανίζουν μη αμελητέα διογκωσιμότητα, ιδιαίτερα στην περίπτωση των κατώτερων μαργών, οι οποίες είναι λιγότερο ασβεστιτικές και αποτελούν ζώνη μετάβασης από τις μπεντονιτικές αργίλους του Σχηματισμού Κανναβιού στις κρητίδες του Σχηματισμού Λευκάρων.



Σχήμα 4.1: Στρωματογραφική στήλη των αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων στην Κύπρο (Constantinou et al., 2002α).

Κατά το Μειόκαινο (περίπου 22 έως 5.5 εκατομμύρια χρόνια πριν), εναποτέθηκαν τα πελαγικά και ημιπελαγικά ασβεστούχα ιζήματα του Σχηματισμού Πάχνας (κυρίως κιτρινωπές κρητίδες και μάργες) σε μεσαίου βάθους λεκάνες που υπήρχαν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας γύρω από το Τρόδος (Eaton, 1987). Οι μάργες του Σχηματισμού Πάχνας θεωρούνται γενικά μη διογκώσιμες (αν και αυτό το σημείο χρήζει περαιτέρω μελέτης). Κατά τόπους, το βάθος της θάλασσας ήταν αρκετά μικρό, γεγονός που οδήγησε στην τοπική ανάπτυξη υφάλων και κατ' επέκταση στη δημιουργία των υφαλογενών ασβεστολίθων του Σχηματισμού Πάχνας. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του Σχηματισμού Πάχνας είναι επίσης η παρουσία στρωμάτων ασβεσταρενίτη και σε μερικές περιπτώσεις η ανάπτυξη κροκαλοπαγών. Κατά την περίοδο αυτή ξεκίνησε και η σταδιακή ανύψωση της οροσειράς του Τρόδους, γεγονός που υποδηλώνεται από την παρουσία κλαστικών υλικών από τα οφιολιθικά πετρώματα και την έναρξη διάβρωσης. Στους ανώτερους ορίζοντες, τα

κροκαλοπαγή περιέχουν θραύσματα από τα οφιολιθικά πετρώματα του Τροόδους, καθώς και ανθρακικά υλικά ρηχών νερών.

Κατά το Ανώτερο Μειόκαινο (περίπου 6 εκατομμύρια χρόνια πριν), η σχετική κίνηση της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας προκάλεσε το κλείσιμο των στενών του Γιβραλτάρ, με αποτέλεσμα την αποκοπή της θάλασσας της Μεσογείου από τον Ατλαντικό Ωκεανό και την εξάτμιση του νερού της (κρίση αλατότητας). Εκείνη την περίοδο εναποτέθηκαν οι εβαπορίτες του Σχηματισμού Καλαβασού (Pantazis, 1967). Ο Σχηματισμός Καλαβασού αποτελείται από γύψους (εβαπορίτες) και γυψούχες μάργες που εμφανίζονται γύρω από την οροσειρά του Τροόδους σε εκτεταμένες περιοχές, ενώ υπογείως έχουν βρεθεί και αποθέσεις ορυκτού άλατος.

Κατά το Πλειόκαινο (περίπου 5.5 έως 2.5 εκατομμύρια χρόνια πριν) τα στενά του Γιβραλτάρ άνοιξαν και η Μεσόγειος κατακλύσθηκε από τα νερά του Ατλαντικού Ωκεανού με αποτέλεσμα να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος ιζηματογένεσης. Στον νέο αυτό κύκλο, εναποτέθηκε αρχικά ο Σχηματισμός Λευκωσίας. Ο Σχηματισμός Λευκωσίας περιλαμβάνει κυρίως μάργες με παρεμβολές λεπτόκοκκων πετρωμάτων (ιλυόλιθοι) και χονδρόκοκκων ασβεσταρενιτών (Κωνσταντίνου, 2004). Η στρωματογραφική ακολουθία του Σχηματισμού Λευκωσίας υποδηλώνει τη σταδιακή ανύψωση της Κύπρου και την ύπαρξη μιας θαλάσσιας λεκάνης, η οποία καθίσταται όλο και περισσότερο αβαθής. Εκτενείς εμφανίσεις του Σχηματισμού Λευκωσίας παρατηρούνται στην ευρύτερη ομώνυμη περιοχή, στην πεδιάδα της Μεσαορίας, στην περιοχή της ελεύθερης Αμμοχώστου, στο Πισσούρι και σε μεγάλα τμήματα της Επαρχίας Πάφου (Constantinou et al., 2002α). Οι μάργες του Σχηματισμού Λευκωσίας χαρακτηρίζονται από μέτρια έως πολύ διογκώσιμες. Η διογκωσιμότητά τους οφείλεται στη σημαντική περιεκτικότητά τους σε μοντμοριλλονίτη, που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει το 25% (Constantinou et al., 2002β). Η παρουσία μοντμοριλλονίτη στις μάργες του Σχηματισμού Λευκωσίας οφείλεται στην απόθεση στις ρηχές λεκάνες γύρω από το Τρόδος υλικών διάβρωσης των μπεντονιτικών αργίλων που είχαν βγει στην επιφάνεια λόγω της ορογένεσης του Τροόδους. Μεταξύ των διογκώσιμων αργίλων της Κύπρου, οι μάργες του Σχηματισμού Λευκωσίας (αν και όχι τόσο διογκώσιμες όσο οι μπεντονιτικές άργιλοι) έχουν τις εκτενέστερες επιφανειακές εμφανίσεις. Επίσης σημαντικό, είναι ότι οι εμφανίσεις τους απαντώνται σε μεγάλα αστικά κέντρα της Κύπρου, όπως η Λευκωσία, η Λάρνακα και η Πάφος.

Του Σχηματισμού Λευκωσίας υπέρκειται ο Σχηματισμός Αθαλάσσιας (Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο, περίπου 2 εκατομμύρια χρόνια) που παρουσιάζει επίσης εκτενή ανάπτυξη

σε ολόκληρη την πεδιάδα της Μεσαορίας. Ο Σχηματισμός Αθαλάσσας αποτελείται από στρώσεις μεσόκοκκου έως χονδρόκοκκου απολιθοματοφόρου ψαμμίτη (συγκολλημένα θραύσματα θαλάσσιων οστράκων, φυκιού αβαθών θαλασσών-λιθοθάμνιο, κρητίδων και ασβεστόλιθων) στις οποίες παρεμβάλλονται ενδιάμεσες στρώσεις αμμούχων απολιθοματοφόρων μαργών. Λόγω της σημαντικής παρουσίας άμμου, οι μάργες του Σχηματισμού Αθαλάσσας έχουν μικρή διογκωσιμότητα.

Τέλος, νεότεροι σχηματισμού αποτελούν οι αλλουβιακές και κολουβιακές αποθέσεις, καθώς και το Σύναγμα (ή Σχηματισμός Απαλού), ένας Πλειστοκαινικός Σχηματισμός (ηλικίας περίπου 1.5 εκατομμύρια χρόνια) που αποτελείται από ποτάμιες αποθέσεις, προϊόντα διάβρωσης των οφιολιθικών πετρωμάτων του Τροόδους, όπως για παράδειγμα χαλίκια, άμμοι και ιλύες. Τα υλικά αυτά είναι κατά κύριο λόγο χονδρόκοκκα και μικρής πλαστικότητας, και κατά συνέπεια μη διογκώσιμα.

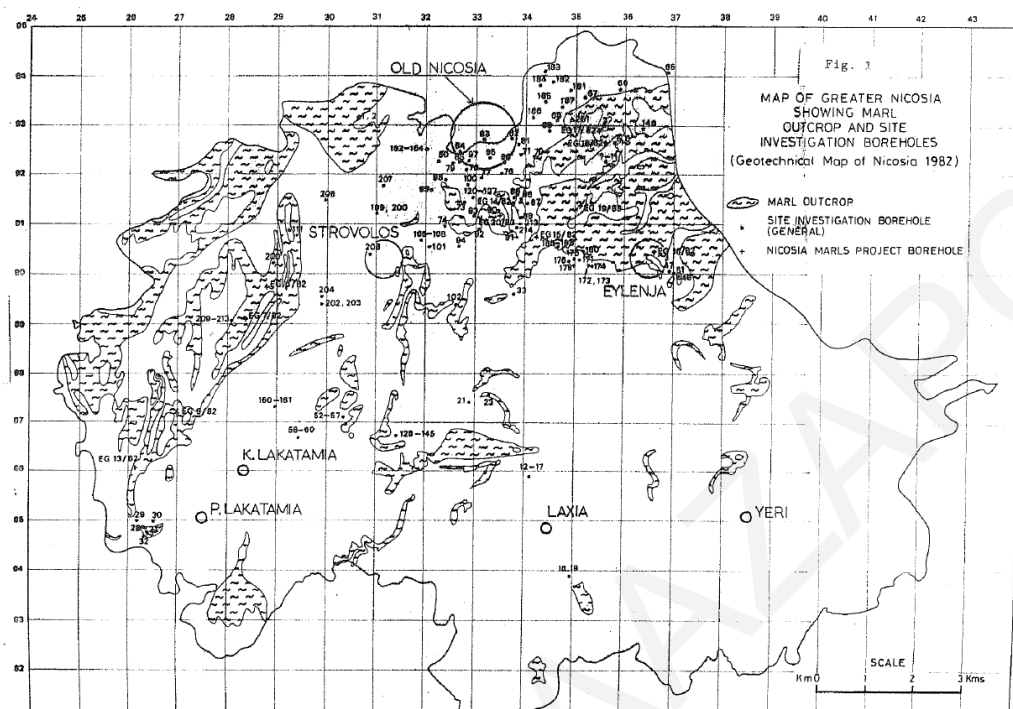
4.2 Γεωλογία της Ευρύτερης Περιοχής της Λευκωσίας

Η Λευκωσία βρίσκεται στην πεδιάδα της Μεσαορίας, η οποία εκτείνεται ανάμεσα στις δύο οροσειρές της Κύπρου, δηλαδή αυτές του Τροόδους και του Πενταδακτύλου. Τα πετρώματα που συναντώνται στη Μεσαορία είναι τα αυτόχθονα ιζηματογενή πετρώματα που εναποτέθηκαν πάνω στις λάβες του Τροόδους, με κύριες επιφανειακές εμφανίσεις αυτές του γεωλογικού Σχηματισμού Λευκωσίας, καθώς και των νεότερων σχηματισμών Αθαλάσσας και Απαλού, οι οποίοι υπέρκεινται του Σχηματισμού Λευκωσίας.

4.2.1 Σχηματισμός Λευκωσίας

Ο Σχηματισμός Λευκωσίας, στον οποίο ανήκουν οι μάργες που είναι το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, έχει εκτεταμένες εμφανίσεις στο νότιο και κεντρικό μέρος της πεδιάδας της Μεσαορίας, καθώς και σε τμήμα της χερσονήσου της Καρπασίας. Κατά συνέπεια, έχει επιφανειακές εμφανίσεις σε περιοχές σημαντικής αστικής ανάπτυξης του νησιού, όπως η πόλη της Λευκωσίας, πρωτεύουσα της Κυπριακής Δημοκρατίας (Σχήμα 4.2). Το συνολικό πάχος του Σχηματισμού ανέρχεται γύρω στα 800m (Ducloz 1965, Hobbs et al. 1986) και αποτελείται από στρώματα απολιθοματοφόρων κιτρινωπών ή γκριζοπράσινων ιλυωδών μαργών και λεπτόκοκκων ασβεσταρενίτων, στα οποία παρεμβάλλονται λεπτά στρώματα καφέ-κίτρινου, πορώδους, χονδρόκοκκου ασβεσταρενίτη. Ο ασβεσταρενίτης, εξαιτίας της εγγύτητας των πηγών και της ευκολίας

λατόμησης/λάξευσής του, χρησιμοποιείται από το παρελθόν έως και σήμερα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικού λίθου (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.2: Χάρτης επιφανειακών εμφανίσεων μάργας του Σχηματισμού Λευκωσίας στην ευρύτερη περιοχή της Λευκωσίας (από Hobbs et al., 1986).



Σχήμα 4.3: Στρώμα ασβεσταρενίτη Σχηματισμού Λευκωσίας (από Constantinou et al., 2002α).

Το κυρίαρχο μέλος του Σχηματισμού είναι η μάργα (Σχήμ 4.4), η οποία είναι ένα συμπαγές και σε ορισμένες περιπτώσεις ελάχιστα στρωματώδες υλικό. Ως μάργα στην

ορολογία της γεωλογίας θεωρείται το μείγμα ασβεστολιθικού και αργιλικού ιζήματος, στο οποίο το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) κυμαίνεται μεταξύ 35% και 65%. Η μάργα του Σχηματισμού Λευκωσίας ενίοτε αποκλίνει από αυτό τον κλασικό ορισμό, εμφανίζοντας ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου μικρότερο από 35% (αργιλόμαργα και αργιλική μάργα) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002). Η μάργα του Σχηματισμού Λευκωσίας έχει υποστεί χαμηλό βαθμό διαγένεσης και είναι ένα ιδιαίτερα σαθρό πέτρωμα μικρής αντοχής. Η αντοχή της σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι μικρότερη από 1MPa, γεγονός που την κατατάσσει περισσότερο στα σκληρά εδάφη (στιφρή υπερστερεοποιημένη άργιλος) παρά στα πετρώματα. Όταν είναι ξηρή και έρθει σε επαφή με νερό έχει την ιδιότητα να αποσυντίθεται με ευκολία σε αυτό. Είναι συχνά απολιθωματοφόρος και σε ορισμένες τοποθεσίες περιέχει καλά διατηρημένα όστρακα θαλάσσιων μικροοργανισμών (π.χ. όστρακα δίθυρων και γαστρόποδων) μέχρι και 10% κατ'όγκο (Palamakumbura & Robertson, 2018). Οι έντονα απολιθωματοφόρες μάργες προέκυψαν από τον θάνατο θαλάσσιων οργανισμών λόγω της μεταβολής των θαλάσσιων συνθηκών και πιθανώς των αλλαγών αλατότητας του νερού κατά το Πλειόκαινο.



Σχήμα 4.4: Κατακόρυφο πρανές μάργας του Σχηματισμού Λευκωσίας.

Σε μερικές θέσεις, είτε στη βάση του Σχηματισμού ή πλησίον αυτής συναντώνται χονδρόκοκκες αποθέσεις όπως για παράδειγμα κροκαλοπαγή και χονδρόκοκκοι

ασβεσταρενίτες, το πάχος των οποίων ενίοτε φθάνει τα 45m-50m. Γενικά εμφανίζονται ως λωρίδες οι οποίες εκτείνονται σε διεύθυνση βορρά-νότου και πιθανώς να σχετίζονται με παλιά δέλτα ποταμών που απέρρεαν από την οροσειρά του Τροόδους στην ίδια περιοχή.

Εκτός από το κροκαλοπαγές βάσης, οι ακολουθίες μαργών και ιλυωδών μαργών διαχωρίζονται από 4 λεπτές παρεμβολές χονδρόκοκκων ιζημάτων. Αυτές οι εναλλαγές δεν θεωρούνται ως μέλος του Σχηματισμού επειδή έχουν τοπική μόνο έκταση. Η κατώτερη συναντάται περίπου στα 220m από τη βάση του Σχηματισμού και αποτελείται από λεπτόκοκκα έως μεσόκοκκα στρώματα παράκτιων αποθέσεων μαργαϊκού γραουβάκη πάχους 6m-15m. Ψηλότερα (περίπου στο μέσο του Σχηματισμού) υπάρχει ένα πιο εκτεταμένο στρώμα με πιο αδρά χαρακτηριστικά από τα προηγούμενα που περιγράφηκαν. Σχηματίστηκε από μαργαϊκούς γραούβακες και σε μερικές θέσεις αποτελείται από ασβεσταρενίτη παρόμοιο με τον τοπικό ασβεσταρενίτη της ευρύτερης περιοχής της Λευκωσίας. Το μέγιστο πάχος αυτού του ορίζοντα που εμφανίζεται νοτιοδυτικά και νότια της πόλης της Λευκωσίας ανέρχεται στα μόλις 10m.

Οι μάργες του Σχηματισμού προέκυψαν από τη διάβρωση μεντονιτικών αργίλων (εξαιρετικά διογκώσιμα εδάφη με ποσοστό μοντμοριλλονίτη > 50%) παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίες εναποτέθηκαν κατά την Ανώτερη Κρητιδική περίοδο ως ιζήματα βαθέων υδάτων, προερχόμενα από την υδροθερμική διάβρωση βασαλτικών πετρωμάτων του ωκεάνιου φλοιού της Τηθύος θάλασσας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ιζημάτων, τα οποία εναποτέθηκαν στις πεδιάδες βόρεια και νότια της οροσειράς του Τροόδους, δημιουργώντας έτσι τον Σχηματισμό Λευκωσίας. Ως εκ τούτου, οι μάργες του Σχηματισμού Λευκωσίας εμφανίζουν υψηλά ποσοστά μοντμοριλλονίτη που δύναται να φτάσουν μέχρι και το 20%-25% (Constantinou et al., 2002β), ενώ η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να χαρακτηριστεί σχετικά μικρή (μεταξύ 30% και 50%).

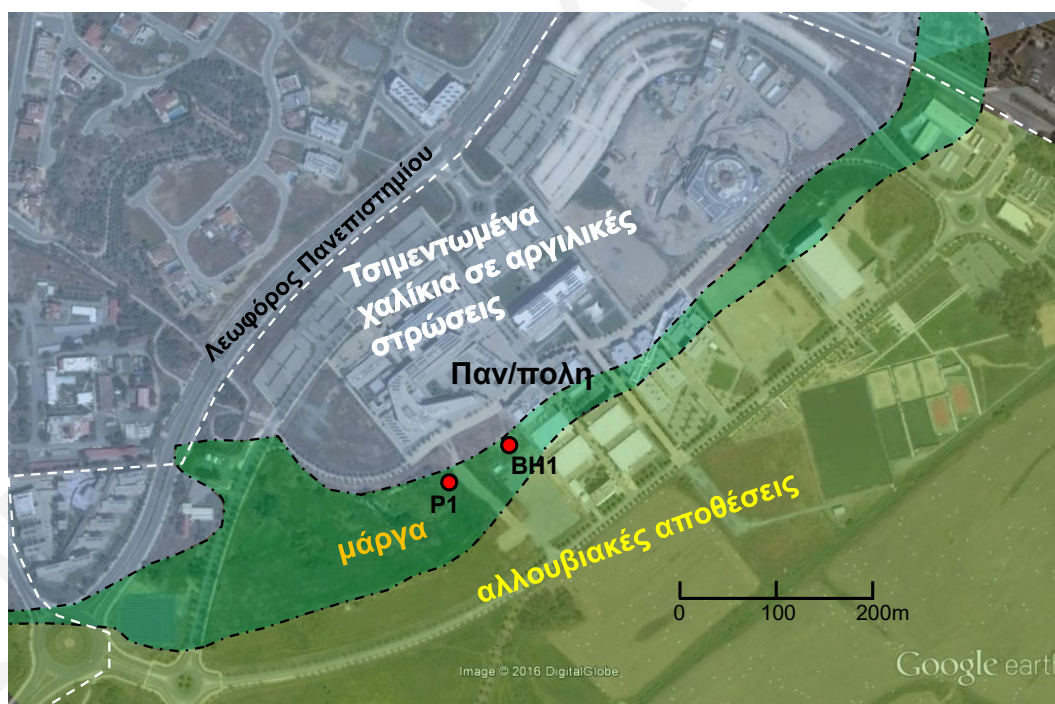
Παρόλο που οι μάργες Λευκωσίας έχουν σαφώς μικρότερη περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη και κατά συνέπεια είναι λιγότερο διογκώσιμες από τις μεντονιτικές αργίλους, η πρακτική σημασία των πρώτων στον κατασκευαστικό τομέα είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο ότι οι επιφανειακές εμφανίσεις των μεντονιτικών αργίλων είναι αρκετά περιορισμένες και συναντώνται σε σχετικά μικρό αριθμό περιοχών κατά μήκος της νότιας ακτής της Κύπρου και στην ορεινή περιοχή της Πάφου. Αντίθετα, τα διογκώσιμα εδάφη του Σχηματισμού Λευκωσίας συναντώνται σε περιοχές σημαντικής αστικής ανάπτυξης, οι οποίες όλο και επεκτείνονται τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της αστικής ανάπτυξης της πόλης της Λευκωσίας. Η παλιά Λευκωσία

έχει χτιστεί πάνω σε υλικά επιχωμάτωσης και αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ τα διάφορα χωριά που την περιστοιχίζουν κάθονταν στο μεγαλύτερο μέρος τους πάνω σε σχηματισμούς νεότερους του Σχηματισμού Λευκωσίας, με υλικά σαφώς μικρότερης διογκωσιμότητας. Η παλιά οικιστική κατανομή πιθανότατα έχει να κάνει με την μακρόχρονη εμπειρία του τοπικού πληθυσμού. Όμως η αστυφιλία των τελευταίων δεκαετιών, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη της στέγασης των προσφύγων της εισβολής του 1974, οδήγησαν στην επέκταση της οικιστικής ανάπτυξης στις ενδιάμεσες περιοχές, δίνοντας έτσι τη σημερινή μορφή του αστικού περιβάλλοντος της Λευκωσίας. Από τον χάρτη του Σχήματος 4.2 φαίνεται ότι πάνω σε μάργα βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των συνοικιών του ανατολικού τμήματος του Δήμου Λευκωσίας, δηλαδή η Παλλουριώτισσα, το Καϊμακλί, ο Λυκαβηττός, καθώς και ο Δήμος Αγλαντζιάς. Το ίδιο συμβαίνει και στο δυτικό τμήμα της περιοχής (π.χ. δυτική Έγκωμη, Αρχάγγελος, Άγιος Δομέτιος), ενώ στο κεντρικό τμήμα (Στρόβολος, Ακρόπολη, Άγιοι Ομολογητές) οι επιφανειακές εμφανίσεις της μάργας είναι τοπικές αλλά σημαντικής έκτασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

5.1 Περιοχή Μελέτης

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, ελήφθησαν δείγματα μάργας Λευκωσίας και έγιναν επιτόπου μετρήσεις εντός μιας περιοχής που βρίσκεται στον χώρο της νέας Πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Κύπρου, στο ανατολικό άκρο της Λευκωσίας, εντός του Δήμου Αγλαντζιάς. Στο Σχήμα 5.1 δίνεται χάρτης με την επιφανειακή γεωλογία της Πανεπιστημιούπολης. Τα εδαφικά δείγματα που εξετάστηκαν λήφθηκαν από μια ερευνητική γεώτρηση (BH1) που πραγματοποιήθηκε τον Μάιο 2015 και ένα σκάμμα (P1) τον Ιούλιο του ίδιου έτους. Και στις δύο τοποθεσίες δειγματοληψίας, η μάργα Λευκωσίας εμφανίζεται επιφανειακά σε μια στενή ζώνη που εκτείνεται σχεδόν παράλληλα με τη Λεωφόρο Πανεπιστημίου (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Χάρτης επιφανειακών εμφανίσεων μάργας Λευκωσίας στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης και θέσεις δειγματοληψίας BH1 και P1.

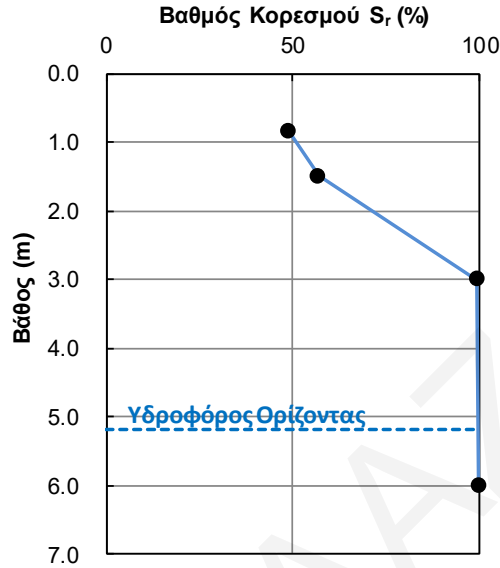
Το σκάμμα (P1) και η γεώτρηση (BH1) απέχουν κατά 70m και βρίσκονται σε υψόμετρο 136.7m και 135.0m αντίστοιχα. Το βόρειο μέρος της Πανεπιστημιούπολης είναι ένα πλατό με το υψόμετρο του εδάφους να βρίσκεται στα 141.0m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σε εκείνο το σημείο η μάργα καλύπτεται από χαλίκια και κροκάλες εντός αργιλικού ιστού. Στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής, η μάργα καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες εναποτέθηκαν πιο πρόσφατα. Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από πιεζόμετρο ανοικτού τύπου που εγκαταστάθηκε στη γεώτρηση BH1 έδειξαν ότι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από τα 5.05m μέχρι τα 5.55m. Οι μικρές αυτές διακυμάνσεις είναι εποχιακές και οφείλονται στην επίδραση των κλιματικών παραγόντων (κυρίως του ύψους βροχόπτωσης στην κεντρική Μεσαορία). Κατά το ακραίο υδρολογικό έτος 2018/19 (κατά τα οποία σημειώθηκε η μεγαλύτερη βροχόπτωση πέραν των τελευταίων 100 χρόνων), η στάθμη ανέβηκε μέχρι τα 4.7m βάθος, δηλαδή μόλις 0.6m από τη μέση στάθμη. Η μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα είναι συμβατή με την ύπαρξη ενός παρακείμενου ρυακιού που βρίσκεται νότια σε απόσταση 300m. Το ρυάκι τροφοδοτείται με νερό από δύο λιμνοδεξαμενές που βρίσκονται 1km (λίμνη Αγίου Γεωργίου) και 2.5km (ταμιευτήρας Αθαλάσσης) δυτικά της περιοχής έρευνας, γεγονός που εξηγεί τη χαμηλή εποχιακή διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή.

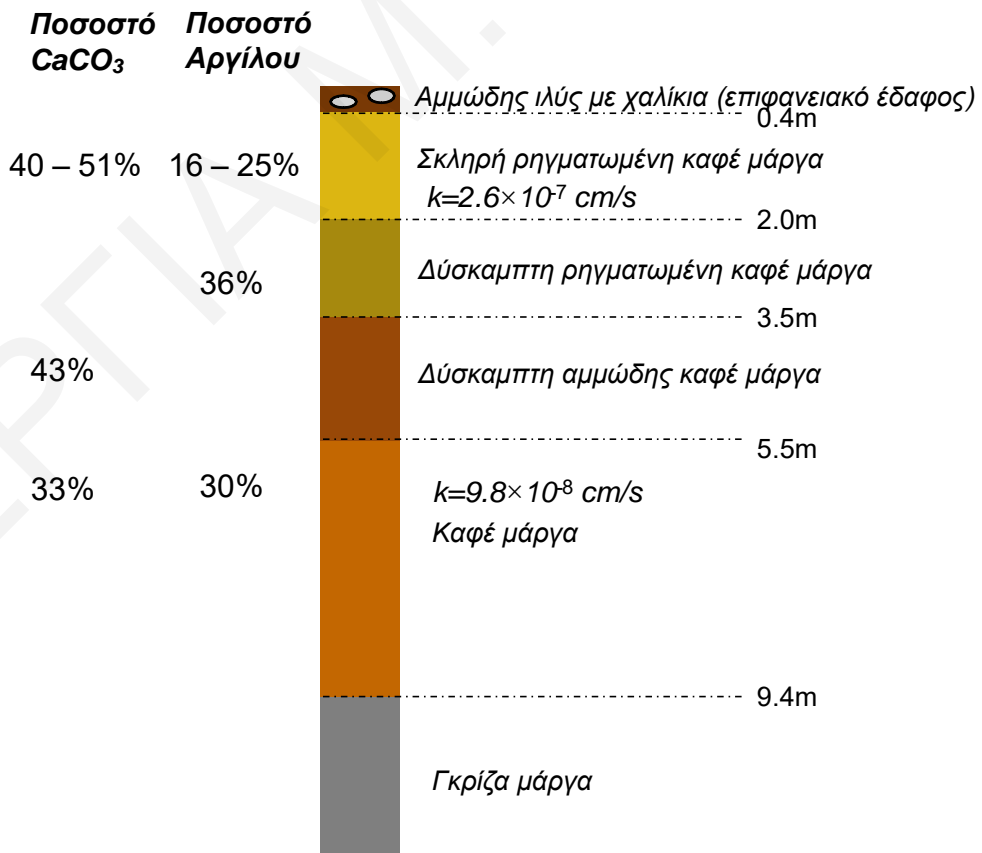
Σύμφωνα με μετρήσεις ποσοστού υγρασίας (w), ειδικής βαρύτητας των κόκκων (G_s) και ειδικού βάρους (γ) που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα U100 που πάρθηκαν από τη γεώτρηση BH1 τον Ιούλιο 2015, η μάργα είναι πλήρως κορεσμένη μέχρι και τα 3m βάθος, δηλαδή 2-2.5m περίπου πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτή η παρατήρηση είναι συμβατή με την αναμενόμενη ζώνη τριχοειδούς αναρρόφησης για ιλυώδεις αργίλους με χαρακτηριστικά μεγέθη κόκκου όπως αυτά της μάργας Λευκωσίας (Barnes, 2010, Κυο, 2014). Πυρηνοληπτικά (tube-sampled) δείγματα μάργας που λήφθηκαν από το σκάμμα έδειξαν ότι σε βάθος εύρους 0.85m-1.5m ο βαθμός κορεσμού κυμαινόταν γύρω στο 50%. Το προφίλ του βαθμού κορεσμού σύμφωνα με τα πιο πάνω φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η στρωματογραφία του εδάφους στην τοποθεσία της γεώτρησης BH1, όπως προκύπτει από τις παρατηρήσεις, τόσο στο σημείο της BH1, όσο και του σκάμματος P1. Η μάργα στην περιοχή της μελέτης αποτελείται κυρίως από άργιλο, ιλύ και ανθρακικό ασβέστιο. Εξαιρουμένης της επιφανειακής στρώσης, το ανώτερο στρώμα εδάφους αποτελείται από την καφέ μάργα, η οποία είναι λιγότερο αργιλώδης και σκληρότερη από τη μάργα που συναντάται σε βάθος πέραν των 5.5m. Το γεγονός ότι η μάργα του ανώτερου ορίζοντα είναι σκληρή οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3), όπως θα επεξηγηθεί εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα,

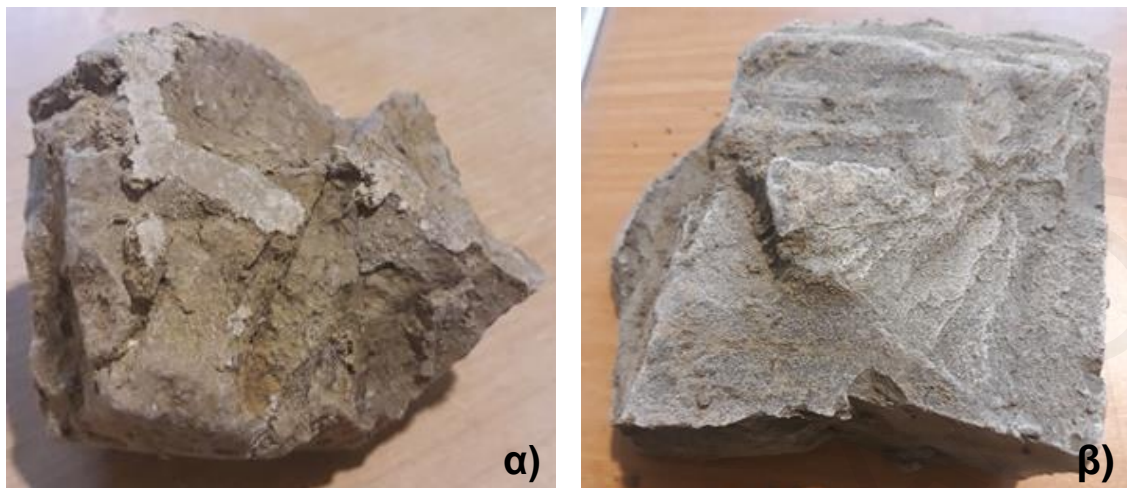
παρά στην υπερστερεοποίηση ή την αποξήρανσή του. Από τα 5.5m βάθος η μάργα γίνεται πιο αργιλώδης και λιγότερο ασβεστιτική, μέχρι να φτάσει το υπόστρωμα της γκρίζας μάργας στα 9.4m. Στην παρούσα έρευνα μελετήθηκε μόνο η καφέ-χακί (Σχήμα 5.4α) μάργα, η οποία είναι αυτή που απαντάται στην ενεργό ζώνη.



Σχήμα 5.2: Προφίλ βαθμού κορεσμού τον Ιούλιο 2015.



Σχήμα 5.3: Στρωματογραφία εδάφους στην περιοχή μελέτης.



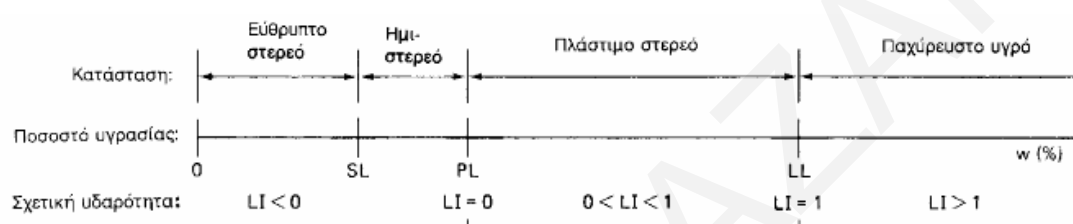
Σχήμα 5.4: Μάργες Σχηματισμού Λευκωσίας α) καφέ-χακί και β) γκρίζα.

5.2 Δειγματοληψίες

Η γεώτρηση BH1 πραγματοποιήθηκε με περιστροφική διάτρηση με στελέχη συνεχούς πτερυγίου (auger-drilled), χωρίς τη χρήση λάσπης ή νερού ώστε να μην επηρεαστεί το φυσικό ποσοστό υγρασίας. Από τη γεώτρηση συλλέχθηκαν δείγματα διαταραγμένα (δειγματολήπτης SPT) και αδιατάρακτα (δειγματολήπτης U100). Το σκάμμα P1 διαστάσεων 1.0m x 2.0m και βάθους 1.5m που δημιουργήθηκε τον Ιούλιο 2015 εξυπηρετούσε δύο βασικούς σκοπούς. Πρώτο τη συλλογή δειγμάτων για τη μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων της μάργας Λευκωσίας και δεύτερο τη διεξαγωγή πειράματος διαβροχής στο πεδίο, με ταυτόχρονη καταγραφή δεδομένων ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και μύζησης εδαφικού ιστού (matric suction) από αντίστοιχους αισθητήρες μέτρησης, οι οποίοι εγκαταστάθηκαν ανά ζεύγη σε δύο διαφορετικές στάθμες, στα 0.75m και 1.5m βάθος. Η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους στη θέση του σκάμματος είναι γενικά επίπεδη με μια ελαφρά κλίση 2° προς τον Νότο. Δείγματα τύπου μπλοκ μεγέθους 0.2m-0.3m λήφθηκαν από τα τοιχώματα και τον πυθμένα του σκάμματος, καθώς και από ένα ενδιάμεσο σημείο (σκαλί) εντός αυτού σε 0.85m βάθος. Τα δείγματα τυλίχθηκαν σε πλαστική μεμβράνη και επικαλύφθηκαν με παραφίνη για τον περιορισμό της απώλειας υγρασίας κατά τη μεταφορά τους στο εργαστήριο. Για την προστασία των δειγμάτων που λήφθηκαν από τη γεώτρηση τοποθετήθηκε παραφίνη στα άκρα των μεταλλικών δειγματοληπτών U100.

5.3 Κατάταξη Υλικού με Βάση τα Όρια Atterberg

Τα όρια Atterberg αναφέρονται σε εδάφη τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των λεπτόκοκκων (π.χ. άργιλοι και ιλύες). Σύμφωνα με το ASTM D2487, ως λεπτόκοκκα εδάφη ορίζονται τα εδάφη των οποίων ποσοστό 50% ή περισσότερο διέρχεται από το κόσκινο No.200 (0.075mm). Τα λεπτόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν ιδιότητες, όπως η πλαστικότητα και η συνοχή, που εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το ποσοστό περιεχόμενης αργίλου, αλλά και από το ποσοστό υγρασίας. Τα όρια Atterberg περιγράφουν τη μετάπτωση του εδάφους από τη στερεή στην ημιστερεή και εν συνεχεία σε πλάστιμη κατάσταση και υγρή κατάσταση (Σχήμα 5.5).



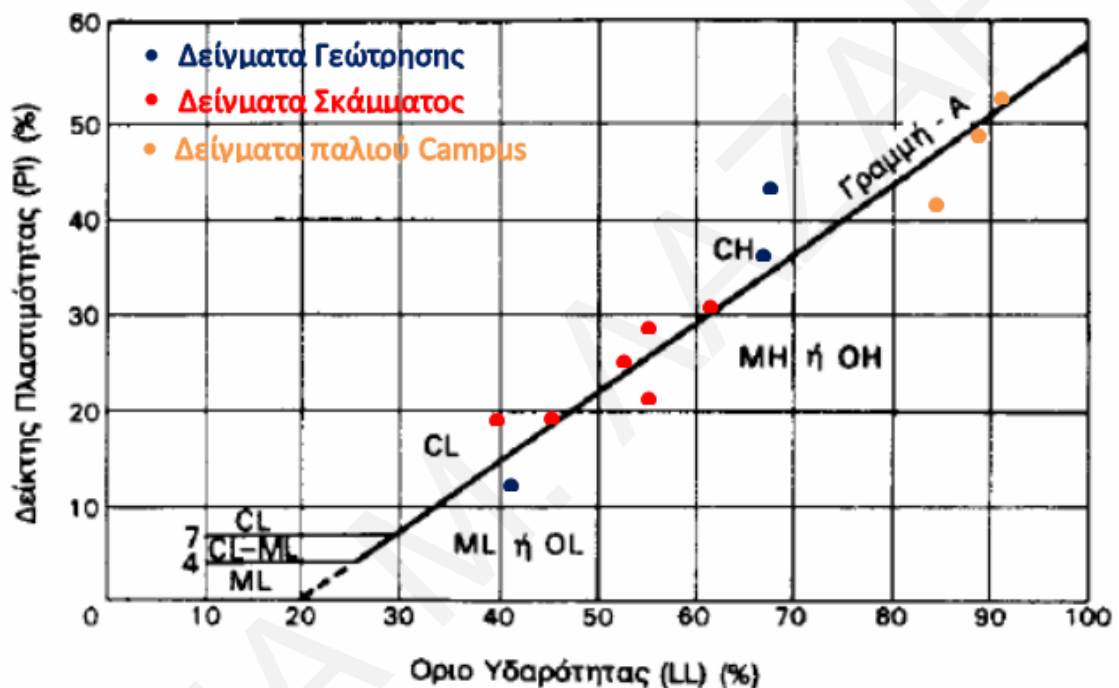
Σχήμα 5.5: Τα στάδια μεταβολής της φυσικής κατάστασης ενός λεπτόκοκκου γεωυλικού καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας (από Καββαδάς, 1996).

Στα όρια μεταξύ των καταστάσεων του Σχήματος 5.5 αντιστοιχούν τα ποσοστά υγρασίας ευρέως γνωστά ως όρια Atterberg: το όριο Συρρίκνωσης (SL ή w_s), το όριο λαστικότητας (PL ή w_p)¹ και το όριο Υδαρότητας (LL ή w_L). Μια σημαντική παράμετρος χαρακτηρισμού των λεπτόκοκκων εδαφών που συνδέεται άμεσα με τα όρια Atterberg είναι ο δείκτης πλαστικότητας (PI), ο οποίος ορίζεται ως η διαφορά του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας ($PI=LL-PL$). Η κατάταξη ενός υλικού όσον αφορά τα όρια Atterberg πραγματοποιείται με τη χρήση του διαγράμματος Casagrande (Σχήμα 5.6). Με βάση αυτή την κατάταξη είναι εφικτό να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα για τη σύσταση ενός αδιατάρακτου πετρώματος, δεδομένου ότι ο μεγάλος δείκτης πλαστικότητας υποδηλώνει μεγάλη περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά. Επιπλέον, μεγάλο PI μπορεί να υποδηλώνει ότι το αργιλικό κλάσμα του πετρώματος έχει μεγάλη ενεργότητα (activity) και ότι απαρτίζεται κυρίως από το ορυκτό μοντμοριλλονίτης.

Σύμφωνα με το Unified Soil Classification System (USCS), ο χαρακτηρισμός για τα δείγματα σκληρής μάργας που λήφθηκαν από το σκάμμα (βάθη 0.85m-1.5m) ποικίλει μεταξύ αργίλου χαμηλής πλαστικότητας (CL) και αργίλου υψηλής πλαστικότητας (CH) (Σχήμα 5.6), με τον δείκτη πλαστικότητας να κυμαίνεται από 19 έως 29, ενώ τα δείγματα

¹ Σε αρκετές βιβλιογραφικές πηγές ο όρος αναφέρεται και ως όριο Πλαστικότητας.

που λήφθηκαν από μεγαλύτερα βάθη (6m από τη ΒΗ1) χαρακτηρίζονται ως άργιλοι υψηλής πλαστικότητας (CH). Για σκοπούς σύγκρισης, δοκιμές ορίων Atterberg πραγματοποιήθηκαν επίσης και για δείγματα τα οποία λήφθηκαν από το παλιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου που βρίσκεται στην περιοχή του Πάρκου Ακαδημίας, με τα έντονα προβλήματα διογκωσιμότητας που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η μάργα του παλιού campus σύμφωνα με διάγραμμα Casagrande χαρακτηρίζεται ως άργιλος ή ιλύς υψηλής πλαστικότητας (CH ή MH), αλλά σε αυτή την περίπτωση οι τιμές PI και LL είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές των δειγμάτων μάργας της νέας Πανεπιστημιούπολης.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande και κατάταξη δειγμάτων μάργας Λευκωσίας.

5.4 Κοκκομετρική Διαβάθμιση

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση μεγέθους κόκκων στα λεπτόκοκκα υλικά είναι η μέθοδος αραιομέτρου (ή ανάλυση καθίζησης - sedimentation analysis), σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά όπου αρκεί η μέθοδος κοσκινίσματος. Σκοπός της κοκκομετρικής διαβάθμισης με τη μέθοδο αραιομέτρου στα διογκώσιμα εδάφη είναι η διάκριση των ποσοτήτων αργίλου και ιλύος που περιέχονται. Στην παρούσα έρευνα ακολουθήθηκε η μέθοδος αραιομέτρου όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D422-63.

Η μέθοδος του αραιομέτρου βασίζεται στην αρχή της διασποράς και καθίζησης των κόκκων σε ένα μέσο διασποράς, το οποίο συνήθως είναι το νερό, με διαφορετικές ταχύτητες που εξαρτώνται κυρίως από το βάρος, το μέγεθος και το σχήμα τους. Η γενική ιδέα είναι ότι οι μικρότεροι κόκκοι χρειάζονται περισσότερο χρόνο ώστε να καθιζάνουν, συγκριτικά με μεγαλύτερους κόκκους, με τη θεώρηση ότι όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια πυκνότητα. Το σωματίδιο επιταχύνεται προς τον βυθό του υγρού μέσου μέχρι οι δυνάμεις μεταφοράς να γίνουν ίσες με τις δυνάμεις βαρύτητας. Όταν οι δυνάμεις αυτές είναι σε ισορροπία, τότε το σωματίδιο αποκτά μια τελική ταχύτητα. Για ένα λείο σωματίδιο, η τελική ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διαφοράς της πυκνότητας ανάμεσα στους κόκκους και στο υγρό, της διαμέτρου των κόκκων και του ιξώδους του ρευστού μέσου. Η ταχύτητα του πύπτοντος σωματιδίου (v) το οποίο βυθίζεται ελεύθερα σε ένα υγρό δίδεται από τον νόμο του Stokes (Εξίσωση 5.1):

$$v = \frac{D^2 g (\rho_s - \rho_L)}{18\eta} \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

όπου D η διάμετρος του σωματιδίου, ρ_s η πυκνότητα των στερεών, ρ_L η πυκνότητα του ρευστού, η το ιξώδες του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η εφαρμογή του νόμου του Stokes βασίζεται στις εξής απλουστευμένες υποθέσεις:

- Διατήρηση της ιξώδους ροής σε ένα υγρό που βρίσκεται σε ηρεμία.
- Δεν υπάρχει διαταραχή του δείγματος, δηλαδή η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι τέτοια ώστε να μην προσκολλάται το ένα σωματίδιο στο άλλο.
- Η θερμοκρασία του υγρού παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.
- Το σχήμα των σωματιδίων είναι σφαιρικό.
- Η ταχύτητα βύθισης των σωματιδίων είναι μικρή.
- Όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια πυκνότητα.
- Στο υγρό διατηρείται μια ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων όλων των μεγεθών.

Αν από την Εξ. 5.1 θεωρηθεί ότι η ταχύτητα είναι η απόσταση (L) που διανύει το σωματίδιο προς τον χρόνο (t) που απαιτείται για να καθιζάνει, δηλαδή ($v=L/t$), και αν αγνοηθούν τυχόν επιδράσεις στην αρχή του πειράματος, τότε προκύπτει η Εξίσωση 5.2 (Head, 2006), από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η διάμετρος των εδαφικών σωματιδίων σε χιλιοστόμετρα (mm):

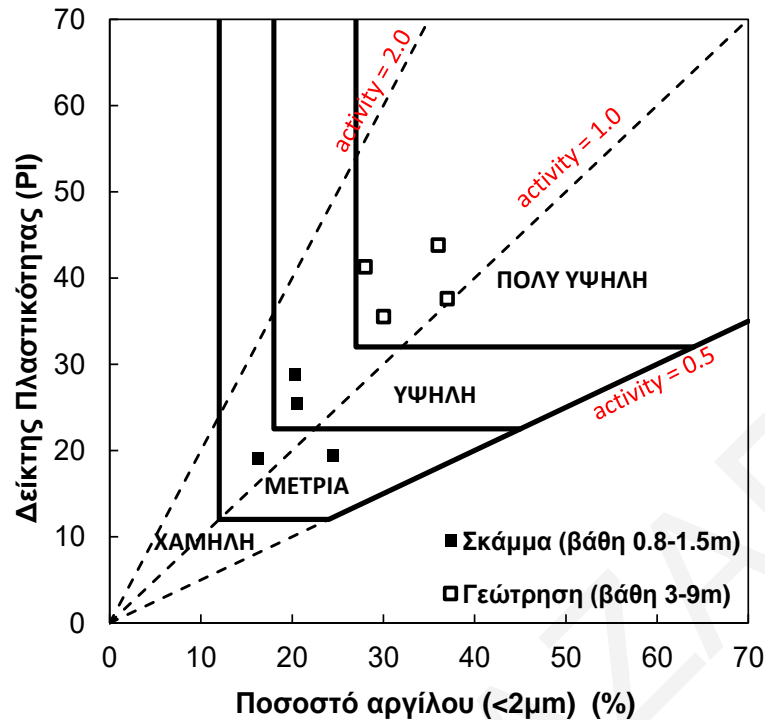
$$D = 0.005531 \sqrt{\frac{\eta H}{t(\rho_s - 1)}} \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των φυσικών ιδιοτήτων τεσσάρων δειγμάτων του ερευνητικού σκάμματος P1 (0.85m-1.5m βάθος) και δύο δειγμάτων της γεώτρησης BH1 από 3m και 6m βάθος.

Πίνακας 5.1: Φυσικά χαρακτηριστικά της μάργας Λευκωσίας και κατάταξη σύμφωνα με το USCS.

Δείγμα	Άργιλος (%)	Ιλύς (%)	LL	PI	G_s	γ_d (kN/m ³)	USCS
P1-1	20	62	54	29	2.69	15.2	CH
P1-2	21	63	52	25	2.68	15.9	CH
P1-3	25	63	45	19	2.66	15.8	CL
P1-4	16	62	39	19	2.72	15.8	CL
P1-5	-	-	61	30	-	-	CH
P1-6	-	-	54	22.9	-	-	MH
BH1 (3m)	36	61	67	44	2.70	16.2	CH
BH1 (4.5m)	-	-	40.5	13.2	-	-	ML
BH1 (6m)	30	60	66	36	2.68	14.5	CH
Παλιό Campus (10m)	-	-	90.5	52.2	-	-	CH
Παλιό Campus (επιφανειακό1)	-	-	89.4	48.2	-	-	MH
Παλιό Campus (επιφανειακό2)	-	-	84.1	41.8	-	-	MH

Με βάση τα αποτελέσματα των ορίων Atterberg και της κοκκομετρικής διαβάθμισης με τη χρήση αραιομέτρου, μπορεί να γίνει μια αρχική εκτίμηση της διογκωσιμότητας της μάργας Λευκωσίας. Συγκεκριμένα, η συσχέτιση της διογκωσιμότητας με τις τιμές δείκτη πλαστικότητας και ποσοστού αργίλου (μέγεθος κόκκων <2 μ m) γίνεται μέσω του επικαλούμενου Νοτιοαφρικανικού διαγράμματος - South African chart - (Van der Merwe, 1975, Williams & Donaldson, 1980) του Σχήματος 5.7. Η διογκωσιμότητα της σκληρής μάργας (δείγματα σκάμματος) κυμαίνεται από μέτρια μέχρι υψηλή, ενώ η υποκείμενη, μαλακότερη μάργα (δείγματα γεώτρησης) εμπίπτει στην κατηγορία εδαφών με πολύ υψηλή διογκωσιμότητα. Σύμφωνα με τους Λουκίδης et al. (2019), η μάργα από το παλιό campus κατατάσσεται στο ίδιο γράφημα αποκλειστικά ως έδαφος πολύ υψηλής διογκωσιμότητας.



Σχήμα 5.7: Διογκωσιμότητα δειγμάτων μάργας Λευκωσίας σύμφωνα με το South African chart.

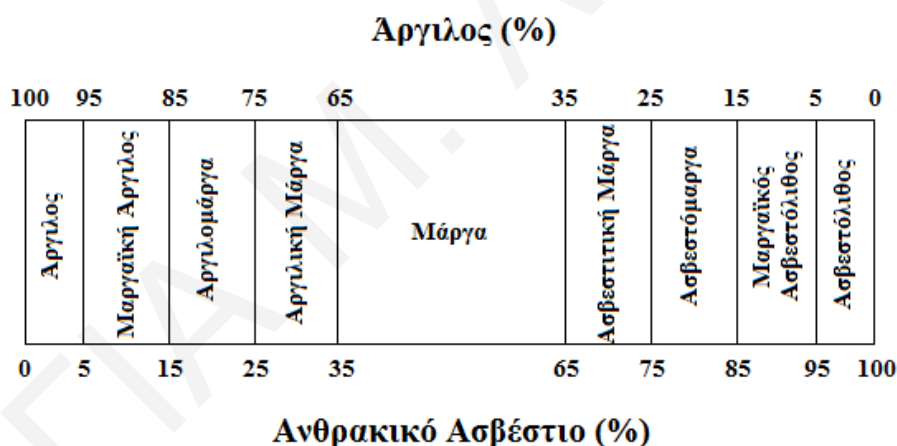
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το ποσοστό αργίλου που προκύπτει από τη δοκιμή αραιομέτρου είναι φαινόμενο ποσοστό και, εξαιτίας της συσσωμάτωσης του ασβεστίτη με τα αργιλικά σωματίδια, δεν αποδίδει το πραγματικό ποσοστό αργιλικών με βάση την ορυκτολογική σύσταση (Anagnostopoulos et al., 1991). Ωστόσο, το φαινόμενο ποσοστό αργιλικών από τη δοκιμή αραιομέτρου είναι αυτό που χρησιμοποιείται παραδοσιακά σε διάφορα δημοφιλή διαγράμματα συσχετισμού και κατατάξεως όπως το Νοτιοαφρικανικό διάγραμμα.

5.5 Προσδιορισμός Περιεκτικότητας σε Ανθρακικά

Ανθρακικά ορυκτά, όπως για παράδειγμα ο ασβεστίτης (CaCO_3), ο μαγνησίτης (MgCO_3) και το ισομοριακό μείγμα των δυο, ο δολομίτης ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), συναντώνται συχνά στα πετρώματα και τα εδάφη (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002). Ο ασβεστίτης (ανθρακικό ασβέστιο) αποτελεί την επικρατούσα μορφή ανθρακικών ορυκτών, διότι είναι το κύριο συστατικό των κελυφών αρκετών θαλάσσιων μικροοργανισμών. Ως εκ τούτου, σε θαλάσσιες αποθέσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της απόθεσης ιζημάτων στην κοιλάδα της Μεσαορία, που είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της μάργας Λευκωσίας, αναμένεται σημαντική συγκέντρωση ανθρακικού ασβεστίου. Άλλωστε, η ονοματολογία ενός αργίλο-ασβεστιτικού πετρώματος δίδεται ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε

ανθρακικό ασβέστιο και αργιλικά (Σχήμα 5.8). Για μια κλασσική μάργα, αναμένεται η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο να είναι μεταξύ 35% και 65%.

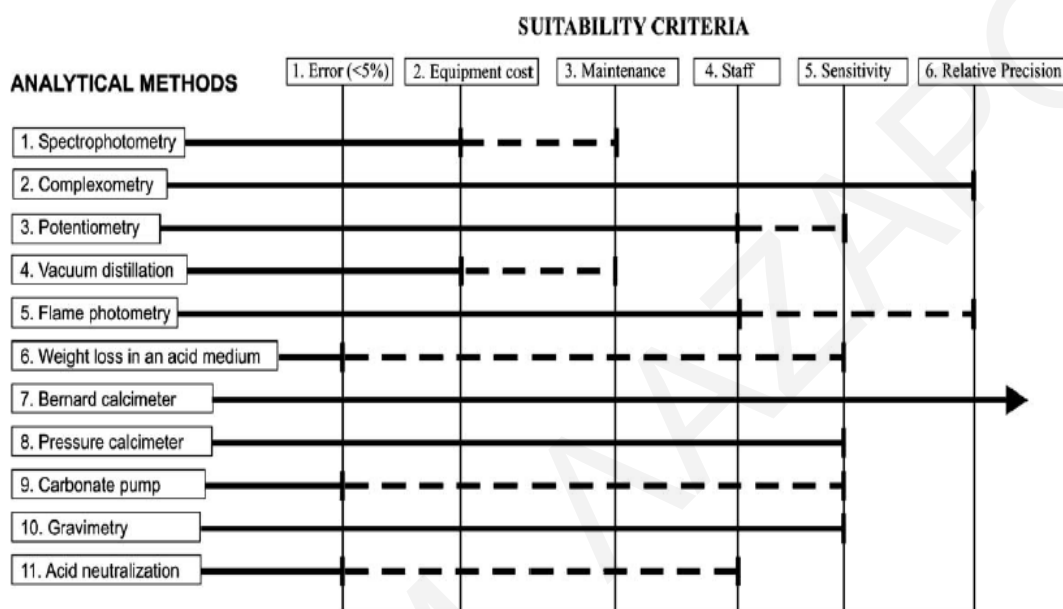
Στα διογκώσιμα εδάφη είναι σημαντικό να προσδιορίζεται το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου που περιέχουν διότι δρα ως ένα βαθμό ως περιοριστικός παράγοντας στον μηχανισμό διόγκωσης χάρη στη φυσική τσιμέντωση που παρέχει. Επίσης, το ανθρακικό ασβέστιο, χάρη στη έστω και μικρή διαλυτότητά του, μπορεί να δράσει ως μια πηγή κατιόντων ασβεστίου, η παρουσία των οποίων τείνει να καταστείλει τον σχηματισμό διάχυτων διπλών στρωμάτων στις επιφάνειες των αργιλικών πλακιδίων (Rimmer & Greenland, 1976). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο μηχανισμός διόγκωσης βασίζεται στην έντονη τάση ορισμένων αργιλικών ορυκτών (όπως για παράδειγμα ο μοντμοριλλονίτης) να απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού στο διπλό στρώμα των αργιλικών σωματιδίων. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό που ελέγχει κατά κύριο λόγο τη διογκωσιμότητα των αργιλικών εδαφών είναι το ποσοστό των διογκώσιμων αργιλικών ορυκτών που περιέχονται και όχι τόσο η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου.



Σχήμα 5.8: Ονοματολογία αργιλοασβεστιτικών υλικών σύμφωνα με το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (από Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

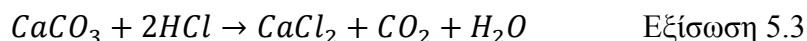
Αρκετές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό περιεκτικότητας ανθρακικών σε πετρώματα, όπως η φλογοφωτομετρία (flame photometry), η μέθοδος Bernard (Bernard calcimeter), η συνθετομέτρηση (complexometry), το ασβεστόμετρο πίεσεως (pressure calcimeter), η μέθοδος της σταθμικής ανάλυσης (gravimetry), κ.α. Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας της μάργας Λευκωσίας σε ανθρακικό ασβέστιο εφαρμόστηκε η μέθοδος Bernard (Bernard calcimeter) (Hulsemann, 1966), διότι σύμφωνα με τους Lamas et al. (2005) είναι η μέθοδος που πλεονεκτεί σε ένα σύνολο κριτηρίων, όπως για παράδειγμα η ακρίβεια, το κόστος εξοπλισμού, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, οι απαιτήσεις

σε προσόντα και εμπειρία του χειριστή, και η ευαισθησία της συσκευής (Σχήμα 5.9). Επίσης, τα αποτελέσματα της εν λόγω μεθόδου δίνουν σφάλμα μικρότερο της τάξεως του $\pm 5\%$. Στο Σχήμα 5.9 η συνεχής γραμμή υποδεικνύει την καταλληλότερη μέθοδο, σύμφωνα με τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη. Διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει ότι η μέθοδος μπορεί να είναι κατάλληλη αλλά όχι η βέλτιστη. Η μέθοδος η οποία καλύπτει όλα τα κριτήρια είναι αυτή του ασβεστόμετρου Bernard.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση επίδοσης μεθόδων για τον προσδιορισμό των ανθρακικών με βάση διάφορα κριτήρια (από Lamas et al., 2005).

Η μέθοδος Bernard βασίζεται στον έμμεσο υπολογισμό περιεκτικότητας σε ανθρακικά με τη διάλυσή τους από υδροχλωρικό οξύ (HCl) και μανομετρική μέτρηση του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Συγκεκριμένα, το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) αντιδρά με το υδροχλωρικό οξύ (HCl) και παράγεται χλωριούχο ασβέστιο (CaCl₂), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό (H₂O), σύμφωνα με τη χημική αντίδραση που έχει την εξής μορφή (Germaine J. & Germaine A., 2009):



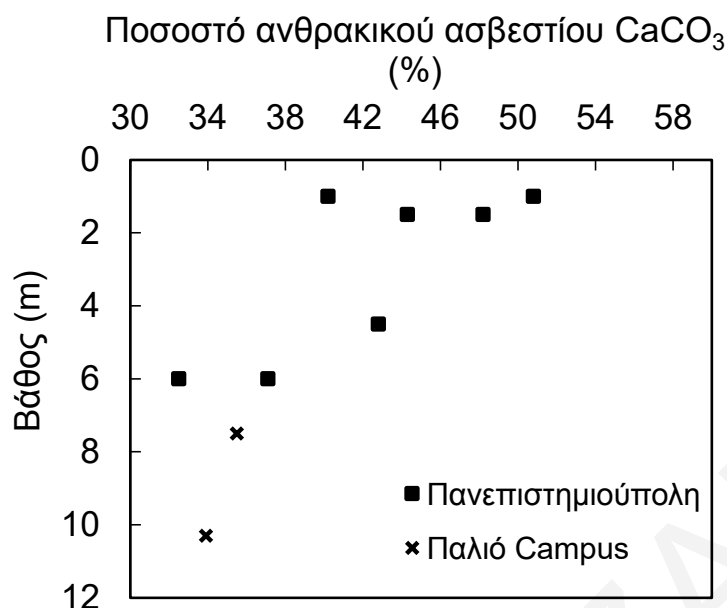
Η πειραματική διάταξη για προσδιορισμό ανθρακικών κατά Bernard βασίζεται στην αρχή λειτουργίας ενός μανομέτρου στήλης υγρού, το οποίο μετρά την πίεση του εκλυόμενου CO₂ και κατά αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η ποσότητά του. Η λειτουργία των μανομέτρων στήλης υγρού διέπεται από την πιο κάτω εξίσωση:

$$p = \rho \times g \times h \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

όπου p είναι η διαφορά πίεσης του ηρεμούντος υγρού πυκνότητας ρ (συνήθως νερό) μεταξύ δύο σταθμών υψομετρικής διαφοράς h . Πρέπει να αναφερθεί πως ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του μανομέτρου είναι η θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτό επηρεάζει την πυκνότητα του υγρού της στήλης. Για αυτό τον λόγο, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων απαιτείται καταγραφή της θερμοκρασίας, ώστε να γίνεται κατάλληλη διόρθωση-αναγωγή.

Σύμφωνα με το γαλλικό πρότυπο NF P94-048, η κανονικότητα του διαλύματος HCl που χρησιμοποιείται είναι 12N. Εντούτοις, το εγχειρίδιο του εξοπλισμού της μεθόδου Bernard της εταιρίας Analytika προτείνει διάλυμα HCl κανονικότητας 4N, ενώ οι Lamas et al. (2005) χρησιμοποιούν διάλυμα κανονικότητας 1N (σε αντιστοιχία με το αμερικάνικο πρότυπο). Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα HCl κανονικότητας 3N, διότι προκαταρκτικές δοκιμές που έγιναν με χρήση οξέων κανονικότητας 12N και 4N έδειξαν ότι η αντίδραση ήταν πολύ βίαιη και το δείγμα άφριζε αρκετά, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρεται από το εκλυόμενο αέριο μέρος της ποσότητας δείγματος μέσα στους σωλήνες σύνδεσης και στον σωλήνα μέτρησης της πειραματικής συσκευής, με αποτέλεσμα να χάνεται. Για πολύ μικρές κανονικότητες HCl (π.χ 1N), παρατηρήθηκε ότι η αντίδραση ήταν ασθενής και πραγματοποιείται αργά. Σε αυτή την περίπτωση ενδεχομένως το διάλυμα να μην ήταν αρκετά δυνατό ώστε να διεισδύσει στους κόκκους και να διαλύσει τα ανθρακικά άλατα.

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα μάργας που συλλέχθηκαν από την Πανεπιστημιούπολη και από το παλιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου. Το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου κυμαίνεται από 33%-51% για τα δείγματα Πανεπιστημιούπολης, ενώ για τα δείγματα του παλιού campus από 33%-35%. Το γεγονός ότι το ποσοστό της μάργας Λευκωσίας σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) είναι στο εύρος 33%-51% δικαιολογεί και την ονομασία της ως μάργα (Σχήμα 5.8), αν και κατά περιπτώσεις μπορεί να ονομαστεί και αργλική μάργα, όπως στην περίπτωση της καφέ (χακί) μάργας που συναντάται κάτω από τα 5.5m βάθος της BH1 και στα δείγματα του παλιού campus, αφού η περιεκτικότητά τους σε ανθρακικό ασβέστιο είναι μικρότερη του 35%.



Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών Bernard σε δείγματα μάργας που λήφθηκαν από την Πανεπιστημιούπολη και το παλιό campus.

5.6 Δοκιμές Οιδημέτρου

Τα εμπειρικά διαγράμματα, όπως το South African chart, εξυπηρετούν στον ποιοτικό χαρακτηρισμό ή στην ταξινόμηση των εδαφικών υλικών σε ότι αφορά τη διογκωσιμότητά τους. Εφόσον ένα εδαφικό υλικό χαρακτηριστεί ως διογκώσιμο, ακολουθεί ποσοτική διερεύνηση για να προσδιοριστεί το ποσοστό της αναμενόμενης μεταβολής του όγκου του.

Οι μέθοδοι εργαστηριακού προσδιορισμού της διογκωσιμότητας αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και ήταν ουσιαστικά προέκταση των υφιστάμενων μεθόδων μονοδιάστατης συμπίεσης για τον υπολογισμό της ογκομετρικής μεταβολής κορεσμένων εδαφών λόγω κατακόρυφης συμπίεσης με τη χρήση οιδημέτρου (Chao, 2007). Οι μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται στις δοκιμές οιδημέτρου (Σχήμα 5.11) έχουν πιο ευρεία χρήση συγκριτικά με τις μεθόδους μέτρησης μύζησης. Οι πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της διογκωσιμότητας με τη χρήση οιδημέτρου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που μετράται η παραμόρφωση ως αποτέλεσμα της διόγκωσης (δοκιμές διόγκωσης-swelling strain tests) και σε αυτές που μετράται η πίεση που απαιτείται να επιβληθεί στο δοκίμιο έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η όποια παραμόρφωση εξαιτίας της διόγκωσης (δοκιμές πίεσης διόγκωσης-swelling pressure tests).

Για να υπολογιστεί η διογκωσιμότητα μιας πλαστικής αργίλου, οι δοκιμές πρέπει να γίνονται ιδανικώς σε αδιατάρακτα δείγματα που λαμβάνονται από το πεδίο, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι δεν θα μεταβληθεί το φυσικό ποσοστό υγρασίας τους στην περίπτωση που η δειγματοληψία πραγματοποιείται κατά την ξηρά περίοδο. Οι πειραματικές δοκιμές οιδημέτρου προϋποθέτουν περιορισμό των πλευρικών παραμορφώσεων του υλικού με την εφαρμογή άκαμπτου μεταλλικού δακτυλίου με ελεύθερη πρόσβαση σε νερό. Οι Feng et al. (1998) και Fredlund et al. (2012) προτείνουν τέσσερις εναλλακτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της διογκωσιμότητας με τεχνικές οιδημέτρου. Οι μέθοδοι αυτές είναι: 1) η φόρτιση μετά από διαδικασία ελεύθερης διόγκωσης, 2) η διαδικασία διόγκωσης υπό σταθερό κατακόρυφο φορτίο, 3) η δοκιμή σταθερού όγκου (Constant Volume Test – CVT) και 4) η διαδικασία αποφόρτισης. Οι πειραματικές δοκιμές για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης του εδάφους σε διόγκωση/κατάρρευση που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διενεργήθηκαν με εφαρμογή της μεθόδου 2, η οποία είναι σε θέση να δώσει την πλέον πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς ενός εδαφικού υλικού που υπόκειται σε διαβροχή.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διογκωσιμότητας της μάργας Λευκωσίας που προέκυψαν μετά από δοκιμές διόγκωσης/κατάρρευσης υπό σταθερή κατακόρυφη πίεση, που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση συμβατικών οιδημέτρων (ASTM 4546-08). Αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα που λήφθηκαν από το σκάμμα (σκληρή μάργα 0.85m-1.5m βάθος) μορφώθηκαν σε μικρότερα δοκίμια διαμέτρου 5cm (όσο και η διάμετρος του μεταλλικού δακτυλίου της συσκευής οιδημέτρου) και τοποθετήθηκαν σε οιδήμετρα, όπου αρχικά υποβλήθηκαν σε κατακόρυφη τάση (με διαφορετικές τιμές τάσεως το καθένα) στη φυσική τους υγρασία. Οι εν λόγω δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τον Μ. Μπαρδάνη στα εργαστήρια της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Τα κελιά οιδημέτρου καλύφθηκαν με πλαστική μεμβράνη και μονωτική ταινία, έτσι ώστε να μην σημειωθούν μεταβολές στη φυσική υγρασία των δειγμάτων (είτε λόγω απορρόφησης υγρασίας από την ατμόσφαιρα, είτε λόγω εξάτμισης) και αφέθηκαν για διάστημα 48 ωρών, διάστημα αρκετό ώστε να σταματήσουν να παρατηρούνται κατακόρυφες παραμορφώσεις λόγω της κατακόρυφης τάσης που τους επιβλήθηκε. Με την ολοκλήρωση αυτής της φάσης, τοποθετήθηκε εντός των κελιών απιονισμένο-απεσταγμένο νερό, υπό τις ίδιες συνθήκες κατακόρυφων τάσεων που επικρατούσαν προηγουμένως, έτσι ώστε να καταγραφούν οι κατακόρυφες παραμορφώσεις διόγκωσης/κατάρρευσης που προκαλούνται εξαιτίας της πλήρους

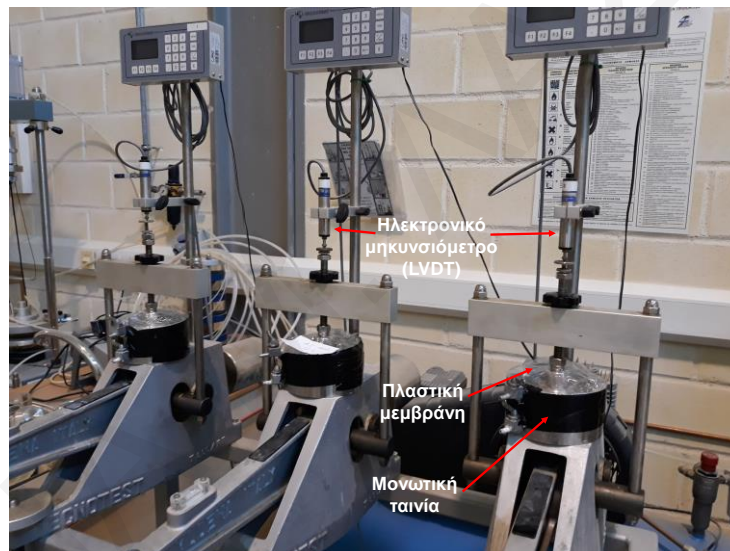
διαβροχής των εδαφικών δοκιμίων (δηλ. μέχρι τον πλήρη κορεσμό του δοκιμίου) και του συνεπαγόμενου μηδενισμού της μύζησης.

Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για δείγματα που λήφθηκαν από την ερευνητική γεώτρηση στα 6m βάθος, με τη διαφορά ότι αυτά τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν από τα εν λόγω δείγματα ήταν αναμοχλευμένα που επανασυμπυκνώθηκαν σε διαφορετικές τιμές ειδικού βάρους γ_d και αρχικού βαθμού κορεσμού S_r , ώστε να μελετηθεί ο βαθμός επίδρασης των δυο αυτών μεγεθών στη διογκωσιμότητα. Οι δοκιμές σε αναμοχλευμένα δοκίμια επιτρέπουν και τη μελέτη της περίπτωσης που τα εδάφη του συγκεκριμένου τύπου χρησιμοποιούνται σε χωματοургικές εργασίες για την κατασκευή επιχωμάτων δρόμων και δεξαμενών κατακράτησης υγρών, ή αναχωμάτων και χωμάτων φραγμάτων. Οι συγκεκριμένες δοκιμές εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Για την παρασκευή των συγκεκριμένων δοκιμών, δείγματα μάργας ξηράθηκαν σε φούρνο στους 105°C και κονιορτοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, το κονιορτοποιημένο υλικό αναμείχθηκε με νερό σε διάφορα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας και αφέθηκε 24 ώρες τυλιγμένο σε μεμβράνη νάιλον για ισορρόπηση της υγρασίας. Για τη συμπίκνωση των δοκιμίων, το αναμοχλευμένο υλικό τοποθετήθηκε σε στρώσεις εντός του μεταλλικού δακτυλίου και η κάθε στρώση συμπίεστηκε με ελαφρά κτυπήματα με τη χρήση είτε μεταλλικής ή ξύλινης ράβδου, διαμέτρου 45mm και 25 mm αντίστοιχα, ανάλογα με το τελικό ειδικό βάρος που έπρεπε να επιτευχθεί. Μετά τη συμπίκνωση, δακτύλιος και δοκίμιο τυλίγονταν με νάιλον μεμβράνη για εξισορρόπηση και διατήρηση του ποσοστού υγρασίας, μέχρι την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή οιδημέτρου.

Το Σχήμα 5.12 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών οιδημέτρου αδιατάρακτων και επανασυμπυκνωμένων δειγμάτων αντίστοιχα, σε όρους ποσοστιαίας παραμόρφωσης διόγκωσης/κατάρρευσης λόγω πλήρους διαβροχής συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η διόγκωση σημειώνεται στα γραφήματα ως αρνητική κατακόρυφη παραμόρφωση, ενώ η κατάρρευση ως θετική. Η ελεύθερη διόγκωση (ϵ_{fsw}) των δειγμάτων σκληρής μάργας που λήφθηκαν από το σκάμμα (Σχήμα 5.12α) ανέρχεται στο 2% ενώ η πίεση διόγκωσης στα 90kPa περίπου. Ελεύθερη διόγκωση (ϵ_{fsw}) ορίζεται η κατακόρυφη παραμόρφωση που αναπτύσσεται όταν το εδαφικό δείγμα διαβρέχεται πλήρως (συνθήκες πλήρους κορεσμού), ξεκινώντας από το φυσικό (ή αρχικό) ποσοστό υγρασίας με πολύ μικρή κατακόρυφα επιβαλλόμενη τάση (περίπου στο 1kPa). Στην παρούσα διατριβή, ως ελεύθερη διόγκωση θεωρείται η διόγκωση υπό

κατακόρυφη τάση ίση με 4kPa, η οποία οφείλεται στη μάζα της άνω πλάκας και του άνω παρόλιθου που εφαρμόζονται πάνω στο δοκίμιο, καθώς και στη μάζα ενός μικρού βάρους που τοποθετείται στον βραχίονα της συσκευής στερεοποίησης, έτσι ώστε να τον καθιστά σταθερό. Ο όρος πίεση διόγκωσης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Palit (1953) και ορίζεται ως η κατακόρυφη τάση στην οποία το εδαφικό υλικό δίνει μηδενικές ογκομετρικές παραμορφώσεις κατά τη διαβροχή του. Η σχετικά μικρή πίεση διόγκωσης των 90kPa μπορεί να μην προκαλεί ανησυχία σε πρακτικά θέματα που αφορούν θεμελιώσεις, ωστόσο συνδέεται με σημαντικές παραμορφώσεις διόγκωσης σε περιπτώσεις όπου επιβάλλονται μικρότερες κατακόρυφες τάσεις, όπως για παράδειγμα εκείνες που μεταφέρονται στο έδαφος από γενικές κοιτοστρώσεις που στηρίζουν χαμηλά κτίρια ή κτίρια μερικών ορόφων, καθώς επίσης και σημαντικές παραμορφώσεις σε κατάρρευση σε υψηλότερες κατακόρυφες τάσεις (π.χ. >90kPa).



Σχήμα 5.11: Πειραματική διάταξη δοκιμών οιδημέτρου για τον προσδιορισμό ογκομετρικών παραμορφώσεων διόγκωσης/κατάρρευσης.

Το Σχήμα 5.12β παρουσιάζει τα αποτελέσματα των επανασυμπυκνωμένων δειγμάτων πιο πλαστικής μάργας, τα οποία ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με το ειδικό βάρος γ_d τους και τον βαθμό κορεσμού S_r που είχαν πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή οιδημέτρου. Όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενες μελέτες (Komine, 2004, Buzzzi et al., 2011), η τάση που έχει ένα υλικό να διογκωθεί αυξάνεται με αύξηση του αρχικού ξηρού ειδικού βάρους (γ_d) και μείωση του αρχικού βαθμού κορεσμού (S_r). Ωστόσο, από τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, φαίνεται ότι η διογκωσιμότητα των δειγμάτων είναι πιο ευαίσθητη σε μεταβολές του αρχικού ξηρού ειδικού βάρους (γ_d), παρά σε μεταβολές του αρχικού βαθμού κορεσμού (S_r). Ανάλογα με την αρχική κατάσταση των δοκιμίων, η πίεση

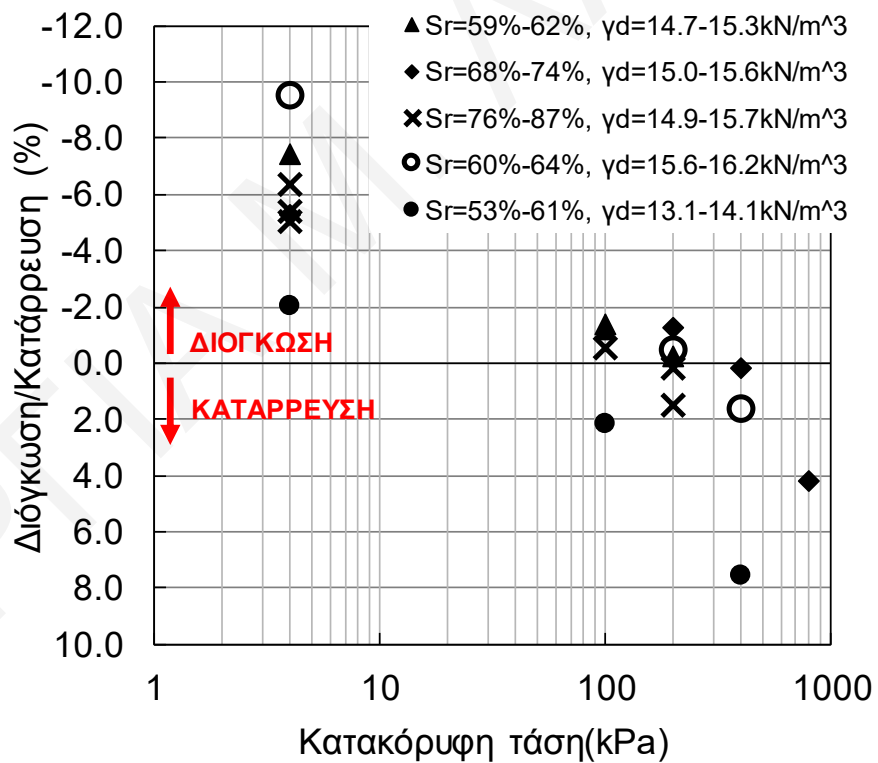
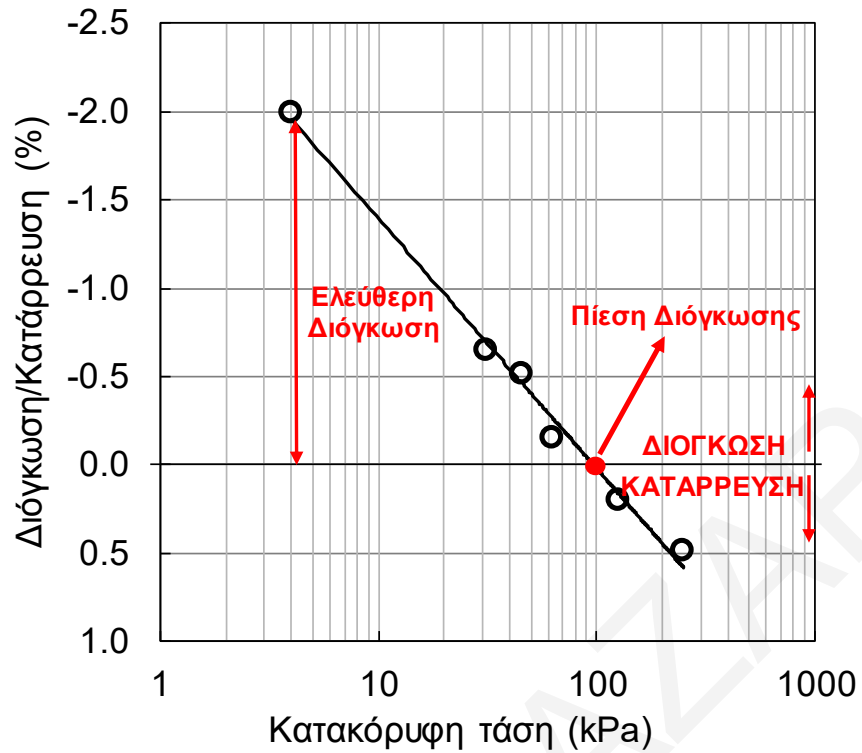
διόγκωσης κυμαίνεται από 12kPa μέχρι 200kPa και η τάση σε ελεύθερη διόγκωση (free swelling strain) μεταξύ 2% και 9.5%. Η συμπεριφορά των δειγμάτων σε όρους ποσοστιαίας παραμόρφωσης (διόγκωσης/κατάρρευσης) συναρτήσκει του λογάριθμου της κατακόρυφης τάσης που επιβάλλεται, μπορεί να αποδοθεί προσεγγιστικά με ευθείες γραμμές τόσο για τη σκληρή αδιατάρακτη μάργα όσο και για την πλαστική επανασυμπυκνωμένη μάργα. Όσον αφορά το Σχήμα 5.12β ειδικότερα, οι προσεγγιστικές ευθείες που προκύπτουν για κάθε ομάδα δεδομένων έχουν περίπου την ίδια κλίση, δεδομένου ότι ο άξονας τετμημένων (οριζόντιος άξονας) είναι σε λογαριθμική κλίμακα.

Οι τιμές ελεύθερης διόγκωσης της μαλακής μάργας υψηλής πλαστικότητας είναι σαφώς μεγαλύτερες από ότι για τη σκληρή μάργα Λευκωσίας, αλλά εντούτοις συμβατές με αυτές που μετρήθηκαν από τους Constantinou et al. (2002β) σε δείγματα μάργας Λευκωσίας με $PI > 40$. Παρά την περιεκτικότητά της σε $CaCO_3$, η μάργα Λευκωσίας γενικά εμφανίζει διογκωσιμότητα η οποία απαντάται σε διογκώσιμες αργίλους που έχουν αμελητέα περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο και άρα δεν κατατάσσονται στην κατηγορία των μαργών. Παρ' όλα αυτά, κατά τα φαινόμενα, η περιεκτικότητα $CaCO_3$ της τάξεως των 30%-50% δεν είναι ικανή να δημιουργήσει ένα συνεχή τσιμεντωμένο σκελετό ο οποίος να μπορεί να περιορίσει τη διόγκωση του αργιλικού κλάσματος, ειδικά στην περίπτωση που αυτό απαρτίζεται σε σημαντικό ποσοστό από μοντμοριλλονίτη, όπως στην περίπτωση της μάργας Λευκωσίας.

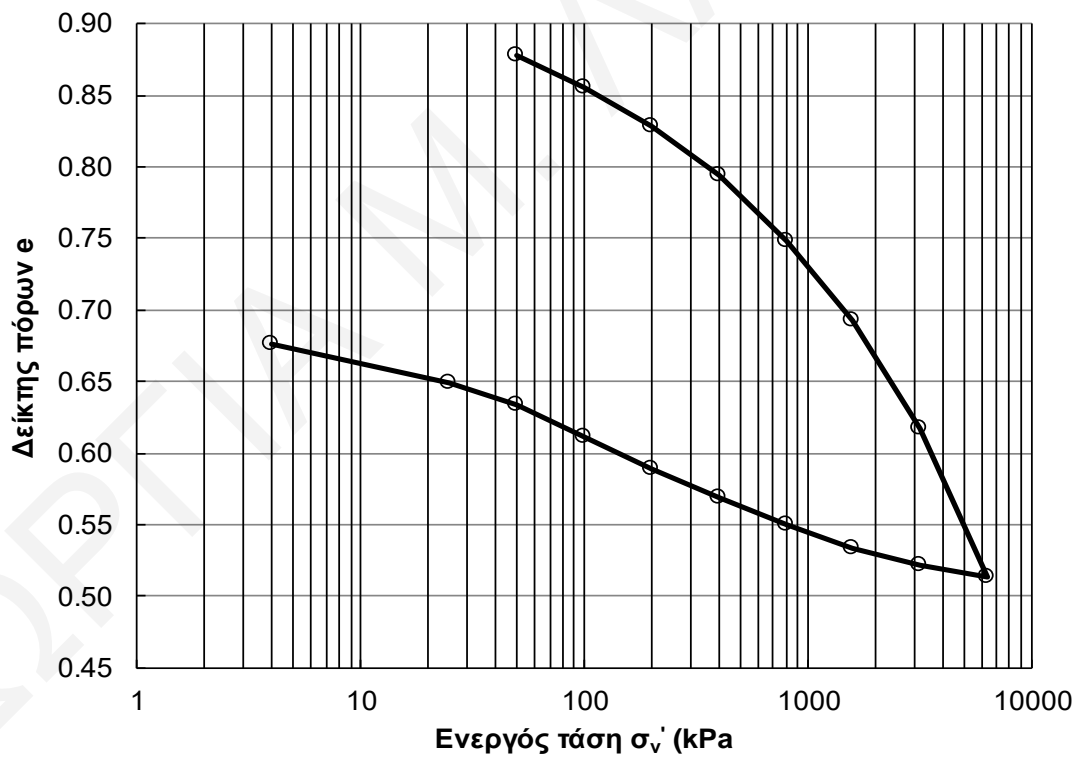
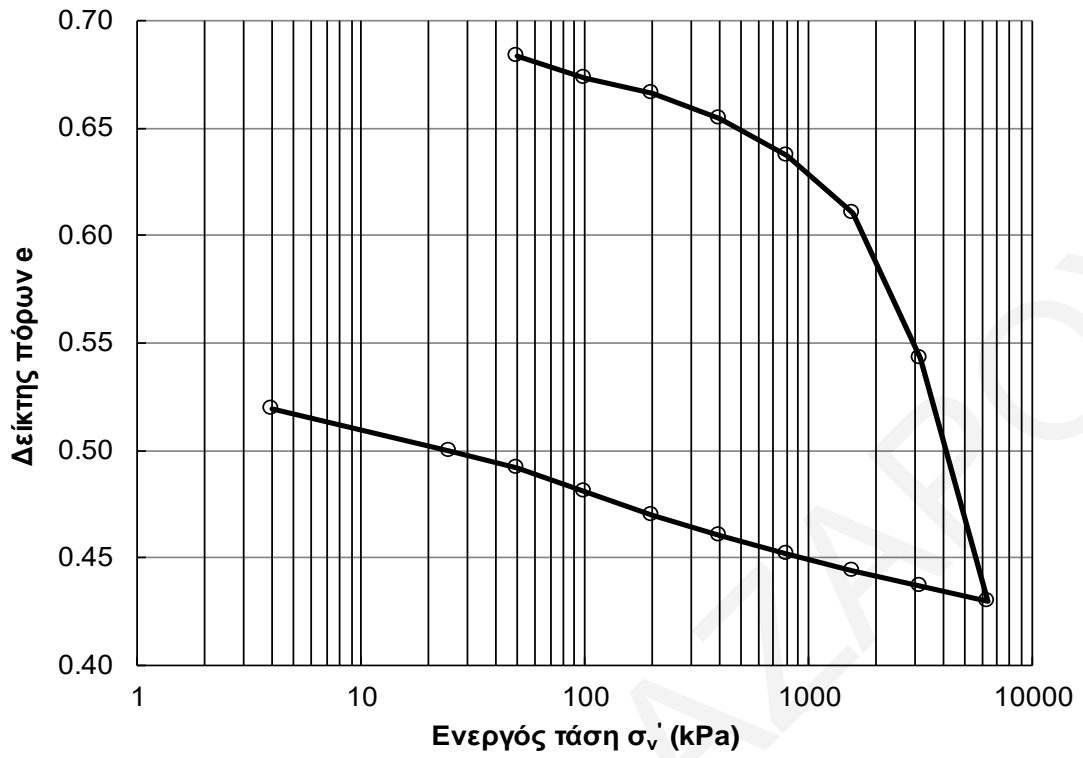
Είναι γνωστό ότι, η τσιμέντωση του αργιλικού ιστού από ανθρακικό ασβέστιο είναι ένας από τους μηχανισμούς που συμβάλλουν στη μείωση της διογκωσιμότητας των αργίλων που υποβάλλονται στη μέθοδο βελτίωσης/σταθεροποίησης με προσθήκη ασβέστη (υπό μορφή υδρασβέστου, δηλ. διαλύματος βάσης $Ca(OH)_2$) (Diamond & Kinter 1965, Zhao et al. 2015). Όμως, αυτή η τσιμέντωση (carbonation) είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σύγκριση με τους τρεις άλλους μηχανισμούς που συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των διογκώσιμων αργίλων, δηλαδή 1) την ανταλλαγή κατιόντων (αντικατάσταση του Na^+ που περιέχεται μεταξύ των πλακιδίων μοντμοριλλονίτη από Ca^{++} του διαλύματος υδράσβεστου), κροκίδωση (flocculation) και συσσωμάτωση (aggregation) των αργιλικών πλακιδίων λόγω της προσθήκης υψηλής συγκέντρωσης ιόντων υπό την παρουσία υψηλού pH, και 3) την προαγωγή τσιμέντωσης μέσω ποζολανικών αντιδράσεων (pozzolanic reactions).

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση συμβατικού οιδημέτρου, όπως περιγράφεται στο

πρότυπο ASTM D2435-96, σε δείγματα που λήφθηκαν από την ερευνητική γεώτρηση και το σκάμμα αντίστοιχα. Τα δοκίμια φορτίστηκαν σε διάφορες κατακόρυφες τάσεις, διπλασιάζοντας σε κάθε επόμενο βήμα το επιβαλλόμενο φορτίο. Αφού έφτασαν σε φορτίο που αντιστοιχεί σε 6400kPa (μέγιστη δυνατότητα της συσκευής του Εργαστηρίου Γεωμηχανικής του Πανεπιστημίου Κύπρου), ακολούθησαν βήματα αποφόρτισης με σκοπό τον υπολογισμό του δείκτη διόγκωσης (C_s). Οι δείκτες διόγκωσης υπολογίζονται ως η κλίση του κλάδου αποφόρτισης της καμπύλης στερεοποίησης. Από το Σχήμα 5.13α προκύπτει ότι ο δείκτης διόγκωσης για τα δείγματα σκληρής μάργας (0.85m-1.5m βάθος) ισούται με 0.029, ενώ για τα δείγματα μάργας από τα 6m βάθος της ερευνητικής γεώτρησης (Σχήμα 5.13β) προκύπτει ίσος με 0.108. Οι αντίστοιχοι ισοδύναμοι δείκτες διόγκωσης (C_s^*) που προκύπτουν ως οι κλίσεις των ευθειών των Σχημάτων 5.12α και β είναι 0.024 και 0.056. Συγκρίνοντας τις τιμές των δεικτών C_s και C_s^* για κάθε περίπτωση δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα, αφενός γιατί για τα δείγματα από το σκάμμα προκύπτει μια αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο τιμών, αφετέρου για τα διαταραγμένα δείγματα οι τιμές αποκλίνουν αρκετά.



Σχήμα 5.12: Ογκομετρική παραμόρφωση λόγω διαβροχής συναρτήσει της αρχικής επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης για α) αδιατάρακτα δείγματα σκληρής μάργας και β) επανασυμπυκνωμένα δείγματα πλαστικής μαλακής μάργας Λευκωσίας.



Σχήμα 5.13: Καμπύλες στερεοποίησης για α) αδιατάρακτα δείγματα και β) επανασυμπυκνωμένα δείγματα μάργας Λευκωσίας.

5.7 Τριαξονικές Δοκιμές

Η μέθοδος τριαξονικών δοκιμών υπό αστράγγιστες συνθήκες (CUPP), όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D4767-04, πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής και της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης συνεκτικών εδαφών σε διαταραγμένα ή αδιατάρακτα κυλινδρικά δοκίμια σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Τα δείγματα που τοποθετούνται στο τριαξονικό κελί, αφού στερεοποιηθούν υπό ισότροπες συνθήκες, διατμούνται επιβάλλοντας κατακόρυφη θλίψη, απουσία συνθηκών στράγγισης και επιβάλλοντας σταθερό ρυθμό αξονικής μετατόπισης (ταχύτητα θλίψης). Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορεί να υπολογιστεί η ενεργός γωνία τριβής και η ενεργός συνοχή του εδάφους, καθώς και να γίνει εκτίμηση του μέτρου του Young E. Οι τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης είχαν κυρίως ως στόχο τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας Young E, στο οποίο βασίζεται το ελαστικό μέρος του καταστατικού προσομοιώματος, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 9.

5.7.1 Μεθοδολογία

Για την εκτέλεση των δοκιμών τριαξονικής θλίψης λήφθηκε δείγμα σκληρής μάργας από το ερευνητικό σκάμμα (0.85m βάθος) και δείγμα μαλακότερης και πιο πλαστικής μάργας από τη γεώτρηση (6m βάθος). Το πρώτο δείγμα λήφθηκε στη διάρκεια των εργασιών εγκατάστασης αισθητήρων στο σκάμμα (για την επίτευξη του πειράματος διαβροχής και μελλοντικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς του εδάφους) με έμπηξη λεπτότοιχου μεταλλικού κυλινδρικού δειγματολήπτη 70cm ύψους και 35cm διαμέτρου (Σχήμα 5.14). Η μαλακότερη μάργα της γεώτρησης εξολκεύθηκε στο εργαστήριο απευθείας από δειγματολήπτη U100 στον μεταλλικό κυλινδρικό δειγματολήπτη 70cm ύψους και 35cm διαμέτρου μέσα σε ελαστική μεμβράνη (Σχήμα 5.15) με τη χρήση εξολκέα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή διατάραξη του δοκιμίου.

Για την εκτέλεση των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες (CU-consolidated undrained), αρχικά έγινε απαέρωση όλων των βαλβίδων και σωλήνων του κελιού και των controllers πίεσης, έτσι ώστε να μην εισάγεται αέρας κατά τη διαδικασία κορεσμού του δείγματος. Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε στη βάση του τριαξονικού κελιού, τοποθετώντας στο πάνω και κάτω μέρος του διηθητικό χαρτί και πωρόλιθο. Η τελική πειραματική διάταξη απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.16. Στο πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου, πάνω από την ελαστική μεμβράνη, τοποθετούνται δύο λαστιχάκια στεγανοποίησης (o-rings). Αυτό αποσκοπεί στη μόνωση του υλικού από το

νερό που το περιβάλλει (νερό κελιού), έτσι ώστε να μην αναλαμβάνει την τάση περίσφιξης σ_3 ως πίεση των πόρων υ.



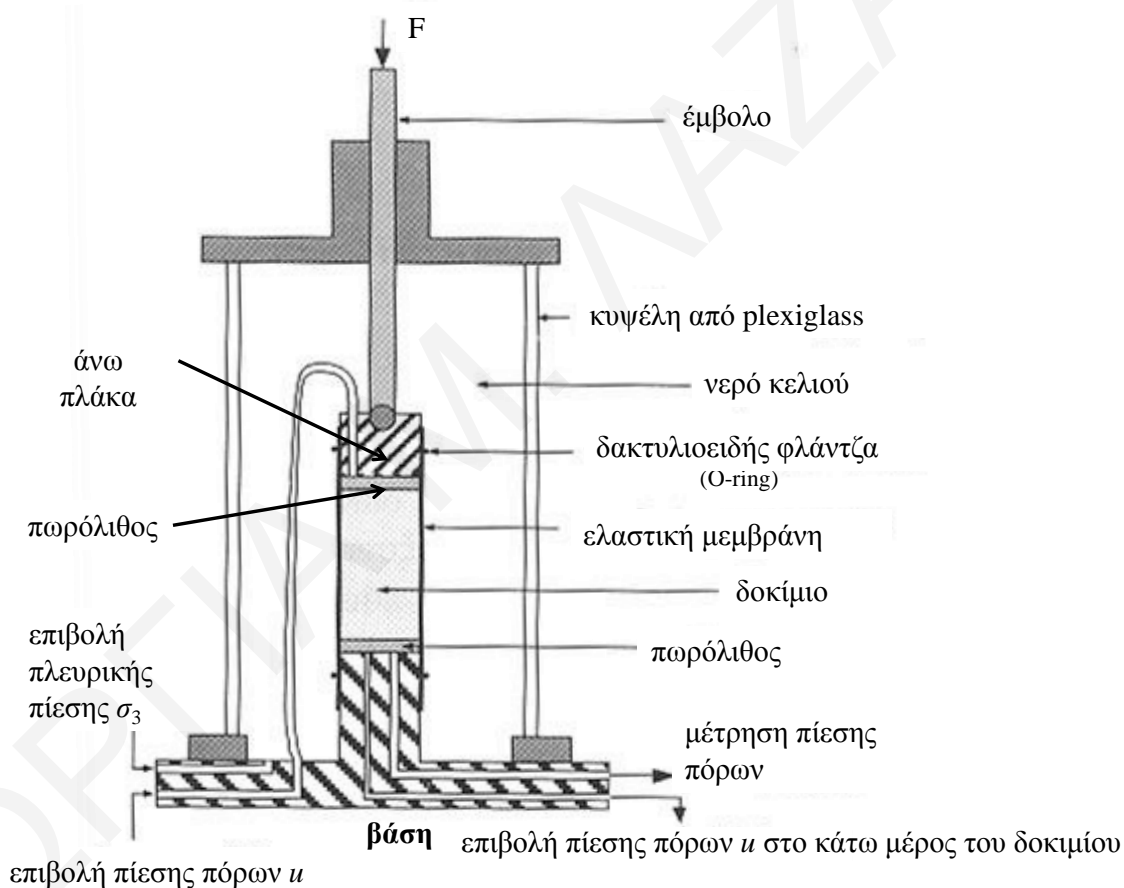
Σχήμα 5.14: Λεπτότοιχος πυρηνοληπτικός δειγματολήπτης κυλινδρικών δοκιμίων τριαξονικών δοκιμών.



Σχήμα 5.15: Αδιατάρακτο δείγμα μετά την εξόλκευση και τοποθέτησή του σε πλαστική μεμβράνη.

Αρχικώς επιβάλλονται στο δοκίμιο αρνητικές πιέσεις (vacuum) στο πάνω μέρος του με ταυτόχρονη εισροή απαερωμένου νερού στο κάτω μέρος του, έτσι ώστε να αναρροφηθεί όσο γίνεται περισσότερος αέρας από τους πόρους του δοκιμίου. Οι αρνητικές πιέσεις διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (της τάξεως των 35kPa) ώστε να αποφευχθεί

επιπλέον στερεοποίηση του εδάφους. Μόλις γίνει η απαέρωση του δοκιμίου, θετικές πιέσεις πόρων επιβάλλονται στο πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου, της τάξεως των 400kPa με 1000kPa, ώστε να επιτευχθεί πλήρης κορεσμός με τη μέθοδο της ενδοπίεσης (back-pressure saturation). Ικανοποιητικός βαθμός κορεσμού σύμφωνα με το ASTM D4767-04 θεωρείται εκείνος που αντιστοιχεί σε τιμές παραμέτρου της πίεσης πόρων (B-value) ίσες ή μεγαλύτερες του 0.95 σε διάρκεια μικρότερη των 10 λεπτών (ακριβέστερα ο χρόνος στον οποίο καταγράφεται η τιμή B-value θεωρούνται τα 2 λεπτά). Η παράμετρος αυτή είναι ο λόγος της μεταβολής της πίεσης των πόρων ως προς τη μεταβολή της πλευρικής πίεσης που την προκάλεσε, δηλαδή $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$, υπό καθεστώς κλειστών βαλβίδων κελιού (απουσία δυνατότητας στράγγισης).



Σχήμα 5.16: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης τριαξονικών δοκιμών (από Barnes, 2010).

Ο κορεσμός του δοκιμίου με τη μέθοδο της ενδοπίεσης επιτυγχάνεται μετά από πολλά στάδια αύξησης της επιβαλλόμενης πίεσης πόρων (back-pressure ή ενδοπίεση). Παράλληλα, αυξάνεται και η πλευρική πίεση σ_3 ώστε να διατηρείται σταθερή η σ'_3 στα 50kPa. Για τον προσδιορισμό της τιμής B-value μετά από κάθε βήμα κορεσμού, κλείνουν

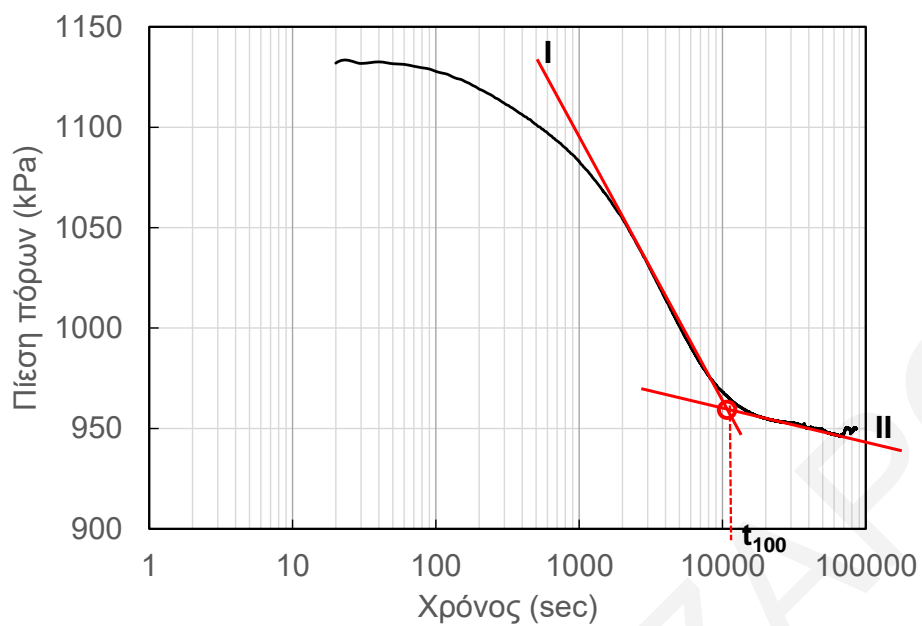
οι βαλβίδες αποστράγγισης και επιβάλλεται απότομα αύξηση της σ_3 (π.χ. αύξηση κατά 50kPa), και στη συνέχεια καταγράφεται η μεταβολή της u που προκλήθηκε (και κατ'έκταση η B-value).

Αφού επιτευχθεί κορεσμός, το εδαφικό δοκίμιο υποβάλλεται σε στάδια στερεοποίησης μέχρι να φτάσουμε στη στοχευόμενη τάση σ_3' στην οποία θα διατηρηθεί το δείγμα. Τα στάδια στερεοποίησης διαρκούν 24 ώρες το καθένα και κάθε φορά η πίεση στερεοποίησης του επόμενου σταδίου είναι η διπλάσια του προηγούμενου σταδίου (π.χ. $\sigma_{3,1}'=100\text{kPa}$, $\sigma_{3,2}'=200\text{kPa}$, $\sigma_{3,3}'=400\text{kPa}$ κ.ο.κ). Όταν το δοκίμιο στερεοποιηθεί στην επιθυμητή σ_3' , υπολογίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα θλίψης ακολουθώντας τα εξής βήματα:

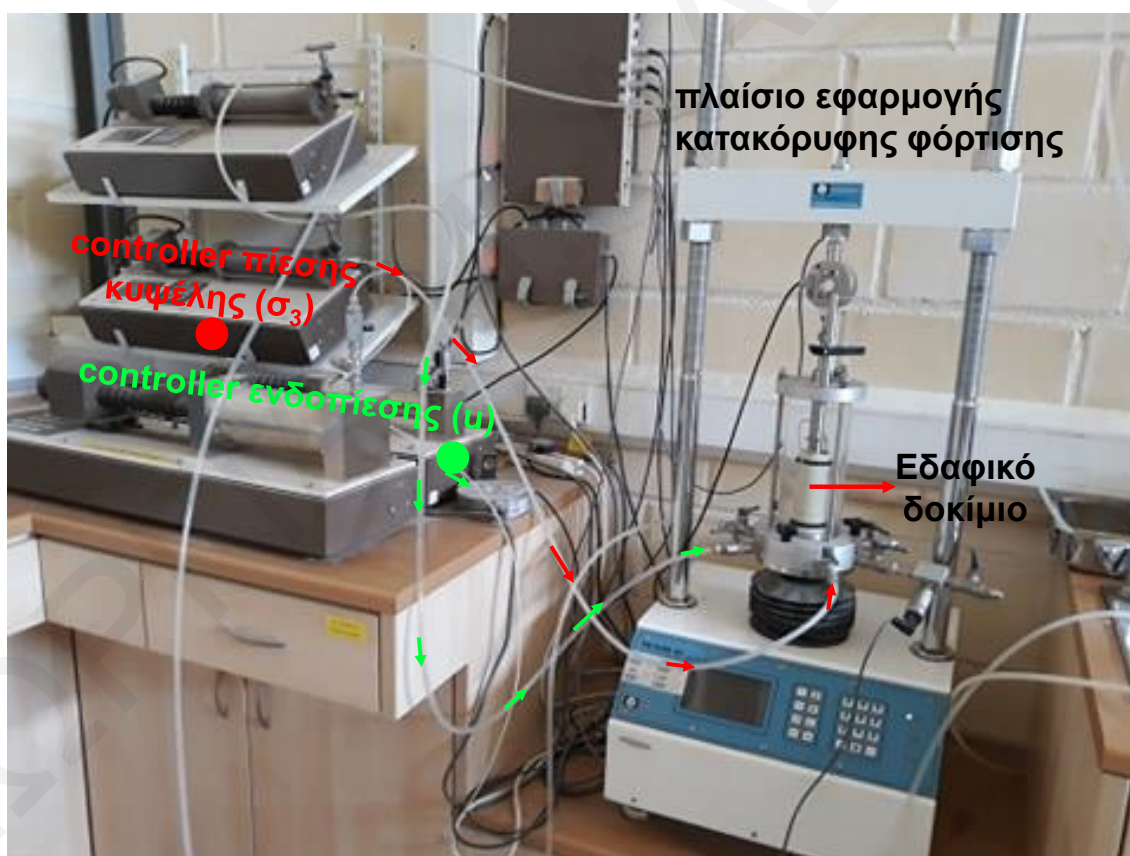
Σχεδιάζεται η καμπύλη της πίεσης πόρων (pore pressure) συναρτήσει του λογάριθμου χρόνου ($\log t$), έτσι ώστε να υπολογιστεί ο χρόνος στον οποίο επιτεύχθηκε η πλήρης στερεοποίηση του δοκιμίου (t_{100}). Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η εφαπτομένη I, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17, και η ευθεία II που εφάπτεται στον τελικό κλάδο της καμπύλης όπου ξεκινά να σταθεροποιείται η πίεση πόρων. Στο σημείο που τέμνονται οι δύο ευθείες αντιστοιχεί η τιμή t_{100} .

Εφαρμόζοντας τη σχέση $de/dt = 4\% / (at_{100})$ υπολογίζεται ο ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης, ο οποίος θα παράξει ισορροπία της πίεσης πόρων σε όλο το ύψος του δοκιμίου κατά τη θλίψη. Σύμφωνα με τους Head & Erps (2014), ο απαιτούμενος συντελεστής a είναι 1.8 στην περίπτωση που έχουν τοποθετηθεί πλευρικά χαρτιά φίλτρου επί του δοκιμίου και 0.53 στην αντίθετη περίπτωση. Με την παραπάνω σχέση, γίνεται η συντηρητική υπόθεση ότι η παραμόρφωση θραύσης του δοκιμίου αναμένεται να είναι 4%. Από τη σχέση $v = de/dt \cdot h$ υπολογίζεται η ταχύτητα θλίψης του δοκιμίου (σε mm/min).

Έπειτα, ακολουθεί το στάδιο της θλίψης (μέχρι αξονικής παραμορφώσεως τουλάχιστον 10%) (Σχήμα 5.18), η οποία επιβάλλεται με αύξηση της κατακόρυφης τάσης σ_1 μέσω του κατακόρυφου εμβόλου (διατηρώντας τη σ_3 σταθερή).



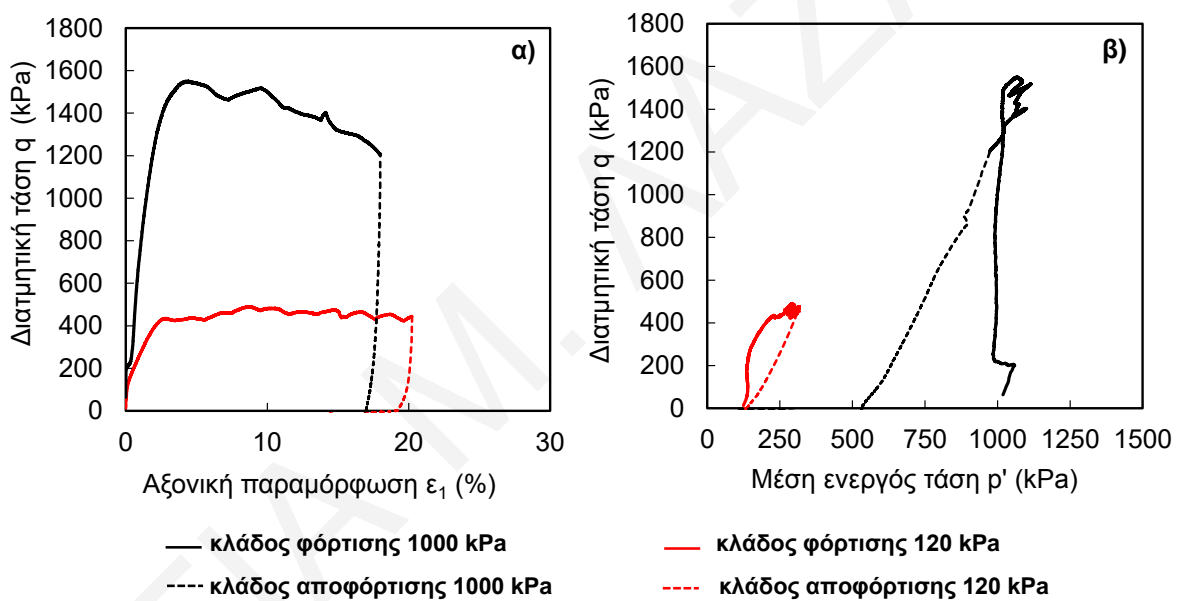
Σχήμα 5.17: Μεθοδολογία υπολογισμού του χρόνου πλήρους στερεοποίησης t_{100} .



Σχήμα 5.18: Σύστημα τριαξονικών δοκιμών του Εργαστηρίου Γεωμηχανικής Πανεπιστημίου Κύπρου.

5.7.2 Αποτελέσματα

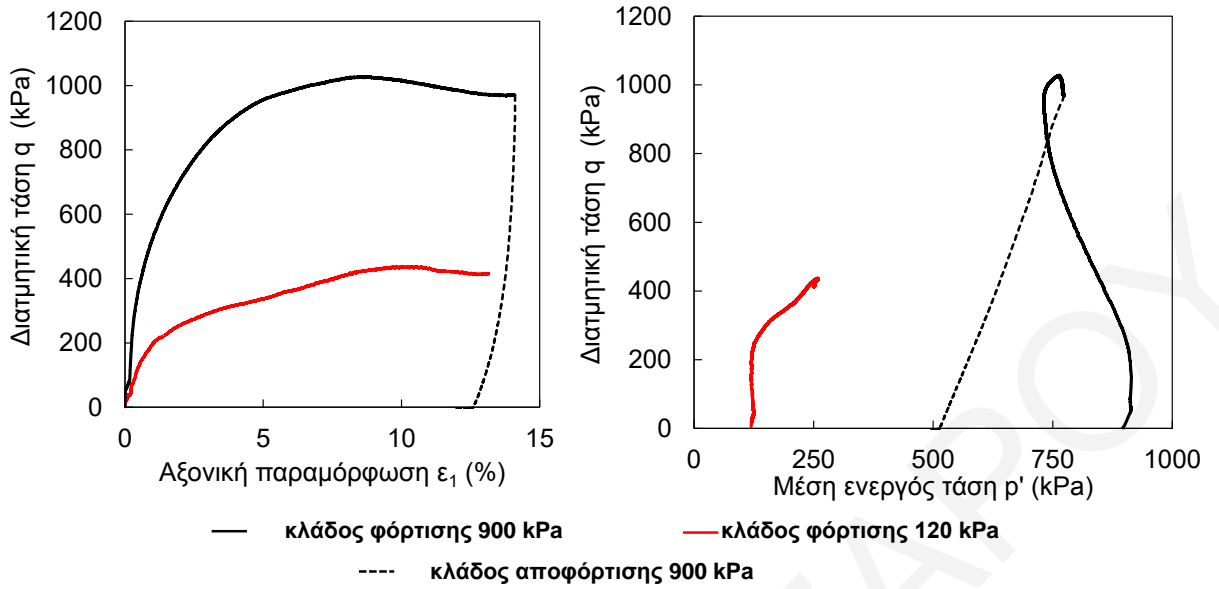
Τα Σχήματα 5.19 και 5.20 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών υπό αστράγγιστες συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα σκληρής-στιφρής μάργας του σκάμματος και σε δείγματα μαλακότερης μάργας από τη γεώτρηση αντίστοιχα, σε δύο διαφορετικές ενεργές τάσεις περίσφιξης (σ'_c). Για την περίπτωση της σκληρής μάργας, επιβλήθηκαν τάσεις περίσφιξης 120kPa και 1000kPa, ενώ για την περίπτωση της μαλακότερης μάργας 120kPa και 900kPa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E σε διατμητική τάση q ίση με 50% της q σε κατάσταση αστοχίας είναι 29.4MPa και 74.2MPa για σ'_c ίσο με 120kPa και 1000kPa αντίστοιχα, για τα δοκίμια σκληρής μάργας. Για τη μαλακότερη μάργα, οι τιμές αυτές ισούνται με 16.2MPa και 54.9MPa για $\sigma'_c = 120$ kPa και 900kPa, αντίστοιχα.



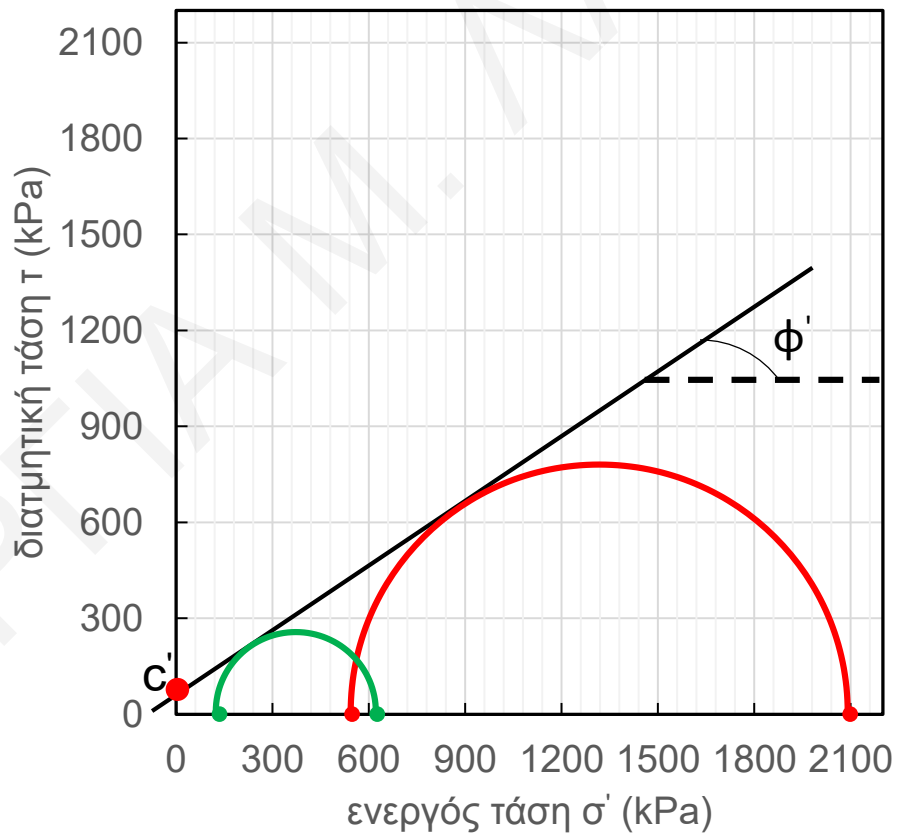
Σχήμα 5.19: Τριαξονικές δοκιμές CUPP για δοκίμια σκληρής μάργας Λευκωσίας από τα 0.85m βάθος: α) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων.

Από τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών προέκυψαν επίσης και οι ενεργές παράμετροι συνοχής c' και γωνιάς τριβής ϕ' . Εφαρμόζοντας τη σχέση που δίδεται από την Εξίσωση 5.5, η οποία περιγράφει το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και επιλύοντας σύστημα 2 εξισώσεων με 2 αγνώστους, προκύπτουν οι τιμές των c' και ϕ' ίσες με 37.6kPa και 34.2° και 64.2kPa και 29.3° για τα δοκίμια σκληρής και μαλακής μάργας, αντίστοιχα. Οι πιο πάνω τιμές μπορούν επίσης να υπολογιστούν και γραφικά σχεδιάζοντας τους κύκλους Mohr για κάθε περίπτωση (Σχήματα 5.21 και 5.22).

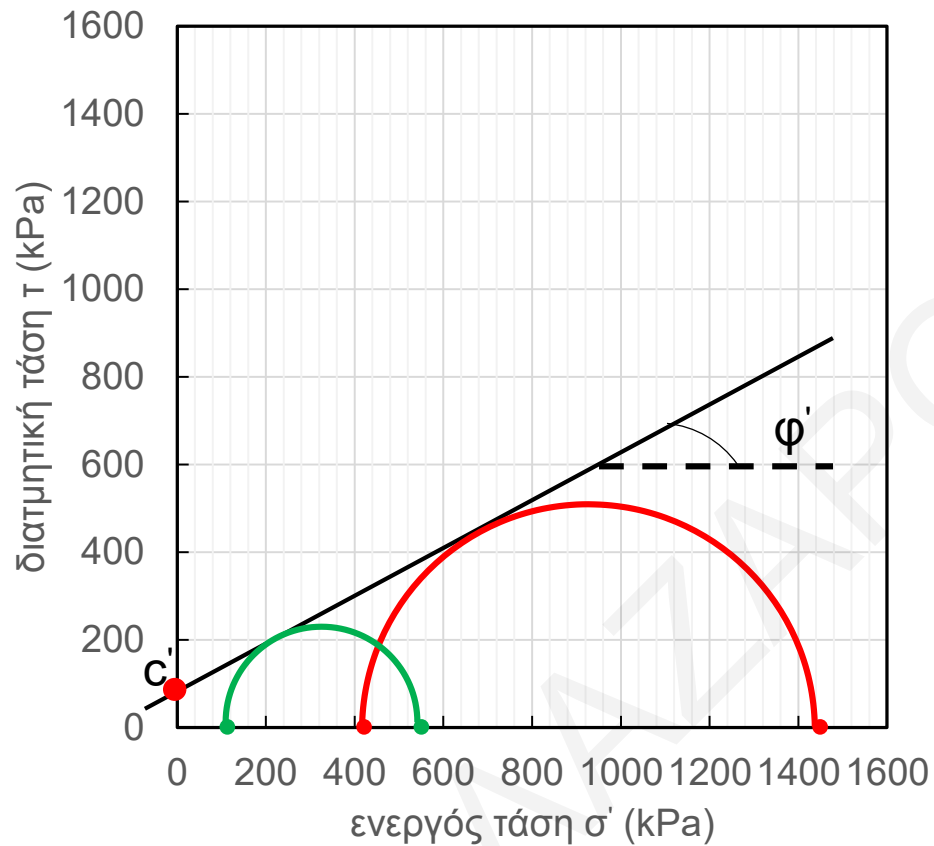
$$\sigma'_{1,f} - \sigma'_{3,f} = (\sigma'_{1,f} + \sigma'_{3,f}) \cdot \sin \phi + 2 \cdot c \cdot \cos \phi \quad \text{Εξίσωση 5.5}$$



Σχήμα 5.20: Τριαξονικές δοκιμές CUPP για δοκίμια μάργας Λευκωσίας από τα 6m βάθος: α) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων.



Σχήμα 5.21: Κύκλοι Mohr για τα δοκίμια σκληρής-στιφρής μάργας του σκάμματος.



Σχήμα 5.22: Κύκλοι Mohr για τα δοκίμια μαλακής μάργας της γεώτρησης.

5.8 Δοκιμές Υδραυλικής Διαπερατότητας

Η υδραυλική διαπερατότητα ενός εδαφικού υλικού ποσοτικοποιείται μέσω της παραμέτρου k (cm/sec) που ονομάζεται συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας. Η τιμή αυτού του συντελεστή είναι συνάρτηση του δείκτη πόρων όσον αφορά τα κορεσμένα εδάφη, ενώ για τα ακόρεστα εδάφη είναι συνάρτηση και της εδαφικής μύζησης.

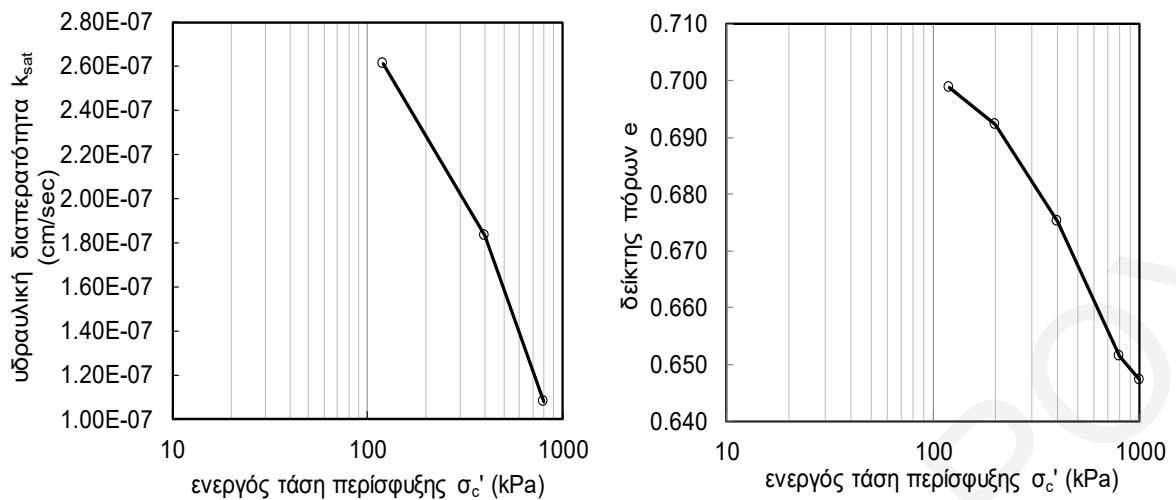
Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η διαπερατότητα των δειγμάτων μάργας Λευκωσίας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού με τη χρήση τριαξονικού κελιού (flexible wall permeameter tests). Μετρήσεις διαπερατότητας έγιναν μετά από στάδια στερεοποίησης των δοκιμών τριαξονικής θλίψης, όπου στο δοκίμιο επιβάλλεται σταθερή υδραυλική κλίση, μειώνοντας την πίεση πόρων στο πάνω μέρος του δοκιμίου και αυξάνοντάς την ισοπόσως στο κάτω μέρος του δοκιμίου (συνθήκες σταθερού φορτίου – constant head test). Ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας k υπολογίζεται με μετρήσεις του όγκου νερού που διέρχεται μέσα από το εδαφικό δοκίμιο σε καθορισμένο χρόνο, δηλ. της διαφοράς ένδειξης όγκου στους controllers που ελέγχουν την πίεση πόρων (ενδοπίεση) στο πάνω και κάτω άκρο του

δοκίμιου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι κατάλληλη για εδάφη με μέτρια ή μικρή διαπερατότητα, όπως για παράδειγμα ιλύες και άργιλοι, και περιγράφεται από το πρότυπο ASTM D 5084-10, με τη διαφορά ότι σε αυτό χρησιμοποιείται διαφορικό μανόμετρο με δεξαμενή υδράργυρου.

5.8.1 Μεθοδολογία-Αποτελέσματα

Ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας προσδιορίστηκε με τη μέθοδο εύκαμπτου τοιχώματος διαπερατόμετρου (flexible wall permeameter) υπό συνθήκες πλήρους κορεσμού σε τριαξονικό κελί (Head & Erps, 2014) σε δείγματα μάργας που λήφθηκαν από το σκάμμα στα 0.85m βάθος και την ερευνητική γεώτρηση στα 6m βάθος. Για την εγκατάσταση σταθερής ροής από κάτω προς τα πάνω στα δοκίμια, επιβλήθηκαν υδραυλικές κλίσεις μεταξύ 15 και 31. Τα δοκίμια ήταν ήδη κορεσμένα με ενδοπιέσεις πόρων (back pressures) μέχρι και 800kPa, έτσι ώστε να επιτευχθεί τιμή της παραμέτρου πίεσης πόρων B-value μεγαλύτερη ή ίση με 0.95. Στα συγκεκριμένα τριαξονικά δοκίμια δεν είχαν τοποθετηθεί πλευρικά χαρτιά φίλτρου, κάτι που αν γινόταν θα αλλοίωνε δραματικά τη μετρούμενη υδραυλική διαπερατότητα.

Η τιμή του συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας προέκυψε ίση με 2.6×10^{-7} cm/sec για την επιφανειακή σκληρή μάργα (Σχήμα 5.23) και 9.8×10^{-8} cm/sec για τη μαλακότερη μάργα από τα 6m βάθος σε επιβαλλόμενες ενεργές τάσεις περίσφιξης (σ_c') ίσες με 120kPa και 90kPa, αντίστοιχα. Η σκληρή μάργα έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα από τη μαλακότερη μάργα, παρά το γεγονός ότι ο αρχικός δείκτης πόρων της e είναι μικρότερος από αυτόν της μάργας που συναντάται σε μεγαλύτερα βάθη (0.67 έναντι 0.79). Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται σε δυο λόγους: στο ότι η μάργα που συναντάται σε ρηχά βάθη 1) έχει μικρότερο αργιλικό κλάσμα και είναι μικρότερης πλαστικότητας (Πίνακας 5.1) και 2) στο ότι έχει υποστεί περισσότερους κύκλους αποξήρανσης στην ιστορία της, με αποτέλεσμα το άνοιγμα μικρορωγμών που επιτρέπουν την ευκολότερη κίνηση του νερού. Το Σχήμα 5.23 δείχνει τη μείωση του συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας k (Σχήμα 5.23α) καθώς η σκληρή μάργα στερεοποιείται σε μεγαλύτερες ενεργές τάσεις σ_3' με ταυτόχρονη μείωση του δείκτη πόρων e (Σχήμα 5.23β). Η στερεοποίηση στα 800kPa που αντιστοιχεί σε ογκομετρική παραμόρφωση σχεδόν 3% οδηγεί σε μείωση του k κατά ένα συντελεστή ίσο με 0.4 ($k = 1.07 \times 10^{-7}$ cm/s).



Σχήμα 5.23: α) Συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού και β) μείωση του δείκτη πόρων της σκληρής μάργας για διαφορετικές τάσεις περίσφυξης.

5.9 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους – Νερού (SWCC)

5.9.1 Εισαγωγή

Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός εδαφικού υλικού εξαρτώνται κυρίως από τη σχέση μεταξύ μύζησης και βαθμού κορεσμού, η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (Soil Water Characteristic Curve – SWCC). Η ολική μύζηση (s) είναι το άθροισμα δύο συνιστωσών, της μύζησης εδαφικού ιστού (s_m) και της ωσμωτικής μύζησης (s_o). Ως μύζηση εδαφικού ιστού ορίζεται η επιφανειακή τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των πόρων του εδαφικού υλικού όταν το νερό που περιέχεται σε αυτό έρθει σε επαφή με τον αέρα (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους). Αντίθετα, η ωσμωτική μύζηση οφείλεται στην παρουσία κατιόντων και ανιόντων (διαλυόμενων αλάτων) στο νερό των πόρων του εδαφικού υλικού και ορίζεται ως η αρνητική πίεση που συγκρατεί το καθαρό νερό σε ισορροπία με το έδαφος (soil water) μέσω μιας ημιδιαπερατής μεμβράνης η οποία επιτρέπει τη διόδο μόνο στο νερό (Wray, 1984). Τα πειράματα για τον προσδιορισμό της SWCC εκτελέστηκαν από τον Μ. Μπαρδάνη στα εργαστήρια της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

5.9.2 Ολική Μύζηση

Για να μετρηθεί η ολική μύζηση (total suction) του εδαφικού υλικού χρησιμοποιήθηκε το ποτενσιόμετρο¹ σημείου δρόσου² (WP4C, Decagon Inc.). Η λειτουργία του WP4C βασίζεται στην αρχή της τεχνικής του υγρόμετρου ψυχρού κατόπτρου. Το WP4C (Σχήμα 5.24) αποτελείται από ένα σφραγισμένο θάλαμο, στον οποίο τοποθετείται το δείγμα σε μεταλλικό δισκίο χωρητικότητας 15ml (με ιδανική ποσότητα περιεχόμενου εδαφικού υλικού 7ml). Στον κλειστό θάλαμο αφήνεται η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος να ισορροπήσει με τους υδρατμούς του αέρα που υπάρχουν μέσα σε αυτόν. Το φως που παράγεται από μια πηγή φωτός κατευθύνεται προς ένα κάτοπτρο (καθρέφτη) από όπου ανακλάται και επιστρέφει σε ένα ανιχνευτή φωτός ο οποίος αναγνωρίζει την έντασή του. Αφού επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της υγρασίας του εδαφικού δοκιμίου και των υδρατμών του περιβάλλοντος του αέρα στον θάλαμο, ο ανεμιστήρας ψυχραίνει την επιφάνεια του κατόπτρου, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία υγροποίησης των υδρατμών πάνω σε αυτό (Thakur et al., 2005). Τότε το φως διαχέεται με αποτέλεσμα η ένταση που καταγράφεται από τον ανιχνευτή να είναι μειωμένη. Το σημείο δρόσου στο κάτοπτρο διατηρείται μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος και η θερμοκρασία του δείγματος μετράται από τον θερμοπυρήνα. Το σημείο δρόσου συσχετίζεται με τη σχετική υγρασία από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η ολική μύζηση του εδαφικού δείγματος που τοποθετείται στον θάλαμο.

Για τη βαθμονόμηση του οργάνου χρησιμοποιείται διάλυμα χλωριούχου καλίου (KCl) συγκέντρωσης 0.5mol/kg. Μέσω αυτού, καθορίζεται η σχετική υγρασία εντός του θαλάμου για την οποία μετράται το σημείο δρόσου. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης, με βάση την οποία συσχετίζεται η σχετική υγρασία με το σημείο δρόσου.

Προτού πραγματοποιηθούν οποιεσδήποτε μετρήσεις όγκου, μάζας και περιεχόμενης υγρασίας, και προτού τοποθετηθούν στη συσκευή WP4C για μέτρηση της ολικής μύζησης, τα δείγματα έμειναν για τρεις βδομάδες τυλιγμένα σε πλαστική μεμβράνη καλυμμένα με παραφίνη σε στεγανοποιητικό δοχείο υπό ελεγχόμενες θερμοκρασιακές συνθήκες, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία της υγρασίας σε όλη τη μάζα τους. Για να προσδιοριστεί ο

¹ Όργανο μέτρησης ηλεκτροκινητικής δύναμης, το οποίο την εξισορροπεί έναντι της διαφοράς δυναμικού που παράγεται με τη διέλευση γνωστού ρεύματος μέσω μιας γνωστής μεταβλητής αντίστασης.

² Η δρόσος είναι το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο οι υπάρχοντες υδρατμοί στην ατμόσφαιρα πλησίον του εδάφους συμπυκνώνονται σε μεγάλες σταγόνες νερού που καλύπτουν κάθε αντικείμενο.

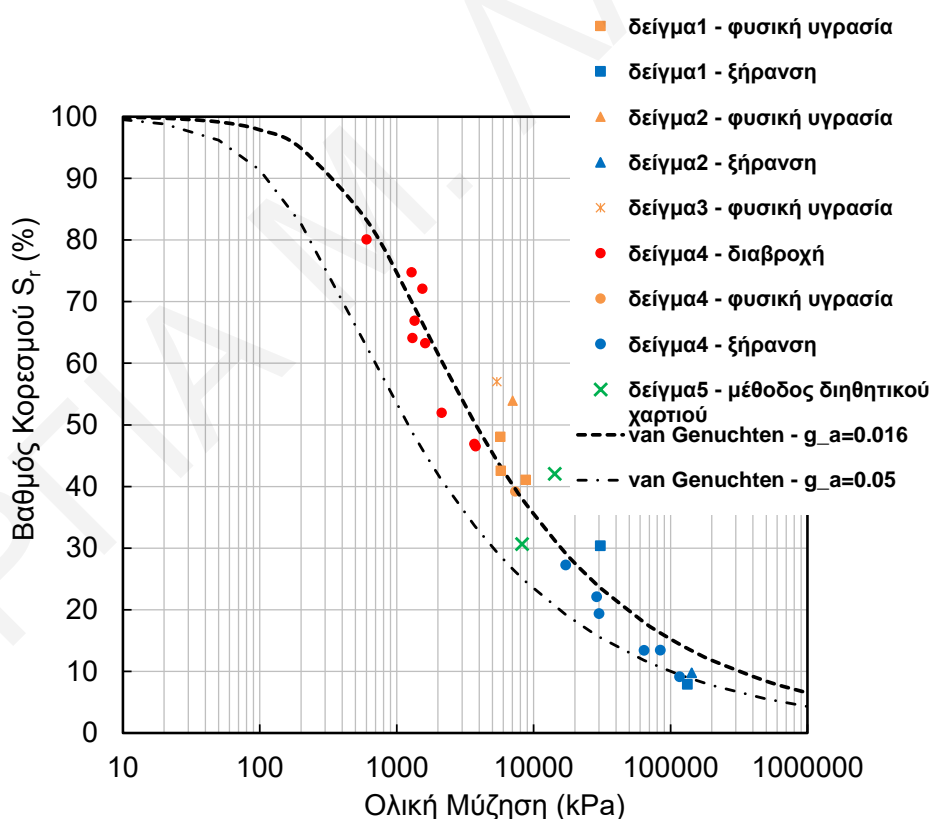
βαθμός κορεσμού (S_r) και ο δείκτης πόρων (e), έτσι ώστε να σχεδιαστεί η καμπύλη SWCC, έπρεπε πρώτα να υπολογιστεί ο όγκος των δειγμάτων σε συνδυασμό με μετρήσεις της μάζας και του ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας των δοκιμίων. Ο όγκος των δειγμάτων προσδιορίστηκε με εμβαπτίσεις παραφινωμένων δοκιμίων σε νερό, σύμφωνα με το AASHTO M 147 (2017). Στη συνέχεια, κάποια δείγματα ξηράθηκαν σταδιακά από το φυσικό ποσοστό υγρασίας τους, ενώ κάποια άλλα διαβράχθηκαν με σκοπό να διαμορφωθούν τα τμήματα ξήρανσης και διαβροχής της καμπύλης SWCC, αντίστοιχα, ξεκινώντας από τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο. Για σκοπούς σύγκρισης, δείγματα ξηράθηκαν αφού τοποθετήθηκαν σε θαλάμους υπό ελεγχόμενες συνθήκες σχετικής υγρασίας, χρησιμοποιώντας κορεσμένα διαλύματα αλάτων $BaCl_2$, KCl , $NaCl$, $Mg(NO_3)_2$ και $MgCl_2$ (Fredlund, 2002, Tang και Cui, 2005, Bardanis και Grifiza, 2012). Αν και εν τέλει δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ξήρανσης, η μέθοδος διαλύματος αλάτων επιτρέπει πιο στοχευμένες και ελεγχόμενες τιμές ολικής μύζησης με την εκ των προτέρων επιλογή της καταλληλότερης συγκέντρωσης του διαλύματος που θα τοποθετηθεί στον θάλαμο (Lazarou et al., 2019).



Σχήμα 5.24: Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου WP4C (Decagon Devices, Inc.).

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (SWCC) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.25. Φαίνεται ότι, όταν το υλικό είναι κατά 80% κορεσμένο, η αντίστοιχη ολική μύζηση ισούται με 600kPa, ενώ για βαθμό κορεσμού 10% η τιμή της ανεβαίνει στα 150MPa. Για δοκίμια που εξετάστηκαν στο φυσικό ποσοστό υγρασίας τους, που κυμαίνεται από 10%

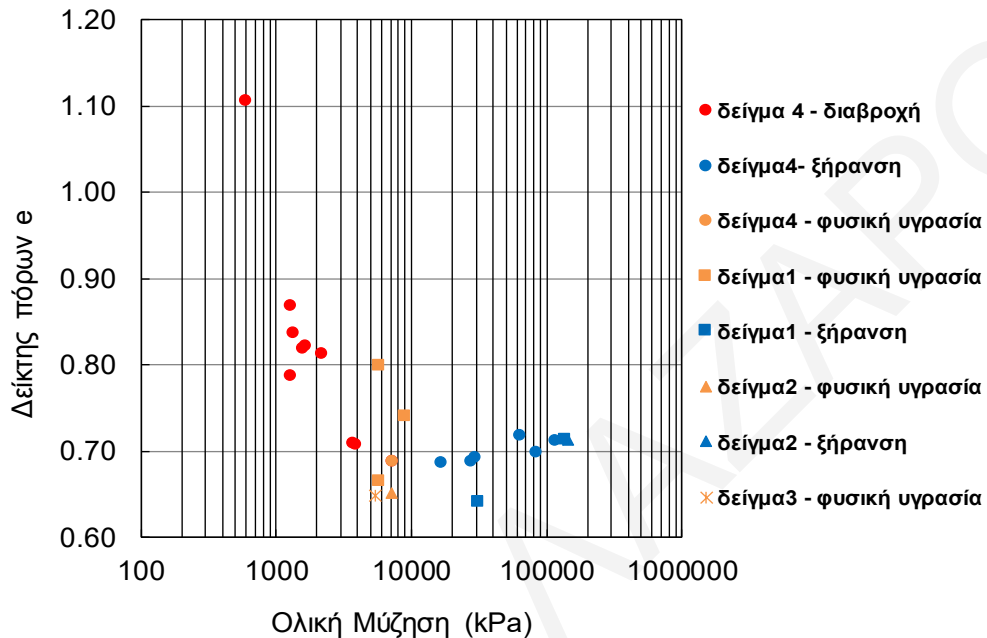
μέχρι 14% και το οποίο αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού 39% έως 57%, η ολική μύζηση ήταν μεταξύ 5700kPa και 8750kPa. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.26 τα δείγματα μάργας είναι κοντά στον παραμένοντα δείκτη πόρων (ή ισοδύναμα, έχουν ξεπεράσει το όριο συρρίκνωσης) για τιμές ολικής μύζησης μεγαλύτερες από 4000kPa που αντιστοιχούν σε βαθμό κορεσμού S_r μικρότερο του 50%. Ως εκ τούτου, η μάργα που λήφθηκε από το σκάμμα τον Ιούλιο 2015 είχε τιμές δείκτη πόρων κοντά ή ίσο με τον παραμένοντα δείκτη πόρων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αποκλείεται να υπήρξε απώλεια υγρασίας κατά τη δειγματοληψία και τη μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο, παρά το γεγονός ότι τυλίχθηκαν σε πλαστική μεμβράνη και τοποθετήθηκαν σε πλαστικά αεροστεγή σακούλια, δεδομένου ότι οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια του καλοκαιριού σε συνθήκες καύσωνα. Ακόμη και έτσι, την υψηλότερη τιμή ολικής μύζησης έδωσε αδιατάρακτο δείγμα που πάρθηκε με έμπηξη μεταλλικού κυλινδρικού δειγματολήπτη και που ήταν καλυμμένο με παραφίνη στα δυο άκρα του, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μετρημένες τιμές επηρεάστηκαν ελάχιστα από φαινόμενα ξήρανσης.



Σχήμα 5.25: Χαρακτηριστική καμπύλη (SWCC) της σκληρής μάργας Λευκωσίας.

Αισθητήρες MPS-6 που εγκαταστάθηκαν στο πεδίο εντός τους σκάμματος P1 (Decagon Devices Inc.) κατέγραψαν τον Σεπτέμβριο 2015 τιμές μύζησης εδαφικού ιστού κοντά στα 750kPa. Οι τιμές αυτές ήταν πολύ μικρότερες από τις τιμές ολικής μύζησης που

μετρήθηκαν με το WP4C, υποδηλώνοντας την παρουσία μεγάλης ωσμωτικής μύζησης (της τάξεως των MPa) στη μάργα Λευκωσίας. Για την επαλήθευση αυτής της παρατήρησης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μύζησης και με τη μέθοδο του χαρτιού φίλτρου, οι οποίες παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 5.26: Δείκτης πόρων σκληρής μάργας συναρτήσει της ολικής μύζησης.

5.9.3 Μετρήσεις Μύζησης Εδαφικού Ιστού και Ωσμωτικής Μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου

Εκτός από τη μύζηση εδαφικού ιστού (matric suction), συνεισφορά στην ολική μύζηση έχει και η ωσμωτική μύζηση (osmotic suction). Στις περισσότερες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία, η ωσμωτική μύζηση θεωρείται ότι έχει αμελητέα τιμή, συγκριτικά με τη μύζηση εδαφικού ιστού, και ως εκ τούτου δεν λαμβάνεται υπόψη (δηλ. μύζηση εδαφικού ιστού \approx ολική μύζηση). Οι ενδείξεις από τις μετρήσεις ολικής μύζησης του WP4C και μύζησης εδαφικού ιστού των αισθητήρων MPS-6, δείχνουν το αντίθετο στην περίπτωση της μάργας Λευκωσίας. Η θεώρηση αυτή έπρεπε να διερευνηθεί περαιτέρω κατά πόσο ισχύει, εφαρμόζοντας τη μέθοδο διηθητικού χαρτιού (ή χαρτιού φίλτρου) που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D5298-10. Μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να υπολογιστεί, τόσο η τιμή της εδαφικής μύζησης, όσο και της ολικής μύζησης. Ακολούθως, η τιμή της ωσμωτικής μύζησης προκύπτει από τη διαφορά της μύζησης εδαφικού ιστού από την ολική μύζηση (ωσμωτική μύζηση = ολική μύζηση – μύζηση εδαφικού ιστού).

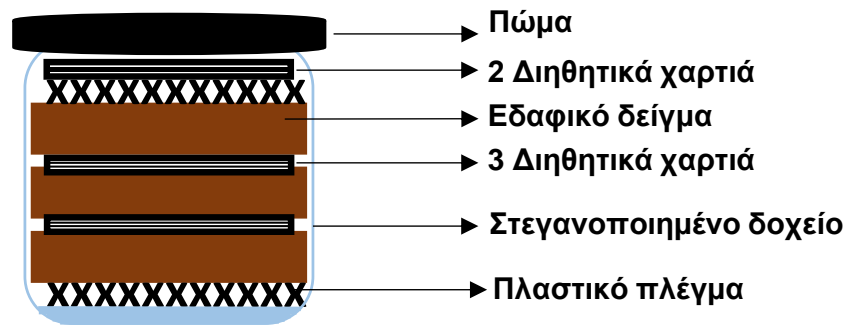
Η μέθοδος διηθητικού χαρτιού βασίζεται στην αρχή ότι, όταν ένα εδαφικό δείγμα βρίσκεται σε επαφή με ένα σώμα το οποίο έχει την ικανότητα να απορροφά υγρασία, τότε θα υπάρξει ροή ύδατος από το εδαφικό υλικό προς το σώμα (διηθητικό χαρτί), έτσι ώστε να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία μεταξύ των δύο (εξίσωση της μύζησης μεταξύ των δυο υλικών). Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι η μάζα του εδαφικού δείγματος να είναι μεγάλη, σε σχέση με το απορροφητικό υλικό, έτσι ώστε να μην μεταβληθεί σημαντικά το ποσοστό υγρασίας του δείγματος και συνεπώς της μετρούμενης μύζησης.

Για αυτό το σκοπό ετοιμάστηκαν δύο δείγματα σκληρής μάργας· ένα μη διαταραγμένο δείγμα κομμένο σε δύο μέρη και ένα διαταραγμένο το οποίο επανασυμπυκνώθηκε με τη μέθοδο που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 5.6). Το ειδικό βάρος (γ_d) του διαταραγμένου δείγματος ήταν 13.6 kN/m^3 . Η μύζηση εδαφικού ιστού προσδιορίστηκε με τη μέθοδο επαφής (contact method), τοποθετώντας διηθητικά χαρτιά Whatman No. 42 (Σχήμα 5.27), η οποία προτείνεται επίσης από τους Al Haj & Standing (2016), μεταξύ των δύο τμημάτων του αδιατάρακτου δείγματος και στο εσωτερικό του επανασυμπυκνωμένου δείγματος. Αντίθετα, η ολική μύζηση προσδιορίστηκε μέσω μη επαφής (non-contact method) του διηθητικού χαρτιού με το δείγμα μέσα στον ίδιο θάλαμο. Ενδεικτική σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 5.28.



Σχήμα 5.27: Χαρτιά φίλτρου διαμέτρου 55mm N° 42 της εταιρείας Whatman.

Για τη μέτρηση μύζησης εδαφικού ιστού, τοποθετήθηκαν τρία διηθητικά χαρτιά ενδιάμεσα στα τμήματα του εδαφικού δείγματος, με το χαρτί στο μέσο (χαρτί μέτρησης) να είναι μικρότερης διαμέτρου από τα δύο που βρίσκονται σε άμεση επαφή με το έδαφος (στα οποία δεν γίνεται κάποια μέτρηση), έτσι ώστε να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις λόγω “μόλυνσης” εξαιτίας της μετακίνησης εδαφικών κόκκων ή μικροοργανισμών που πιθανώς να βρίσκονται μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 5.28: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης μεθόδου διηθητικού χαρτιού.

Οι τιμές ολικής μύζησης με την εφαρμογή της μεθόδου διηθητικού χαρτιού παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.25. Για τα αδιατάρακτα δείγματα η ολική μύζηση και η μύζηση εδαφικού ιστού ήταν 14.3MPa και 9.5MPa, ενώ για τα διαταραγμένα επανασυμπυκνωμένα δείγματα οι τιμές ήταν 8.2MPa και 4.3MPa αντίστοιχα. Αυτά τα ζεύγη τιμών υποδηλώνουν την ύπαρξη ωσμωτικής μύζησης της τάξεως των 3.9MPa–4.8MPa για ποσοστό φυσικής υγρασίας 10%-12%, η οποία είναι ενδεικτική για μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων. Σύμφωνα με τους Sreedeeep & Singh (2006) και Arifin & Schanz (2009), η ωσμωτική μύζηση αναμένεται να μειώνεται λογαριθμικά με αύξηση του καθαρού νερού, γεγονός που οδηγεί στην ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης των διαλυτών αλάτων στους εδαφικούς πόρους. Η σημαντικότητα της παρουσίας αλάτων στη σκληρή μάργα Λευκωσίας επιβεβαιώθηκε μέσω χημικής ανάλυσης (Πίνακας 5.2) που έγινε από το εργαστήριο Tsakalidis Analysis & Testing. Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (6mS/cm) και αλατότητα (0.3g/100g) αποτελούν ενδείξεις για μέτρια έως έντονα αλατούχο έδαφος (Jones, 2001, Shahid, 2013) με τα κατιόντα νατρίου (Na^+ meq/100g=3.2) να παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη υψηλής ωσμωτικής μύζησης.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ανάλυσης αλατότητας για τη σκληρή μάργα Λευκωσίας.

Ιδιότητα	Τιμή
pH	7.80
ηλεκτρική αγωγιμότητα (1:1 έδαφος-νερό) (mS/cm)	6.00
αλατότητα (g/100 g)	0.30
ιοντοανταλλαγές καλίου (meq K/100 g)	0.41
ιοντοανταλλαγές νατρίου (meq Na/100 g)	3.20

5.9.4 Βαθμονόμηση Καμπύλης SWCC

Η ροή νερού σε μη κορεσμένα εδάφη εξαρτάται και από τις δυο συνιστώσες της ολικής μύζησης, δηλ. τη μύζηση εδαφικού ιστού και την ωσμωτική μύζηση, οι οποίες όμως περιγράφουν το φαινόμενο μέσω ενός διαφορετικού μηχανισμού η καθεμία. Αυστηρά ομιλούντες, θα πρέπει να λαμβάνονται και οι δύο υπόψη μέσω ξεχωριστών υπολογισμών (Fredlund & Rahardjo 1993, Ng & Menzies 2007). Εντούτοις, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις, όπως άλλωστε και τα πλείστα λογισμικά γεωτεχνικών εφαρμογών που παρέχουν δυνατότητες προσομοίωσης μερικώς κορεσμένης ροής, λαμβάνει υπόψη μόνο ένα μηχανισμό ροής. Συνεπώς, για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι επιδράσεις ωσμωτικής μύζησης και μύζησης εδαφικού ιστού συμπτύχθηκαν σε μια ενιαία μεταβλητή δυναμικού ροής νερού (δηλ. την ολική μύζηση) στην Εξίσωση 5.6 και στον νόμο του Darcy (Rushton 2004, Galavi 2010). Με βάση την προσέγγιση αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας που σχετίζεται με τη μύζηση εδαφικού ιστού και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας που σχετίζεται με την ωσμωτική μύζηση είναι ίσοι.

Η βαθμονόμηση της εξίσωσης van Genuchten (Εξ. 5.6) στα πειραματικά δεδομένα φαίνεται στο Σχήμα 5.25. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν σε αυτή την καμπύλη είναι $g_a=0.016$, $g_n=1.37$ και $S_{r,res}=0$. Οι τιμές αυτές προέκυψαν μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης με τη χρήση Excel solver. Η Εξ. 5.6 έχει καλή απόκριση συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα για το μεγαλύτερο εύρος τιμών της καμπύλης, εκτός από τις τιμές που αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές μύζησης ($s>30\text{MPa}$, που αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού $S_r<20\%$), όπου παρατηρείται μια ελαφρά υπερεκτίμηση του βαθμού κορεσμού. Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται μια ακόμη καμπύλη SWCC μετατοπισμένη προς τα αριστερά από την καμπύλη ολικής μύζησης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει για τιμή $g_a=0.05$ και αντιστοιχεί στη μύζηση εδαφικού ιστού που μετρήθηκε στο πεδίο το καλοκαίρι του 2015 ($s=750\text{kPa}$ για $S_r=55\%$). Η πλειοψηφία των παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκαν με την τιμή $g_a=0.016$, που αντιστοιχεί σε όρους ολικής μύζησης, ενώ περιορισμένος αριθμός αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν και για τιμή $g_a=0.05$ για σκοπούς σύγκρισης. Οι παραμετρικές αναλύσεις με τιμή $g_a=0.05$ υποθέτουν μηδενική συνεισφορά της ωσμωτικής μύζησης στη μεταφορά υγρασίας, δηλ. απουσία διαλυτών αλάτων στους πόρους του εδαφικού υλικού.

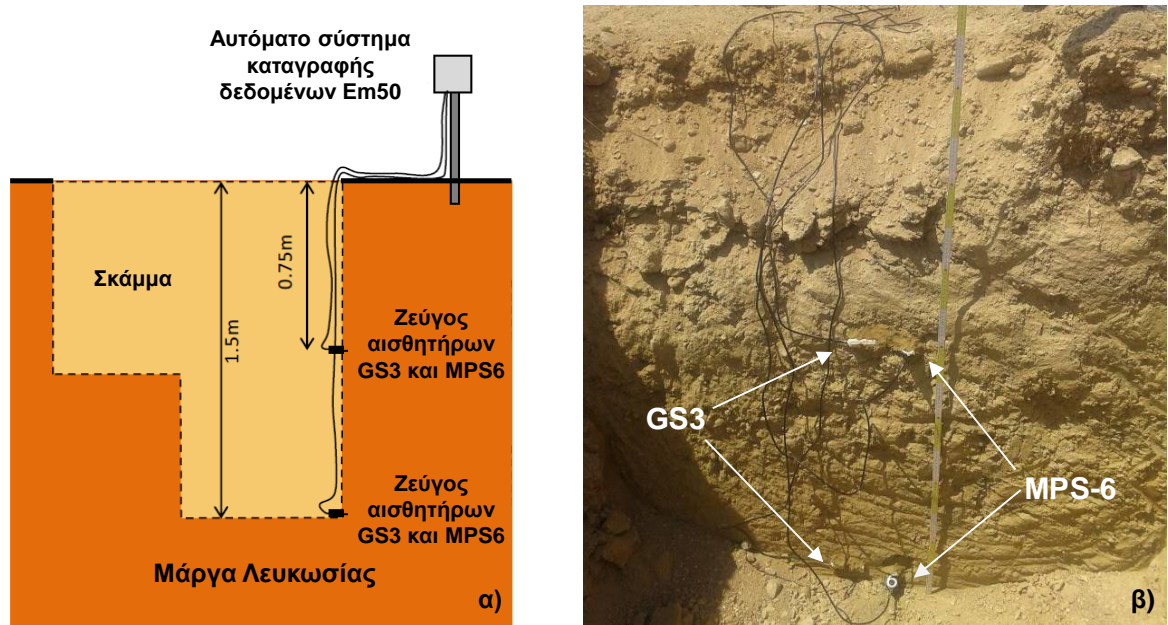
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

6.1 Εγκατάσταση Αισθητήρων

Σκοπός της δημιουργίας του σκάμματος, πέραν της λήψης επιφανειακών δειγμάτων μάργας, ήταν και η διενέργεια ενός πειράματος διαβροχής για τον υπολογισμό της υδραυλικής διαπερατότητας του υλικού στο πεδίο, καθώς και η μακροχρόνια παρατήρηση της μύζησης και της υγρασίας του εδάφους εντός της ενεργού ζώνης, καθώς αυτές μεταβάλλονται με τα εποχιακά κλιματικά δεδομένα.

Αφού δημιουργήθηκε το σκάμμα, ζεύγη αισθητήρων ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας GS3 (frequency domain reflectometry – FDR –volumetric water content sensor της Decagon Devices Inc.) και μύζησης εδαφικού ιστού (αισθητήρες τύπου τεμαχίων πορώδους υλικού της MPS-6 της Decagon Devices Inc.) τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικές στάθμες, στα 0.75m και 1.5m βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 6.1α). Η αρχή λειτουργίας των τεμαχίων πορώδους υλικού (porous blocks) βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού με τον βαθμό κορεσμού του. Αν για παράδειγμα το πορώδες υλικό βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους κορεσμού, η ηλεκτρική του αντίσταση έχει μια μικρή και δεδομένη τιμή. Όταν έρθει σε επαφή με ξηρότερο έδαφος, το πορώδες υλικό του αισθητήρα θα χάσει υγρασία εξαιτίας της μύζησης εδαφικού ιστού και ταυτόχρονα θα μεταβληθεί η ηλεκτρική του αντίσταση.

Ο αισθητήρας GS3 χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για τις μετρήσεις διηλεκτρικής διαπερατότητας του περιβάλλοντος εδαφικού μέσου. Ο αισθητήρας διοχετεύει ένα ταλαντευόμενο κύμα ισχύος 70MHz στις ακίδες που φορτίζονται σύμφωνα με τη διηλεκτρικότητα του υλικού. Το φορτίο που αποθηκεύεται είναι ανάλογο της διηλεκτρικότητας και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας του υποστρώματος. Ο μικροεπεξεργαστής του αισθητήρα GS3 μετρά το φορτίο και εξάγει μια τιμή διηλεκτρικής διαπερατότητας από τον αισθητήρα. Αυτή η τιμή μετατρέπεται στο ποσοστό υγρασίας του εδαφικού υποστρώματος μέσω συγκεκριμένης εξίσωσης βαθμονόμησης για το έδαφος που μελετάται.



Σχήμα 6.1: Εγκατάσταση αισθητήρων GS3 και MPS-6 στο σκάμμα: α) σχηματική τομή και β) φωτογραφία κατακόρυφου πρανούς σκάμματος με τους αισθητήρες εγκατεστημένους και πριν την επανατοποθέτηση του εδάφους που αφαιρέθηκε.

Στο Σχήμα 6.1β φαίνεται η δυτική πλευρά του σκάμματος μετά την εγκατάσταση των αισθητήρων. Στη συνέχεια το σκάμμα πληρώθηκε με σχεδόν όλο το εδαφικό υλικό που είχε αφαιρεθεί, το οποίο επανασυμπυκνώθηκε με χρήση δονητικής πλάκας (Σχήμα 6.2) με στόχο την επίτευξη πυκνότητας πλησίον αυτής που είχε η αδιατάρακτη μάργα. Οι αισθητήρες συνδέθηκαν με ένα αυτόματο σύστημα καταγραφής δεδομένων Em50, έτσι ώστε να καταγράφονται συνεχώς οι μακροχρόνιες μετρήσεις.

6.2 Πείραμα Διαβροχής

Τον Οκτώβριο του 2015 πραγματοποιήθηκε πείραμα διαβροχής (Hillel et al., 1972, Toll et al., 2012) στο σημείο που έγινε η τοποθέτηση των αισθητήρων εντός της Πανεπιστημιούπολης (νέο campus) του Πανεπιστημίου Κύπρου, έτσι ώστε να γίνει μια εκτίμηση των επί τόπου υδραυλικών ιδιοτήτων της Μάργας Λευκωσίας. Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος διαβροχής, μετά τη συμπύκνωση του εδάφους, μέχρι και την ολοκλήρωση του πειράματος.



Σχήμα 6.2: Συμπύκνωση εδαφικού υλικού του σκάμματος.

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους μια λεκάνη διαμέτρου ενός μέτρου (1m) έχοντας ως κέντρο τον κατακόρυφο άξονα των αισθητήρων πεδίου. Ο περιβάλλοντας χώρος της λεκάνης καθαρίστηκε προσεκτικά αφαιρώντας τη βλάστηση (έτσι ώστε να μην επηρεάζεται το πείραμα από τη διαπνοή των φυτών) και τη χαλαρή φυτική γη (για να αποφευχθεί αλλοίωση αποτελεσμάτων λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων εδάφους). Περιμετρικά της λεκάνης τοποθετήθηκε πλαστική αδιαπέρατη μεμβράνη για την πλευρική της στεγάνωση. Οι φάσεις διαβροχής (wetting phases) του εδάφους διεξάγονταν με γέμισμα της λεκάνης με νερό γνωστού όγκου, το οποίο στη συνέχεια αφηνόταν να απορροφηθεί από το έδαφος κατά τη διάρκεια φάσεων μη διαβροχής (non-wetting phases).

Κατά τη διάρκεια των φάσεων απορρόφησης, μια έκταση 4m^2 (συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας της λεκάνης) ήταν καλυμμένη με πλαστικό φύλλο με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των φαινομένων εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται οι διάφορες φάσεις του πειράματος διαβροχής που ξεκίνησε την 1^η Οκτωβρίου 2015 και λόγω της εγγενώς μικρής διαπερατότητας του εδάφους διήρκησε 4 μήνες.

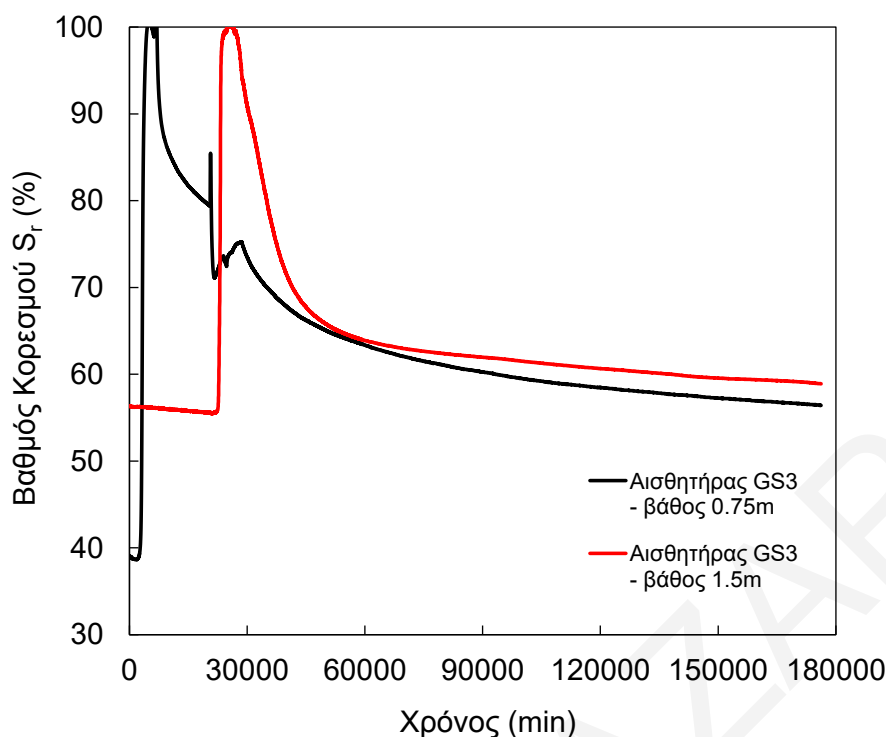


Σχήμα 6.3: Στάδια εκτέλεσης του πειράματος διαβροχής στο πεδίο.

Πίνακας 6.1: Φάσεις πειράματος διαβροχής.

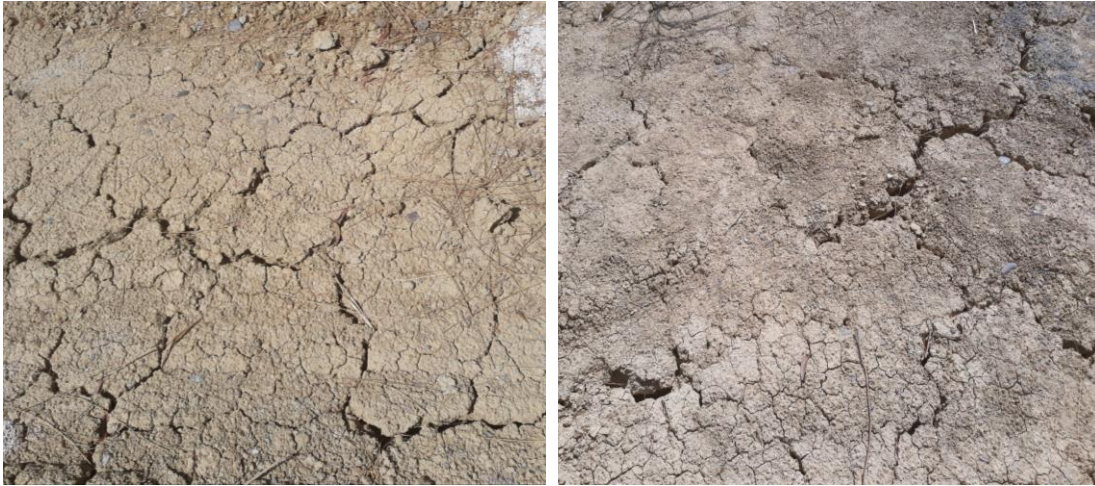
Αριθμός Φάσης	Διάρκεια (λεπτά)	Αθροιστική διάρκεια (λεπτά)	Όγκος νερού (lt)	Μέσος ρυθμός διαβροχής (m/day)
1	155	155	55	0.651
2	70	225	0	0.000
3	57	282	33	1.062
4	45	327	11	0.448
5	45	372	11	0.448
6	843	1215	0	0.000
7	120	1335	55	0.561
8	60	1395	0	0.000
9	180	1575	50	0.510
10	4490	6065	0	0.000
11	180	6245	55	0.561
12	14150	20395	0	0.000
13	1170	21565	380	0.596
14	3160	24725	527	0.306
15	20	24745	0	0.000
16	1410	26155	300	0.390
17	2760	28915	900	0.598
18	146880	175795	0	0.000

Έως και τη φάση 7, το μέσο ύψος του νερού στη λεκάνη ήταν 7cm, ενώ για τις υπόλοιπες φάσεις αυξήθηκε κατά το διπλάσιο, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία του πειράματος διαβροχής και να επιτευχθεί πλήρης κορεσμός του εδάφους στα βάθη εγκατάστασης των αισθητήρων (0.75m και 1.5m) σε πιο μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό έγινε εφικτό και με την εγκατάσταση δεξαμενής νερού ενός κυβικού μέτρου, η οποία παρείχε σταθερά νερό στη λεκάνη, γεγονός που επέτρεψε την αύξηση της διάρκειας των φάσεων διαβροχής. Το Σχήμα 6.4 δείχνει τη χρονοϊστορία του βαθμού κορεσμού σύμφωνα με τις καταγραφές των αισθητήρων ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας GS3 στις δύο στάθμες αισθητήρων. Στη φάση 10 (4 Οκτωβρίου 2015) το έδαφος κορέστηκε σε βάθος 0.75m ενώ στο 1.5m ο κορεσμός σημειώθηκε περίπου δύο βδομάδες αργότερα (17 Οκτωβρίου 2015) στη φάση 14.



Σχήμα 6.4: Καταγραφή χρονοϊστορίας βαθμού κορεσμού σε βάθη 0.75m και 1.5m κατά τη διάρκεια του πειράματος διαβροχής.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η φαινόμενη υδραυλική διαπερατότητα του μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στο πεδίο αναμένεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη (ακόμη και μιας ή δύο τάξεων μεγέθους) από αυτή που μετρήθηκε στο εργαστήριο σε αδιατάρακτα δείγματα μάργας (Benson & Gribb, 1997). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ενός δικτύου ρωγμών το οποίο δημιουργήθηκε κατά τους αλληπάλληλους εποχιακούς κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης του υλικού στο παρελθόν (κυρίως στα αβαθή στρώματα εδάφους), καθώς και σε φυσικές (δομικές) ασυνέχειες (structural discontinuities). Οι Albrecht & Benson (2001) από μελέτες που διεξήγαγαν βρήκαν ότι οι ρωγμές που αναπτύσσονται εξαιτίας των κύκλων διαβροχής-ξήρανσης δύνανται να αυξήσουν την υδραυλική διαπερατότητα έως και 500 φορές. Η υδραυλική διαπερατότητα της αποξηραμένης κρούστας (desiccated crust) αναμένεται να μειώνεται με το βάθος, αφού το άνοιγμα των ρωγμών μειώνεται και εξαφανίζεται κάτω από ένα συγκεκριμένο βάθος (Konrad & Ayad, 1997, Fredlund & Rahardjo, 1993, Ng et al., 2003). Οι ρωγμές συρρίκνωσης παρατηρούνται κυρίως κατά τους ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Ρωγμές συρρίκνωσης στην επιφάνεια της μάργας Λευκωσίας κατά τη διάρκεια ξηρής περιόδου.

6.3 Μακροχρόνιες Μετρήσεις Πεδίου

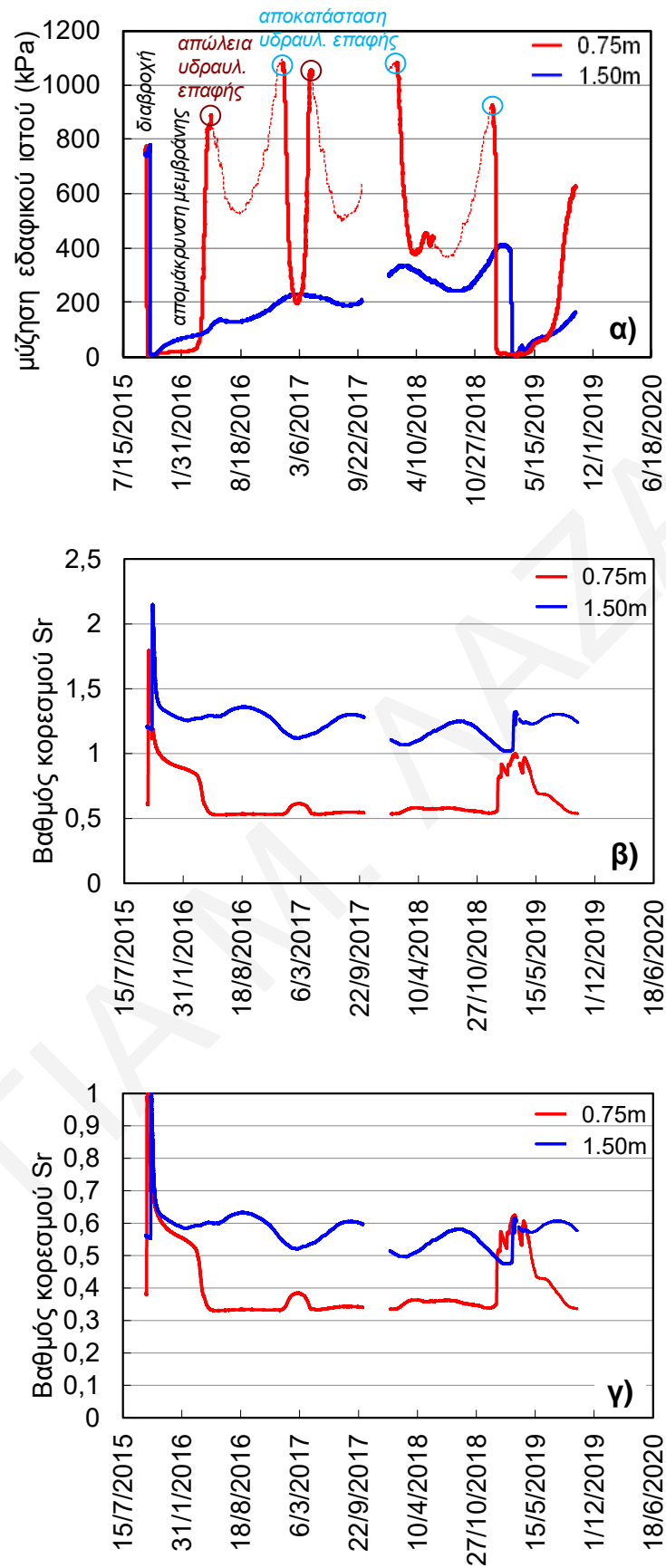
Στο Σχήμα 6.6 φαίνονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν από τον σταθμό παρακολούθησης που εγκαταστάθηκε στην Πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Κύπρου από τον Οκτώβριο 2015 μέχρι και τα τέλη του 2019. Σε αυτό το χρονικό διάστημα καταγράφηκαν μετρήσεις μύζησης εδαφικού ιστού (matric suction) (Σχήμα 6.6α) και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (volumetric water content), οι οποίες μεταφράστηκαν σε βαθμό κορεσμού (Σχήμα 6.6β), από τα ζεύγη αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν εντός του σκάμματος σε βάθη 0.75m και 1.50m. Αρχικά, παρατηρείται μια μεγάλη περίοδος όπου οι αισθητήρες στα 0.75m είναι υπό την επίδραση των φαινομένων του πειράματος διαβροχής, ενώ στη συνέχεια το έδαφος ξηραίνεται και εξακολουθεί να παραμένει σε κατάσταση μερικού κορεσμού, με τιμές μύζησης εδαφικού ιστού μεγαλύτερες των 200kPa ακόμη και κατά τη διάρκεια των χειμερινών-βροχερών μηνών. Στη διάρκεια της περιόδου όπου σημειώθηκαν εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες βροχόπτωσης (Δεκέμβριος 2018 μέχρι Φεβρουάριος 2019) παρατηρήθηκε απότομη μείωση της μύζησης μέχρι πρακτικά να μηδενιστεί. Οι αισθητήρες στα 1.50m βάθος καταγράφουν αντίστοιχη συμπεριφορά, αλλά με μια χρονική καθυστέρηση 2 μηνών στην ανάπτυξη συνθηκών πλήρους κορεσμού, σε σχέση με τους αισθητήρες στα 0.75m.

Οι καταγραφές μύζησης στα 0.75m στη διάρκεια των θερινών-ξηρών περιόδων για τα έτη 2016-2018 σημειώνουν μείωση, με κατώτερα σημεία τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τους αισθητήρες καταγραφής ογκομετρικού ποσοστού

υγρασίας, οι οποίοι καταγράφουν χαμηλές τιμές. Τα συγκεκριμένα τμήματα της καμπύλης μύζησης ξεκινούν με απότομη παύση της αύξησης της μύζησης (Απρίλιος-Μάιος) και σταματούν σε σημεία απότομης έναρξης της μείωσής της (Δεκέμβριος-Ιανουάριος). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μερική αποκόλληση του αισθητήρα μύζησης στην έναρξη της ξηρής περιόδου (Απρίλιος-Μάιος), λόγω της συρρίκνωσης του εδάφους, με αποτέλεσμα την απώλεια της υδραυλικής επαφής μεταξύ αισθητήρα και εδάφους. Δηλαδή, ο αισθητήρας μύζησης (πιο συγκεκριμένα το τεμάχιο πορώδους υλικού του αισθητήρα) δεν βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος και ως εκ τούτου το έδαφος αδυνατεί να μεταδώσει τη μύζηση του σε αυτόν. Σε αυτό συντείνει και η σχετικά μικρή τιμή κατακόρυφης τάσης στο βάθος των 0.75m, η οποία δεν μπορεί να διατηρήσει την επαφή. Η υδραυλική επαφή αποκαθίσταται ξανά όταν το έδαφος διογκώνεται στη διάρκεια των βροχερών μηνών (Δεκέμβριος-Ιανουάριος). Οι μεταβολές μύζησης που παρατηρούνται όταν χάνεται η υδραυλική επαφή πιθανόν να αντικατοπτρίζουν τη μετανάστευση υδρατμών από τον ρηχό υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής προς την ατμόσφαιρα, μέσω του δικτύου ρωγμών που δημιουργούνται τις άνυδρες περιόδους.

Στα 1.50m βάθος οι καταγραφές μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας είναι σε συμφωνία καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ οι διακυμάνσεις είναι μικρότερες σε σχέση με τις καταγραφές των αισθητήρων στα 0.75m. Δηλαδή, με αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ο αισθητήρας μύζησης καταγράφει με τον ίδιο ρυθμό μειωμένες τιμές και το αντίστροφο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στα 1.50m βάθος μετά τη διεξαγωγή του πειράματος διαβροχής το έδαφος διατήρησε σε χαμηλά επίπεδα τη μύζηση του, σε σχέση με την αρχική (προ πειράματος διαβροχής), που ήταν στα 750kPa, ακόμη και μετά την πάροδο τριών ξηρών περιόδων. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, τόσο οι αισθητήρες μύζησης στα 0.75m, όσο και στα 1.50m, παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης των περίπου 2 και 6 μηνών αντίστοιχα, σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του εδάφους (χρονική διαφορά μεταξύ ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-βαθμού κορεσμού και μέγιστης ποσότητας βροχόπτωσης).

Οι τιμές βαθμού κορεσμού του Σχήματος 6.6β είναι αυτές που αντιστοιχούν στις μετρήσεις ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας που καταγράφονται από το αυτόματο καταγραφικό Em50, χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία και βάσει της εργοστασιακής του βαθμονόμησης.



Σχήμα 6.6: Σταθμός μετρήσεων στην Πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Κύπρου: α) μύζηση εδαφικού ιστού, β) βαθμός κορεσμού και γ) διορθωμένος βαθμός κορεσμού.

Εν τη απουσία βαθμονόμησης των αισθητήρων ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας GS3 για το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό, οι καταγραφές αντιπροσωπεύουν στην ουσία σχετικές μεταβολές της εδαφικής υγρασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό του αισθητήρα που τοποθετήθηκε στα 1.50m βάθος, ο οποίος όταν βρισκόταν σε κατάσταση μερικού κορεσμού στις ξηρές περιόδους (μύζηση περίπου κάποιες εκατοντάδες kPa) οι τιμές του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας κυμαίνονταν γύρω από το 0.5. Δεδομένου ότι ο δείκτης πόρων της συγκεκριμένης μάργας είναι μεταξύ 0.65 και 0.80, αυτή η τιμή ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας δίνει τιμές βαθμού κορεσμού 112%-127% κάτι που είναι φυσικώς αδύνατο. Οι τιμές ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας που δίνει ο αισθητήρας στα 1.5m βάθος είναι περίπου διπλάσιες από τις πραγματικές, γεγονός που υποδηλώνει ασυνήθιστα μεγάλες τιμές αγωγιμότητας, οι οποίες πιθανώς να οφείλονται στην παρουσία των οξειδώσεων που χαρακτηρίζουν τις ασυνέχειες που συχνά παρατηρούνται στη μάργα Λευκωσίας (Σχήμα 6.7). Ως εκ τούτου, οι τιμές βαθμού κορεσμού διορθώνονται στο Σχήμα 6.6γ, πολλαπλασιάζοντας τις τιμές του Σχήματος 6.6β με ένα συντελεστή αναγωγής, έτσι ώστε η μέγιστη τιμή που καταγράφεται κατά το πείραμα διαβροχής (συνθήκες πλήρους κορεσμού) να αντιστοιχεί σε $S_r=100\%$.



Σχήμα 6.7: Παρουσία οξειδώσεων σε φυσική ασυνέχεια δείγματος μάργας Λευκωσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ

7.1 Γεωμετρία Μοντέλου και Ιδιότητες Εδαφικών Στρωμάτων

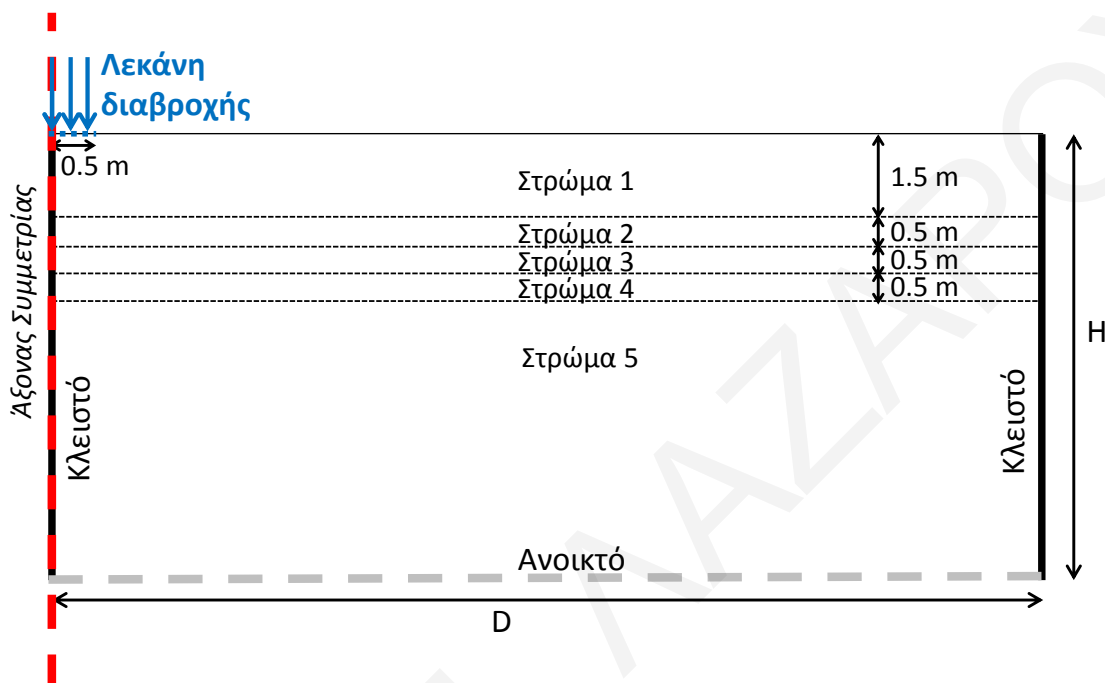
Το πείραμα διαβροχής στο πεδίο πραγματοποιήθηκε με σκοπό να γίνει μια εκτίμηση των ισοδύναμων (ή φαινόμενων) υδραυλικών ιδιοτήτων της μάργας Λευκωσίας μέσω αντίστροφης προσομοίωσης (back-calculation analysis), με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D. Η γεωμετρία του μοντέλου, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως αξονοσυμμετρικό δύο διαστάσεων (2D), με τον άξονα συμμετρίας να περνά από το κέντρο της λεκάνης διαβροχής. Το ύψος (H) του μοντέλου είναι 8m και το μήκος (D) 40m. Τα πλευρικά σύνορα (το αριστερό στο σχήμα είναι ο άξονας συμμετρίας) ορίστηκαν ως κλειστά σύνορα (μηδενικής ροής κάθετα στο σύνορο), ενώ το κάτω σύνορο αφέθηκε ανοικτό με σταθερό υδραυλικό ύψος (constant head boundary condition). Κατά τις φάσεις διαβροχής, επιβλήθηκε σταθερό υδραυλικό φορτίο (constant hydraulic head) στο τμήμα του πάνω συνόρου που αντιστοιχεί στη λεκάνη διαβροχής, ενώ για τις φάσεις μη διαβροχής το συγκεκριμένο τμήμα αφέθηκε ανοικτό (free seepage) χωρίς την επιβολή οποιουδήποτε υδραυλικού φορτίου.

Το εδαφικό προφίλ χωρίστηκε σε πέντε διαφορετικά στρώματα (Σχήμα 7.1), επιτρέποντας τον καθορισμό διαφορετικών παραμέτρων με αύξηση του βάθους, έτσι ώστε να αντικατοπτριστούν οι πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο (δηλ. μείωση της υδραυλικής διαπερατότητας με το βάθος λόγω κλεισίματος των ρωγμών).

Αφού καθορίστηκε το εδαφικό προφίλ μαζί με τις συνοριακές συνθήκες, διεξήχθησαν προσομοιώσεις δοκιμής-σφάλματος (trial and error simulations) στοχεύοντας να αναπαραχθεί η χρονοϊστορία του βαθμού κορεσμού, όπως καταγράφηκε από τους αισθητήρες στα 0.75m και 1.5m βάθος. Αυτό επιτεύχθηκε με αλλαγή:

1) του επί τόπου συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση υπό συνθήκες πλήρους κορεσμού ($k_{y,sat}$),

- 2) του λόγου του οριζόντιου προς κάθετου συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας στο πεδίο σε συνθήκες πλήρους κορεσμού ($k_{x,sat} / k_{y,sat}$) και
- 3) της εξάρτησης της υδραυλικής διαπερατότητας του μη κορεσμένου εδάφους με τη μύζηση.



Σχήμα 7.1: Γεωμετρία του μοντέλου και συνοριακές συνθήκες για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής.

Η εξάρτηση της υδραυλικής διαπερατότητας με τον βαθμό κορεσμού (S_r), ως εκ τούτου και της μύζησης, περιγράφεται στο Plaxis μέσω της Εξίσωσης 7.1 (van Genuchten, 1980, Galavi, 2010) ως εξής:

$$k(s) = k_{sat} \times S_{rel}^{g_l} \left[1 - \left(1 - S_{rel}^{\left(\frac{-1}{g_c} \right)} \right)^{-g_c} \right]^2 \quad \text{Εξίσωση 7.1}$$

όπου k_{sat} η υδραυλική διαπερατότητα του εδάφους σε συνθήκες πλήρους κορεσμού (δηλ. $S_r=100\%$ και $s=0$ kPa) και με τον σχετικό βαθμό κορεσμού S_{rel} να δίδεται από την Εξίσωση 7.2:

$$S_{rel} = \frac{S_r(s) - S_{r,res}}{1 - S_{r,res}} \quad \text{Εξίσωση 7.2}$$

Το g_l είναι η παράμετρος υλικού που ελέγχει τη μείωση της διαπερατότητας k με μείωση του βαθμού κορεσμού S_r . Το g_l ανήκει στην ομάδα παραμέτρων των οποίων οι τιμές

προσδιορίστηκαν με αντίστροφη προσομοίωση (back calculation analysis) με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος (trial and error).

Για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής θεωρήθηκε ότι η χαρακτηριστική καμπύλη (SWCC) της σκληρής μάργας Λευκωσίας (δείγματα που λήφθηκαν από το σκάμμα μέχρι 1.5m βάθος) που προσδιορίστηκε πειραματικά με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_n=1.37$ και $S_{r,res}=0$, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζεται σε ολόκληρο το εδαφικό προφίλ του Σχήματος 7.1. Η απλοποιημένη αυτή θεώρηση έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα των αναλύσεων προσομοίωσης επειδή οι πιο σημαντικές αλλαγές στην υγρασία του εδάφους, εξαιτίας της διήθησης του νερού από τη λεκάνη διαβροχής, σημειώνονται στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Επίσης, τα δείγματα που συλλέχθηκαν σε βάθη μεγαλύτερα των 5m είχαν ήδη υψηλό βαθμό κορεσμού, γεγονός που οφείλεται στην τριχοειδή ανύψωση υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα που συναντάται σε ρηχά βάθη (περίπου 7m). Ως εκ τούτου, η κατάσταση του εδάφους βρίσκεται στον ανώτερο κλάδο της χαρακτηριστικής καμπύλης (SWCC), γεγονός που σημαίνει ότι με αύξηση του βαθμού κορεσμού S_r θα παρατηρηθούν πολύ μικρές μεταβολές μύζησης. Παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης για τιμές g_a ίσες με 0.02, 0.05 και 0.06 (τιμές οι οποίες μετατοπίζουν την SWCC προς τα αριστερά), θεωρώντας έμμεσα με αυτό τον τρόπο μικρότερη επίδραση της ωσμωτικής μύζησης στην υδατική ροή από ότι η μύζηση του εδαφικού ιστού. Μάλιστα, για τιμές 0.05-0.06 η επίδραση της ωσμωτικής μύζησης είναι μηδενική.

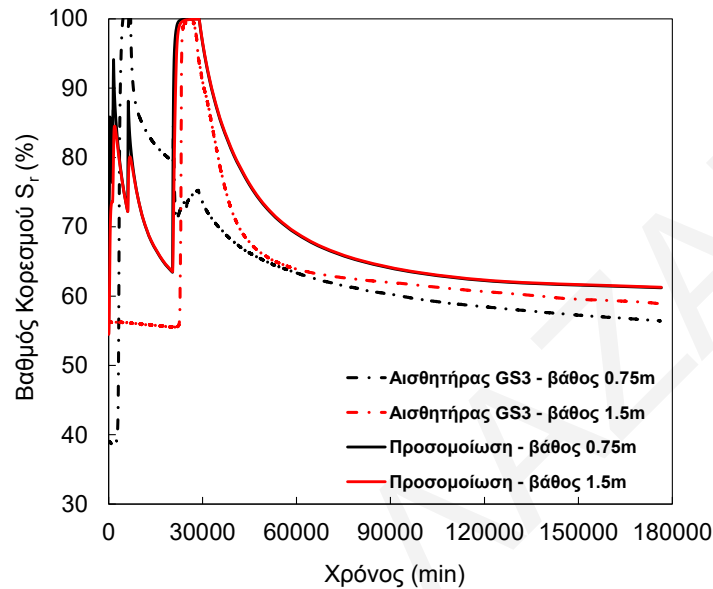
Για την εγκατάσταση στο προσομοίωμα, πριν την έναρξη των φάσεων διαβροχής των αρχικών συνθηκών μύζησης και υγρασίας που παρατηρήθηκαν στο πεδίο (δεδομένης της παρουσίας του υδροφόρου ορίζοντα στα 7m βάθος), ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε αρχικά στα 3m βάθος και στη συνέχεια επιβλήθηκε τιμή μύζησης στην επιφάνεια του εδάφους που αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού $S_r=55\%$ (βαθμός κορεσμού αποξηραμένης κρούστας κατά τη θερινή περίοδο). Με την εφαρμογή αυτής της μύζησης, η υγρασία αποβάλλεται από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα και συμβαίνει ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Η μύζηση στην επιφάνεια του εδάφους επιβάλλεται για αρκετά εικονικά έτη (10 με 12) μέχρι επίτευξης σταθερής κατάστασης (steady state) και σταθεροποίησης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στα 7m βάθος περίπου.

7.2 Αντίστροφη ανάλυση πειράματος διαβροχής (Back-calculation analysis)

Για την αντίστροφη ανάλυση του πειράματος διαβροχής έγιναν πολλές δοκιμές σφάλματος (trial and error) με στόχο την, όσο γίνεται, καλύτερη προσέγγιση των χρονοϊστοριών του βαθμού κορεσμού, όπως αυτές προέκυψαν από τις καταγραφές των αισθητήρων GS3 που εγκαταστάθηκαν στο πεδίο (Σχήμα 6.4), από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, βασικός στόχος της διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος ήταν να επιτευχθεί μια καλή προσέγγιση του κλάδου προοδευτικού αποκορεσμού που ακολουθεί τον πλήρη κορεσμό που συνέβη στα 1.5m βάθος σε χρόνο ίσο με 23000 λεπτά (16 μέρες από την έναρξη του πειράματος διαβροχής). Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις των αισθητήρων μύζησης εδαφικού ιστού MPS-6 δεν λήφθηκαν υπόψη στις αντίστροφες αναλύσεις, εξαιτίας της εγγενούς μεγάλης χρονικής υστέρησης (της τάξεως αρκετών ημερών) που παρουσιάζουν στις μεταβολές μύζησης (Aitchison & Richards, 1965, Ridley, 1993, Pullin, 2004), κυρίως κατά τον αποκορεσμό εδαφών με πολύ μικρή διαπερατότητα (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Οι τιμές υδραυλικής διαπερατότητας που μετρήθηκαν εργαστηριακά σε αδιατάρακτα δείγματα της σκληρής μάργας Λευκωσίας αποτέλεσαν οδηγό για την επιλογή τιμών παραμέτρων των αναλύσεων δοκιμής-σφάλματος, με το σκεπτικό ότι η υδραυλική διαπερατότητα στο πεδίο δεν μπορεί να είναι μικρότερη της διαπερατότητας των αέριων δειγμάτων που εξετάστηκαν στο εργαστήριο. Οπότε, σε όλες τις αναλύσεις η υδραυλική διαπερατότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση σε συνθήκες πλήρους κορεσμού $k_{y,sat}$ για το κατώτερο εδαφικό στρώμα (στρώμα 5 στο Σχήμα 7.1) ορίστηκε ίση με 9.8×10^{-8} cm/sec, η οποία μετρήθηκε στις δοκιμές διαπερατότητας στο εργαστήριο. Επίσης, θεωρήθηκε ότι οι υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν στο στρώμα 5 είναι ισότροπες, δηλ. η υδραυλική διαπερατότητα στην οριζόντια διεύθυνση σε συνθήκες πλήρους κορεσμού ισούται με την υδραυλική διαπερατότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση ($k_{y,sat} = k_{x,sat} = 9.8 \times 10^{-8}$ cm/sec). Για τα στρώματα 1 έως 4, η $k_{y,sat}$ κυμαινόταν στις διάφορες αναλύσεις από 2 μέχρι 800 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του στρώματος 5, ενώ ο λόγος $k_{x,sat}/k_{y,sat}$ από 0.01 έως 1.0. Η τιμή της $k_{x,sat}$ της αποξηραμένης κρούστας (desiccated crust) αναμένεται να είναι μικρότερη από την $k_{y,sat}$ επειδή οι ρωγμές συρρίκνωσης είναι πιο διαδεδομένες στην κατακόρυφη διεύθυνση, παρά στην οριζόντια (Konrad & Ayad, 1997). Τέλος, οι τιμές της παραμέτρου g_i της Εξίσωσης 7.1 κυμαίνονταν από -7.0 έως +1.0. Οι τιμές αυτές παράγουν 15 με 3000 φορές, αντίστοιχα, μικρότερη διαπερατότητα στην αποξηραμένη κρούστα για $S_r=55\%$ από ότι σε πλήρη κορεσμό ($S_r=100\%$).

Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η καλύτερη δυνατή προσέγγιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τις καταγραφές των αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν στα δύο βάθη (0.75m και 1.5m) του σκάμματος. Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την επίτευξη αυτής της απόκρισης φαίνονται στον Πίνακα 7.1.



Σχήμα 7.2: Καταγραφή χρονοϊστορίας βαθμού κορεσμού σε βάθη 0.75m και 1.5m και αποτελέσματα βέλτιστης δυνατής προσέγγισης με προσομοίωση σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 7.1: Τιμές υδραυλικών ιδιοτήτων που προέκυψαν από τις αντίστροφες αναλύσεις.

Στρώμα	Δείκτης πόρων e	g_l	$k_{y,sat}$ (m/sec)	$k_{x,sat}$ (m/sec)	$k_{y,sat} / k_{x,sat}$
1	0.68	-5.0	4.05×10^{-7}	4.05×10^{-9}	100
2	0.68	-5.0	4.05×10^{-7}	4.05×10^{-9}	100
3	0.68	-5.0	5.21×10^{-8}	2.60×10^{-9}	20
4	0.68	-5.0	5.21×10^{-9}	2.60×10^{-9}	2
5	0.79	-5.0	9.80×10^{-10}	9.80×10^{-10}	1

Η τιμή της $k_{y,sat}$ για τα στρώματα 1 και 2 της αποξηραμένης κρούστας (4.05×10^{-7} m/sec) είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την υδραυλική διαπερατότητα που μετρήθηκε στο εργαστήριο σε αδιατάρακτο δείγμα (2.60×10^{-9} m/sec), γεγονός που είναι σύμφωνο με τις παρατηρήσεις των Ankeny et al. (1991), οι οποίοι με πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι η υδραυλική διαπερατότητα λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών δύναται να είναι μέχρι και δύο

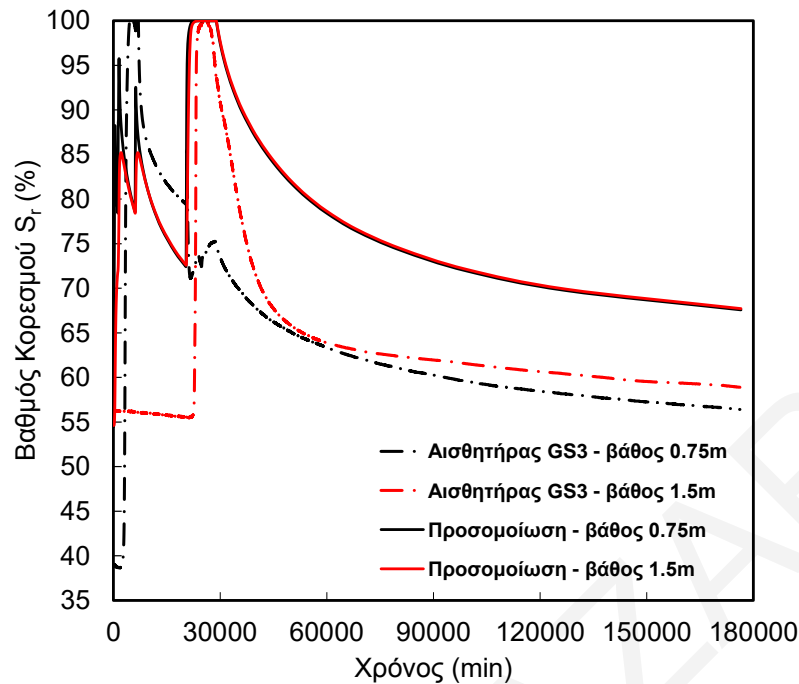
τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν που μετράται στο εργαστήριο. Επιπρόσθετα, οι Tsaparas & Toll (2002) υποστηρίζουν ότι η υδραυλική διαπερατότητα της αποξηραμένης κρούστας σε αριθμητικά μοντέλα πρέπει να είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη διαπερατότητα του εδάφους που βρίσκεται κάτω από αυτήν.

Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται παράδειγμα με αποτελέσματα ανάλυσης με μη βέλτιστες τιμές παραμέτρων, συγκεκριμένα με $g_1 = -2$ αντί για -5 και τις υπόλοιπες τιμές όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνουν παρεμφερείς τιμές βαθμού κορεσμού όπως και η ανάλυση του Σχήματος 7.2, ενώ εξακολουθούν να δίνουν χαμηλότερες μέγιστες τιμές από αυτές που κατέγραψαν οι αισθητήρες πεδίου. Εντούτοις, όσον αφορά τον κλάδο αποκορεσμού, η συγκεκριμένη ανάλυση αδυνατεί να προσομοιώσει τις καταγραφές των αισθητήρων πεδίου, γεγονός που αποκλίνει από τον βασικό στόχο της διαδικασίας, ο οποίος ήταν η επίτευξη μιας καλής προσέγγισης του προοδευτικού κλάδου αποκορεσμού, ο οποίος ακολουθεί τον πλήρη κορεσμό των αισθητήρων.

Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στα διάφορα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις δοκιμής-σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.

Πίνακας 7.2: Τιμές παραμέτρων που εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που δίνουν τα αποτελέσματα προσομοίωσης του πειράματος διαβροχής του Σχήματος 7.3.

Στρώμα	Δείκτης πόρων e	g_1	$k_{y,sat}$ (m/sec)	$k_{x,sat}$ (m/sec)	$k_{y,sat} / k_{x,sat}$
1	0.68	-2.0	4.63×10^{-7}	4.63×10^{-9}	100
2	0.68	-2.0	3.76×10^{-7}	3.76×10^{-9}	100
3	0.68	-2.0	3.33×10^{-8}	4.77×10^{-10}	70
4	0.68	-2.0	5.20×10^{-9}	2.60×10^{-9}	2
5	0.79	-2.0	9.80×10^{-10}	9.80×10^{-10}	1



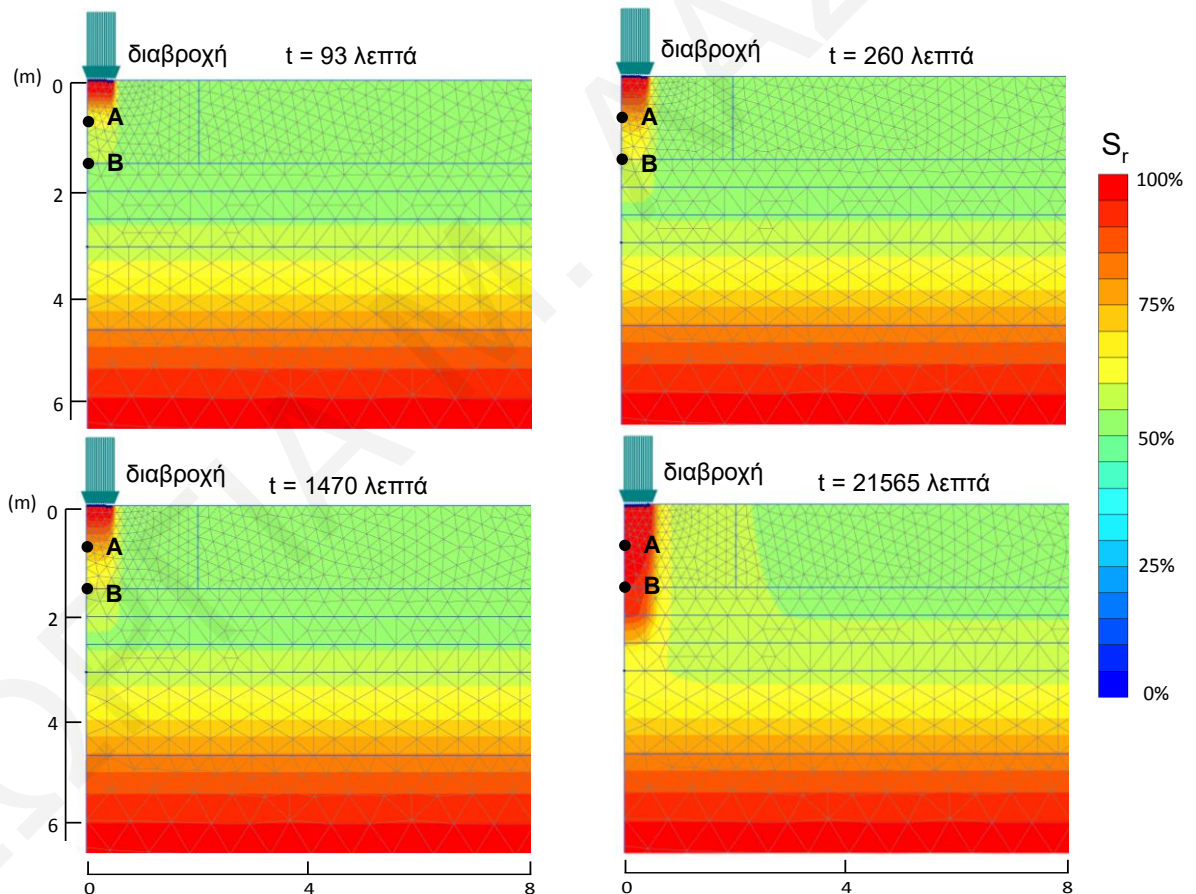
Σχήμα 7.3: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.004\text{m/day}$, $k_y=0.04\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και $k_{y,sat}/k_{x,sat}$ 100, 70, 2 και 1 για τα στρώματα 2-5 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται η διήθηση της υγρασίας στο έδαφος σε διαγράμματα (contours) της εξέλιξης του βαθμού κορεσμού S_r με τον χρόνο. Ο αισθητήρας σε βάθος 0.75m (A) ξεκινά να καταγράφει μεταβολές υγρασίας σε χρόνο ίσο με 93 λεπτά (δηλ. από την πρώτη κιάλας φάση διαβροχής του πειράματος) ενώ ο αισθητήρας στο 1.5m βάθος (B) σε χρόνο ίσο με 260 λεπτά (φάση 3-διαβροχή). Και οι δύο αισθητήρες δείχνουν πλήρη κορεσμό με την ολοκλήρωση της φάσης 13 (21565 λεπτά), δηλ. 15 μέρες μετά την έναρξη του πειράματος. Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται ότι ο βολβός του βαθμού κορεσμού είναι σχετικά στενός και το νερό διαδίδεται στην κάθετη κυρίως διεύθυνση με μια πολύ μικρή πλευρική διάχυση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις πολύ μικρότερες τιμές υδραυλικής διαπερατότητας που τίθενται στην οριζόντια διεύθυνση, σε σχέση με την κατακόρυφη, για τα στρώματα 1 και 2 ($k_{y,sat}/k_{x,sat} = 100$).

Όσον αφορά τον κλάδο ξήρανσης που ακολουθεί το σημείο στο οποίο επιτεύχθηκε ο πλήρης κορεσμός του αισθητήρα στο 1.5m (αισθητήρας B), παρατηρείται ότι υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των δεδομένων καταγραφής του πειράματος διαβροχής και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Πριν από αυτό το σημείο όμως υπάρχει σχετικά μεγάλη απόκλιση των δύο χρονοϊστοριών, παρ' όλες τις προσπάθειες που έγιναν

αλλάζοντας τις παραμέτρους της μάργας Λευκωσίας στις αναλύσεις δοκιμής-σφάλματος. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανώς να οφείλονται σε κάποιες από τις απλοποιητικές παραδοχές που έγιναν όπως:

1. η θεώρηση ότι το φαινόμενο μετανάστευσης της υγρασίας ελέγχεται μόνο από τη ροή νερού, η οποία ακολουθεί τον νόμο του Darcy, αγνοώντας τις επιδράσεις της μετανάστευσης της αέριας φάσης και της ενυδάτωσης των πλέον ενεργών αργιλικών ορυκτών (π.χ. μοντμοριλλονίτης) της μάργας,
2. η θεώρηση ότι η υστέρηση που παρουσιάζεται στην SWCC κατά τους κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης δεν έχει επίδραση στο πρόβλημα που μελετάται,
3. δεν λήφθηκε υπόψη το κλείσιμο των ρωγμών λόγω της διαβροχής του εδάφους, γεγονός που επιφέρει πρόσθετη υστέρηση στην εξάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας από τη μύζηση.



Σχήμα 7.4: Εξέλιξη του πεδίου του βαθμού κορεσμού εντός του υπεδάφους όπως προέκυψε από προσομοίωση του πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Ο λόγος για τον οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η υστέρηση στην SWCC είναι ότι το πρόγραμμα Plaxis δεν δίνει τέτοια δυνατότητα, δηλαδή η SWCC στο Plaxis είναι σταθερή καμπύλη. Ως εκ τούτου, η χαρακτηριστική καμπύλη της σκληρής μάργας Λευκωσίας που χρησιμοποιήθηκε στο Plaxis προσαρμόστηκε σε δεδομένα από δείγματα που ξεραθήκαν και υγράθηκαν από μια αρχική κατάσταση με βαθμό κορεσμού 40%-60% (Σχήμα 5.25). Συνεπώς, η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να θεωρηθεί ως μια μέση SWCC. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με εργαστηριακές μετρήσεις (Loukidis et al., 2020), το πλάτος της υστέρησης προκύπτει σχετικά μικρό σε δείγματα μάργας Λευκωσίας πλαστικότητας παραπλήσιας ($PI=22-32$) της σκληρής μάργας που εξετάζεται εδώ ($PI=19-30$). Συγκεκριμένα, ο κλάδος ύγρανσης εμφανίζεται μετατοπισμένος προς τα αριστερά στο διάγραμμα S_r vs. S με μέγιστη απόκλιση, από τον κλάδο ξήρανσης, της τάξεως του 40%-50% σε όρους μύζησης (δηλ. μύζηση 40%-50% μικρότερη στον κλάδο ύγρανσης από ότι στον κλάδο ξήρανσης για αυτή την τιμή βαθμού κορεσμού). Αντίθετα, στην περίπτωση καφέ (χακί) μάργας Λευκωσίας υψηλότερης πλαστικότητας ($PI=50$) από το παλαιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου, η απόκλιση των δυο κλάδων είναι πολύ μεγαλύτερη (10 φορές μικρότερη μύζηση στον κλάδο ύγρανσης από ότι στον κλάδο ξήρανσης για αυτή την τιμή βαθμού κορεσμού).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΓΕΝΙΚΗ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ

8.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του πειράματος διαβροχής και την εκτίμηση των τιμών των υδραυλικών ιδιοτήτων της μάργας στο πεδίο, διεξήχθησαν σειρές παραμετρικών αναλύσεων μετανάστευσης της υγρασίας κάτω από αβαθή θεμελίωση (γενική κοιτόστρωση) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τα κλιματολογικά δεδομένα της περιόδου Μάιος 2014 - Σεπτέμβριος 2015. Η περίοδος αυτή ξεκινά με ένα ξηρό καλοκαίρι, ακολουθούμενο από ένα βροχερό χειμώνα και κλείνει και πάλι με ένα ξηρό καλοκαίρι.

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως στόχο την κατανόηση του φαινομένου μετακίνησης της εδαφικής υγρασίας από και προς το έδαφος θεμελίωσης. Η κατανόηση αυτού του φαινομένου είναι καθοριστικής σημασίας για τη μελέτη και αντιμετώπιση της επίπτωσης της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους θεμελίωσης στις κατασκευές. Συγκεκριμένα, με τις παρούσες παραμετρικές αναλύσεις εξετάζεται η επίδραση του βάθους θεμελίωσης, των υδραυλικών χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων συγκράτησης νερού της μάργας Λευκωσίας, αλλά και της παρουσίας ή απουσίας ενός ρηχού υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση του σχήματος της θεμελίωσης (κυκλικό σχήμα ή θεμελιολωρίδα), καθώς και δύο μέθοδοι «εξυγίανσης» του εδάφους (προδιαβροχή και αντικατάσταση εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό) που χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη για τη μείωση των δυσμενών επιπτώσεων που προκύπτουν εξαιτίας της διόγκωσης του εδάφους.

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το στάδιο της μελέτης και παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι αποκλειστικά αναλύσεις ροής. Δηλαδή απουσιάζει η μηχανική απόκριση (παραμορφώσεις και ανάπτυξη τάσεων) της στερεάς φάσης και, κατά συνέπεια, αγνοούνται οι επιδράσεις της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης. Ωστόσο, η επίδραση των φαινομένων αυτών στη μετανάστευση υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης είναι μικρή δεδομένου, ότι τυχόν αλλαγές στον δείκτη

πόρων του υλικού λόγω εξωτερικών μηχανικών δράσεων δεν δύνανται να δώσουν σημαντική μεταβολή της υδραυλικής διαπερατότητας υπό δεδομένες συνθήκες κορεσμού. Για παράδειγμα, μια μείωση δείκτη πόρων από 0.7 σε 0.69 λόγω αύξησης της ολικής τάσης από 100kPa σε 200kPa προκαλεί, σύμφωνα με το Σχήμα 5.23, σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, μια μείωση στον συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας κατά 12%, η οποία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σύγκριση με τις διαφορές τάξης μεγέθους που μπορούν να προκαλέσουν οι εποχιακές διακυμάνσεις μύζησης μέσω της Εξίσωσης 5.6. Επιπλέον, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω των φορτίων μιας κατασκευής εδραζόμενης σε γενική κοιτόστρωση και της αλληλεπίδρασης του εδάφους με αυτή είναι εν γένει μικρές (της τάξεως των μερικών δεκάδων kPa) και είναι απίθανο να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στον δείκτη πόρων ενός σκληρού εδάφους, όπως η μάργα Λευκωσίας, όταν μάλιστα αυτή είναι μερικώς κορεσμένη.

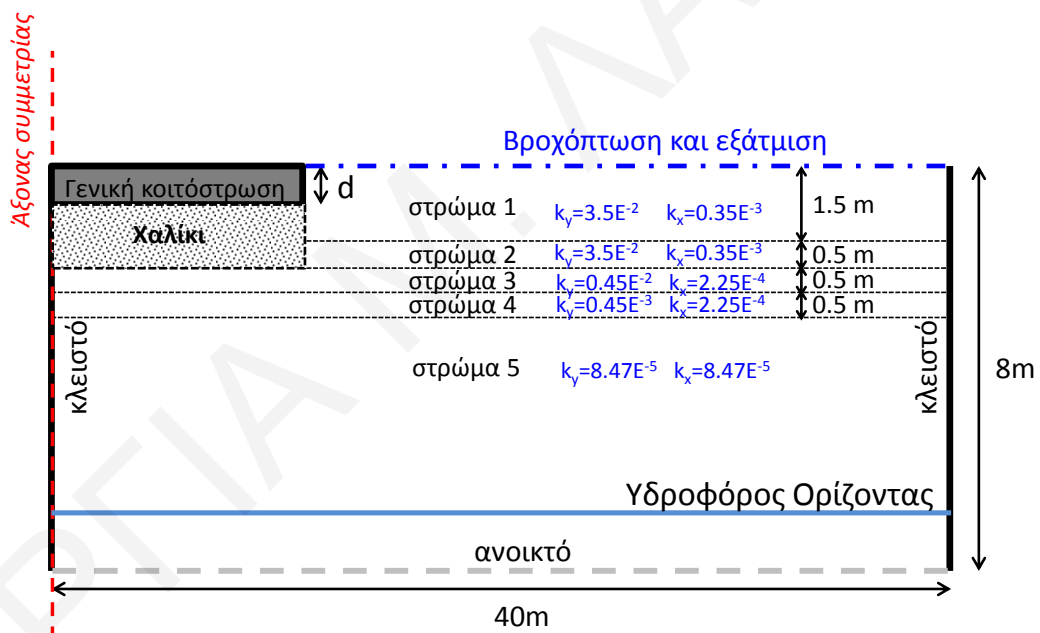
8.2 Αριθμητικό Μοντέλο και Συνοριακές Συνθήκες

Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε για τις παραμετρικές αναλύσεις είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής (Σχήμα 7.1), με τη διαφορά ότι στην επιφάνεια του εδάφους έχει πλέον εγκατασταθεί μια αβαθής πλάκα θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση) διαμέτρου ή πλάτους 20m, που λειτουργεί ως ένα υδραυλικά αδιαπέρατο σώμα. Χάρη στη συμμετρία του προβλήματος, μόνο το ήμισυ της πλάκας περιλαμβάνεται μέσα στον τομέα ανάλυσης, με το κέντρο της να βρίσκεται στο αριστερό σύνορο του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή στον άξονα συμμετρίας (Σχήμα 8.1). Το πάνω σύνορο της πλάκας θεμελίωσης θεωρείται ότι βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια του εδάφους. Το πάχος του εδαφικού προφίλ ($H=8\text{m}$) είναι αρκετό ώστε να μπορεί να οριστεί ο υδροφόρος ορίζοντας σε βάθος 7m και το πλάτος ($D=40\text{m}$) τόσο ευρύ, όσο να είναι εφικτή η ανάκτηση των συνθηκών ελεύθερου πεδίου (free field) στο δεξί άκρο του μοντέλου, το οποίο βρίσκεται μακριά από την πλάκα θεμελίωσης. Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με τις υδραυλικές συνοριακές συνθήκες.

Οι σειρές παραμετρικών αναλύσεων δομήθηκαν έτσι ώστε κάθε φορά να αλλάζει μια εκ των παραμέτρων του προβλήματος, ώστε να εξεταστεί η επίδρασή της στο φαινόμενο μετανάστευσης της υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης. Αρχικά μελετήθηκε το πως επηρεάζει η παράμετρος g_a της εξίσωσης van Genuchten (Εξίσωση 5.6), η οποία ελέγχει

τη θέση της χαρακτηριστικής καμπύλης SWCC του υλικού (μετακίνησή της δεξιά-αριστερά στο διάγραμμα). Οι περισσότερες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τιμή g_a ίση με 0.016 (υπόθεση ότι ολική μύζηση αυτούσια ελέγχει τα φαινόμενα ροής), ενώ διεξήχθησαν αναλύσεις και για τιμές 0.05 (υπόθεση ότι τα φαινόμενα ροής εξαρτώνται αποκλειστικά από τη μύζηση εδαφικού ιστού) και 0.005 (τυχαία ακραία τιμή που θα αντιστοιχούσε σε ένα έδαφος μεγαλύτερης πλαστικότητας από ότι η σκληρή μάργα Λευκωσίας).

Στις αναλύσεις θεωρήθηκαν επίσης τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου g_i , η οποία ελέγχει τον ρυθμό μείωσης της υδραυλικής διαπερατότητας με αύξηση της μύζησης (Εξίσωση 7.1). Οι τιμές -2, -5 και -7 που θεωρήθηκαν δίνουν τιμές υδραυλικής διαπερατότητας (k_y) σε ακόρεστη κατάσταση στα ανώτερα στρώματα μάργας (όπου ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι ίσος με 55%-60% μέχρι και τα 2m βάθος, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις πεδίου) ίσες με 0.3%, 2.0% και 6.0% της $k_{y,sat}$, αντίστοιχα.

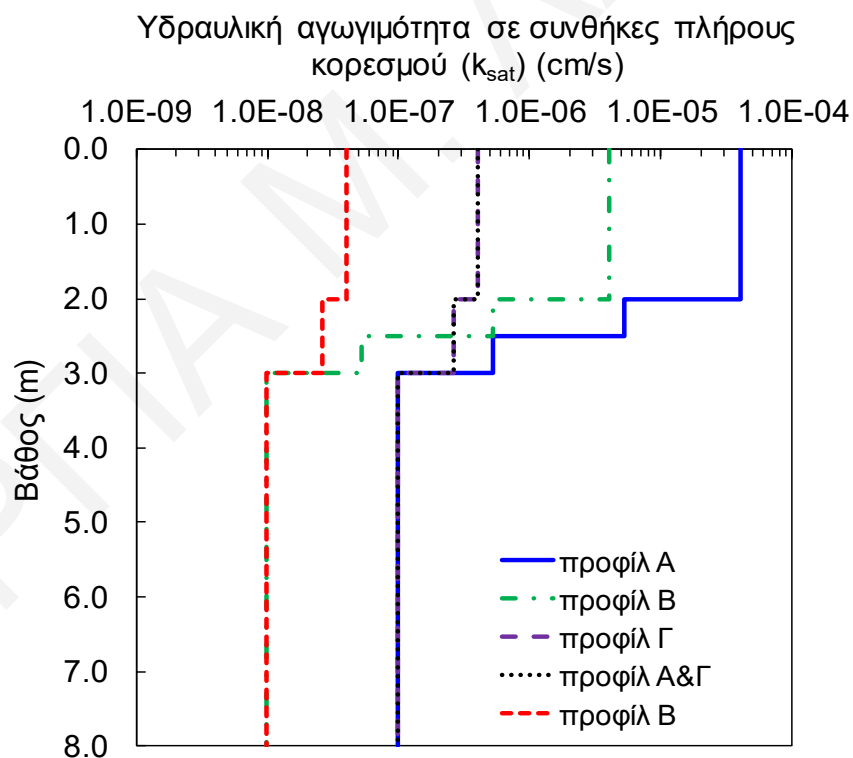


Σχήμα 8.1: Εδαφικό προφίλ και συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις ροής παρουσία γενικής κοιτόστρωσης.

Σε ότι αφορά στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά προφίλ κατανομής υδραυλικής αγωγιμότητας (σε συνθήκες πλήρους κορεσμού) με το βάθος. Το προφίλ Α αφορά στις τιμές που προέκυψαν μέσω της αντίστροφης ανάλυσης του πειράματος διαβροχής που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο. Το προφίλ Β αποτελείται από τιμές οι οποίες είναι μιας τάξης μεγέθους μικρότερες (έδαφος μικρότερης διαπερατότητας) από τις τιμές του προφίλ Α. Το προφίλ Γ έχει τις ίδιες τιμές με το προφίλ

A, με τη διαφορά ότι οι τιμές κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας $k_{y,sat}$ και οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας $k_{x,sat}$ τίθενται ίσες σε κάθε στρώμα (π.χ. $k_{y,sat,στρώματος1}=k_{x,sat,στρώματος1}$, κ.ο.κ.). Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της $k_{y,sat}$ στα ανώτερα στρώματα είναι σημαντικά μειωμένη και σχεδόν ίση με αυτή σε μεγαλύτερα βάθη, ως να μην υπάρχουν ρωγμές συρρίκνωσης στην αποξηραμένη κρούστα (desiccation crust).

Στις παραμετρικές αναλύσεις εξετάστηκαν και δύο μέθοδοι εξυγίανσης του εδάφους: 1) η προδιαβροχή του εδάφους θεμελίωσης και 2) η αντικατάσταση του εδάφους θεμελίωσης ως ένα βάθος με χονδρόκοκκο υλικό. Για την πρώτη περίπτωση, η προδιαβροχή του εδάφους προσομοιώθηκε με την επιβολή σταθερού υδραυλικού φορτίου (hydraulic head) ύψους 20cm στο σημείο της επιφάνειας του εδάφους όπου θα εδραστεί η πλάκα θεμελίωσης για περίοδο 20 ημερών. Η περίοδος αυτή ακολουθήθηκε από 10 ημέρες χωρίς την επιβολή οποιουδήποτε υδραυλικού φορτίου (μηδενική τιμή) πριν την εγκατάσταση της πλάκας θεμελίωσης και άλλες 10 ημέρες μετά την εγκατάσταση της πλάκας, αλλά πριν την εισαγωγή κλιματικών δεδομένων.



Σχήμα 8.2: Εδαφικά προφίλ κατακόρυφης και οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις ακόρεστης ροής.

Στις αναλύσεις με αντικατάσταση του εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό θεωρήθηκε ότι το έδαφος κάτω από τη θεμελίωση σκάφθηκε και αντικαταστάθηκε με μείγμα χαλικιού και

άμμου σε στρώση πάχους 1m έως 2m. Η χαρακτηριστική καμπύλη (SWCC) του εν λόγω εδάφους, καθώς και τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά, λήφθηκαν από την εργασία των Lee et al. (2011) (Πίνακας 8.1).

Σε ότι αφορά στο πάχος της πλάκας θεμελίωσης, το οποίο καθορίζει στις αναλύσεις και το βάθος της στάθμης θεμελίωσης, τέθηκε στις πλείστες αναλύσεις ίσο με 0.5m, ενώ κάποιες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με πάχη πλάκας 1.0m και 2.0m, έτσι ώστε να εξεταστεί η επίδραση του βάθους έδρασης.

Πίνακας 8.1: Παράμετροι χαρακτηριστικής καμπύλης και υδραυλικές ιδιότητες χονδρόκοκκου υλικού εξυγίανσης.

Ιδιότητα	Τιμή
g_a	14.1
g_n	1.54
S_{res}	8.9%
g_l	1.0
$k_{y,sat} = k_{x,sat}$	5×10^{-4} m/sec

Τέλος, για να επιτευχθεί ο αρχικός βαθμός κορεσμού (ίσος με 55%) ομοιόμορφα εντός ολόκληρου του εδαφικού προφίλ, στις αναλύσεις χωρίς υδροφόρο ορίζοντα (Υ.Ο.), επιβλήθηκε αρχική τιμή μύζησης (ίδια σε όλο το έδαφος) ανάλογα με τη θεωρούμενη κάθε φορά SWCC. Στις αναλύσεις με παρουσία ρηχού Υ.Ο., ορίστηκε αρχικά ένας αβαθής Υ.Ο. στα 3m βάθος (όπως και στις αναλύσεις που έγιναν για την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής) και ακολούθησε η σταδιακή επιβολή της μύζησης, μόνο στην επιφάνεια του εδάφους αυτή τη φορά και σε διάρκεια πολλών εικονικών ετών, έτσι ώστε να εγκαθιδρυθεί το προφίλ βαθμού κορεσμού που παρατηρήθηκε στο πεδίο, με τον Υ.Ο. στα 7m βάθος υπό σταθερές συνθήκες (steady state). Η τοποθέτηση του κάτω συνόρου, όπου το υδραυλικό φορτίο παραμένει σταθερό, στα 8m βάθος έχει ως αποτέλεσμα να συμβαίνουν αμελητέες εποχιακές διακυμάνσεις της στάθμης του Υ.Ο. στις προσομοιώσεις. Εντούτοις, σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου, οι μεταβολές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που σημειώνονται εποχιακά στην περιοχή μελέτης είναι μικρές, συγκεκριμένα της τάξεως του $\pm 0.25m$ για τυπικά υδρολογικά έτη. Συνεπώς, η διατήρηση της στάθμης του Υ.Ο. πρακτικώς σταθερή με τον καθορισμό του βάθους του κάτω συνόρου στα 8m μπορεί να θεωρηθεί συμβατή με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής.

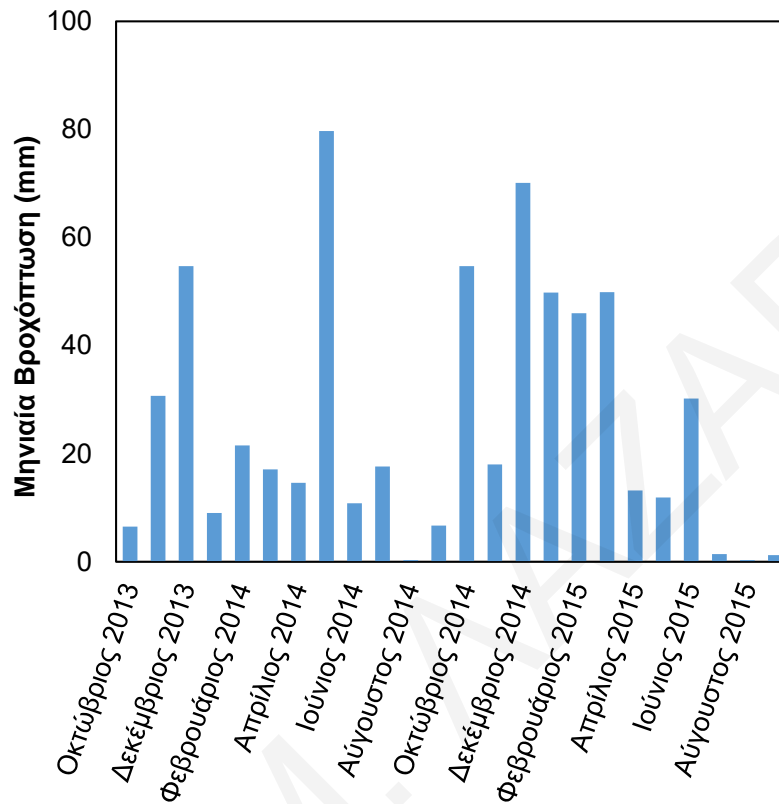
8.3 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Στο πάνω ελεύθερο σύνορο του μοντέλου, δηλαδή στην επιφάνεια εδάφους που δεν καλύπτεται από την πλάκα θεμελίωσης, έχουν επιβληθεί μετεωρολογικά δεδομένα βροχόπτωσης και εξάτμισης στη διάρκεια των βροχερών και ξηρών ημερών αντίστοιχα. Τα δεδομένα βροχόπτωσης λήφθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Αθαλάσσης του Τμήματος Μετεωρολογίας Κύπρου, που βρίσκεται σε απόσταση 1.2km από την περιοχή του σταθμού μέτρησης εδαφικής υγρασίας και μύζησης. Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζονται οι μηνιαίες βροχοπτώσεις για τα υδρολογικά έτη 2013/14 έως 2014/15. Η περίοδος για την οποία εκτελέστηκαν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ροής υπό συνθήκες μερικού κορεσμού, συγκεκριμένα Μάιος 2014 - Σεπτέμβριος 2015, της οποίας περιλαμβάνει μια υγρά περίοδο (Οκτώβριος-Απρίλιος) με βροχόπτωση ελαφρά άνω της μέσης για τα δεδομένα της Λευκωσίας (ύψος βροχόπτωσης 313mm) και μια τυπικά ξηρά περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου (ύψος βροχόπτωσης 44mm).

Κατά τις μέρες όπου το ύψος βροχόπτωσης είναι μηδενικό, επιβάλλεται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους εξάτμιση (αρνητική διήθηση υγρασίας) με τιμές που προκύπτουν από υπολογισμούς με βάση δεδομένα επιφανειακής εξάτμισης λεκάνης (pan evaporation data). Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από μετρήσεις του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών της Κυπριακής Δημοκρατίας, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 800 μέτρων από τη θέση μελέτης. Σύμφωνα με το Σχήμα 8.4 (Metochis, 1977), η ετήσια εξάτμιση λεκάνης ανέρχεται στα 1600mm, τιμή η οποία υπερβαίνει κατά πολύ την ετήσια βροχόπτωση στη Λευκωσία, ακόμη και των πιο βροχερών υδρολογικών ετών, γεγονός που είναι χαρακτηριστικό των περιοχών με ξηρό και ημίξηρο κλίμα. Συνεπώς, στις αναλύσεις χωρίς παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα, έγινε η παραδοχή ότι η συνολική ετήσια εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους πρέπει να είναι ίση με το συνολικό ύψος βροχής που πέφτει κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Σύμφωνα με τους Zhang et al. (2001), αυτό αποτελεί μια δόκιμη θεώρηση, δεδομένου ότι το κλίμα της Λευκωσίας μπορεί να χαρακτηριστεί ξηρό, σύμφωνα με τον Thornthwaite (1948).

Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους υπολογίστηκαν κάνοντας προς τα κάτω προσαρμογή (scale down) των δεδομένων pan evaporation του Metochis (1977) με το να πολλαπλασιάζονται με ένα μειωτικό συντελεστή αναγωγής, έτσι ώστε το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (δηλ. η ετήσια εξάτμιση) να είναι ίση με την ετήσια βροχόπτωση του εκάστοτε υδρολογικού έτους που λαμβάνεται υπόψη (Σχήμα 8.4α). Οι μηνιαίες τιμές εξάτμισης που προέκυψαν κατανέμονται

ομοιόμορφα στις χωρίς βροχόπτωση μέρες ενός δεδομένου μήνα. Τέλος, για να επιτευχθεί ο αρχικός βαθμός κορεσμού (ίσος με 55%) εντός ολόκληρου του εδαφικού προφίλ, επιβλήθηκε αρχική τιμή μύζησης ανάλογα με τη θεωρούμενη κάθε φορά SWCC.



Σχήμα 8.3: Δεδομένα βροχόπτωσης για το υδρολογικό έτος 2013/14 – 2014/15.

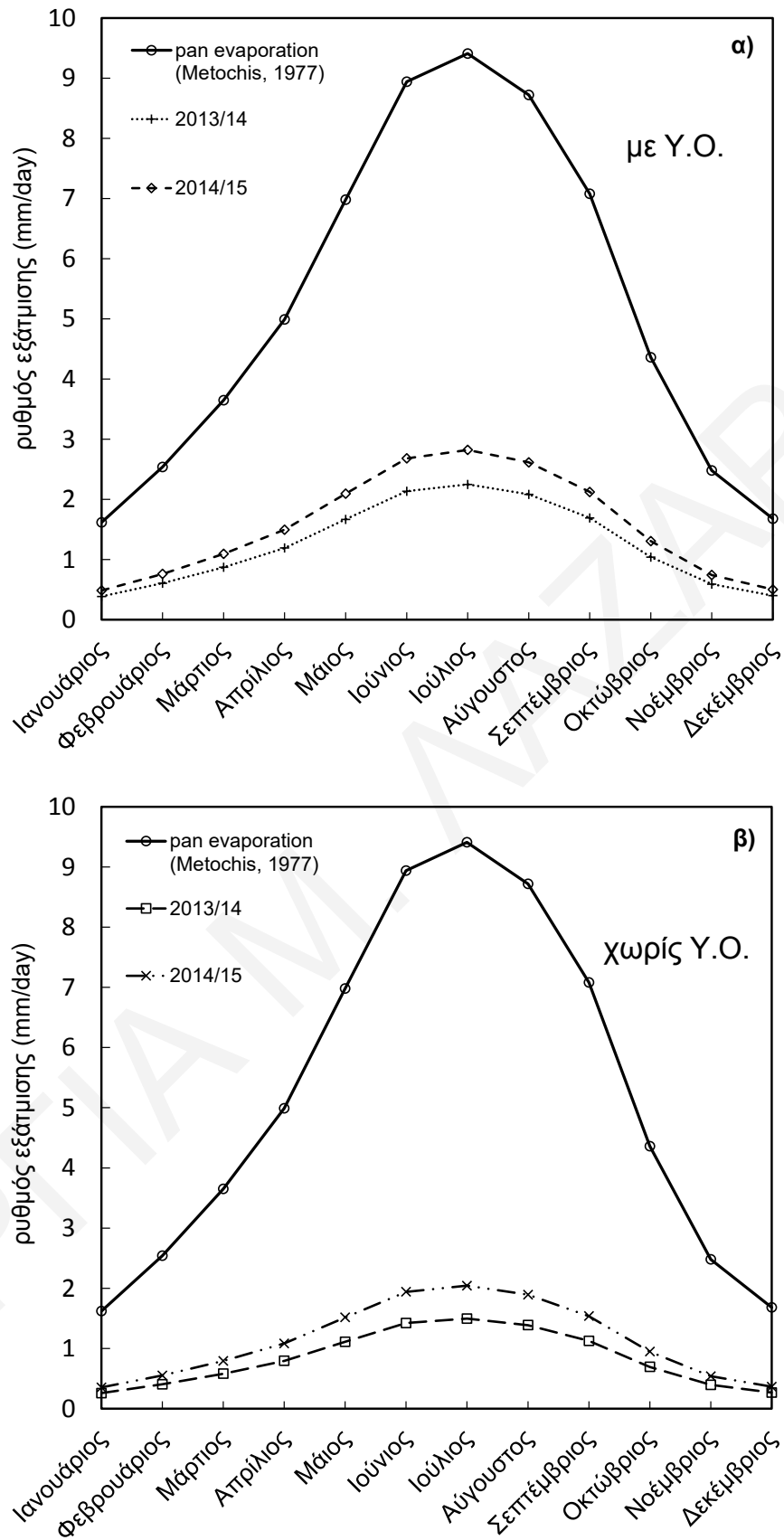
Αντίθετα, στην περίπτωση που υπάρχει ρηχός υδροφόρος ορίζοντας (Υ.Ο.) υπάρχει η δυνατότητα μακροπρόθεσμης μεταφοράς υγρασίας από αυτόν προς την ατμόσφαιρα. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές εξάτμισης υπολογίζονται παρόμοια με την περίπτωση απουσίας υδροφόρου, με τη διαφορά ότι στην τιμή της ετήσιας βροχόπτωσης προστίθεται και η ετήσια συνεισφορά υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η τιμή της ετήσιας συνεισφοράς του υδροφόρου ορίζοντα υπολογίστηκε από προσομοιώσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, με παρακολούθηση του ρυθμού εκροής υγρασίας από την επιφάνεια του εδάφους που προκύπτει μετά τη σταθεροποίηση του υδροφόρου ορίζοντα (steady state conditions) στα 7m βάθος στις προκαταρκτικές υπολογιστικές φάσεις που πραγματοποιούνται για την εγκατάσταση του αρχικού προφίλ μύζησης. Επειδή ο ρυθμός εκροής από τον Υ.Ο. εξαρτάται από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, ο μειωτικός συντελεστής αναγωγής διαφέρει ανάλογα με τις παραμέτρους διαπερατότητας και SWCC της κάθε ανάλυσης.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται οι τιμές μειωτικού συντελεστή αναγωγής της pan evaporation που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε υδρολογικό έτος, εν απουσία ή παρουσία του ρηχού υδροφόρου ορίζοντα, για να προκύψουν οι τιμές εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους που επιβλήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες εξάτμισης λεκάνης (pan evaporation) και εξάτμισης εδάφους (ground evaporation) για τις αναλύσεις με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-5$ και τιμές διαπερατοτήτων που αντιστοιχούν στο Προφίλ Α.

Στον Πίνακα 8.3 δίνεται αναλυτικά ο κατάλογος παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη μετανάστευσης υγρασίας κάτω από γενική κοιτόστρωση.

Πίνακας 8.2: Μειωτικός συντελεστής επιφανειακής εξάτμισης λεκάνης για κάθε υδρολογικό έτος για διαφορετικές τιμές g_a .

Υδροφόρος Ορίζοντας	g_a	2013-2014	2014-2015
NAI	0.016	0.239	0.300
ΌΧΙ		0.159	0.217
NAI	0.05	0.190	0.249
ΌΧΙ		0.159	0.217
NAI	0.005	0.386	0.453
ΌΧΙ		0.159	0.217



Σχήμα 8.4: Επιφανειακή εξάτμιση λεκάνης (και εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους για τα υδρολογικά έτη 2013/14 και 2014/15 για παραμέτρους εδάφους $g_a=0.016$, $g_i=-5$ και προφίλ διαπερατότητας A: α) παρουσία ρηχού υδροφόρου και β) απουσία υδροφόρου.

Πίνακας 8.3: Κατάλογος αναλύσεων ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

Αριθμός ανάλυσης	ξ_a	ξ_l	Προφίλ διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Χαλίκι	Προ- διαβροχή	Αξονοσυμμετρική	Επίπεδης Παραμόρφωσης	Υδροφόρος Ορίζοντας
1	0.05	-5	A	0.5			√		√
2	0.05	-5	A	0.5			√		
3	0.05	-5	A	0.5		√	√		
4	0.005	-5	A	0.5			√		√
5	0.005	-5	A	0.5			√		
6	0.005	-5	A	0.5		√	√		
7	0.016	-7	A	0.5			√		
8	0.016	-7	A	0.5		√	√		
9	0.016	-2	A	0.5			√		
10	0.016	-2	A	0.5		√	√		
11	0.016	-5	B	0.5			√		√
12	0.016	-5	B	0.5	1.0m		√		
13	0.016	-5	B	0.5			√		
14	0.016	-5	B	0.5		√	√		
15	0.016	-5	A	0.5			√		√
16	0.016	-5	A	0.5				√	√
17	0.016	-5	A	0.5		√	√		√
18	0.016	-5	A	2.0			√		√
19	0.016	-5	A	0.5	2.0m		√		√
20	0.016	-5	A	0.5	1.0m		√		

Πίνακας 8.3 (συνέχεια): Κατάλογος αναλύσεων ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

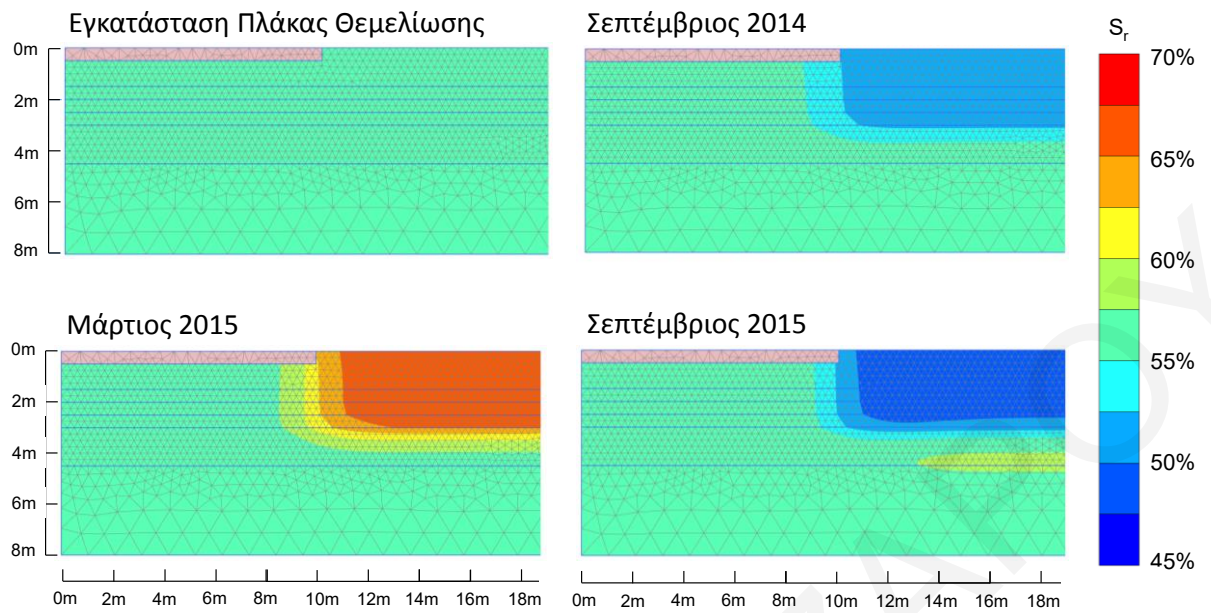
Αριθμός ανάλυσης	ξ_a	ξ_i	Προφίλ διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Χαλίκι	Προ- διαβροχή	Αξονοσυμμετρική	Επίπεδης παραμόρφωσης	Υδροφόρος Ορίζοντας
21	0.016	-5	A	0.5	2.0m		√		
22	0.016	-5	A	0.5			√		
23	0.016	-5	A	0.5				√	
24	0.016	-5	A	0.5		√	√		
25	0.016	-5	A	1.0			√		
26	0.016	-5	A	2.0			√		
27	0.016	-5	Γ	0.5			√		√
28	0.016	-5	Γ	0.5	1.0m		√		
29	0.016	-5	Γ	0.5			√		
30	0.016	-5	Γ	0.5		√	√		
31	0.016	-5	Γ	1.0			√		
32	0.016	-5	Γ	2.0			√		

8.4 Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων

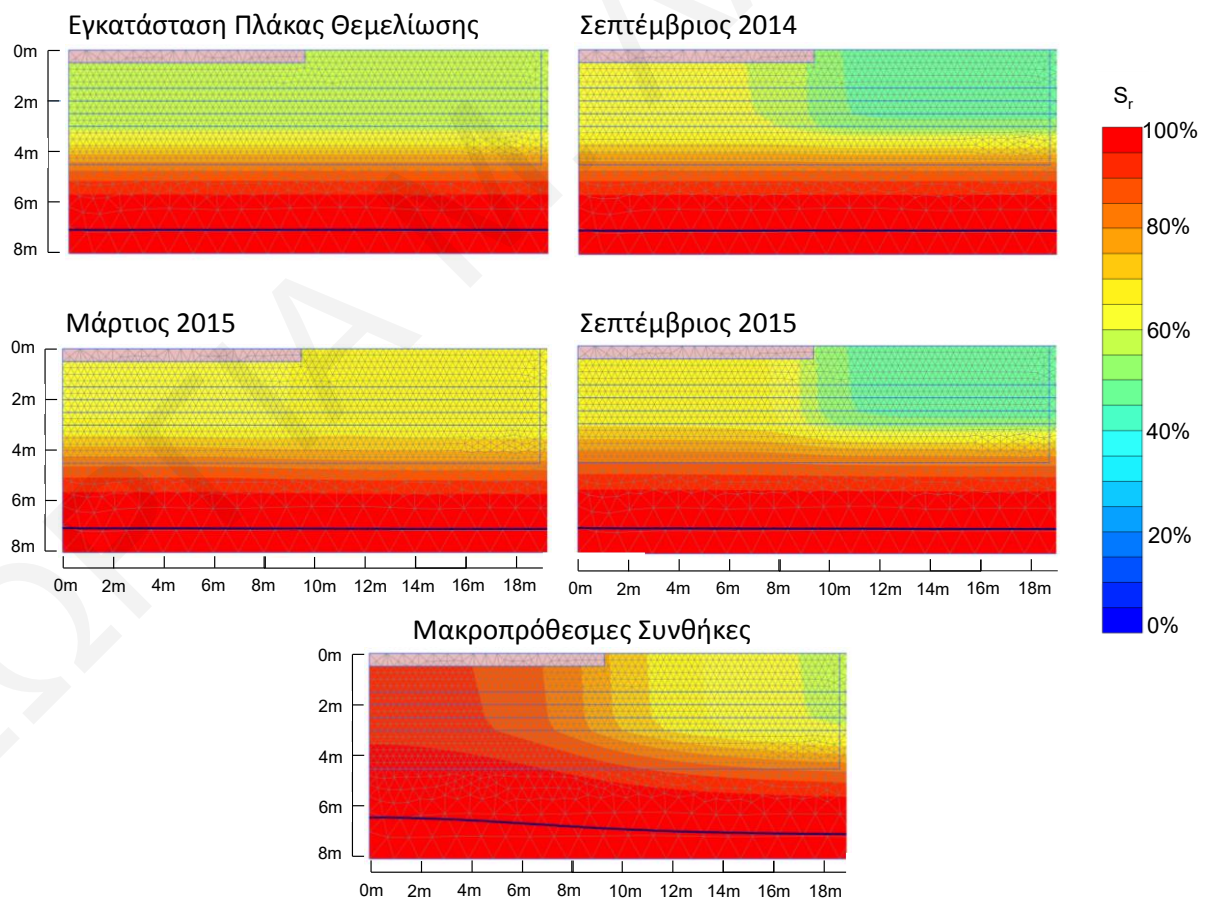
8.4.1 Εξέλιξη Βαθμού Κορεσμού με τον Χρόνο

Τα Σχήματα 8.5 και 8.6 δείχνουν την εξέλιξη του βαθμού κορεσμού κάτω και γύρω από την πλάκα θεμελίωσης στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τιμές $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατοτήτων A και πάχος πλάκας θεμελίωσης $d=0.5m$, απουσία και παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα, αντίστοιχα. Τα διαγράμματα αυτά αναπαριστούν την κατανομή υγρασίας στο εδαφικό προφίλ την τελευταία ημέρα του εκάστοτε μήνα. Οι μήνες που παρουσιάζονται (Μάρτιος και Σεπτέμβριος) αντιστοιχούν στο τέλος της βροχερής και ξηράς περιόδου, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 8.5, στη φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης, το προφίλ του βαθμού κορεσμού είναι ομοιόμορφο σε όλο το έδαφος με τιμή $S_r=55\%$. Τον Σεπτέμβριο 2014 και 2015 (τέλος θερινής/ξηρής περιόδου) τα ανώτερα στρώματα που δεν καλύπτονται από την πλάκα θεμελίωσης έχουν S_r που κυμαίνεται γύρω στο 50%, ενώ στο τέλος της χειμερινής/βροχερής περιόδου (Μάρτιος 2015) η τιμή αυτή ανεβαίνει στο 67%.

Αντίθετα, στο Σχήμα 8.6 οι τιμές βαθμού κορεσμού με ολοκλήρωση της εγκατάστασης της πλάκας αυξάνονται κατά βάθος, με $S_r=55\%$ στα ανώτερα εδαφικά στρώματα και $S_r=100\%$ στα 5.5m περίπου λόγω τριχοειδούς αναρρόφησης υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα. Οι παρατηρήσεις για τους μήνες στο τέλος της ξηρής και υγρής περιόδου είναι όμοιες με την περίπτωση απουσίας υδροφόρου, με τη διαφορά ότι ο βαθμός κορεσμού κάτω από τη θεμελίωση δεν κυμαίνεται γύρω στο 55% αλλά στο 65%, λόγω της μακροπρόθεσμα μονοτονικής αύξησης υγρασίας κάτω από τη θεμελίωση (Σχήματα 8.6 και 8.8). Αυτό συμβαίνει επειδή η πλάκα θεμελίωσης λειτουργεί ως ένα αδιαπέρατο σύνορο που αποτρέπει την έξοδο της υγρασίας στην ατμόσφαιρα που αναδύεται από τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα αποτελέσματα για τις μακροπρόθεσμες συνθήκες (long-term conditions) αφορούν σε μια επιπλέον χρονική διάρκεια 40 ετών μετά την ολοκλήρωση της φάσης του Σεπτεμβρίου 2015, απουσία οποιασδήποτε επιφανειακής εισροής/εκροής (χωρίς επιβολή μετεωρολογικών δεδομένων π.χ. βροχόπτωση ή εξάτμιση) πλην της μακροπρόθεσμης αποβολής υγρασίας στην ατμόσφαιρα από τον υδροφόρο ορίζοντα. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι μια χρονική διάρκεια 10 ετών είναι αρκετή ώστε να επιτευχθούν σταθερές συνθήκες (steady state) στις αναλύσεις με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Σχήμα 8.5: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

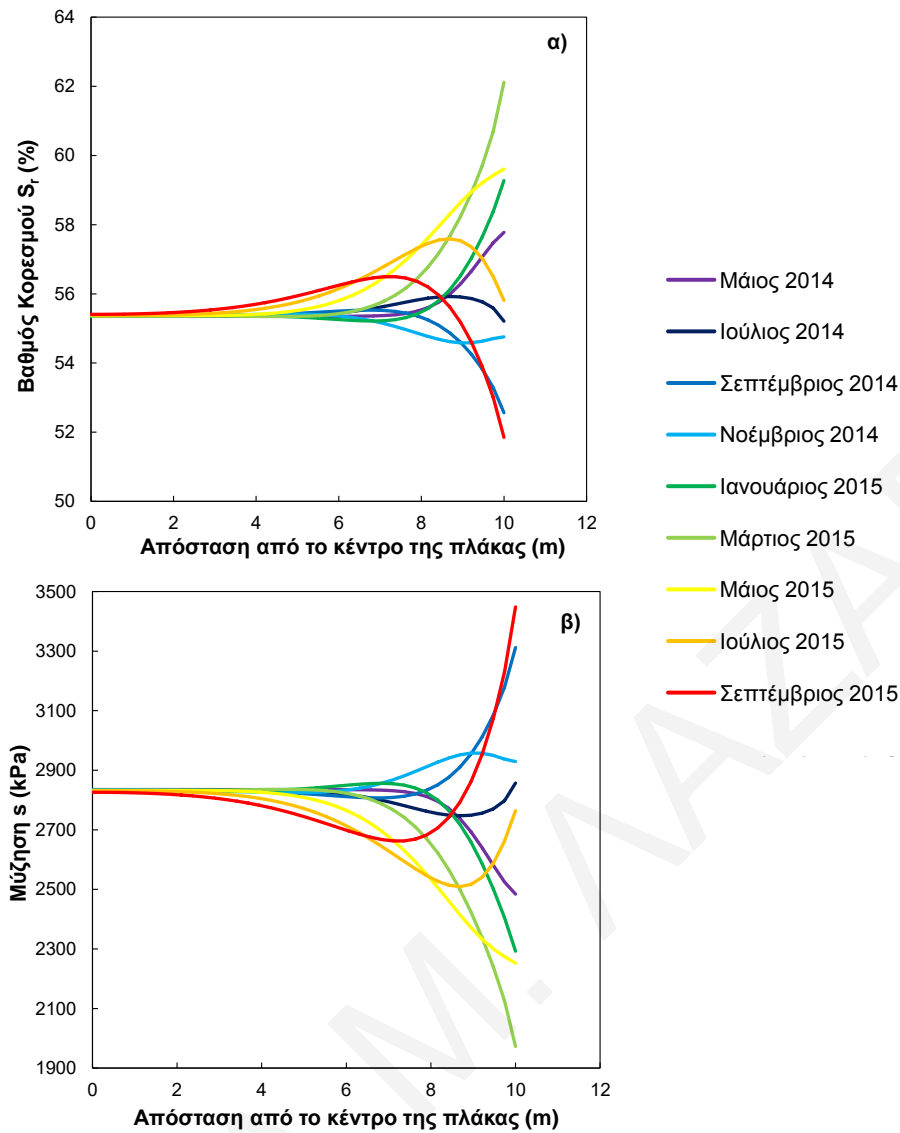


Σχήμα 8.6: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από ανάλυση με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα, $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

Το μακροπρόθεσμο προφίλ βαθμού κορεσμού που φαίνεται στο Σχήμα 8.6 κάτω από το κέντρο της θεμελίωσης είναι αυτό το οποίο προκύπτει αποκλειστικά από το δυναμικό διαφοράς υδραυλικού ύψους (elevation head) ($s=\gamma_w \cdot h_w$, όπου h_w το ύψος από τον υδροφόρο ορίζοντα). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο βαθμός κορεσμού κάτω από την κεντρική περιοχή της πλάκας να ανέρχεται σε $S_r=93\%$, ενώ στην περιμετρική περιοχή να είναι 70% . Ως εκ τούτου, η παρουσία υδροφόρου ορίζοντα δύναται να προκαλέσει σοβαρά φαινόμενα μόνιμης διόγκωσης κάτω από το κέντρο της πλάκας (center heave) σε μακροπρόθεσμη βάση, με τον λόγο μυζήσεων $s_{\text{άκρου}}/s_{\text{κέντρου}}$ να υπερβαίνει την τιμή 2 (Σχήμα 8.8). Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται τα διαγράμματα της εξέλιξης του βαθμού κορεσμού για όλες οι φάσεις των αναλύσεων 2, 15, 17, 20, 22, 24, 26 και 29.

Τα Σχήματα 8.7 και 8.8 παρουσιάζουν την εξέλιξη της κατανομής του βαθμού κορεσμού S_r και της μύζησης s με τον χρόνο, κατά μήκος της επιφάνειας επαφής της πλάκας θεμελίωσης με το έδαφος, από τις αναλύσεις χωρίς υδροφόρο και με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα, αντίστοιχα. Εν τη απουσία υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 8.7) είναι προφανές ότι στη διάρκεια των θερινών/ξηρών μηνών (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) ο βαθμός κορεσμού μειώνεται κάτω από την περιμετρική περιοχή της πλάκας, ενώ αντίθετα κατά τους χειμερινούς/βροχερούς μήνες (Δεκέμβριο-Μάρτιο) η υγρασία διεισδύει κάτω από την πλάκα. Οι εποχιακές διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού είναι της τάξης του $\pm 15\%$. Το μικρό πλάτος εποχιακών διακυμάνσεων S_r , σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η υστέρηση της SWCC είναι σχετικά μικρή σε μάργα Λευκωσίας μέσης πλαστικότητας (Loukidis et al., 2020), καθιστά ικανοποιητική προσέγγιση τη χρήση της καμπύλης του Σχήματος 5.25 ως την αμετάβλητη (χωρίς υστέρηση) SWCC που θεωρεί το πρόγραμμα Plaxis.

Στην περίπτωση των θερινών/ξηρών μηνών, η μύζηση κάτω από το άκρο της πλάκας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μύζηση κάτω από το κέντρο της ($s_{\text{άκρου}}/s_{\text{κέντρου}}=1.29$ τον Σεπτέμβριο 2015), προκαλώντας το φαινόμενο της σχετικής ανύψωσης του κέντρου της πλάκας (γνωστό ως center heave στη διεθνή βιβλιογραφία) εξαιτίας της συρρίκνωσης του εδάφους κάτω από το άκρο της. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται το φαινόμενο της ανύψωσης του άκρου της πλάκας (edge heave), με τον λόγο μύζησης στα δύο σημεία να είναι ίσος με $s_{\text{άκρου}}/s_{\text{κέντρου}}=0.69$ τον Μάρτιο 2015. Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις και για την ανάλυση με παρουσία υδροφόρου.

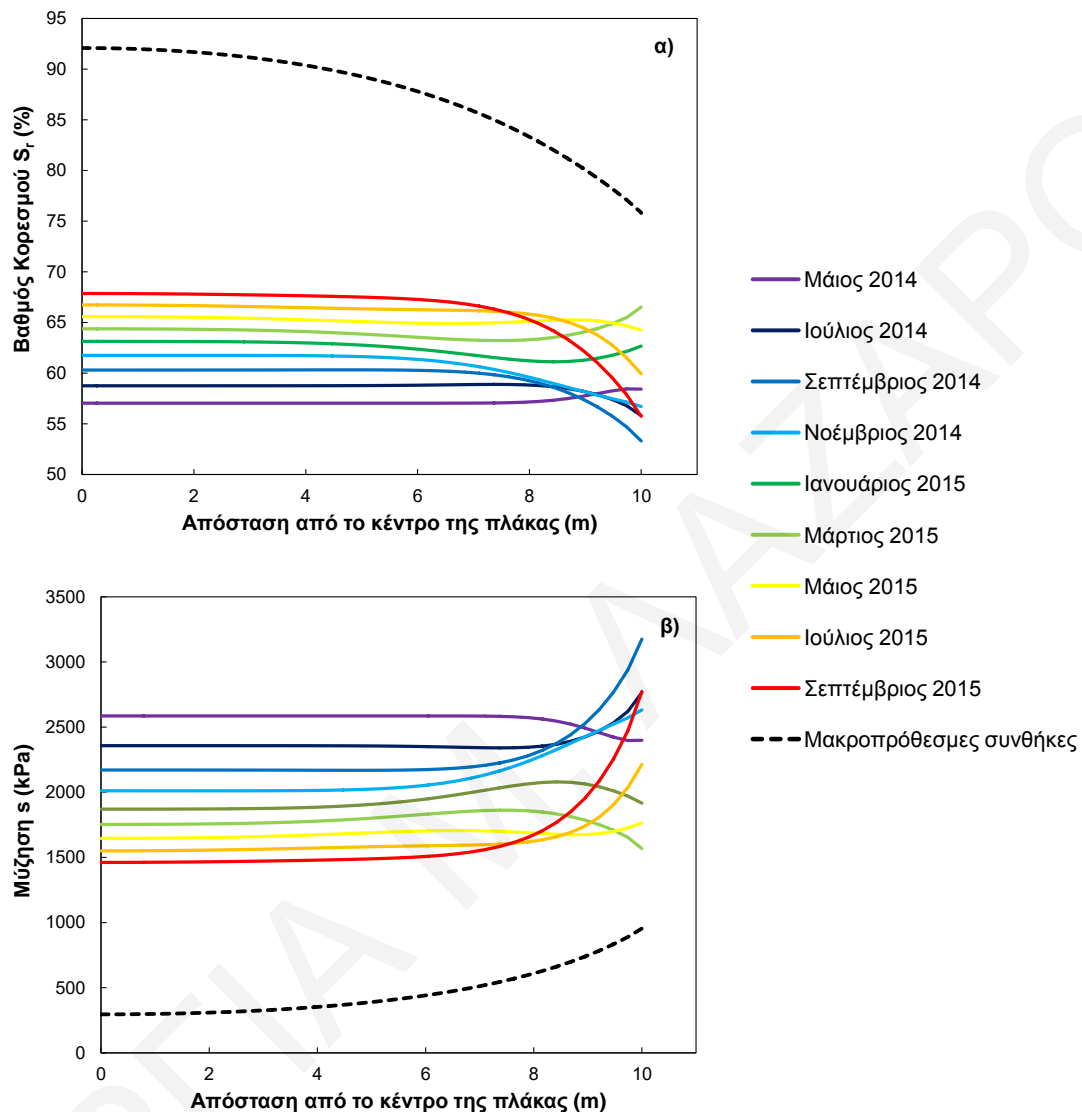


Σχήμα 8.7: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας και εδάφους θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο ορίζοντα, με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

8.4.2 Επίδραση Χαρακτηριστικής Καμπύλης και Διαπερατότητας

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου g_a η οποία σύμφωνα με την εξίσωση van Genuchten (Εξίσωση 5.6) ελέγχει τη θέση της χαρακτηριστικής καμπύλης του υλικού (SWCC) στο διάγραμμα βαθμού κορεσμού S_r συναρτήσεως της μύζησης s . Επίσης, μελετάται η επίδραση της παραμέτρου g_i που ελέγχει τη μείωση της διαπερατότητας k με μείωση του βαθμού κορεσμού S_r (Εξίσωση 7.1). Στο Σχήμα 8.9 πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των κατανομών βαθμού κορεσμού κάτω από την πλάκα θεμελίωσης για διαφορετικές τιμές g_a για τις περιπτώσεις α) απουσίας και β) παρουσίας ρηχού υδροφόρου, διατηρώντας $g_i=-5$, πάχος της πλάκας d (0.5m) και προφίλ διαπερατοτήτων A. Παρατηρείται ότι, όσο η τιμή του g_a αυξάνεται (μετατόπιση

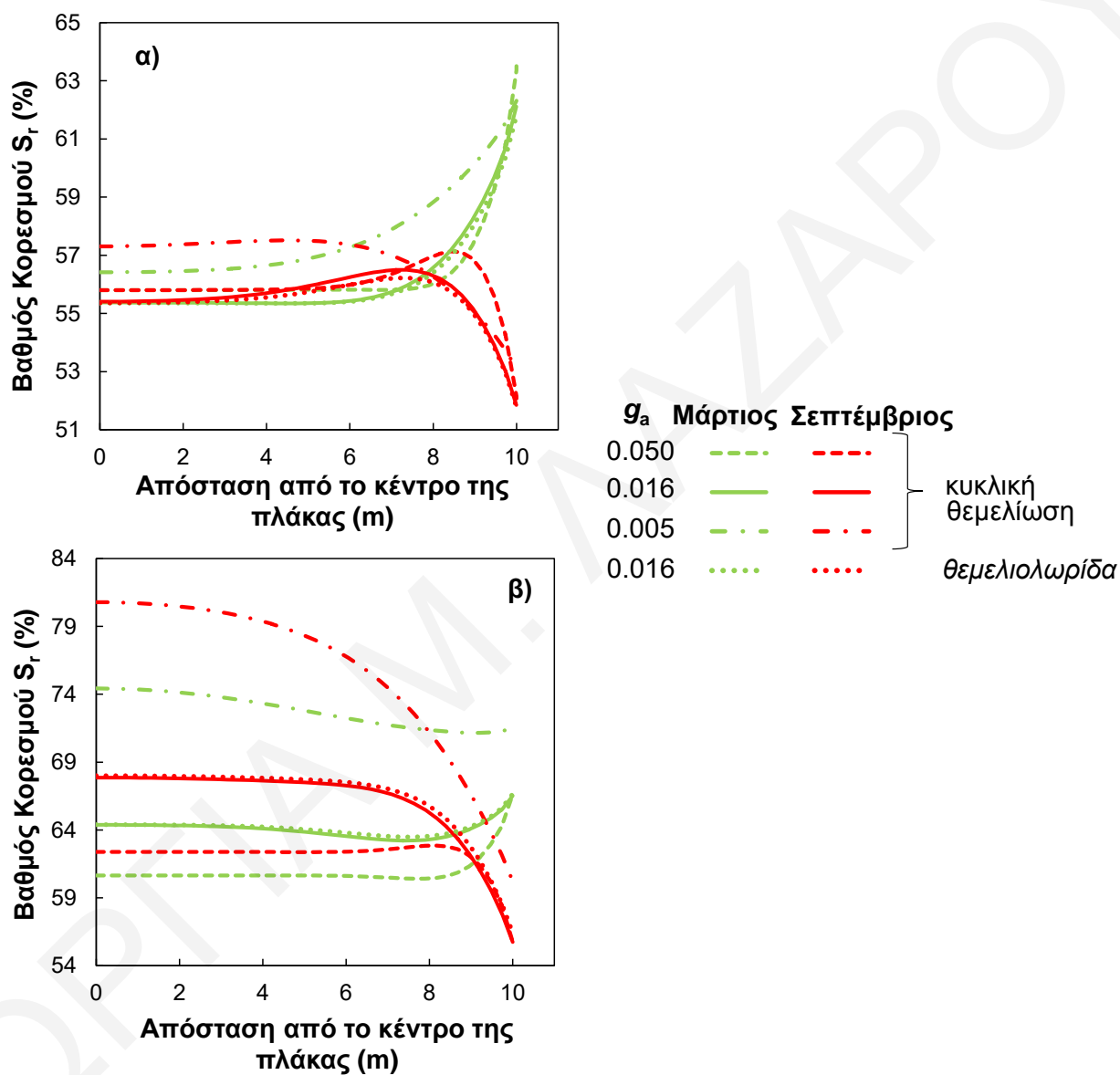
χαρακτηριστικής καμπύλης προς τα αριστερά), η περιοχή που σημειώνονται οι μεταβολές υγρασίας γίνεται πιο στενή και οι διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού κατά μήκος της θεμελίωσης είναι πιο απότομες (Σχήμα 8.9α).



Σχήμα 8.8: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας-εδάφους θεμελίωσης από την ανάλυση με ρηχό υδροφόρο, $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.

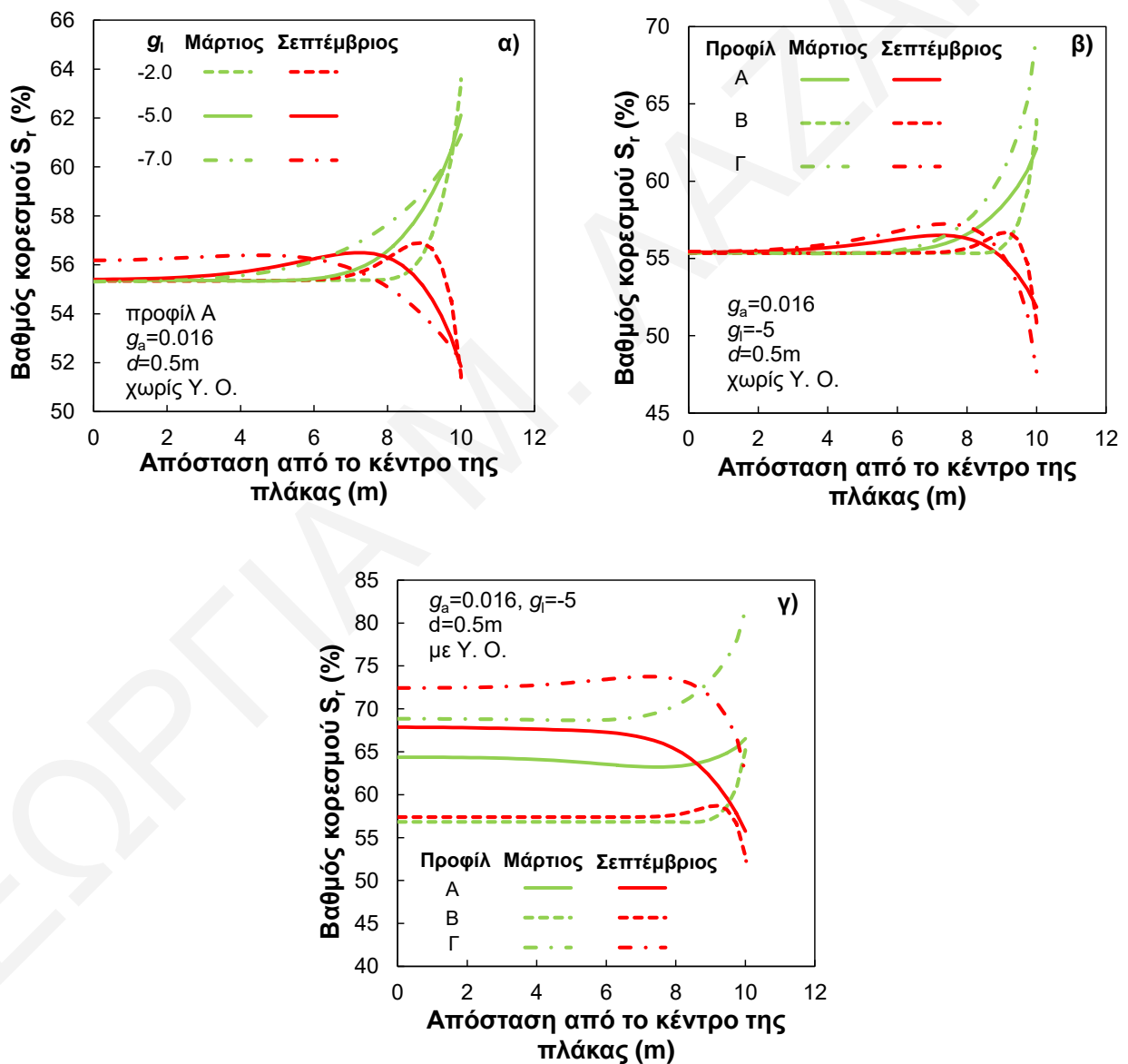
Για τιμές $g_a=0.016$ η ζώνη μεταβολών υγρασίας εμφανίζεται διευρυμένη (2.0m-5.0m), σε αντίθεση με τις τιμές που δίνουν οι αναλύσεις με $g_a=0.05$ (εύρος 1.5m-2.0m). Η κατανομή βαθμού κορεσμού για τις αναλύσεις με υδροφόρο (Σχήμα 8.9β) υποδηλώνει ότι για μικρές τιμές g_a (π.χ. 0.005), που σημαίνει μεγαλύτερη ενεργότητα αργίλου-clay activity, η υγρασία αναδύεται ταχύτερα από τον υδροφόρο προς τη θεμελίωση, επιδεινώνοντας τα φαινόμενα διόγκωσης του εδάφους κάτω από το κέντρο της πλάκας (center heave).

Σε ότι αφορά την επίδραση του σχήματος της θεμελίωσης, η κατανομή υγρασίας για την περίπτωση της θεμελιολωρίδας είναι πρακτικά όμοια με την περίπτωση κυκλικής θεμελίωσης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα προφίλ του βαθμού κορεσμού κάτω από την πλάκα θεμελίωσης θα είναι σχεδόν τα ίδια (με πολύ μικρές διαφορές), ανεξαρτήτως των αναλογιών των διαστάσεων και του σχήματός της.



Σχήμα 8.9: Επίδραση της παραμέτρου g_a στην κατανομή υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης για τιμές $g_i=-5$, $d=0.5m$ και προφίλ διαπερατοτήτων A: α) απουσίας ρηχού Υ.Ο. και β) παρουσίας ρηχού Υ.Ο.

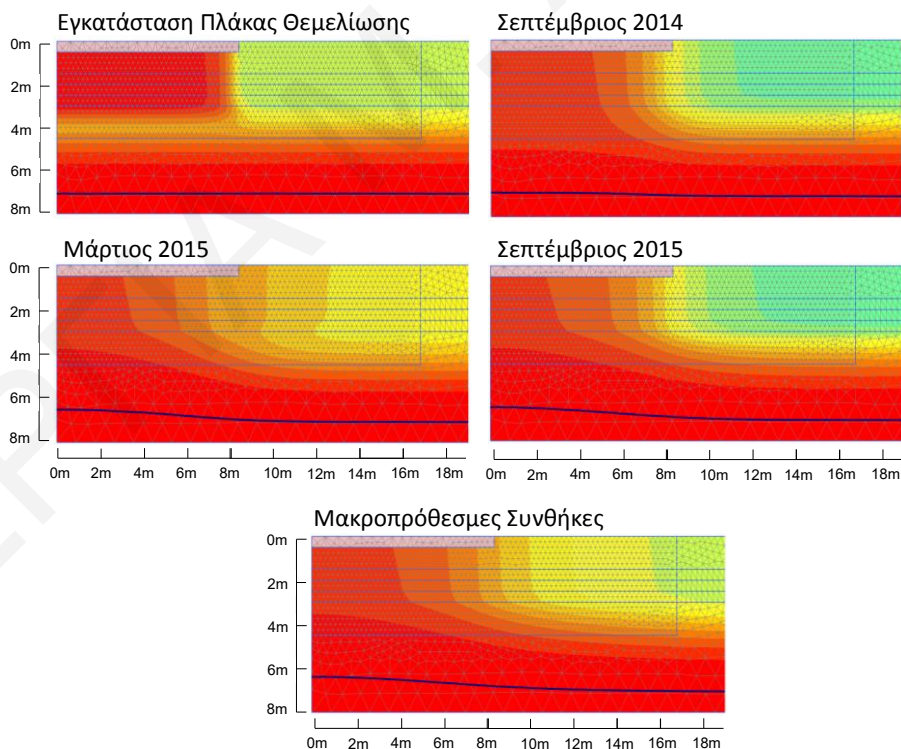
Το Σχήμα 8.10α δείχνει ότι για μικρότερες τιμές της παραμέτρου g_i σε απόλυτη τιμή (όσο μικρότερη απόλυτη τιμή, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μείωσης της υδραυλικής διαπερατότητας με μείωση του βαθμού κορεσμού), η ζώνη διακύμανσης υγρασίας κάτω από την πλάκα είναι στενότερη. Σε ότι αφορά το προφίλ της διαπερατότητας πλήρους κορεσμού (k_{sat}), για την περίπτωση που το εδαφικό προφίλ έχει τις ίδιες διαπερατότητες σε x και y διεύθυνση (προφίλ Γ), η ζώνη διακύμανσης υγρασίας είναι πιο εκτεταμένη (Σχήμα 8.10β και γ) γεγονός που οφείλεται στην ευχέρεια της υγρασίας να διαχέεται με τον ίδιο σχεδόν τρόπο, τόσο στην κατακόρυφη, όσο και στην οριζόντια κατεύθυνση, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις των προφίλ διαπερατοτήτων Α και Β.



Σχήμα 8.10: Επίδραση της διαπερατότητας του εδάφους στην κατανομή υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης για τιμές $g_a=0.016$ και $d=0.5m$ για α) διαφορετικές τιμές g_i , και διαφορετικά προφίλ διαπερατοτήτων με β) απουσία και γ) παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

8.4.3 Προδιαβροχή Εδάφους

Τα Σχήματα 8.11 και 8.12 δείχνουν τα αποτελέσματα ανάλυσης με προδιαβροχή του εδάφους θεμελίωσης με παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα. Παρατηρούμε ότι η υγρασία κοντά στο κέντρο της θεμελίωσης διατηρείται περίπου στα ίδια επίπεδα τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο στάδιο ($S_r=92-96\%$). Ωστόσο, τα επίπεδα υγρασίας κοντά στο άκρο της πλάκας είναι κατά πολύ μικρότερα εξαιτίας της απώλειας υγρασίας με την πάροδο του χρόνου από την επιφάνεια του εδάφους στην ατμόσφαιρα λόγω εξάτμισης. Ο λόγος μύζησης άκρου-κέντρου της πλάκας ($s_{\text{άκρου}}/s_{\text{κέντρου}}$) φτάνει τιμές της τάξεως του 5 (Σχήμα 8.12β) καταδεικνύοντας ότι η προδιαβροχή του εδάφους πιθανώς να μην είναι αποτελεσματική μέθοδος για περιοχές με έντονα ξηρό κλίμα όπως αυτό της Λευκωσίας. Οι εποχιακές διακυμάνσεις υγρασίας κάτω από το άκρο της πλάκας θεμελίωσης αν και αισθητές, δεν είναι τόσο σημαντικές όσο η σχεδόν μόνιμη διόγκωση κάτω από το κέντρο της (center heave). Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι στις προσομοιώσεις που έγιναν θεωρήθηκε ότι κανένα αδιαπέρατο σύνορο δεν εκτείνεται πέρα από την περιοχή της πλάκας θεμελίωσης (π.χ. στεγανωτική μεμβράνη) και ως εκ τούτου η εξάτμιση συμβαίνει ακριβώς στο άκρο της πλάκας.



Σχήμα 8.11: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από ανάλυση με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα και προδιαβροχή εδάφους, $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5\text{m}$.

Στο Σχήμα 8.13α παρουσιάζεται η κατανομή του βαθμού κορεσμού για τις προσομοιώσεις με προδιαβροχή του εδάφους για διαφορετικές τιμές g_a και g_l . Εν τη απουσία υδροφόρου ορίζοντα μικρές τιμές g_a (δηλ. μεγαλύτερη ενεργότητα αργίλου) έχουν ως αποτέλεσμα την ταχύτερη διάχυση υγρασίας που εισάγεται στο έδαφος κατά την προδιαβροχή. Για παράδειγμα, ο βαθμός κορεσμού S_r στο κέντρο της θεμελίωσης ένα χρόνο μετά την προδιαβροχή του εδάφους είναι της τάξεως του 70% για τιμές g_a 0.005, ενώ για $g_a=0.05$ οι τιμές διατηρούνται πάνω από 85%. Εντούτοις, ανεξάρτητα από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, η προδιαβροχή απουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 8.13β) θα έχει ως συνέπεια την μεσο-βραχυπρόθεσμη ανάπτυξη διόγκωσης κάτω από το κέντρο της θεμελίωσης (center heave), όπως και στην προσομοίωση με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, με ακόμη μεγαλύτερες διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού κατά μήκος της πλάκας, οι οποίες παρατηρούνται ειδικά για μεγάλα g_a (μικρότερο δυναμικό συγκράτησης νερού) και g_l (μεγαλύτερη μείωση της υδραυλικής διαπερατότητας με μείωση του βαθμού κορεσμού).

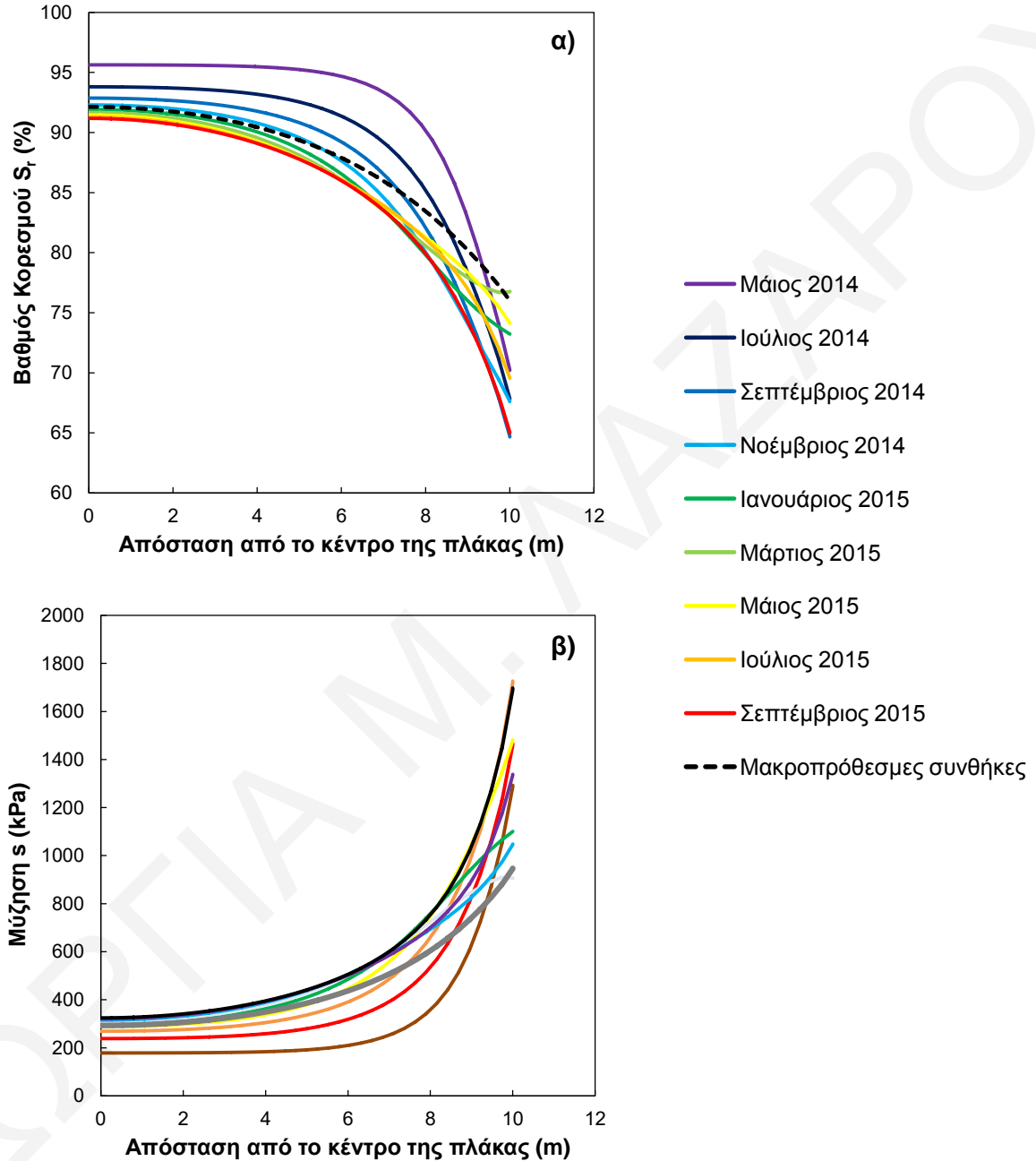
Βάσει των αποτελεσμάτων του Σχήματος 8.13β μπορούμε να πούμε ότι αν η υδραυλική διαπερατότητα σε συνθήκες πλήρους κορεσμού στην κατακόρυφη διεύθυνση ($k_{y,sat}$) σε ρηχά βάθη είναι της ίδιας τάξης μεγέθους όπως και σε μεγαλύτερα βάθη (10^{-7} - 10^{-6} cm/sec – Προφίλ Γ) το μέτωπο διαβροχής εισχωρεί πολύ δύσκολα στο έδαφος στην καθορισμένη διάρκεια των 20 ημερών προδιαβροχής και ο βαθμός κορεσμού στη διεπιφάνεια θεμελίωσης-εδάφους παραμένει πολύ κάτω από τις τιμές πλήρους κορεσμού.

8.4.4 Βάθος Σκυροδέτησης και Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους από Χονδρόκοκκο

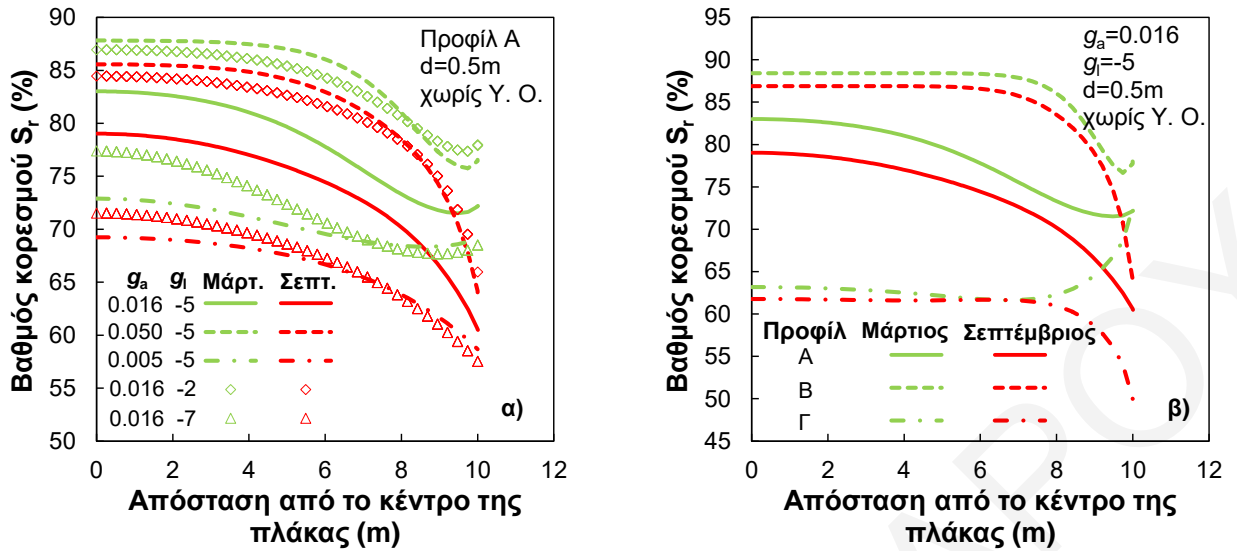
Υλικό

Σύμφωνα με το Σχήμα 8.14α οι διακυμάνσεις στις τιμές του βαθμού κορεσμού κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης εν τη απουσία υδροφόρου ορίζοντα είναι σχεδόν οι ίδιες για τις περιπτώσεις διαφόρων παχών πλάκας ($0.5m < d < 2.0m$). Δηλαδή, σε αυτό το βάθος η υγρασία διεισδύει κάτω από την πλάκα με την ίδια ευκολία ανεξαρτήτως της κατακόρυφης απόστασης που διανύει από την επιφάνεια του εδάφους. Η παρατήρηση αυτή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος μέχρι και τα 2m βάθος ανήκει σε μια ακόρεστη ζώνη με σχεδόν σταθερή τιμή μύζησης s (τουλάχιστον κατά τους θερινούς μήνες), σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της αντίστροφης προσομοίωσης του πειράματος διαβροχής αλλά και των επί τόπου παρατηρήσεων. Αυτό, σε συνδυασμό με τις μεγάλες και σταθερές τιμές της κατακόρυφης διαπερατότητας $k_{y,sat}$ (λόγω της παρουσίας ρηγματώσεων στα ανώτερα στρώματα) διευκολύνουν την κατείσδυση σε εκείνα τα βάθη. Επιπλέον, η μείωση του $k_{y,sat}$

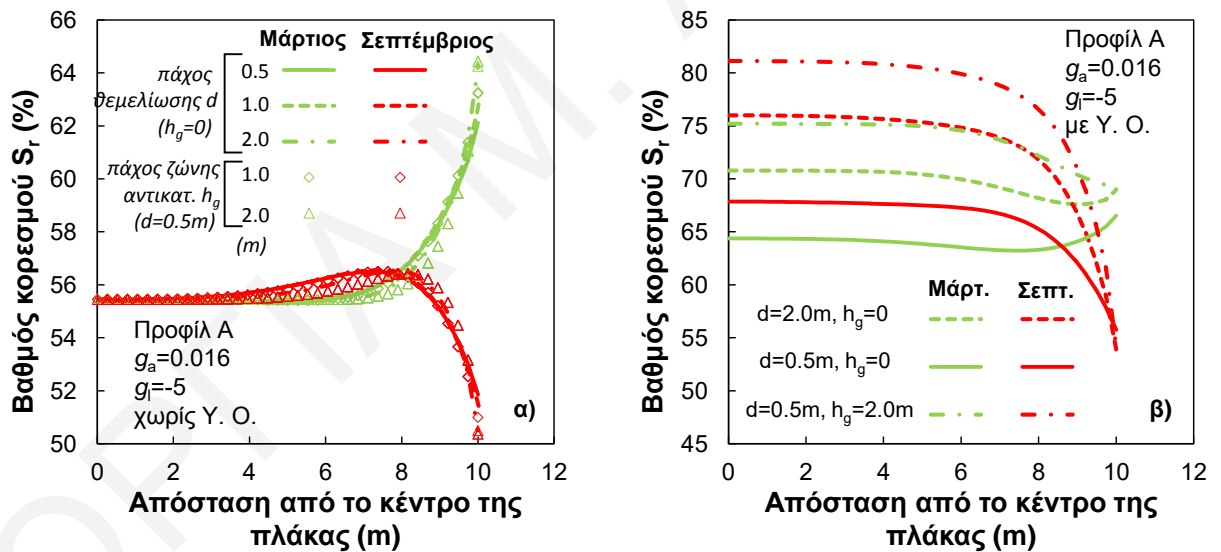
σε μεγαλύτερα βάθη (κλείσιμο ρωγμών) εμποδίζει την εισχώρηση υγρασίας σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα αναγκάζοντάς την σε οριζόντια μετακίνηση κάτω από την πλάκα θεμελίωσης έστω και αν το βάθος σκυροδέτησής της βρίσκεται 2m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 8.12: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους - πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση με ρηχό υδροφόρο και προδιαβροχή του εδάφους, $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



Σχήμα 8.13: Κατανομή του βαθμού κορεσμού S_r κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας θεμελίωσης-εδάφους από τις προσομοιώσεις με προδιαβροχή εδάφους: α) επίδραση των παραμέτρων του g_a και g_i και β) επίδραση του προφίλ υδραυλικής διαπερατότητας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού.



Σχήμα 8.14: Κατανομή του βαθμού κορεσμού S_r κατά μήκος της επιφάνειας επαφής πλάκας θεμελίωσης-εδάφους για διαφορετικά πάχη πλάκας θεμελίωσης και αντικατάστασης φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό (άμμο και χαλίκι): α) απουσία ρηχού Υ.Ο. και β) παρουσία ρηχού Υ.Ο.

Στο Σχήμα 8.14α φαίνονται επίσης τα αποτελέσματα των αναλύσεων στις οποίες μέρος του εδάφους θεμελίωσης αντικαταστάθηκε από χονδρόκοκκο υλικό ως μέθοδος εξυγίανσης. Το χονδρόκοκκο υλικό, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, θεωρείται ότι είναι

μείγμα άμμου και χαλικιού το οποίο αντικαθιστά το φυσικό έδαφος σε στρώσεις 1m ή 2m κάτω από πλάκα θεμελίωσης πάχους 0.5m. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται αφορούν την κατανομή βαθμού κορεσμού στη διεπιφάνεια μεταξύ του υλικού αντικατάστασης και του φυσικού εδάφους. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η αντικατάσταση του εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό δεν αλλάζει σημαντικά την εικόνα, με τα αποτελέσματα που δίνουν οι συγκεκριμένες προσομοιώσεις να είναι πρακτικώς ισοδύναμα με αυτά που έδωσαν οι αναλύσεις με πλάκα πάχους 2m. Αυτό συμβαίνει επειδή το μείγμα άμμου-χαλικιού απορροφά ελάχιστη υγρασία από τη μάργα, γεγονός που οφείλεται στο ότι για τις σχετικά μεγάλες τιμές μύζησης που ισχύουν σε αυτά τα βάθη, ο βαθμός κορεσμού του αμμοχάλικου είναι πολύ χαμηλός (γύρω στο 9%) και συνεπώς η υδραυλική του αγωγιμότητα είναι εξαιρετικά μικρή παρά τις πολύ μεγάλες τιμές όταν είναι πλήρως κορεσμένο. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτές τις αναλύσεις η πλευρική έκταση του εδάφους αντικατάστασης είναι ευθυγραμμισμένη με το άκρο της θεμελίωσης και ως εκ τούτου το νερό της βροχής δεν έχει άμεση πρόσβαση σε αυτό. Στην περίπτωση που η βροχή έχει δυνατότητα να κατεισδύσει απευθείας εντός του όγκου του αμμοχάλικου τα αποτελέσματα ενδέχεται να είναι πολύ διαφορετικά. Γι' αυτό το λόγο, θα πρέπει να τοποθετείται στεγανωτική μεμβράνη στα τοιχώματα της εκσκαφής που θα δεχθεί το αμμοχάλικο, ώστε νερό που τυχόν κατεισδύσει εντός του αμμοχάλικου να μην διαβρέξει το υποκείμενο διογκώσιμο έδαφος (US Army Corp of Engineers, 1983).

Για τις αναλύσεις με ρηχό υδροφόρο ορίζοντα (Σχήμα 8.14β), το βάθος διεπαφής θεμελίωσης-φυσικού εδάφους ή φυσικού εδάφους-αμμοχάλικου παίζει σημαντικό ρόλο. Σε όσο μεγαλύτερο βάθος βρίσκεται η διεπιφάνεια τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κορεσμού κάτω από το κέντρο της πλάκας. Αυτό οφείλεται στην άνοδο υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα η οποία φθάνει νωρίτερα σε μια βαθύτερα τοποθετημένη διεπαφή, συντελώντας σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις υγρασίας κατά μήκος της πλάκας.

8.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ροής οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι εποχιακές διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού S_r και της μύζησης s παρατηρούνται σε μια ζώνη μήκους 1.5m-5.0m από το άκρο της πλάκας. Το εύρος των διακυμάνσεων εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (SWCC) και τις υδραυλικές

ιδιότητες του εδαφικού προφίλ. Όσο λιγότερο ενεργή (μεγάλο g_a) ή/και λιγότερο διαπερατή είναι η άργιλος τόσο στενότερη είναι η ζώνη διακύμανσης της υγρασίας. Επιπλέον, αυτή η ζώνη φαίνεται να είναι ανεξάρτητη του σχήματος της θεμελίωσης.

Η παρουσία ενός ρηχού υδροφόρου οδηγεί στη συγκέντρωση υγρασίας κάτω από το κέντρο της πλάκας (center heave) σε μέσο έως μακροπρόθεσμη βάση και στη μεγάλη διακύμανση μύζησης στη διεπαφή εδάφους-θεμελίωσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της τριχοειδούς ανύψωσης υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα η οποία στη συνέχεια εγκλωβίζεται κάτω από τη θεμελίωση που δρα ως αδιαπέρατο σύνορο με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η διαφυγή της προς την ατμόσφαιρα. Αντίθετα, η απώλεια υγρασίας κάτω από την περιμετρική ζώνη της θεμελίωσης εξακολουθεί να συμβαίνει, οδηγώντας έτσι σε μεγάλες διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού κατά μήκος της πλάκας.

Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων δείχνουν ότι η προδιαβροχή του εδάφους μάλλον δεν αποτελεί αποτελεσματική λύση υπό τις κλιματικές συνθήκες της Κύπρου για τον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλούνται από τα διογκώσιμα εδάφη. Ένας λόγος είναι ότι για εδάφη με χαμηλή επιτόπου υδραυλική διαπερατότητα ($k_{sat,y}$ της τάξεως του 10^{-6} cm/sec), η προδιαβροχή αδυνατεί να ανεβάσει την υγρασία του εδάφους σε επίπεδα πλήρους κορεσμού σε σημαντικά βάθη κάτω από την πλάκα θεμελίωσης σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ο βασικός όμως λόγος είναι ότι ακόμη και αν επιτευχθεί ικανοποιητικός κορεσμός μέσω της προδιαβροχής, οι διακυμάνσεις στον βαθμό κορεσμού και στη μύζηση κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης θα είναι αρκετά μεγάλες ($S_{άκρου}/S_{κέντρου}$ της τάξεως του 4).

Η μέθοδος αντικατάστασης του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό σε βάθος 1m-2m κάτω από την πλάκα θεμελίωσης δεν οδηγεί σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στο προφίλ υγρασίας σε σύγκριση με μια θεμελίωση που εδράζεται απευθείας σε μάργα σε αντίστοιχα βάθη. Αυτό σημαίνει ότι η μετανάστευση υγρασίας κάτω από τη θεμελίωση δεν επιδεινώνεται από την παρουσία του σχετικά διαπερατού στρώματος αμμοχάλικου. Ως εκ τούτου μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αυτή η τεχνική παρουσιάζει το ακόλουθο πλεονέκτημα σε σχέση με την περίπτωση όπου η θεμελίωση εδράζεται κατευθείαν σε διογκώσιμο έδαφος. Η τάση για ανάπτυξη διόγκωσης κάτω από την επίχωση θα είναι πρακτικά η ίδια με την περίπτωση που η πλάκα εδράζεται απευθείας σε διογκώσιμο έδαφος, όμως οι σχετικές πιέσεις που ασκούνται από το διογκώσιμο έδαφος θα διαχθούν αρχικά στο χονδρόκοκκο στρώμα πριν φθάσουν στην πλάκα θεμελίωσης καταλήγοντας έτσι σε μικρότερες διαφορικές μετατοπίσεις και μικρότερες ζημιές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

9.1 Διαμόρφωση Προσομοιώματος

Καταστατικό προσομοίωμα ονομάζεται το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν μαθηματικά τη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού. Σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ένα καταστατικό μοντέλο καλείται να υπολογίσει τις μεταβολές των τάσεων ενός υλικού σημείου με δεδομένες τις μεταβολές στις παραμορφώσεις και σε άλλες εσωτερικές μεταβλητές (π.χ. πορώδες, αλλαγές στη δομή του εδαφικού ιστού, κτλ.), αλλά και της μύζησης ή του βαθμού κορεσμού, στην περίπτωση των μερικώς κορεσμένων εδαφών. Επομένως, για την πραγματοποίηση συζευγμένων (σύζευξη ροής-μηχανικής παραμόρφωσης) αναλύσεων αλληλεπίδρασης γενικής κοιτόστρωσης – διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας, χρειάζεται ένα καταστατικό προσομοίωμα που να μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά της μάργας όπως αυτή παρατηρήθηκε στις δοκιμές διόγκωσης/κατάρρευσης που πραγματοποιήθηκαν στο οιδήμετρο. Ένα ελαστικό καταστατικό προσομοίωμα, όπως αυτό που χρησιμοποιείται κατ'εξοχήν στην πράξη για την ανάλυση διαφορικών καθιζήσεων και κάμψεων γενικών κοιτοστρώσεων, δεν επαρκεί. Για αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διαμορφώθηκε ένα απλό καταστατικό προσομοίωμα το οποίο συνδυάζει ένα μη-γραμμικό ελαστικό νόμο με ένα μηχανισμό ο οποίος προβλέπει πλαστικές ογκομετρικές μεταβολές που οφείλονται στις αλλαγές μύζησης (και ως εκ τούτου μεταβολές στον βαθμό κορεσμού). Σε πρόσφατη μελέτη, ο Σιταρένιος (2019) κάνει εκτενή αναφορά στα κυριότερα καταστατικά προσομοιώματα για μερικώς κορεσμένα εδάφη αλλά και στο πώς αυτά μπορούν να τροποποιηθούν ώστε να χρησιμοποιούν την ενεργό τάση Bishop (1959).

Το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα χρησιμοποιεί τον κατά Bishop ορισμό της ενεργού τάσης με συνθήκες σταθερής πίεσης του αέρα, όπως θεωρείται από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Plaxis (Galavi, 2010), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεκπεραίωση των αριθμητικών αναλύσεων αλληλεπίδρασης πλάκας-θεμελίωσης εδάφους:

$$\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - (\chi u_w) \delta_{ij}$$

Εξίσωση 9.1

όπου σ'_{ij} και σ_{ij} οι τανυστές των ενεργών και ολικών τάσεων αντίστοιχα, χ η παράμετρος ενεργού τάσης που λαμβάνεται κατά προσέγγιση σύμφωνα με το Plaxis ίση με τον βαθμό κορεσμού S_r (εκπεφρασμένος ως καθαρός αριθμός από 0 έως 1, όχι ως ποσοστό), u_w η πίεση του νερού των πόρων, η οποία μπορεί να είναι θετική (όπως σε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα) ή αρνητική, δηλαδή μύζηση s ($u_w = -s$). Το δ_{ij} συμβολίζει το δέλτα του Kronecker (ίσο με 1 για $i=j$, αλλιώς ίσο με 0).

Το ελαστικό μέρος του προσομοιώματος ακολουθεί τον νόμο του Hooke ως εξής:

$$\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{el,kl} = D_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{pl,kl}) \quad \text{Εξίσωση 9.2}$$

όπου ϵ , ϵ_{el} και ϵ_{pl} είναι οι τανυστές των ολικών, ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων, αντίστοιχα, και D_{ijkl} το μητρώο δυσκαμψίας ισότροπου ελαστικού υλικού, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως ένα μητρώο 6×6 σε όρους μέτρου του Young E και του λόγου Poisson ν ως εξής:

$$\underline{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 9.3}$$

Όπως φαίνεται στην Εξ. 9.2, οι ολικές παραμορφώσεις προκύπτουν με βάση την κλασική ελαστοπλαστική θεωρία ως το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{el,ij} + \dot{\epsilon}_{pl,ij} \quad \text{Εξίσωση 9.4}$$

Η τιμή του μέτρου Young E δεν θεωρείται σταθερή αλλά μια αύξουσα συνάρτηση της ενεργού τάσης, όπως άλλωστε παρατηρήθηκε στις τριαξονικές δοκιμές CU υπό διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις περίσφιξης σ'_c (Σχήμα 5.19). Για τη σκληρή μάργα Λευκωσίας, για διατμητική τάση q ίση με το ήμισυ της τιμής σε αστοχία, το μέτρο ελαστικότητας E (E_{50}) ισούται με 29.4MPa και 74.2MPa για τάσεις περίσφιξης σ'_c ίσες με 120kPa και 1000kPa αντίστοιχα.

Επιπλέον, είναι γνωστό από την επιστημονική βιβλιογραφία ότι η εξάρτηση της εδαφικής δυσκαμψίας από τη μέση ενεργό τάση είναι μη γραμμική. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την εξίσωση των Hardin & Richard (1963), το μέτρο διάτμησης είναι συνάρτηση της ρίζας της μέσης ενεργού τάσεως. Στην ίδια λογική, το παρόν προσομοίωμα θεωρεί ότι το μέτρο του Young E είναι μια συνάρτηση δύναμης (power law) της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ'_v που δίδεται από την πιο κάτω σχέση:

$$E = A\sigma'_v{}^n p_a^{1-n} \quad \text{Εξίσωση 9.5}$$

όπου A και n παράμετροι του μοντέλου και p_a μια πίεση αναφοράς (μέση ατμοσφαιρική πίεση) η οποία ισούται με 100kPa.

Ένα καθαρά ελαστικό καταστατικό προσομοίωμα (δηλ. $\dot{\epsilon}_{pl,ij} = 0$ στην Εξ. 9.4) είναι σε θέση να προβλέψει διογκώσεις λόγω αύξησης του ποσοστού υγρασίας του εδάφους και συρρίκνωση λόγω μείωσης του ποσοστού υγρασίας. Για παράδειγμα, μια μείωση της μύζησης λόγω διαβροχής οδηγεί σε μείωση των ενεργών ορθών τάσεων (θεωρώντας ότι οι ολικές τάσεις παραμένουν σταθερές), η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην ανάπτυξη αρνητικής μεταβολής ογκομετρικής παραμόρφωσης, δηλ. διόγκωση σύμφωνα με τη γεωτεχνική σύμβαση προσήμου. Αντίθετα, μια αύξηση της μύζησης λόγω ξήρανσης οδηγεί σε αύξηση των ενεργών ορθών τάσεων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θετικής μεταβολής της ογκομετρικής παραμόρφωσης (δηλ. συρρίκνωση). Αν και από άποψη προσήμου οι προβλέψεις ενός καθαρά ελαστικού μοντέλου είναι ορθές, τα μεγέθη αυτών των παραμορφώσεων γενικά δεν αντικατοπτρίζουν τις πειραματικές παρατηρήσεις (π.χ. δεδομένα οιδημέτρου). Ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι ένα καθαρά ελαστικό μοντέλο δεν μπορεί να προβλέψει κατάρρευση λόγω διαβροχής, αφού η μείωση της μύζησης και η αύξηση των ενεργών τάσεων παράγει πάντα μόνο διογκώσεις σύμφωνα με την Εξ. 9.2.

Με βάση τα παραπάνω, είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός μηχανισμού ανάπτυξης ανελαστικών (πλαστικών) παραμορφώσεων που θα καθιστούν το μοντέλο ικανό να αναπαράγει τα πειραματικά δεδομένα οιδημέτρου (δοκιμές διόγκωσης/ κατάρρευσης). Για την επίτευξη αυτού, η μεταβολή της ανελαστικής (πλαστικής) ογκομετρικής παραμόρφωσης λόγω μεταβολής της μύζησης υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\dot{\epsilon}_{vpl} = -\frac{a\dot{s}\chi - (1-a)\langle -\dot{s} \rangle \chi}{D_{vpl}} \quad \text{Εξίσωση 9.6}$$

όπου a είναι παράμετρος του μοντέλου, s η μύζηση, D_{vpl} ένα πλαστικό μέτρο δυσκαμψίας και $\langle \cdot \rangle$ οι αγκύλες Macaulay (δηλ. $[\cdot] + \cdot / 2$). Η Εξ. 9.6 προβλέπει θετικές μεταβολές πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης (συρρίκνωση) όσο μειώνεται η μύζηση ($\dot{s} < 0$) και αρνητικές πλαστικές παραμορφώσεις (διόγκωση) καθώς αυξάνεται η μύζηση ($\dot{s} > 0$), δηλαδή η $\dot{\epsilon}_{vpl}$ έχει πάντα αντίθετο πρόσημο από την αντίστοιχη ελαστική ογκομετρική παραμόρφωση $\dot{\epsilon}_{vel}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διογκώσεις που προβλέπει το μοντέλο να είναι μικρότερες από αυτές που θα προέβλεπε ένα καθαρά ελαστικό προσομοίωμα. Επίσης, η Εξ. 9.6 παράγει αρνητικές πλαστικές παραμορφώσεις κατά την ξήρανση σε μικρότερο βαθμό από ότι θετικές πλαστικές παραμορφώσεις κατά τη διαβροχή, γεγονός που οφείλεται στις αγκύλες Macaulay και ελέγχεται από την παράμετρο a , αποτρέποντας έτσι την εμφάνιση διόγκωσης του εδάφους κατά την ξήρανση.

Το πλαστικό μέτρο δυσκαμψίας D_{vpl} ορίζεται ως μια αύξουσα συνάρτηση της ενεργού κατακόρυφης τάσης σ'_v αλλά ταυτόχρονα φθίνουσα συνάρτηση της ολικής κατακόρυφης τάσης σ_v ως ακολούθως:

$$D_{vpl} = p_a / 3 + \left(\frac{c_1}{1 + c_3 (\sigma_v / p_a)} + c_2 \right) \sigma_v'^m p_a^{1-m} \quad \text{Εξίσωση 9.7}$$

όπου m , c_1 , c_2 και c_3 είναι παράμετροι του μοντέλου. Όσο αυξάνεται το σ_v , το πλαστικό μέτρο δυσκαμψίας D_{vpl} φθίνει και κατά συνέπεια οι πλαστικές παραμορφώσεις που προβλέπει η Εξ. 9.6 αυξάνονται κατ' απόλυτο τιμή. Αυτό δίνει την ικανότητα στο προσομοίωμα να προβλέπει κατάρρευση του εδάφους (μεγάλες θετικές ογκομετρικές παραμορφώσεις) για μεγάλες τιμές σ_v όταν $\dot{s} < 0$ (διαβροχή). Αντίθετα, όταν οι τιμές σ_v είναι αμελητέες, το D_{vpl} γίνεται πολύ μεγάλο (σχεδόν απειρίζεται) με αποτέλεσμα η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση να είναι αμελητέα και η διόγκωση που προβλέπει το μοντέλο να παραμένει σε υψηλά επίπεδα, όπως παρατηρείται σε δοκιμές ελεύθερης διόγκωσης.

Τέλος, για τον προσδιορισμό των συνιστωσών του τανυστή πλαστικών παραμορφώσεων που χρειάζεται η Εξ. (9.2) για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων, γίνεται η θεώρηση ότι η πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση της Εξ. (9.6) κατανέμεται χάριν απλότητας ισόποσα στις τρεις ορθές πλαστικές παραμορφώσεις, δηλαδή $\dot{\epsilon}_{pl,ij} = \dot{\epsilon}_{vpl} / 3$ για $i=j$ και $\dot{\epsilon}_{pl,ij} = 0$ για $i \neq j$, εν είδη νόμου ροής (flow rule). Το σύνολο των εξισώσεων του

καταστατικού προσοιώματος (Εξ. 9.2 - 9.7) περιλαμβάνει συνολικά οκτώ παραμέτρους που καλείται να προσδιορίσει ο χρήστης μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης.

9.2 Βαθμονόμηση Καταστατικού Προσομοιώματος

Το καταστατικό προσομοίωμα βαθμονομήθηκε για τη σκληρή, μέτρια διογκώσιμη μάργα Λευκωσίας, η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ενεργού ζώνης στην περιοχή μελέτης στο νέο campus του Πανεπιστημίου Κύπρου και για την οποία παρήχθησαν τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα. Η βαθμονόμηση των περισσότερων εκ των παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος έγινε στο υπολογιστικό περιβάλλον όπου προορίζονταν να γίνουν οι αναλύσεις αλληλεπίδρασης πλάκας θεμελίωσης-εδάφους, δηλαδή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D. Το καταστατικό προσομοίωμα εισήχθη στο Plaxis 2D μέσω μιας υπορουτίνας (user model subroutine) γραμμένης σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Οι τιμές των οκτώ παραμέτρων του καταστατικού προσομοιώματος που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση δίνονται στον Πίνακα 9.1.

Οι τιμές των παραμέτρων A και n της εξίσωσης υπολογισμού του ελαστικού μέτρου του Young (Εξ. 9.5) υπολογίστηκαν βάσει των πειραματικών δεδομένων μέτρου E_{50} που λήφθηκαν από τις τριαξονικές δοκιμές. Ο λόγος του Poisson ν δεν μετρήθηκε εργαστηριακά, κάτι που θα απαιτούσε τη διενέργεια ιδιαίτερα χρονοβόρων τριαξονικών δοκιμών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (CD). Ως εκ τούτου, υποτέθηκε ότι ο λόγος του Poisson της μάργας Λευκωσίας είναι ίσος με 0.25, η οποία είναι μια τυπική τιμή για αργιλικά εδάφη (Chakraborty et al., 2013) και μάργες (Gercek, 2007) με βάση τη βιβλιογραφία.

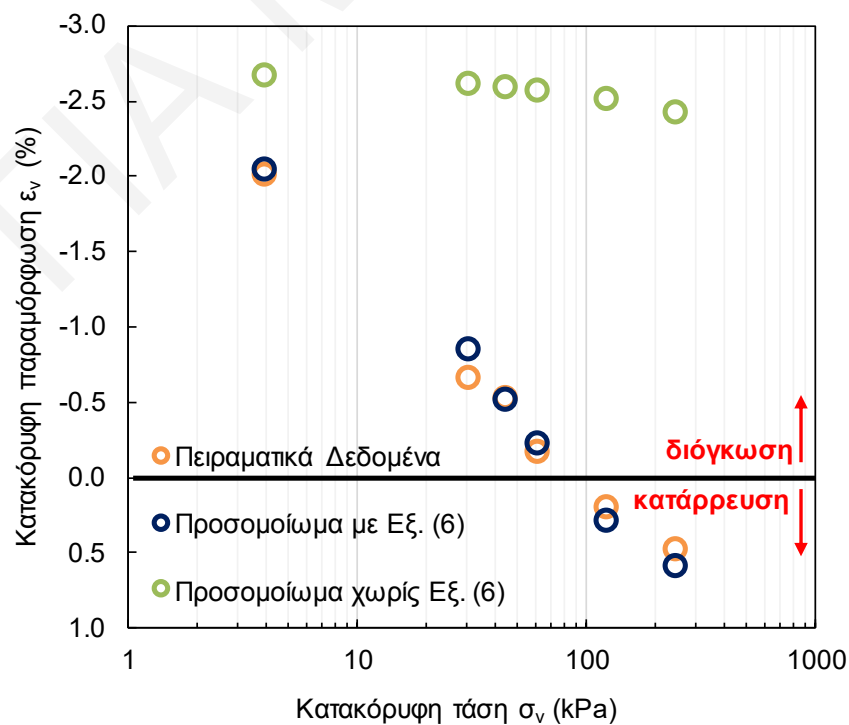
Οι υπόλοιποι παράμετροι του καταστατικού προσομοιώματος βαθμονομήθηκαν με διαδικασία δοκιμής-σφάλματος (trial-and-error) πραγματοποιώντας συζευγμένες (μηχανικής παραμόρφωσης – ροής νερού) προσομοιώσεις των πειραμάτων διόγκωσης/κατάρρευσης σε οιδημέτρο στα δείγματα σκληρής, μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας (Σχήμα 9.1).

Οι παράμετροι m , c_1 , c_2 και c_3 προσδιορίστηκαν μέσω δοκιμής-σφάλματος υπό την προϋπόθεση ότι όλα τα εδαφικά δοκίμια είχαν αρχικό βαθμό κορεσμού S_r (πριν τον υδρεμοτισμό) ίσο με 52% (αρχική μύζηση 3500kPa). Βασικά ζητούμενα της βαθμονόμησης αυτών των παραμέτρων είναι 1) η πρόβλεψη ελεύθερης διόγκωσης ίσης με 2%, 2) πρόβλεψη πίεσης διόγκωσης κοντά στα 100kPa, και 3) η καμπύλη που

διαμορφώνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο διάγραμμα του Σχήματος 9.1 να είναι όσο το περισσότερο δυνατόν μια ευθεία γραμμή. Η επιλογή της τιμής της παραμέτρου α έγινε με γνώμονα η παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διαβροχή υπό χαμηλές τάσεις να ανακτάται σχεδόν πλήρως με μετέπειτα ξήρανση στην αρχική κατάσταση κορεσμού, συμπεριφορά γενικά αναμενόμενη για σιφρά αργιλικά εδάφη (Alonso et al. 1999, Romero et al. 2003).

Πίνακας 9.1 Τιμές παραμέτρων καταστατικού προσομοιώματος.

Συνιστώσα καταστατικού προσομοιώματος	Παράμετρος	Τιμή
Μέτρο του Young	A	394
	n	0.2
Λόγος του Poisson	v	0.25
Ρυθμός ογκομετρικής πλαστικής παραμόρφωσης	α	0.75
Πλαστικό μέτρο δυσκαμψίας	m	0.4
	c1	1360
	c2	146
	c3	19.2



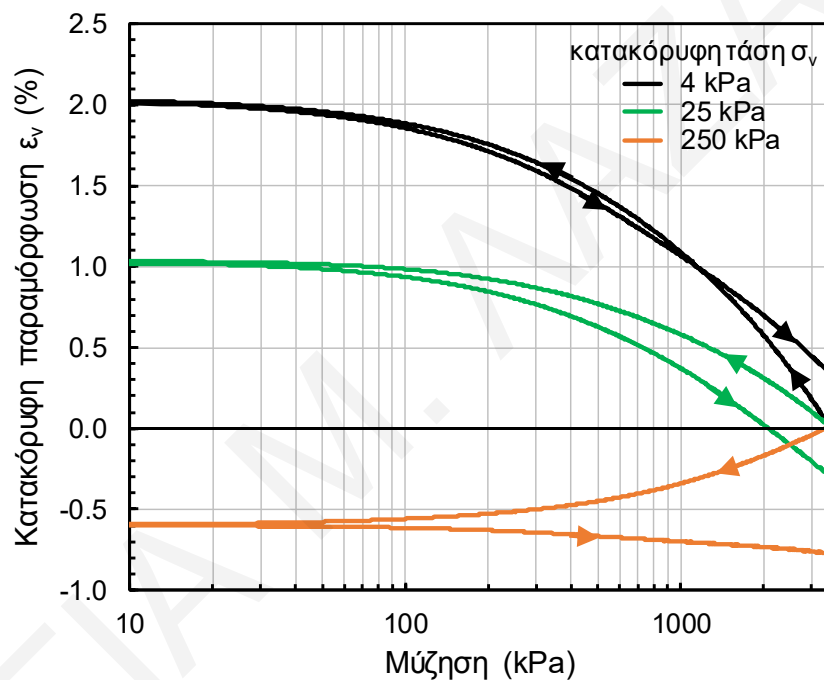
Σχήμα 9.1: Κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω υδρεμποτισμού δοκιμίων υπό διάφορες τιμές κατακόρυφης τάσης: πειραματικά δεδομένα και προβλέψεις καταστατικού προσομοιώματος.

Στο Σχήμα 9.1 πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων διόγκωσης/κατάρρευσης της σκληρής μάργας Λευκωσίας και των τελικών προβλέψεων του καταστατικού προσομοιώματος που μοντελοποιήθηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρείται ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα, χάρη στην ανάπτυξη πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων, έχει τη δυνατότητα να προβλέπει την κατάρρευση του εδάφους για κατακόρυφες τάσεις μεγαλύτερες της πίεσης διόγκωσης ($\sigma_v > 90 \text{kPa}$). Αντίθετα, στην περίπτωση που ο μηχανισμός πρόβλεψης πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων αγνοηθεί (παράληψη Εξ. 9.6) τότε το καταστατικό προσομοίωμα προβλέπει μόνο διόγκωση του εδάφους, η οποία επηρεάζεται ελάχιστα από την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση.

Ο μηχανισμός ανάπτυξης κατάρρευσης στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων χάρη στο προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα μπορεί να περιγραφεί ως εξής. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D, η υπορουτίνα καταστατικού προσομοιώματος καλείται με σκοπό να ανανεωθούν οι ενεργές τάσεις σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης Gauss χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις μεταβολές παραμορφώσεων και τις μεταβολές της μύζησης που παράγονται από τον αλγόριθμο επίλυσης των συζευγμένων εξισώσεων συνολικής ισορροπίας κόμβων και εξισώσεων ροής (global solution algorithm). Σύμφωνα με την Εξ. 9.6, οι μεταβολές των πλαστικών παραμορφώσεων είναι θετικές όταν το έδαφος διαβρέχεται (μείωση μύζησης s) οδηγώντας σε μια επιπλέον μείωση της ενεργού τάσης (Εξ. 9.2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θλιπτικών μη-εξισορροπημένων δυνάμεων (unbalanced forces) οι οποίες θα παράξουν επιπρόσθετες ολικές παραμορφώσεις που θα είναι συστολικές (συρρίκνωση) στο επόμενο βήμα επίλυσης των εξισώσεων συνολικής ισορροπίας. Αυτές οι παραμορφώσεις γίνονται μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η ορθή κατακόρυφη ολική τάση σ_v (Εξ. 9.7) και έτσι δύνανται να οδηγήσουν σε κατάρρευση (συρρίκνωση κατά τον υδρεμποτισμό) του εδαφικού ιστού αντί για διόγκωση, για τιμές σ_v μεγαλύτερες της πίεσης διόγκωσης.

Στο Σχήμα 9.2 φαίνεται η εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης που προκύπτει χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα σε προσομοιώσεις πειραμάτων οιδιμέτρου συναρτήσει της απώλειας μύζησης κατά τον υδρεμποτισμό, αλλά και για μετέπειτα ξήρανση πίσω στην αρχική κατάσταση, δηλαδή για ένα πλήρη κύκλο ύγρανσης-ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι για χαμηλή τιμή της κατακόρυφης τάσης ($\sigma_v = 4 \text{kPa}$), η

διόγκωση 2% ανακτάται σχεδόν πλήρως στο τέλος του κύκλου. Αντίθετα, για κατακόρυφη τάση 250kPa, η οποία είναι μεγαλύτερη από την πίεση διόγκωσης, η μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης είναι αρνητική, δηλαδή έχουμε απώλεια όγκου, και κατά την ύγρανση (λόγω κατάρρευσης εδαφικού ιστού) και κατά την ξήρανση. Εντούτοις, η συρρίκνωση λόγω ξήρανσης (0.18%) είναι μικρότερη από την παραμόρφωση κατάρρευσης (0.6%) που αναπτύσσεται κατά το υδρομοτισμό που προηγείται. Αυτά τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς που παράγει το καταστατικό προσομοίωμα είναι ποιοτικώς συμβατά με πειραματικές παρατηρήσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Alonso et al. 1999, Romero et al. 2003)



Σχήμα 9.2: Εξέλιξη της κατακόρυφης παραμόρφωσης συναρτήσει της μύζησης για ένα πλήρη κύκλο ύγρανσης-ξηράνσης από προσομοιώσεις πειραμάτων οιδημέτρου χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 - ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

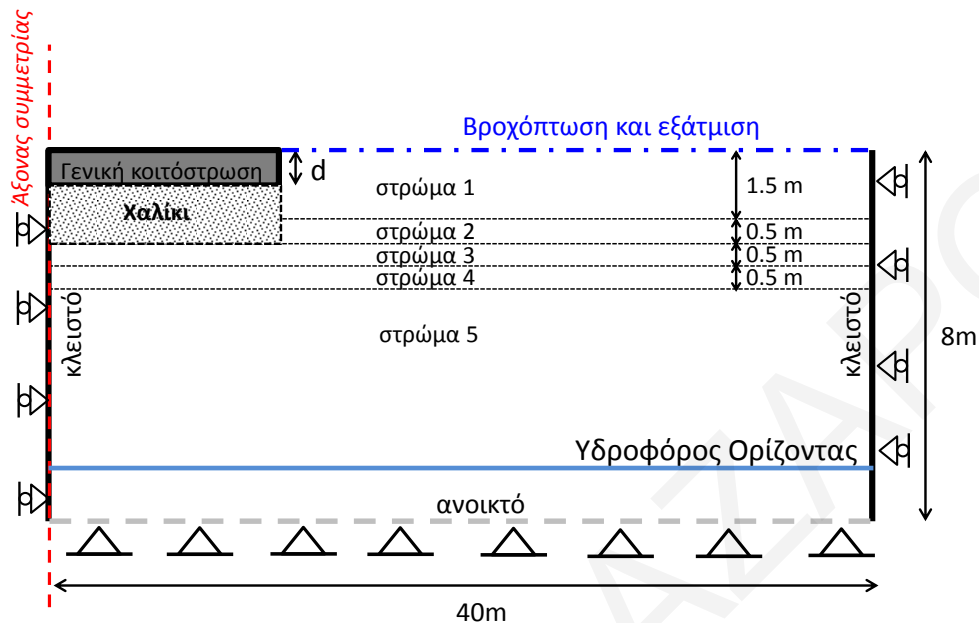
10.1 Εισαγωγή

Έχοντας κατανοήσει τους παράγοντες που επιδρούν στη μετακίνηση εδαφικής υγρασίας προς και από τον χώρο κάτω από μια γενική κοιτόστρωση, η παρούσα έρευνα προχώρησε στη μελέτη αλληλεπίδρασης διογκώσιμου εδάφους-πλάκας θεμελίωσης. Συγκεκριμένα, σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται η απόκριση μιας αβαθούς γενικής κοιτόστρωσης σε δράσεις που επιβάλλουν οι διογκώσεις και συρρικνώσεις του εδάφους θεμελίωσης εξαιτίας των εποχιακών μεταβολών υγρασίας στο έδαφος. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκαν σειρές παραμετρικών συζευγμένων αναλύσεων μηχανικής παραμόρφωσης-ροής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D χρησιμοποιώντας το καταστατικό μοντέλο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 9. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων εστιάζουν στις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στην πλάκα θεμελίωσης λόγω των διογκώσεων/συρρικνώσεων του εδάφους. Τα βέλη κάμψεως της πλάκας χρησιμοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο για την εξαγωγή των ισοδύναμων κατανομών δυσκαμψίας ελατηρίων Winkler.

10.2 Μεθοδολογία

Το εδαφικό προφίλ, οι συνοριακές συνθήκες ροής και το προφίλ διαπερατοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις αναλύσεις είναι τα ίδια με αυτά στις αναλύσεις ροής και παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.1. Επιπλέον, στο οριζόντιο κάτω σύνορο δεσμεύονται οι μετατοπίσεις και στις δυο διευθύνσεις (κατακόρυφη και οριζόντια). Στα κατακόρυφα σύνορα γίνεται δέσμευση μόνο του οριζόντιου βαθμού ελευθερίας, με τους κόμβους να είναι ελεύθεροι να κινηθούν κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Επισημαίνεται ότι και αυτές οι αναλύσεις εκμεταλλεύονται τη συμμετρία του προβλήματος, με την προϋπόθεση ότι τα φορτία της ανωδομής που επιβάλλονται στην πλάκα είναι επίσης συμμετρικά. Έτσι, το αριστερό κατακόρυφο σύνορο αποτελεί τον άξονα συμμετρίας και άρα περνά από το

μέσο της πλάκας. Έδαφος και θεμελίωση διακριτοποιούνται σε 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία με 12 σημεία ολοκλήρωσης Gauss.



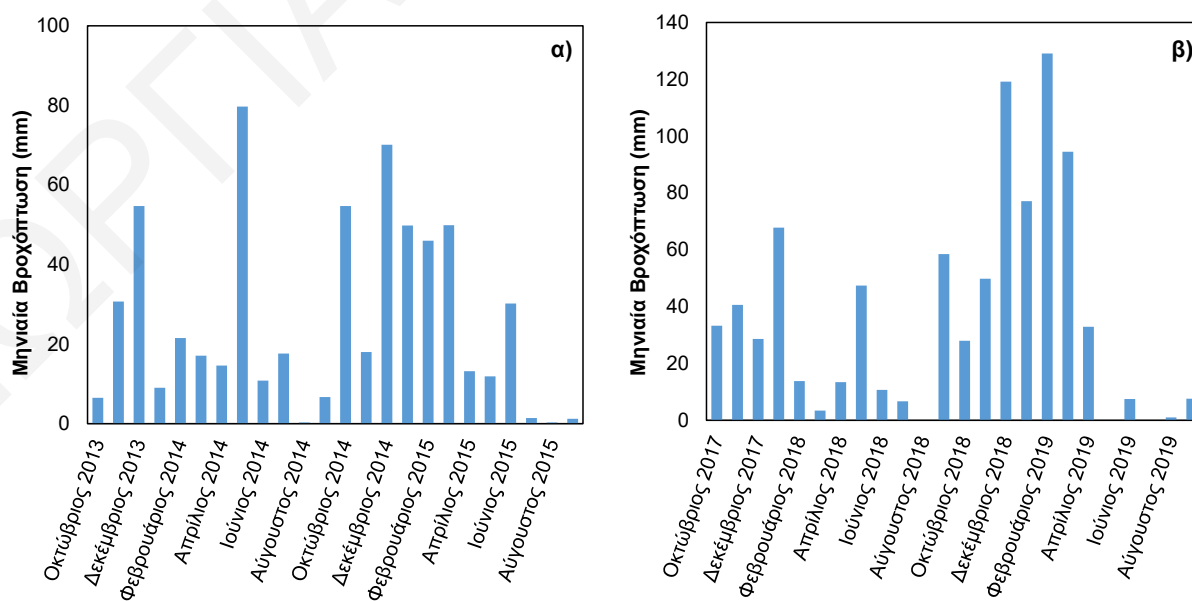
Σχήμα 10.1: Συνοριακές συνθήκες συζευγμένων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων.

Το σκυρόδεμα της πλάκας θεμελίωσης θεωρείται ότι συμπεριφέρεται πάντοτε ελαστικά, με το μέτρο του Young, τον λόγο του Poisson και το ειδικό του βάρος να είναι ίσα με 32GPa, 0.20 και 25.0kN/m³ αντίστοιχα. Το έδαφος και η πλάκα είναι πάντοτε σε επαφή, δηλαδή δεν τοποθετείται μεταξύ τους οποιαδήποτε διεπιφάνεια τριβής ή ανάπτυξης διακένου. Στον ουδέτερο άξονα της θεμελίωσης (δηλ. ο οριζόντιος άξονας στο μέσο της διατομής της) τοποθετήθηκε μια σειρά από στοιχεία κελύφους έτσι ώστε να είναι δυνατός ο εύκολος υπολογισμός των εντατικών μεγεθών (καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις) που αναπτύσσονται σε αυτήν. Η δυσκαμψία των στοιχείων κελύφους ορίστηκε με τέτοιο τρόπο (δηλ. 10⁻⁶ φορές μικρότερη από την καμπτική δυσκαμψία της θεμελίωσης) έτσι ώστε η παρουσία τους να έχει αμελητέα επίδραση στις παραμορφώσεις της πλάκας. Αυτό επιτρέπει την εξαγωγή των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στην πλάκα θεμελίωσης απλά πολλαπλασιάζοντας τις τιμές του διαγράμματος καμπτικών ροπών της αλυσίδας στοιχείων κελύφους επί 10⁺⁶. Το σκυρόδεμα θεωρήθηκε εντελώς αδιαπέρατο. Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους είναι αυτή του καταστατικού προσομοιώματος που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 9, με τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στη σκληρή, μέτρια διογκώσιμη μάργα Λευκωσίας. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (SWCC) και η εξάρτηση της διαπερατότητας από τον βαθμό κορεσμού περιγράφονται από τις εξισώσεις

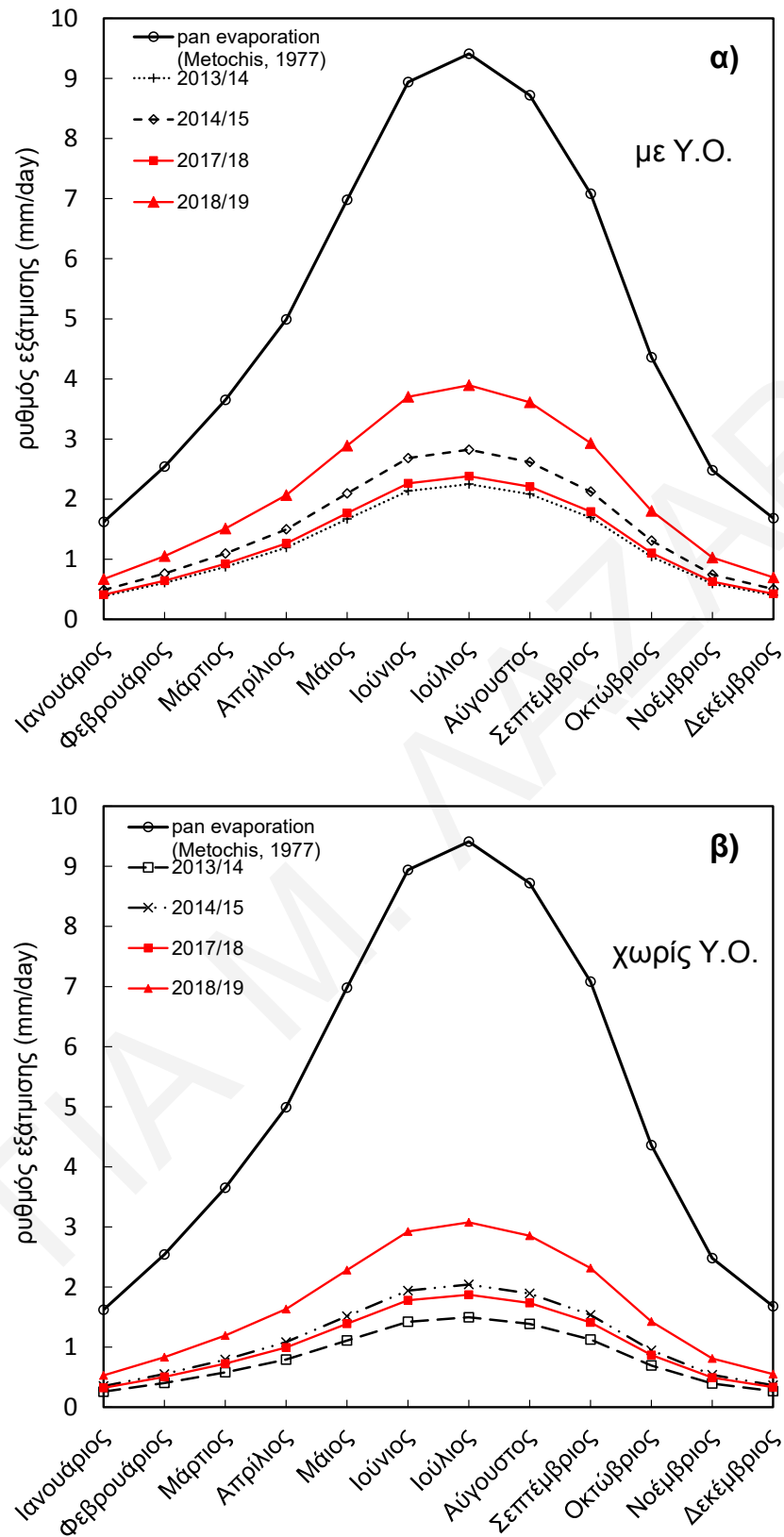
van Genuchten. Το ειδικό βάρος του εδάφους σε συνθήκες πλήρους κορεσμού θεωρήθηκε ίσο με 19kN/m^3 και ο δείκτης πόρων τέθηκε ίσος με 0.68.

Αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για κυκλική θεμελίωση (αξονοσυμμετρικές συνθήκες) και απειρομήκη ορθογωνική θεμελίωση (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) με πάχος $d=0.5\text{m}$ (και σε ορισμένες περιπτώσεις 1.0m) και διαμέτρου ή πλάτους 20m . Οι περισσότερες αναλύσεις έγιναν με την πάνω επιφάνεια της πλάκας να φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο 12kPa , που αντιστοιχεί χονδρικά στα φορτία που επιβάλλει ένα μονώροφο κτίριο σε συνήθεις συνθήκες (ελέγχου λειτουργικότητας). Για να εξεταστεί η επίδραση του μεγέθους της φόρτισης που δέχεται η πλάκα, παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης για τιμές ομοιόμορφου φορτίου 24kPa , 60kPa και 120kPa (π.χ. κτίρια 2, 5 και 10 ορόφων). Επίσης, παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τα τρία διαφορετικά προφίλ διαπερατοτήτων Α, Β και Γ του Σχ. 8.2, για τιμές της παραμέτρου g_1 ίσες με -2, -5 και -7 και τιμές παραμέτρου g_a της χαρακτηριστικής καμπύλης ίσες με 0.005, 0.016 και 0.05, εν τη απουσία ή παρουσία ενός ρηχού υδροφόρου ορίζοντα στα 7m βάθος.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν υπόψη είναι δυο διαφορετικών περιόδων, συγκεκριμένα Μάιος 2014 – Σεπτέμβριος 2015 και Μάιος 2018 – Σεπτέμβριος 2019 (Σχήμα 10.2). Η πρώτη περίοδος αφορά συνήθεις κλιματολογικές συνθήκες, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει ένα εξαιρετικά βροχερό χειμώνα (μεγαλύτερη βροχόπτωση των τελευταίων 100 χρόνων τουλάχιστον).



Σχήμα 10.2: Δεδομένα βροχόπτωσης για τα υδρολογικά έτη α) 2013/14 – 2014/15 και β) 2017/18 – 2018/19.



Σχήμα 10.3: Επιφανειακή εξάτμιση λεκάνης (και εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19 για παραμέτρους εδάφους $g_a=0.016$, $g_i=-5$ και προφίλ διαπερατότητας A: α) παρουσία ρηχού υδροφόρου και β) απουσία υδροφόρου.

Τα δεδομένα βροχόπτωσης λήφθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Αθαλάσσας του Τμήματος Μετεωρολογίας Κύπρου, που βρίσκεται σε απόσταση 1.2km από την περιοχή του σταθμού μέτρησης εδαφικής υγρασίας και μύζησης.

Στο Σχήμα 10.3 παρουσιάζονται οι τιμές εξάτμισης για τα υδρολογικά έτη 2013/14 – 2014/15 και 2017/18 – 2018/19 με παρουσία (Σχήμα 10.3α) και απουσία υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 10.3β). Τα δεδομένα pan evaporation του Metochis (1977) προσαρμόζονται προς τα κάτω (scale down) με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 8. Οι εν λόγω τιμές αφορούν τις αναλύσεις με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-5$ και τιμές διαπερατοτήτων που αντιστοιχούν στο Προφίλ Α. Να διευκρινιστεί ότι οι μηνιαίες τιμές εξάτμισης που προέκυψαν κατανέμονται ομοιόμορφα στις χωρίς βροχόπτωση μέρες ενός δεδομένου μήνα. Για τις αναλύσεις χωρίς ρηχό υδροφόρο ορίζοντα, για να επιτευχθεί ο αρχικός βαθμός κορεσμού (ίσος με 55%) εντός ολόκληρου του εδαφικού προφίλ, επιβλήθηκε αρχική τιμή μύζησης ανάλογα με τη θεωρούμενη κάθε φορά SWCC.

Στον Πίνακα 10.1 παρουσιάζονται οι τιμές μειωτικού συντελεστή αναγωγής της pan evaporation που χρησιμοποιήθηκαν για τα υδρολογικά έτη 2013/14, 2014/15, 2017/18 και 2018/19 εν απουσία ή παρουσία του ρηχού υδροφόρου ορίζοντα για να προκύψουν οι τιμές εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους που επιβλήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Επειδή ο ρυθμός εκροής από τον ρηχό Υ.Ο. εξαρτάται από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, ο μειωτικός συντελεστής αναγωγής διαφέρει ανάλογα με τις παραμέτρους διαπερατότητας και SWCC της κάθε ανάλυσης.

Πίνακας 10.1: Μειωτικός συντελεστής επιφανειακής εξάτμισης λεκάνης για κάθε υδρολογικό έτος για διαφορετικές τιμές g_a .

Υδροφόρος Ορίζοντας	g_a	2013-2014	2014-2015	2017-2018	2018-2019
ΝΑΙ	0.016	0.239	0.300	0.253	0.414
ΌΧΙ		0.159	0.217	0.199	0.327
ΝΑΙ	0.05	0.190	0.249	0.202	0.363
ΌΧΙ		0.159	0.217	0.199	0.327
ΝΑΙ	0.005	0.386	0.453	0.405	0.569
ΌΧΙ		0.159	0.217	0.199	0.327

Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση δύο εξυγιαντικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην πράξη για τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων της διογκωσιμότητας του εδάφους, η προδιαβροχή και η αντικατάσταση του φυσικού εδάφους από χονδρόκοκκο υλικό (αμμοχάλικο). Στην περίπτωση της προδιαβροχής, το έδαφος διαβρέχεται για 20 μέρες επιβάλλοντας υδραυλικό φορτίο 20cm στην έκταση που θα καταλάβει η πλάκα. Επίσης μεσολαβούν 10 μέρες χωρίς διαβροχή (μηδενικό υδραυλικό φορτίο) πριν την τοποθέτηση της πλάκας. Στην περίπτωση της αντικατάστασης εδάφους, το αμμοχάλικο θεωρείται ως ένα ισότροπο γραμμικά ελαστικό υλικό με μέτρο του Young 100MPa και λόγο του Poisson 0.3 (Bowles, 1996). Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του αμμοχάλικου τίθενται τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις ροής του Κεφαλαίου 8.

Συνολικά εκτελέστηκαν 89 παραμετρικές συζευγμένες αναλύσεις αλληλεπίδρασης γενικής κοιτόστρωσης – εδάφους. Αναλυτικός κατάλογος με τους συνδυασμούς παραμέτρων και συνθηκών για κάθε ανάλυση δίνεται στον Πίνακα 10.2.

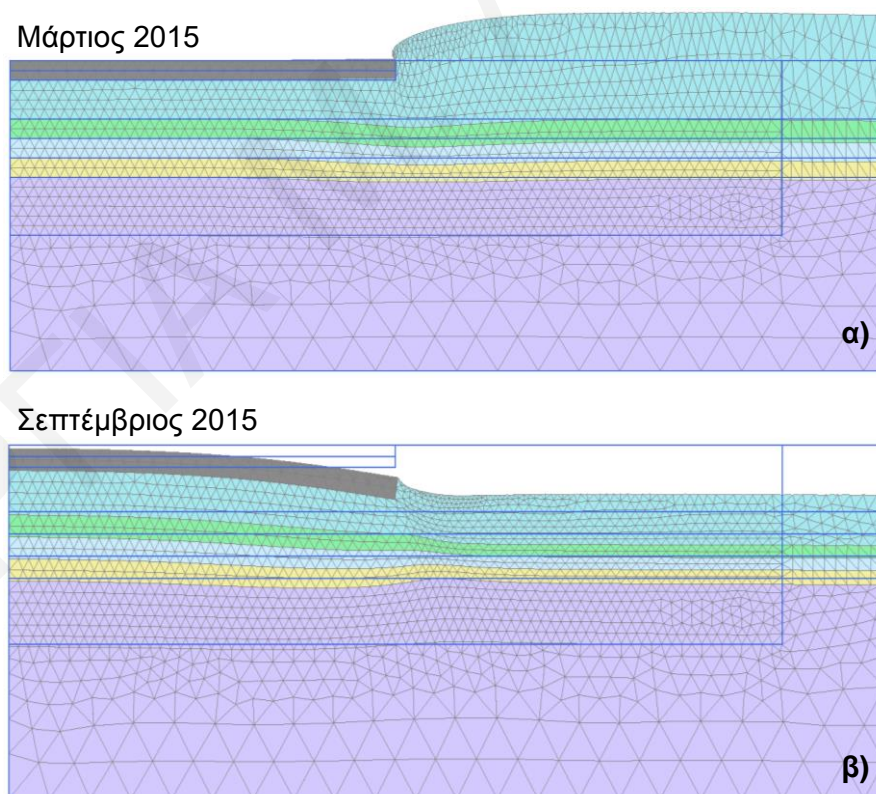
10.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αλληλεπίδρασης γενικής κοιτόστρωσης – διογκώσιμου εδάφους, με έμφαση στις διαφορές που προκύπτουν στις καμπτικές ροπές μεταβάλλοντας τις παραμέτρους και συνθήκες του προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συζευγμένες αναλύσεις έχουν σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος από ότι οι αναλύσεις ροής του Κεφαλαίου 8. Για παράδειγμα μια τυπική συζευγμένη ανάλυση είχε ελάχιστη διάρκεια περίπου 120 λεπτών έναντι 15 λεπτών αν η ανάλυση ήταν αποκλειστικά ροής.

Το Σχήμα 10.4 παρουσιάζει παράδειγμα με το παραμορφωμένο πλέγμα όπως προέκυψε από την ανάλυση κυκλικής πλάκας για την περίοδο 2014/15 με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 12kPa χωρίς υδροφόρο ορίζοντα. Το Σχήμα 10.4α δείχνει το παραμορφωμένο πλέγμα στο τέλος της χειμερινής-βροχερής περιόδου (Μάρτιος) και το Σχήμα 10.4β στο τέλος της θερινής-ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος). Στο τέλος της χειμερινής περιόδου το έδαφος διογκώνεται αναγκάζοντας την κάτω ίνα της πλάκας σε εφελκυσμό (ανύψωση του άκρου της πλάκας – edge lift) και την πλάκα να καμφθεί παίρνοντας κυρτό σχήμα (κοίλα προς τα πάνω). Αντίθετα, το έδαφος κοντά στο άκρο της θεμελίωσης που εκτίθεται στην επίδραση των φαινομένων εξάτμισης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού συρρικνώνεται σε

σχέση με το έδαφος κάτω από το κέντρο της, αναγκάζοντας έτσι την πλάκα να καμφθεί στρέφοντας τα κοίλα προς τα κάτω (center lift).

Η τάξη μεγέθους μετατοπίσεων που παράγονται λόγω των εποχιακών διακυμάνσεων υγρασίας στη μέτρια διογκώσιμη σκληρή μάργα Λευκωσίας φαίνεται στον Πίνακα 10.3, όπου δίνονται οι ανυψώσεις και καθιζήσεις στο κέντρο της πλάκας και στην ελεύθερη επιφάνεια στο δεξί άκρο του εδαφικού προφίλ (ελεύθερο πεδίο) στο τέλος της χειμερινής περιόδου και της θερινής περιόδου των υδρολογικών ετών 2014/15 και 2018/19. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τις ίδιες παραμέτρους με το παραπάνω παράδειγμα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι οι ανυψώσεις/καθιζήσεις στο ελεύθερο πεδίο για το έτος 2018/19 είναι σχεδόν δύο φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του 2014/15 (Πίνακας 10.3). Το γεγονός αυτό οφείλεται στον εξαιρετικά βροχερό χειμώνα και το εξαιρετικά ξηρό καλοκαίρι του υδρολογικού έτους 2018/19. Επίσης, η φραγή της εξάτμισης και της διαβροχής του εδάφους θεμελίωσης από την αδιαπέρατη πλάκα έχει ως αποτέλεσμα οι μετατοπίσεις του κέντρου της πλάκας να είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες από αυτές που παρατηρούνται στο ελεύθερο πεδίο.



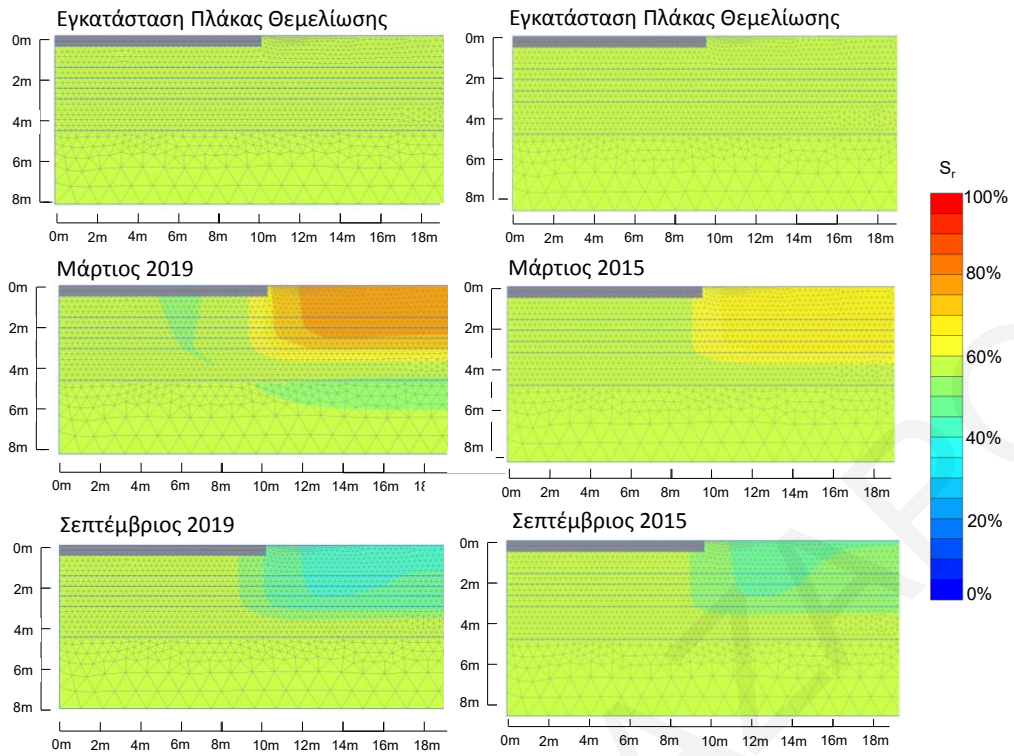
Σχήμα 10.4: Παραμορφωμένο πλέγμα στο τέλος α) της χειμερινής περιόδου και β) στο τέλος της θερινής περιόδου του υδρολογικού έτους 2014/15 χωρίς την παρουσία ρηχού Υ.Ο.

Αυτό εξηγείται συγκρίνοντας την κατανομή του βαθμού κορεσμού που προέκυψε για τις αναλύσεις του υδρολογικού έτους 2018/19, τόσο με απουσία όσο και με παρουσία Υ.Ο. με τα αντίστοιχα προφίλ για το υδρολογικό έτος 2014/15. Παρατηρούμε ότι για το έτος 2018/19 ο βαθμός κορεσμού κάτω από την πλάκα είναι πολύ μεγαλύτερος στο τέλος της βροχερής περιόδου (Μάρτιος) ενώ στο τέλος της θερινής περιόδου (Σεπτέμβριος) είναι μικρότερος. Πιο συγκεκριμένα, για το 2014/15 με απουσία υδροφόρου (Σχήμα 10.5) ο βαθμός κορεσμού S_r ήταν γύρω στο 65% στο τέλος Μαρτίου και 45% στο τέλος Σεπτεμβρίου στα ανώτερα 2m του εδαφικού προφίλ, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το 2018/19 είναι περίπου 75% και 40%. Το ίδιο παρατηρείται και με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 10.6), όπου οι τιμές για το 2014/15 ανέρχονται σε 65% έναντι 75% τον Μάρτιο του έτους 2018/19, ενώ τον Σεπτέμβριο περίπου 50% έναντι 35%.

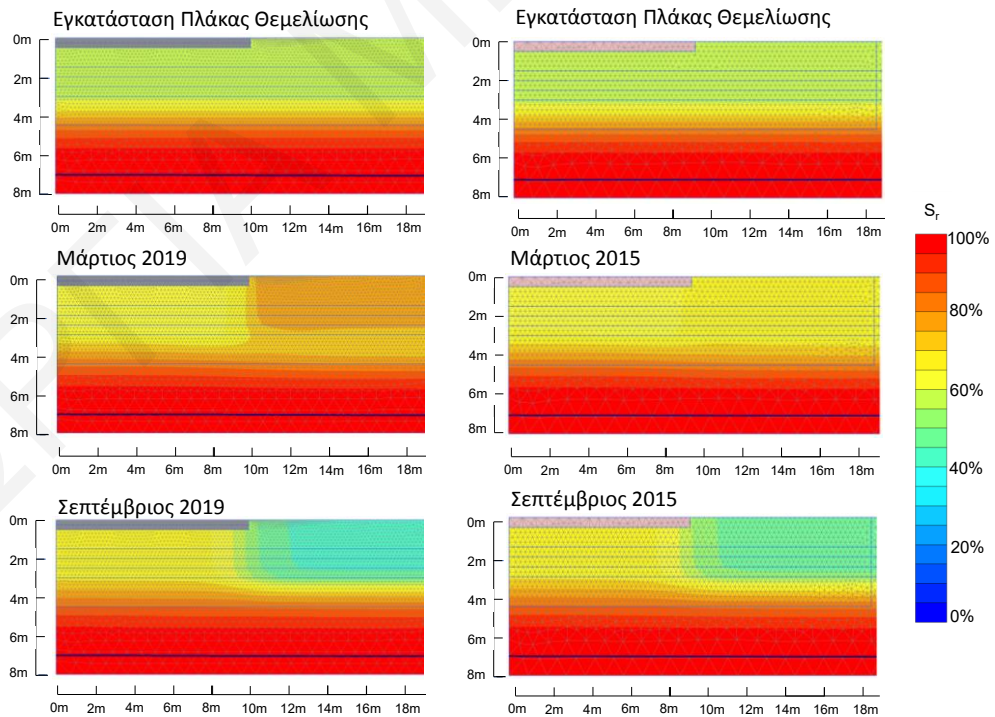
Πίνακας 10.3: Παραμορφώσεις στο τέλος της χειμερινής (Μάρτιος) και στο τέλος της θερινής (Σεπτέμβριος) περιόδου.

	Κέντρο της πλάκας (mm)	Ελεύθερη επιφάνεια (mm)
Μάρτιος 2015-χωρίς Υ.Ο.	-0.03	5.62
Σεπτέμβριος 2015-χωρίς Υ.Ο.	-0.81	-13.4
Μάρτιος 2015-με Υ.Ο.	2.58	8.88
Σεπτέμβριος 2015-με Υ.Ο.	1.50	-13.5
Μάρτιος 2019-χωρίς Υ.Ο.	-0.18	10.05
Σεπτέμβριος 2019-χωρίς Υ.Ο.	-1.64	-22.8
Μάρτιος 2019-με Υ.Ο.	3.22	18.67
Σεπτέμβριος 2019-με Υ.Ο.	1.24	-17.35

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών συζευγμένων αναλύσεων σε ότι αφορά την κάμψη της πλάκας θεμελίωσης. Το βασικό στοιχείο ενδιαφέροντος είναι η κατανομή καμπτικών ροπών της πλάκας και το πώς αυτή επηρεάζεται από τις παραμέτρους του προβλήματος οι οποίες αναφέρθηκαν πιο πάνω. Σε κάθε περίπτωση δίδεται το διάγραμμα καμπτικών ροπών σε τρεις φάσεις: α) την αρχική κατάσταση, δηλαδή μετά τη φόρτιση του θεμελίου αλλά πριν την επιβολή των κλιματικών δεδομένων στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, β) τη φάση των μέγιστων θετικών καμπτικών ροπών οι οποίες αναπτύσσονται στο τέλος της χειμερινής περιόδου και γ) τη φάση των μέγιστων αρνητικών ροπών που αναπτύσσονται στο τέλος



Σχήμα 10.5: Κατανομή βαθμού κορεσμού από αναλύσεις με απουσία υδροφόρου ορίζοντα για $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ Α και $d=0.5m$ για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19.



Σχήμα 10.6: Κατανομή βαθμού κορεσμού από αναλύσεις με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα για $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ Α και $d=0.5m$ για τα υδρολογικά έτη 2013/14 - 2014/15 και 2017/18 - 2018/19.

της θερινής περιόδου. Το σημείο μηδέν του οριζόντιου άξονα αντιστοιχεί στο κέντρο της γενικής κοιτόστρωσης ενώ στα 10m αντιστοιχεί το άκρο της. Τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών όλων των αναλύσεων του Πίνακα 10.2 για την αρχική κατάσταση (εγκατάσταση πλάκας), το τέλος της βροχερής περιόδου (Μάρτιος) και το τέλος της ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος) παρατίθενται στο Παράρτημα Ε.

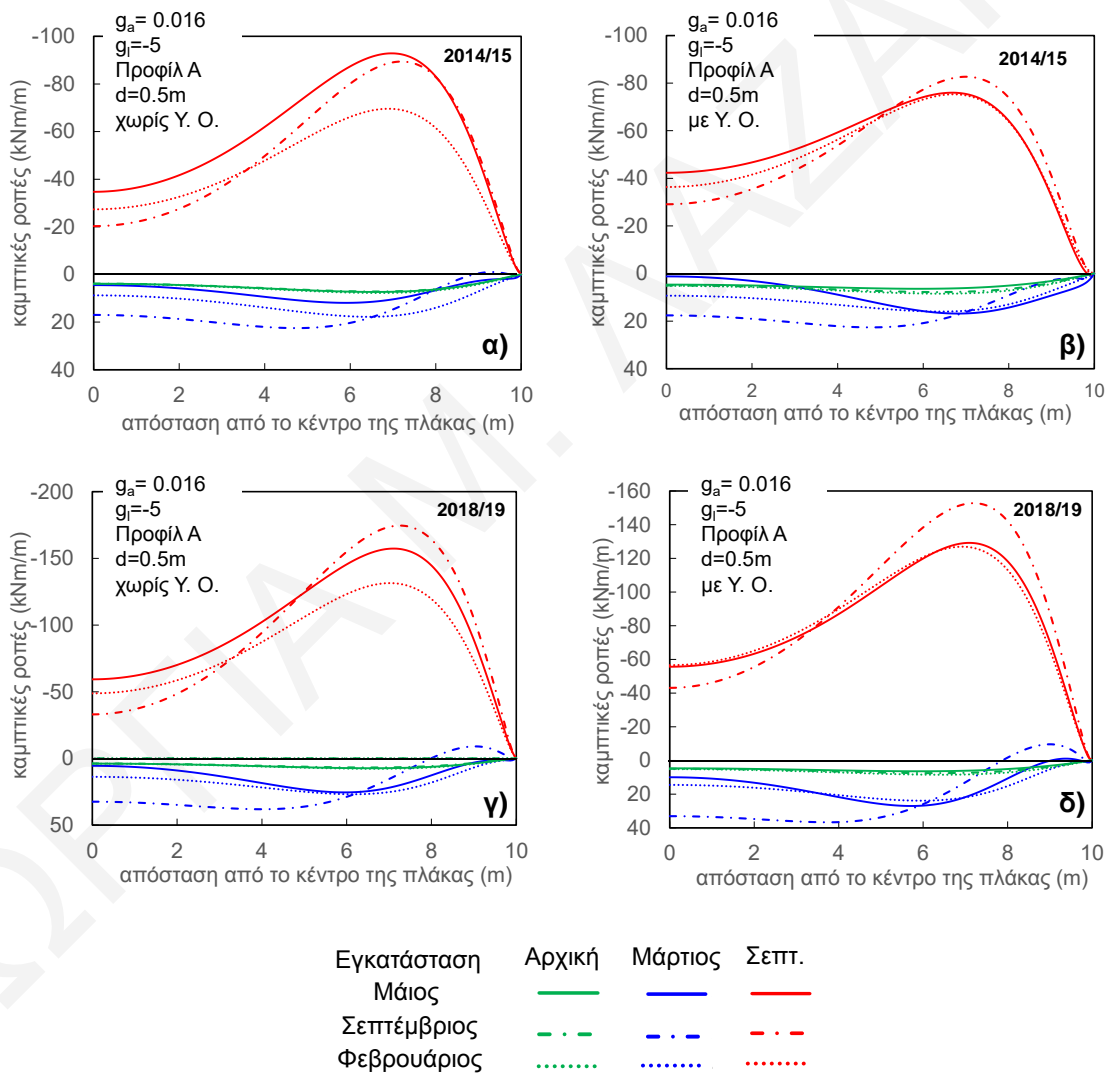
10.3.1 Επίδραση Υδρολογικού έτους και Περιόδου Εγκατάστασης της Πλάκας

Στο Σχήμα 10.7 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης για δυο διαφορετικά υδρολογικά έτη, το 2014/15 (τυπικό) και το 2018/19 (ακραία βροχερός χειμώνας και ακραία ξηρό καλοκαίρι) για διαφορετικές περιόδους εγκατάστασης της πλάκας (Μάιος 2014, Σεπτέμβριος 2014, Φεβρουάριος 2015, Μάιος 2018, Σεπτέμβριος 2018 και Φεβρουάριος 2019) από αναλύσεις με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α, πάχος πλάκας 0.5m και ομοιόμορφη φόρτιση $q=12\text{kPa}$, με ή χωρίς ρηχό υδροφόρο ορίζοντα (Αναλύσεις #1, 2, 6, 7, 11, 12, 16, 17, 50, 51, 58, 59). Οι μήνες εγκατάστασης της πλάκας επιλέγηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξεταστούν οι επιπτώσεις εγκατάστασης στο τέλος της θερινής-ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος) και στο τέλος της χειμερινής περιόδου (Φεβρουάριος). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι πριν από την εγκατάσταση της πλάκας τους μήνες Σεπτέμβριος 2014 και 2018 και Φεβρουάριος 2015 και 2019, επιβλήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα των προηγούμενων μηνών του εκάστοτε υδρολογικού έτους (δηλαδή από τον Μάιο 2014 και 2018 αντίστοιχα) έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση των κλιματολογικών παραγόντων στη διαφοροποίηση του προφίλ βαθμού κορεσμού για την εκάστοτε περίοδο εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης.

Εν τη απουσία υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 10.7α), παρατηρείται ότι οι καμπτικές ροπές στην αρχική φάση (φάση εγκατάστασης της πλάκας) είναι θετικές με μέγιστη τιμή περίπου στα 7.5kNm/m για όλες τις περιπτώσεις. Στο τέλος της χειμερινής περιόδου (Μάρτιος 2015) οι μέγιστες θετικές καμπτικές ροπές (εφελκυσμός κάτω ίνας) αυξάνονται σε 12kNm/m, 23kNm/m και 18kNm/m για εγκατάσταση της πλάκας τον Μάιο 2014, Σεπτέμβριο 2014 και Φεβρουάριο 2015 αντίστοιχα. Για κάθε περίπτωση σημειώνεται μια αύξηση των μέγιστων θετικών καμπτικών ροπών κατά περίπου 60%, 200% και 140% αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει επειδή η υγρασία μεταναστεύει προς το κέντρο της πλάκας, κατά τους βροχερούς μήνες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο βαθμός κορεσμού S_r σε μια απόσταση 3m-4m από το άκρο της πλάκας. Εγκατάσταση της πλάκας τον Σεπτέμβριο (τέλος ξηράς περιόδου) σημαίνει ότι η προσαύξηση της υγρασίας μέχρι το τέλος της υγρής

περίοδου θα είναι η μέγιστη δυνατή, εξού και η μεγαλύτερη αύξηση θετικής καμπτικής ροπής συμβαίνει στην περίπτωση που η πλάκα εγκαθίσταται τον Σεπτέμβριο.

Αντίθετα, οι μέγιστες ροπές στο τέλος της θερινής περιόδου (Σεπτέμβριος 2015) αλλάζουν πρόσημο και γίνονται αρνητικές (εφελκυσμός κάτω ίνας), ανεξάρτητα από τον μήνα εγκατάστασης της πλάκας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θεμελίωση να χάνει την υποστήριξή της αφού το έδαφος συρρικνώνεται και να κάμπτεται με τα κοίλα προς τα κάτω (εφελκυσμός πάνω ίνας). Πλέον σημαντικό είναι το ότι οι μέγιστες (κατ' απόλυτο τιμή) αρνητικές ροπές λόγω ξήρανσης προκύπτουν σαφώς μεγαλύτερες (3 με 8 φορές) από τις μέγιστες θετικές ροπές λόγω χειμερινής διαβροχής.



Σχήμα 10.7: Διαγράμματα καμπτικών ροπών για διαφορετικές περιόδους εγκατάστασης κυκλικής πλάκας και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12kPa$ από αναλύσεις α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.

Πίνακας 10.2: Συζευγμένες αναλύσεις μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

A/A	g_a	g_i	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμοχάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
1	0.016	-5	A	0.5			√			12	Μάιος		√
2	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
3	0.016	-5	A	0.5			√			24	Μάιος		√
4	0.016	-5	A	0.5			√			60	Μάιος		√
5	0.016	-5	A	0.5			√			120	Μάιος		√
6	0.016	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
7	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
8	0.016	-5	A	0.5			√			24	Μάιος	√	
9	0.016	-5	A	0.5			√			60	Μάιος	√	
10	0.016	-5	A	0.5			√			120	Μάιος	√	
11	0.016	-5	A	0.5			√			12	Σεπτέμβριος	√	
12	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Σεπτέμβριος	√	
13	0.016	-5	A	0.5			√			24	Σεπτέμβριος	√	
14	0.016	-5	A	0.5			√			60	Σεπτέμβριος	√	
15	0.016	-5	A	0.5			√			120	Σεπτέμβριος	√	
16	0.016	-5	A	0.5			√			12	Φεβρουάριος	√	
17	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Φεβρουάριος	√	
18	0.016	-5	A	0.5			√			24	Φεβρουάριος	√	
19	0.016	-5	A	0.5			√			60	Φεβρουάριος	√	
20	0.016	-5	A	0.5			√			120	Φεβρουάριος	√	
21	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Μάιος	√	
22	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Μάιος	√	
23	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Μάιος	√	
24	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Σεπτέμβριος	√	
25	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Σεπτέμβριος	√	

Πίνακας 10.2 (συνέχεια): Συζευγμένες αναλύσεις μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμοχάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
26	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Σεπτέμβριος	√	
27	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Φεβρουάριος	√	
28	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Φεβρουάριος	√	
29	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Φεβρουάριος	√	
30	0.05	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
31	0.05	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
32	0.005	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
33	0.005	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
34	0.016	-7	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
35	0.016	-2	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
36	0.016	-5	B	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
37	0.016	-5	B	0.5			√			12	Μάιος	√	
38	0.016	-5	A	0.5				√	√	12	Μάιος	√	
39	0.016	-5	A	0.5		√	√		√	12	Μάιος	√	
40	0.016	-5	A	0.5	1.0		√			12	Μάιος	√	
41	0.016	-5	A	0.5				√		12	Μάιος	√	
42	0.016	-5	A	0.5		√	√			12	Μάιος	√	
43	0.016	-5	A	1.0			√			12	Μάιος	√	
44	0.016	-5	Γ	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
45	0.016	-5	Γ	0.5	1.0		√			12	Μάιος	√	
46	0.016	-5	Γ	0.5			√			12	Μάιος	√	
47	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Μάιος		√
48	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Μάιος		√
49	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Μάιος		√
50	0.016	-5	A	0.5			√			12	Σεπτέμβριος		√

Πίνακας 10.2 (συνέχεια): Συζευγμένες αναλύσεις μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

A/A	g_a	g_l	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμοχάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
51	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Σεπτέμβριος		√
52	0.016	-5	A	0.5			√			24	Σεπτέμβριος		√
53	0.016	-5	A	0.5			√			60	Σεπτέμβριος		√
54	0.016	-5	A	0.5			√			120	Σεπτέμβριος		√
55	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Σεπτέμβριος		√
56	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Σεπτέμβριος		√
57	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Σεπτέμβριος		√
58	0.016	-5	A	0.5			√			12	Φεβρουάριος		√
59	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Φεβρουάριος		√
60	0.016	-5	A	0.5			√			24	Φεβρουάριος		√
61	0.016	-5	A	0.5			√			60	Φεβρουάριος		√
62	0.016	-5	A	0.5			√			120	Φεβρουάριος		√
63	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Φεβρουάριος		√
64	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Φεβρουάριος		√
65	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Φεβρουάριος		√
66	0.005	-5	A	0.5			√			12	Μάιος		√
67	0,05	-5	A	0.5			√			12	Μάιος		√
68	0.016	-2	A	0.5			√			12	Μάιος		√
69	0.016	-7	A	0.5			√			12	Μάιος		√
70	0.016	-5	B	0.5			√			12	Μάιος		√
71	0.016	-5	Γ	0.5			√			12	Μάιος		√
72	0.005	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
73	0.05	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
74	0.016	-5	B	0.5			√		√	12	Μάιος		√
75	0.016	-5	Γ	0.5			√		√	12	Μάιος		√

Πίνακας 10.2 (συνέχεια): Συζευγμένες αναλύσεις μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμο-χάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
76	0.016	-5	A	0.5				√	√	12*	Μάιος	√	
77	0.016	-5	A	0.5				√	√	120*	Μάιος	√	
78	0.016	-5	A	0.5				√		12*	Μάιος	√	
79	0.016	-5	A	0.5				√		120*	Μάιος	√	
80	0.016	-5	A	0.5				√	√	12**	Μάιος	√	
81	0.016	-5	A	0.5				√	√	120**	Μάιος	√	
82	0.016	-5	A	0.5				√		12**	Μάιος	√	
83	0.016	-5	A	0.5				√		120**	Μάιος	√	
84	0.016	-5	A	0.5				√		12**	Σεπτέμβριος	√	
85	0.016	-5	A	1.0				√		12**	Σεπτέμβριος		√
86	0.016	-5	A	0.5	1.0			√		12**	Σεπτέμβριος		√
87	0.016	-5	A	0.5	1.0			√		12	Μάιος	√	
88	0.016	-5	A	0.5	1.0			√		12**	Μάιος	√	
89	0.016	-5	A	0.5	1.0			√	√	12**	Μάιος	√	

*2 σημειακά φορτία

**3 σημειακά φορτία

Η ίδια περίπου συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση με παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 10.7β). Ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση σημειώνεται και πάλι αύξηση στις μέγιστες θετικές και αρνητικές τιμές καμπτικών ροπών αλλά μικρότερη σε σχέση με τις αναλύσεις χωρίς υδροφόρο ορίζοντα. Για τη χειμερινή περίοδο, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο υδροφόρος ορίζοντας τροφοδοτεί το έδαφος κάτω από το κέντρο της πλάκας με υγρασία περιορίζοντας έτσι τις μεγάλες διαφορές S_r μεταξύ κεντρικής και περιμετρικής περιοχής της πλάκας. Εντούτοις, μειωμένες εμφανίζονται οι ροπές παρουσία Υ.Ο. και τη θερινή περίοδο, παρόλο που οι διακυμάνσεις σε βαθμό κορεσμού και μύζηση κατά μήκος της πλάκας είναι μεγαλύτερες (Κεφάλαιο 8). Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι η σημαντικά αυξημένη υγρασία κάτω από την κεντρική περιοχή της πλάκας οδηγεί σε μειωμένη δυσκαμψία του εκεί εδάφους θεμελίωσης, δρώντας έτσι ανακουφιστικά στις κάμψεις με τα κοίλα προς τα κάτω που αναπτύσσονται στις ξηρές περιόδους.

Στα Σχήματα 10.7γ και δ εξετάζεται η ίδια περίπτωση αλλά για το υδρολογικό έτος 2018/19. Γενικά, οι μέγιστες τιμές καμπτικών ροπών είναι περίπου 1.5 φορά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του υδρολογικού έτους 2014/15 τόσο για την ανάλυση χωρίς όσο και για την ανάλυση με υδροφόρο ορίζοντα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το έτος 2018/19 χαρακτηρίζεται από ένα εξαιρετικά βροχερό χειμώνα και ένα εξαιρετικά ξηρό καλοκαίρι.

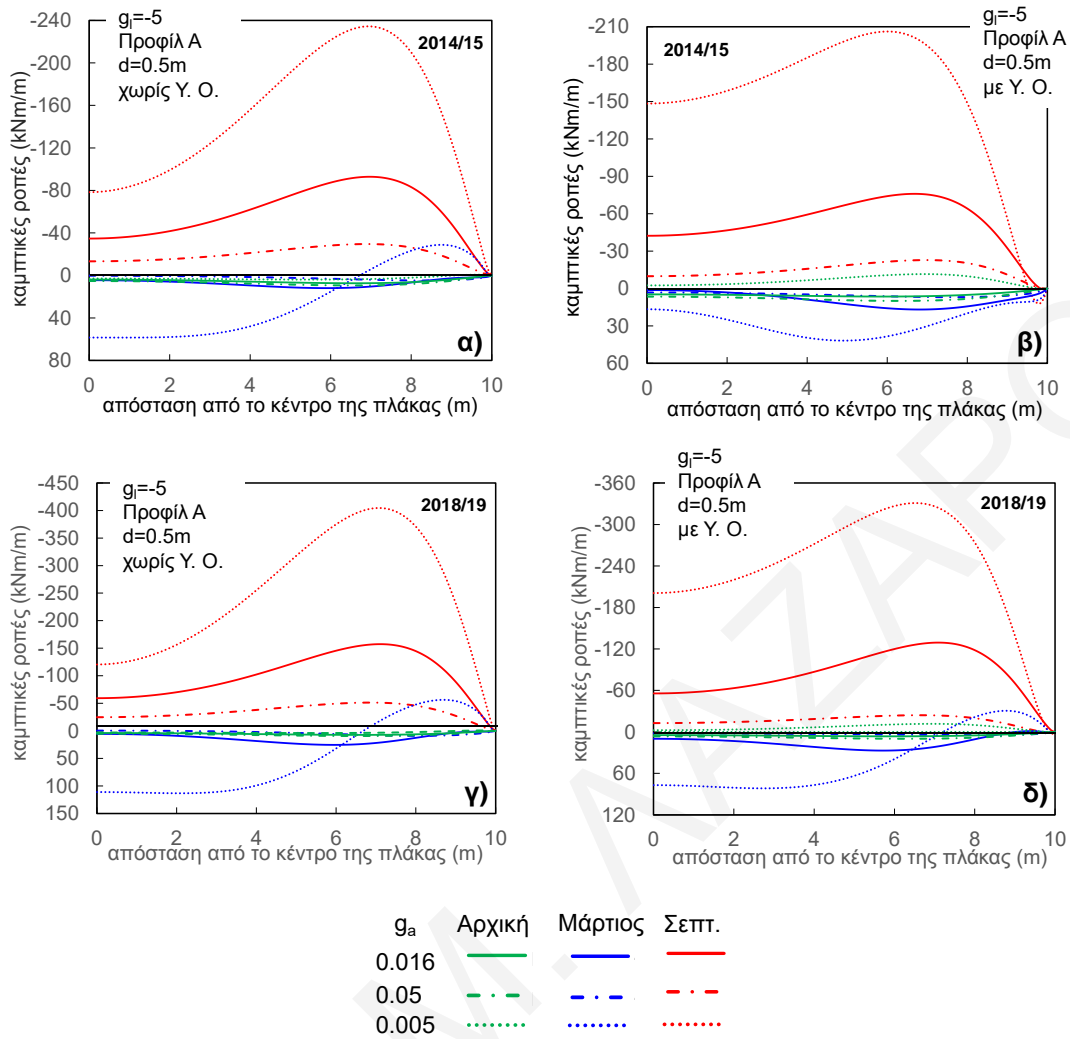
Οι ροπές που προκύπτουν αγνοώντας την επίδραση της διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους, δηλαδή οι πράσινες καμπύλες στα διαγράμματα του Σχ. 10.7, είναι πολύ μικρότερες από αυτές που θα αναπτυχθούν στην πραγματικότητα επί ενός διογκώσιμου εδάφους και μόνο θετικές. Αν ο σχεδιασμός της πλάκας γίνει βάσει αποκλειστικά των εντατικών μεγεθών από αναλύσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη διογκώσεις/συρρικνώσεις εδάφους (όπως γίνεται στην πράξη στην Κύπρο), η πλάκα θα οπλιστεί με τον ελάχιστο απαιτούμενο οπλισμό (0.15% του εμβαδού διατομής της πλάκας). Ο οπλισμός αυτός, θεωρώντας επικάλυψη 5cm, αντιστοιχεί σε ροπή αστοχίας 1) 130kNm/m αν αυτός τοποθετηθεί μόνο στο κάτω πέλμα (δεδομένου ότι οι ροπές είναι παντού θετικές), και 2) 145kNm/m αν τοποθετηθεί συντηρητικά και στο κάτω και στο πάνω πέλμα (κάτι το οποίο είναι πιθανότερο να συμβεί στην πράξη). Στην πρώτη περίπτωση, σύμφωνα με τα διαγράμματα του Σχήματος 10.7γ και δ, η πλάκα αναμένεται να αστοχήσει λόγω των κάμψεων της ξηράς περιόδου σε όλες τις περιπτώσεις. Στη δεύτερη περίπτωση, υπέρβαση

της αντοχής υπάρχει μόνο σε ορισμένα από τα αποτελέσματα αναλύσεων με τα μετεωρολογικά δεδομένα του ακραίου υδρολογικού έτους (2018/19).

10.3.2 Επίδραση Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού (SWCC)

Στο Σχήμα 10.8 πραγματοποιείται σύγκριση των καμπτικών ροπών των αναλύσεων με διαφορετική κάθε φορά τιμή της παραμέτρου g_a του μοντέλου van Genuchten (Αναλύσεις # 1, 2, 6, 7, 30, 31, 32, 33, 66, 67, 72, 73). Οι τιμές g_a επιλέγηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού της σκληρής μάργας Λευκωσίας σε όρους ολικής μύζησης ($g_a=0.016$), σε όρους μύζησης εδαφικού ιστού-matric suction ($g_a=0.05$), καθώς και μια ακραία τιμή ($g_a=0.005$) που θα αντιστοιχούσε σε ένα έδαφος με μεγαλύτερη πλαστικότητα. Παρατηρούμε ότι οι μικρότερες τιμές g_a (μετατόπιση της καμπύλης SWCC προς τα δεξιά) συμβάλλουν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων (κατ' απόλυτο τιμή) καμπτικών ροπών, τόσο στο τέλος της βροχερής όσο και στο τέλος της ξηρής περιόδου. Αυτό οφείλεται στο ότι το έδαφος με μικρότερο g_a εμφανίζει μεγαλύτερες μεταβολές μύζησης για τις ίδιες μεταβολές βαθμού κορεσμού. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 8.9α, αν και η κατανομή του βαθμού κορεσμού όσον αφορά το εύρος της ζώνης διακύμανσης της υγρασίας μεταβάλλεται με το g_a , οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές βαθμού κορεσμού είναι περίπου οι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις. Επομένως, η ανάλυση με $g_a=0.005$ θα παράξει μεγαλύτερες μεταβολές μύζησης και άρα μεταβολές στην εδαφική δυσκαμψία και σε παραμορφώσεις κατά μήκος της πλάκας.

Το Σχήμα 10.8β παρουσιάζει την κατανομή των καμπτικών ροπών της πλάκας για τις περιπτώσεις με υδροφόρο ορίζοντα. Αυτές οι αναλύσεις δίνουν περίπου 1.2 φορές μικρότερες καμπτικές ροπές σε σχέση με τις αναλύσεις όπου απουσιάζει ο υδροφόρος (Σχήμα 10.8α) γεγονός που οφείλεται στην αύξηση του βαθμού κορεσμού του εδάφους κάτω από το κέντρο της πλάκας λόγω των φαινομένων τριχοειδούς ανύψωσης οδηγώντας σε μικρότερες διακυμάνσεις του S_r τις χειμερινές περιόδους και σε σχετικά μικρότερη δυσκαμψία του εδάφους κάτω από το κέντρο της πλάκας. Τα Σχήματα 10.6γ και δ παρουσιάζουν την επίδραση του g_a σε συνάρτηση με τα μετεωρολογικά δεδομένα του υδρολογικού έτους 2018/19 εν τη απουσία ή παρουσία υδροφόρου ορίζοντα αντίστοιχα. Οι μέγιστες καμπτικές ροπές (θετικές και αρνητικές) που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες του έτους 2014/15 εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων βροχής του εν λόγω χειμώνα και του πολύ ξηρού καλοκαιριού του συγκεκριμένου έτους.



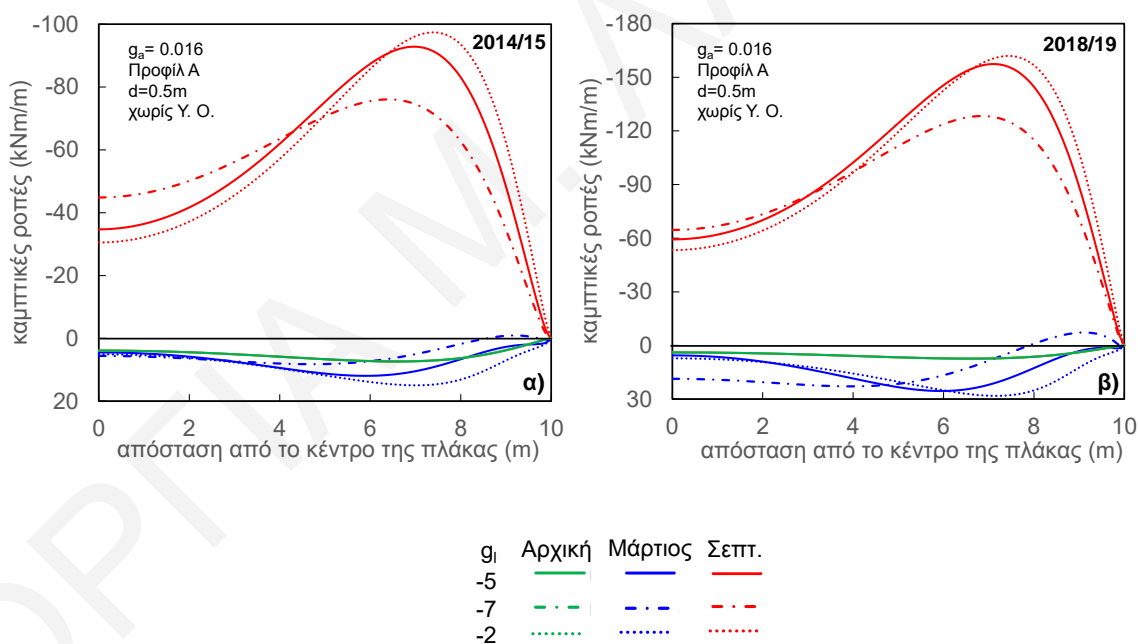
Σχήμα 10.8: Επίδραση της παραμέτρου g_a στις καμπτικές ροπές της πλάκας θεμελίωσης για αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.

10.3.3 Επίδραση Χαρακτηριστικών Διαπερατότητας

Στο Σχήμα 10.9 φαίνεται η επίδραση της παραμέτρου g_i στις καμπτικές ροπές της πλάκας θεμελίωσης (Αναλύσεις # 1, 6, 34, 35, 68, 69). Μικρότερες σε απόλυτο τιμή g_i (π.χ. -2) υποδηλώνουν μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της υδραυλικής διαπερατότητας όσο μειώνεται ο βαθμός κορεσμού (Εξίσωση 7.1). Η τιμή $g_i = -2$ οδηγεί σε μεγαλύτερες θετικές και αρνητικές ροπές στο τέλος της βροχερής και ξηρής περιόδου αντίστοιχα εξαιτίας του γεγονότος ότι οι διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού είναι συγκριτικά μεγαλύτερες και περιορίζονται σε μια στενή ζώνη κοντά στην περίμετρο της πλάκας, δίνοντας πιο απότομες μεταβολές στη δυσκαμψία του εδάφους κατά μήκος της.

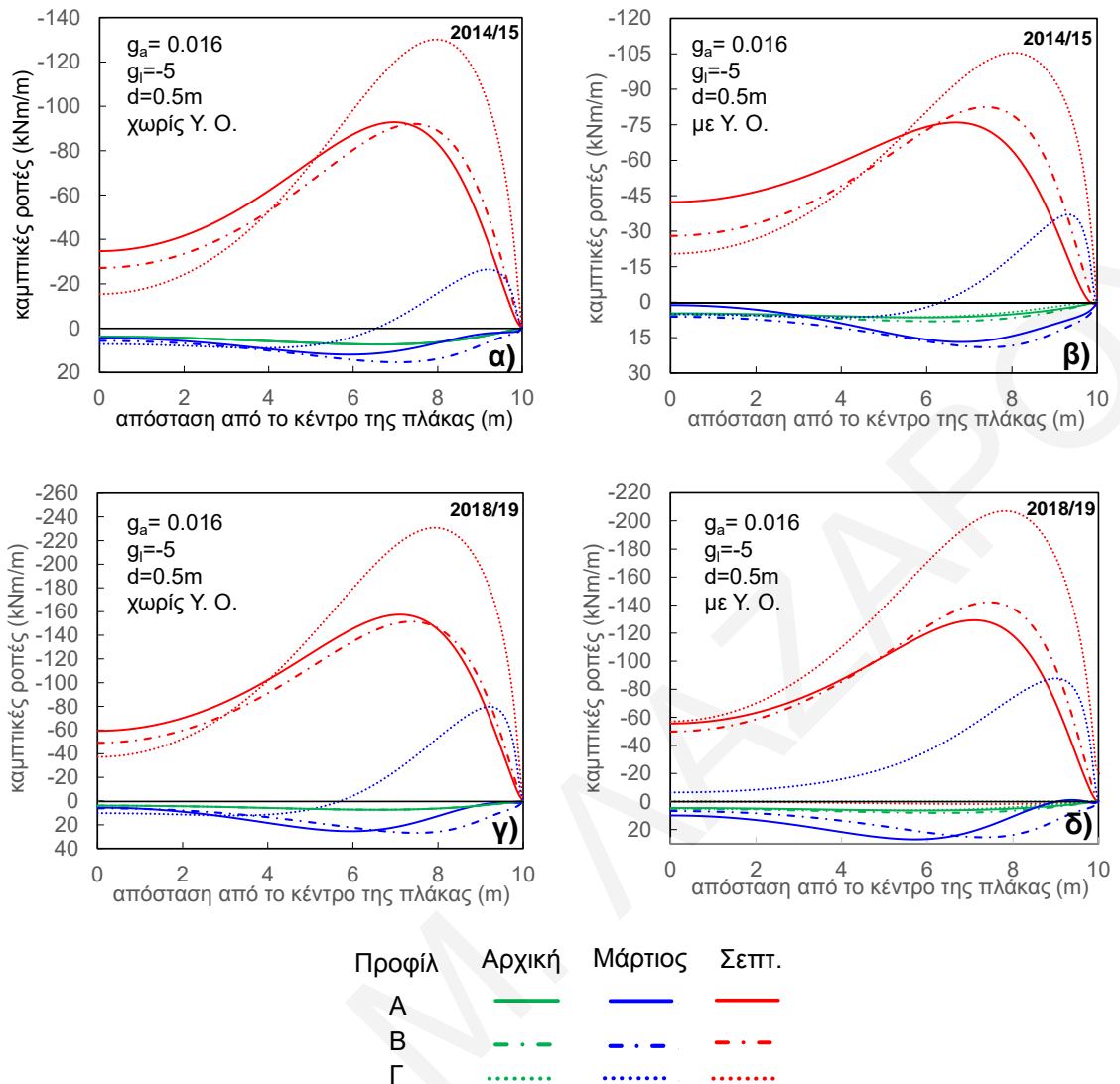
Στο Σχήμα 10.9α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το υδρολογικό έτος 2014/15 ενώ στο Σχήμα 10.9β για το 2018/19. Οι καμπτικές ροπές αναπτύσσονται ποιοτικά με όμοιο τρόπο, μόνο που για το έτος 2018/19 παρατηρείται αύξηση των τιμών της τάξεως του 80% και 70% στο τέλος Μαρτίου και Σεπτεμβρίου, αντίστοιχα, λόγω των ακραίων κλιματολογικών δεδομένων που επικράτησαν στην περιοχή το 2018/19.

Στο Σχήμα 10.10 φαίνεται η επίδραση των διαφορετικών προφίλ διαπερατοτήτων του εδάφους. Το προφίλ Α συνίσταται από τιμές υδραυλικής διαπερατότητας οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω αντίστροφης προσομοίωσης (back-calculation analysis) με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος (trial and error) του πειράματος διαβροχής που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο. Το προφίλ Β υποθέτει τιμές υδραυλικής διαπερατότητας μιας τάξης μικρότερης από αυτές του προφίλ Α τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση (δηλ. $k_{y,sat}$ και $k_{x,sat}$ διαιρούνται διά 10) ενώ το προφίλ Γ είναι το ίδιο με το προφίλ Α με τη διαφορά ότι οι τιμές στην κάθετη διεύθυνση ($k_{y,sat}$) ισούνται με τις τιμές στην οριζόντια ($k_{x,sat}$) για κάθε εδαφικό στρώμα.



Σχήμα 10.9: Επίδραση παραμέτρου g_i στις καμπτικές ροπές για την ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5$ m, προφίλ διαπερατοτήτων Α και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q = 12\text{kPa}$ με απουσία υδροφόρου οριζοντα για τα υδρολογικά έτη: α) 2014/15 και β) 2018/19.

Σύμφωνα με το Σχήμα 10.10 (Αναλύσεις # 1, 2, 6, 7, 36, 37, 44, 46, 70, 71, 74, 75), οι μέγιστες καμπτικές ροπές είναι πρακτικώς οι ίδιες για τα προφίλ Α και Β στο τέλος της βροχερής και ξηρής περιόδου. Αντίθετα, σημαντικά αυξημένες εμφανίζονται οι ροπές στην περίπτωση του προφίλ Γ.

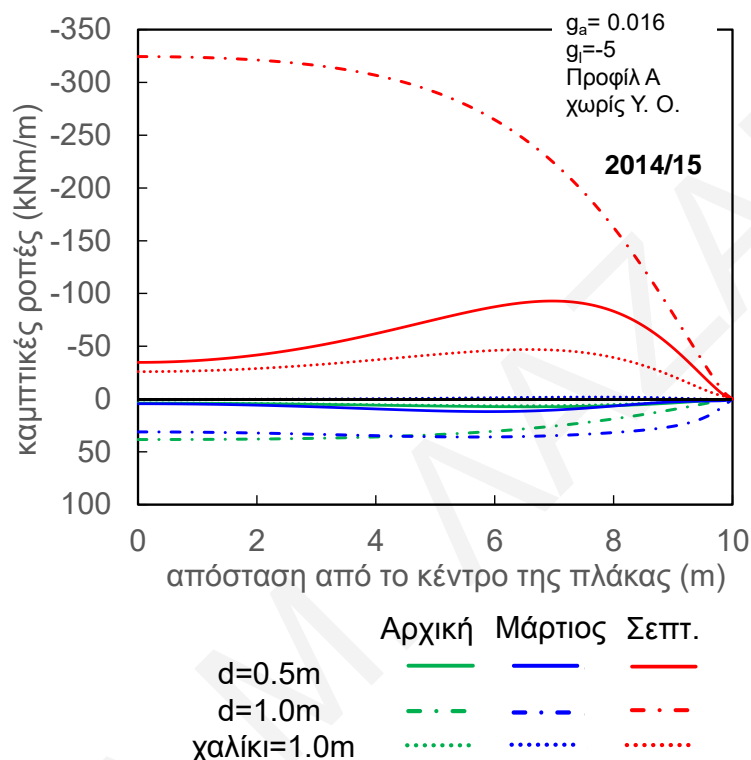


Σχήμα 10.10: Επίδραση του προφίλ διαπερατότητας στις καμπτικές ροπές για αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.

10.3.4 Βάθος Σκυροδέτησης και Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους με Χονδρόκοκκο Υλικό

Παρά το γεγονός ότι η διακύμανση του βαθμού κορεσμού S_r στις αναλύσεις με πάχος πλάκας $d=0.5\text{m}$ και $d=1.0\text{m}$ είναι πρακτικά η ίδια κατά μήκος της διεπιφάνειας πλάκας-εδάφους (Σχήμα 8.14α), όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.11 η κατανομή καμπτικών ροπών της πλάκας είναι σημαντικά διαφορετική (Αναλύσεις # 6, 40, 43) εξαιτίας των διαφορών στην καμπτική δυσκαμψία της πλάκας. Συγκεκριμένα, η λεπτή πλάκα θεμελίωσης ($d=0.5\text{m}$) είναι 8 φορές πιο εύκαμπτη σε σχέση με την πιο παχιά πλάκα ($d=1.0\text{m}$). Ως αποτέλεσμα, η γενική κοιτόστρωση πάχους $d=0.5\text{m}$ αναπτύσσει μέγιστη θετική ροπή

περίπου 12kNm/m στο τέλος της χειμερινής περιόδου και μέγιστη αρνητική ροπή 95kNm/m στο τέλος της θερινής περιόδου, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για πλάκα πάχους $d=1.0\text{m}$ ισούνται με 36kNm/m και 325kNm/m, αυξήσεις της τάξεως του 300% και 340% αντίστοιχα. Εντούτοις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως και στην περίπτωση της λεπτής πλάκας, δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσεως δεδομένου ότι μια όπλιση άνω και κάτω πέλματος με τον ελάχιστο οπλισμό παράγει ροπή αντοχής 610kNm/m για την πλάκα με $d=1.0\text{m}$.



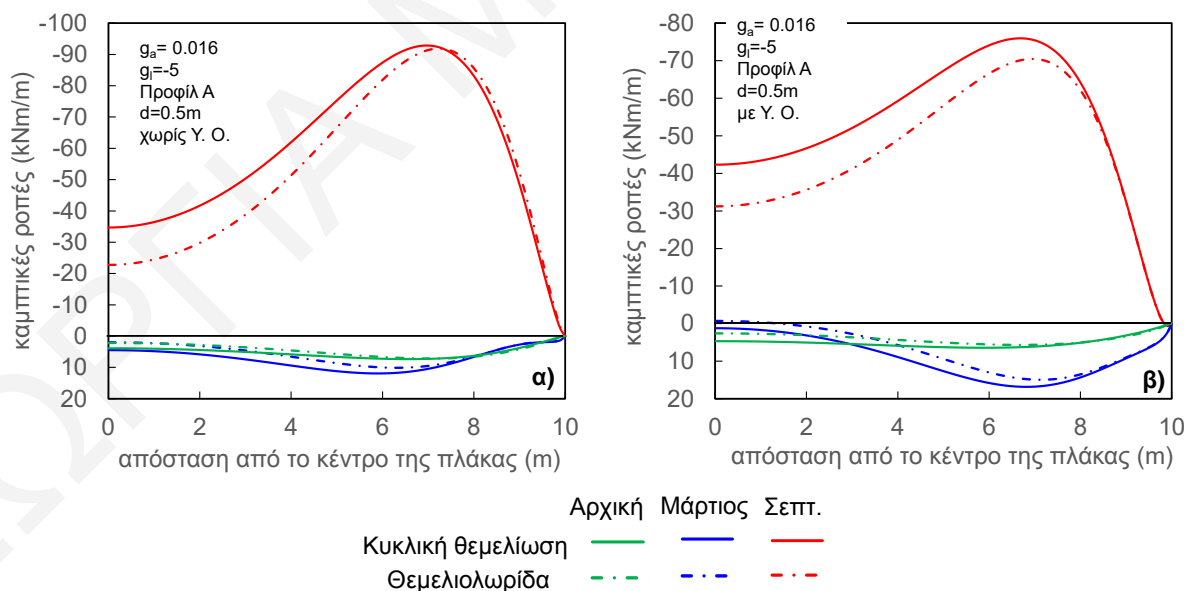
Σχήμα 10.11: Επίδραση του βάθους σκυροδέτησης της πλάκας και της αντικατάστασης του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό στις καμπτικές ροπές για αναλύσεις με ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ το υδρολογικό έτος 2014/15.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην οποία το φυσικό έδαφος αντικαθίσταται με χονδρόκοκκο υλικό (αμμοχάλικο) πάχους 1.0m κάτω από την πλάκα θεμελίωσης πάχους $d=0.5\text{m}$ ως μέθοδος εξυγίανσης. Η παρουσία εξυγαντικής στρώσης λειτουργεί σαφώς ευεργετικά σε ότι αφορά τις καμπτικές καταπονήσεις της πλάκας, δίνοντας μείωση μέγιστων τιμών ροπών κατά 50% περίπου σε σχέση με την περίπτωση που η πλάκα εδράζεται απευθείας σε διογκώσιμο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη θετική ροπή τον Μάρτιο 2015 στο κέντρο της πλάκας ισούται με μόλις 2kNm/m, ενώ κοντύτερα στο άκρο είναι αρνητική με τιμή 3kNm/m. Τον Σεπτέμβριο 2015 η μέγιστη αρνητική ροπή ανέρχεται στα 47kNm/m έναντι 95kNm/m απουσία εξυγίανσης. Γενικά, τόσο στο τέλος της χειμερινής (Μάρτιος) όσο και στο τέλος της θερινής περιόδου

(Σεπτέμβριος) παρατηρούνται μειώσεις κατά περίπου 4 και 2 φορές αντίστοιχα των μέγιστων καμπτικών ροπών γεγονός που υποδεικνύει ότι η εξυγιαντική μέθοδος αντικατάστασης του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό είναι μια πολύ καλή πρακτική για αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται εξαιτίας της διογκωσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης.

10.3.5 Σχήμα γενικής κοιτόστρωσης

Οι περισσότερες αναλύσεις διεξήχθησαν υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες (κυκλική θεμελίωση). Για να εξεταστεί η επίδραση του σχήματος της πλάκας πραγματοποιήθηκαν επίσης αναλύσεις σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (πλάκα σε σχήμα λωρίδας). Το Σχήμα 10.12 συγκρίνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των δύο περιπτώσεων (Αναλύσεις # 6, 7, 38, 41). Οι καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στη θεμελιολωρίδα είναι γενικά μικρότερες από αυτές στην κυκλική θεμελίωση. Εντούτοις, οι διαφορές στις μέγιστες κατ' απόλυτο τιμή ροπές είναι πρακτικώς αμελητέες, συγκεκριμένα μικρότερες από 10% στις αρνητικές ροπές της ξηράς περιόδου και γύρω στο 15% στις θετικές ροπές της υγρής περιόδου. Αυτό οφείλεται στο ότι το προφίλ βαθμού κορεσμού S_r στη διεπιφάνεια πλάκας-εδάφους είναι σχεδόν ανεξάρτητο του σχήματος της θεμελίωσης, όπως διαπιστώθηκε στο Κεφάλαιο 8.



Σχήμα 10.12: Επίδραση του σχήματος της πλάκας για ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5$ m, προφίλ διαπερατοτήτων Α και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12kPa$ για το υδρολογικό έτος 2014/15 στην α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

10.3.6 Προδιαβροχή του Εδάφους

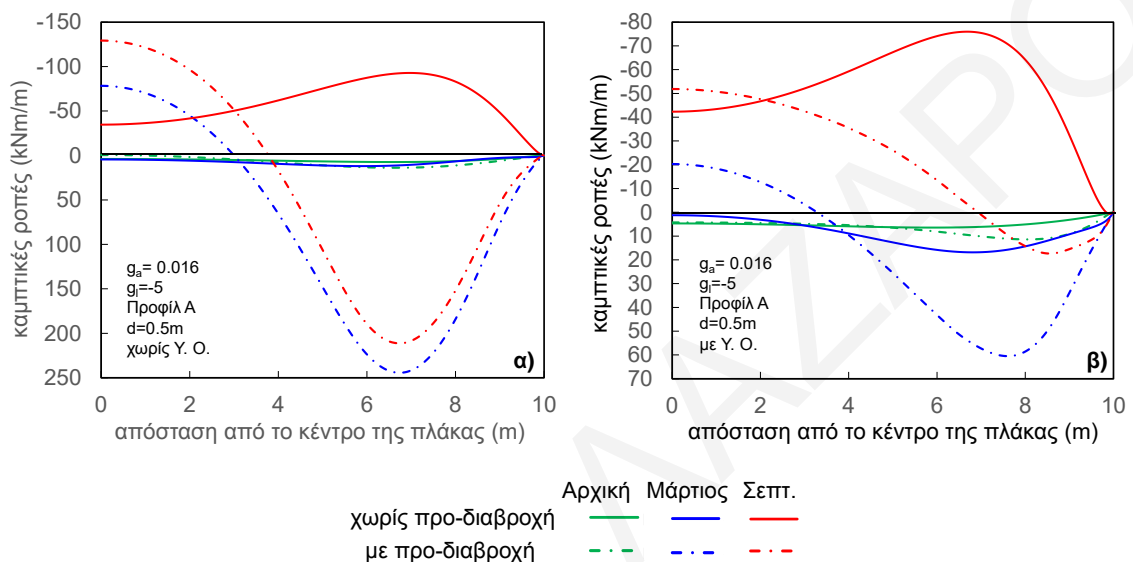
Η επίδραση της προδιαβροχής του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 10.13 (Αναλύσεις # 6, 7, 37, 42). Ανεξαρτήτως παρουσίας ρηχού υδροφόρου ορίζοντα παρατηρείται ότι στο κέντρο της πλάκας αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες (κατ' απόλυτο τιμή) ροπές στο τέλος της βροχερής (Μάρτιος) και ξηρής (Σεπτέμβριος) περιόδου από ότι αν δεν γινόταν προδιαβροχή. Αυτό συμβαίνει επειδή με το πέρασμα των μηνών και την απώλεια της αρχικής υγρασίας που δημιουργεί η προδιαβροχή, δημιουργούνται μεγάλες μεταβολές του βαθμού κορεσμού, της μύζησης και, κατ' επέκταση, της δυσκαμψίας του εδάφους κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης. Ο βαθμός κορεσμού του εδάφους αυξάνεται και φτάνει σχεδόν σε πλήρη κορεσμό ($S_r=95\%$) με τη διαβροχή του πριν την εγκατάσταση της πλάκας τον Μάιο 2014. Όταν στη συνέχεια έρχεται το καλοκαίρι 2014, μέρος της αρχικής υγρασίας που δημιούργησε η προδιαβροχή διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα ο βαθμός κορεσμού στην περίμετρο της θεμελίωσης να πέφτει στα 65%, με τον λόγο μύζησης άκρου-κέντρου της πλάκας $S_{\text{άκρου}}/S_{\text{κέντρου}}$ να φτάνει τιμές της τάξεως του 5. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η προδιαβροχή του εδάφους εν τη απουσία ρηχού υδροφόρου θα παράξει τιμές ροπών που υπερβαίνουν την αντοχή της πλάκας πάχους 0.5m αν αυτή οπλιστεί με τον ελάχιστο οπλισμό (145kNm). Η μόνη περίπτωση όπου η προδιαβροχή λειτουργεί κάπως ευεργετικά είναι σε ότι αφορά τις κάμψεις της ξηράς περιόδου όταν υπάρχει ρηχός υδροφόρος ορίζοντας. Αυτό οφείλεται στο ότι λόγω της παρουσίας του υδροφόρου διατηρείται η υγρασία της προδιαβροχής κάτω από την πλάκα σε μεγαλύτερο βαθμό χάρη στο φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης.

10.3.7 Επιδράσεις Φορτίων Θεμελίωσης

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους των φορτίων που επιβάλλονται στη θεμελίωση από την ανωδομή, δεδομένου ότι η τάση για διόγκωση ενός εδάφους εξαρτάται έντονα από το μέγεθος την κατακόρυφης τάσης που μεταβιβάζεται σε αυτό. Επίσης, εξετάζεται η αλληλεπίδραση του συστήματος θεμελίωσης-εδάφους στην περίπτωση που αντί για κατανεμημένη φόρτιση (όπως στις μέχρι τώρα αναλύσεις αυτού του Κεφαλαίου) επιβάλλονται στη θεμελίωση συγκεντρωμένα φορτία.

Στο Σχήμα 10.14 πραγματοποιείται σύγκριση των διαγραμμάτων καμπτικών ροπών της γενικής κοιτόστρωσης που προέκυψαν από τέσσερις αναλύσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο από 12kPa έως 120kPa (Αναλύσεις # 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 21, 22, 23, 47, 48, 49). Για το έτος 2014/15 με απουσία Υ.Ο. (Σχήμα 10.14α) σημειώνεται αύξηση στο τέλος Μαρτίου της μέγιστης θετικής καμπτικής ροπής (εφελκυσμός κάτω ίνας

θεμελίωσης) της τάξεως του 60% σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες για την περίπτωση των 12kPa ενώ για τις αναλύσεις με 60kPa και 120kPa παρατηρείται μείωση της τάξεως του 40% και 45% αντίστοιχα. Στην αντίστοιχη περίπτωση για το ακραίο υδρολογικό έτος 2018/19 (Σχήμα 10.14γ) οι αυξήσεις για τα 12kPa και 24kPa ανέρχονται σε 230% και 80% αντίστοιχα ενώ για τα 60kPa και 120kPa σημειώνεται μείωση κατά περίπου 23% και 46% αντίστοιχα.

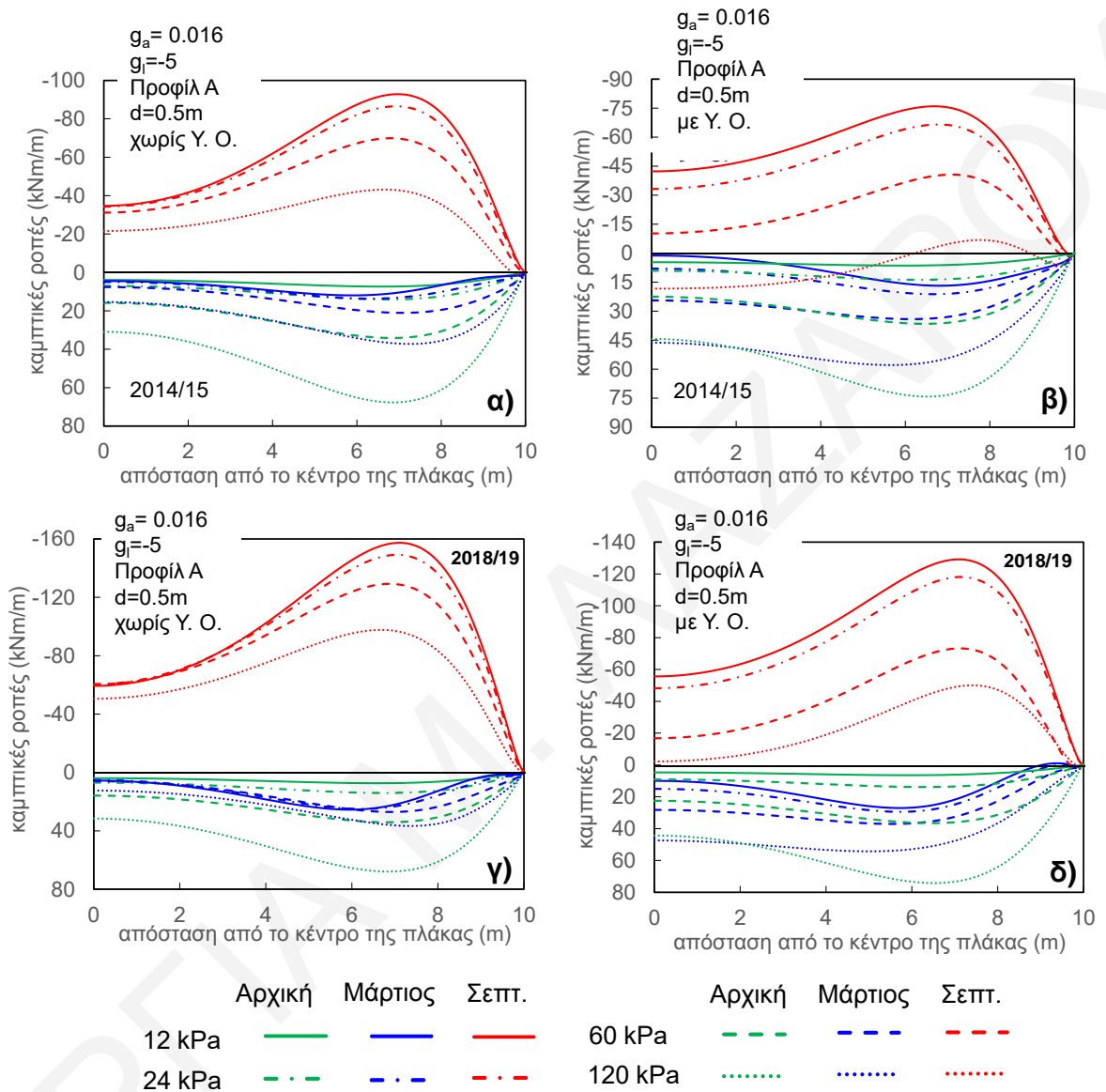


Σχήμα 10.13: Επίδραση προδιαβροχής εδάφους στις καμπτικές ροπές για ανάλυση με $g_a = 0.016$, $d = 0.5$ m, προφίλ διαπερατοτήτων A και ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $q=12\text{kPa}$ για το υδρολογικό έτος 2014/15: α) απουσία και β) παρουσία ρηγού υδροφόρου ορίζοντα.

Αυτό οφείλεται στο ότι το μεγαλύτερο φορτίο μειώνει την τάση του εδάφους θεμελίωσης να διογκωθεί, όπως επίσης παρατηρείται και στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών οιδιμέτρου που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών παραμορφώσεων της μάργας Λευκωσίας υπό διαφορετικά κατακόρυφα φορτία (Σχήματα 5.12α και 9.1). Όμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στις περιπτώσεις με υδροφόρο ορίζοντα για τα δύο υδρολογικά έτη (Σχήματα 10.14β και δ) με τις αυξήσεις στις τιμές για μικρά φορτία (12kPa και 24kPa) να είναι ακόμη μεγαλύτερες ενώ για τα μεγαλύτερα φορτία (60kPa και 120kPa) οι μειώσεις είναι μικρότερες.

Η πιο κρίσιμη περίπτωση εξακολουθεί να είναι αυτή που αντιστοιχεί στο τέλος της ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος), ανεξαρτήτως υδρολογικού έτους, κατά την οποία παρατηρούνται καμπτικές ροπές μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται στην αρχική κατάσταση. Εντούτοις, όσο αυξάνεται η τιμή φορτίου που επιβάλλεται στην πλάκα, οι μέγιστες κατ' απόλυτο τιμή αρνητικές καμπτικές ροπές μειώνονται αισθητά. Οι

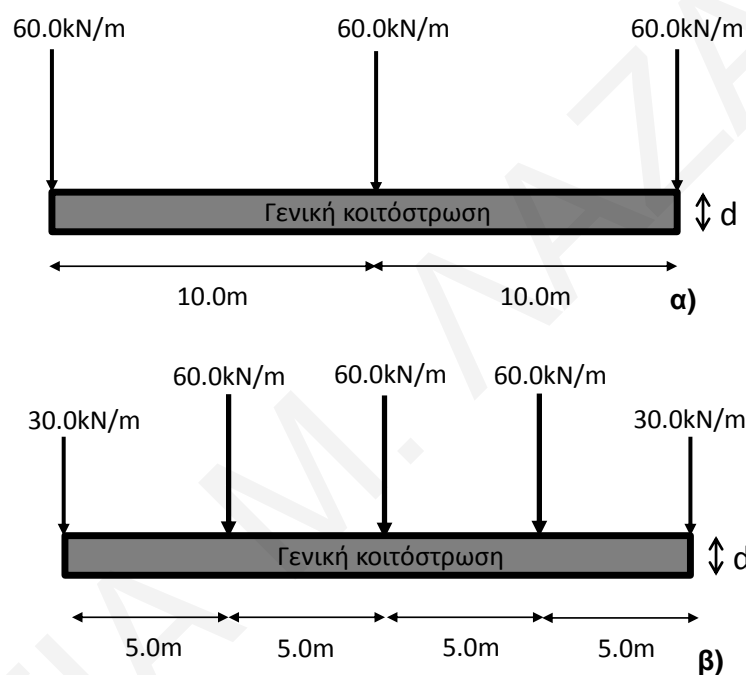
μέγιστες αρνητικές ροπές μειώνονται περίπου στο μισό ή και ακόμη περισσότερο στην περίπτωση των 120kPa (ισοδύναμο φορτίο δεκαώροφου κτιρίου) σε σχέση με την περίπτωση των 12kPa (ισοδύναμο φορτίο μονώροφου κτιρίου).



Σχήμα 10.14: Επίδραση μεγέθους φορτίων θεμελίωσης στις καμπτικές ροπές: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15 και γ) απουσία και δ) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2018/19.

Μέχρι αυτό το σημείο, οι αναλύσεις που παρουσιάστηκαν είχαν την πλάκα να φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο q . Στην πραγματικότητα, τα φορτία της ανωδομής μεταφέρονται στη θεμελίωση μέσω των υποστυλωμάτων και μπορούν να αποδοθούν καλύτερα ως συγκεντρωμένα (σημειακά) φορτία. Στα Σχήματα 10.15 και 10.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων όπου μια πλάκα θεμελίωσης σε σχήμα θεμελιολωρίδας (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) φορτίζεται με 3 ή 5 συγκεντρωμένα

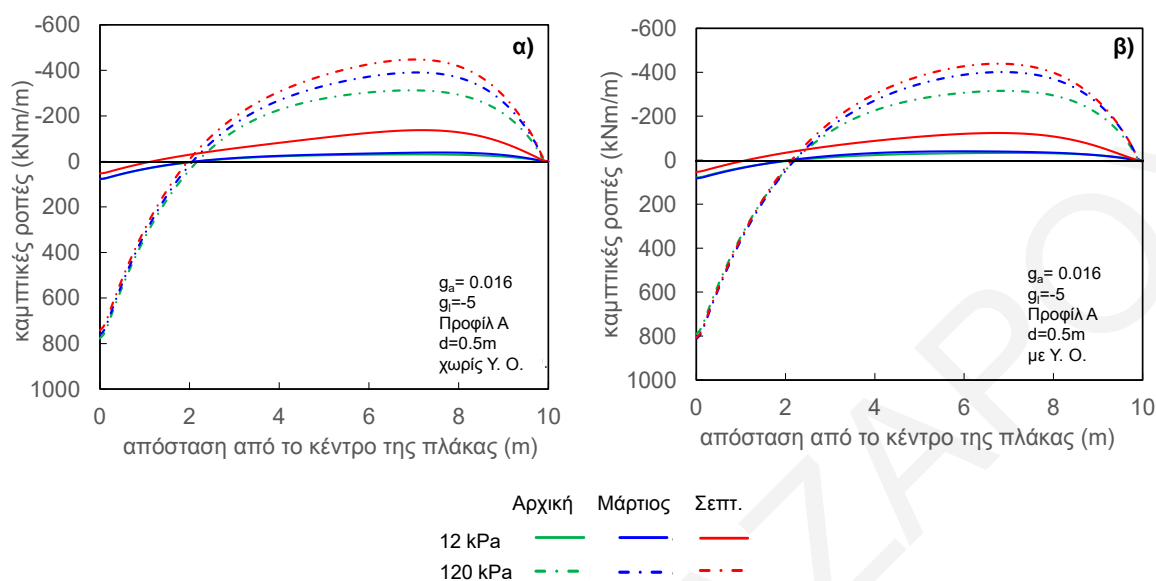
φορτία. Τα φορτία εφαρμόστηκαν στο κέντρο ($x=0$) και τα άκρα ($x=10\text{m}$) της πλάκας, ενώ για τη δεύτερη περίπτωση εφαρμόστηκαν στο κέντρο ($x=0$), τα άκρα ($x=10\text{m}$) και επιπλέον στο μέσο της απόστασης κέντρου-άκρου ($x=5\text{m}$). Οι τιμές τους ήταν τέτοιες ώστε το συνισταμένο φορτίο τους, ανοιγμένο ως προς την επιφάνεια έδρασης, να δίνει τις τιμές ισοδύναμης ομοιόμορφα κατανεμημένης φόρτισης 12kPa και 120kPa . Το Σχήμα 10.15α παρουσιάζει τη φορτιζόμενη πλάκα με τα 3 συγκεντρωμένα φορτία ενώ το Σχήμα 10.15β με τα 5 συγκεντρωμένα τα οποία ισοδυναμούν με μια ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 12kPa . Για ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 120kPa τα φορτία του Σχήματος 10.15 απλά πολλαπλασιάζονται επί 10.



Σχήμα 10.15: Επιβολή α) 3 συγκεντρωμένων φορτίων και β) 5 συγκεντρωμένων φορτίων τα οποία ισοδυναμούν με ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 12kPa .

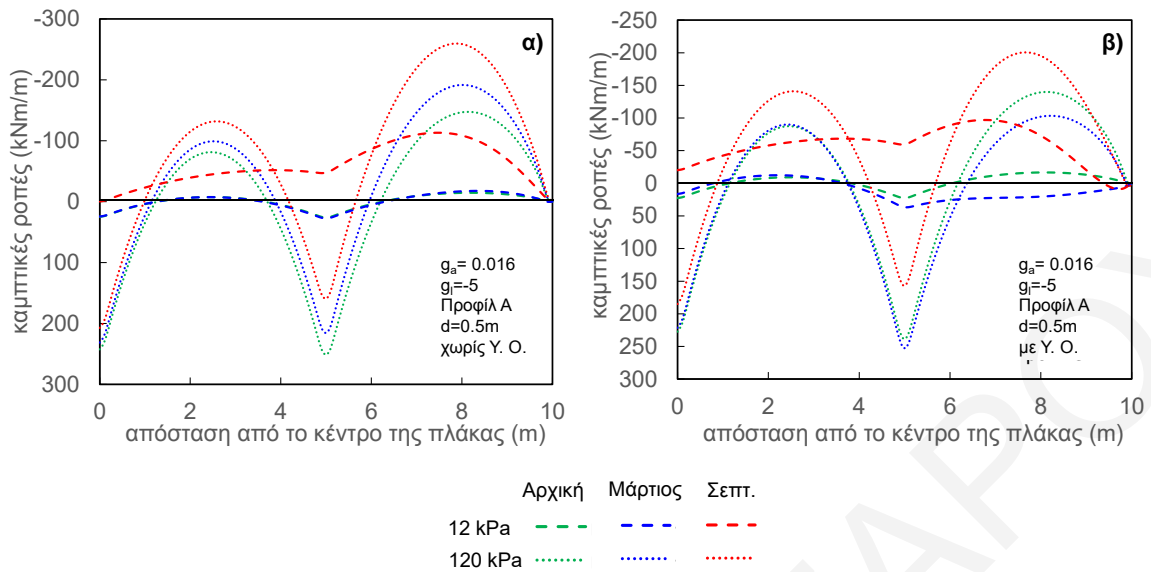
Για τις αναλύσεις με τα δύο συγκεντρωμένα φορτία (Αναλύσεις # 76, 77, 78, 79), απουσία (Σχήμα 10.16α) και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 10.16β), η κάμψη της πλάκας επηρεάζεται σε μικρό βαθμό στο τέλος της χειμερινής περιόδου (Μάρτιος), αφού οι μέγιστες τιμές καμπτικών ροπών παρουσιάζουν αύξηση μέχρι κατά 30% σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Αντίθετα, στο τέλος της θερινής περιόδου (Σεπτέμβριος), η πλάκα φορτιζόμενη με μικρά φορτία (ισοδύναμα των 12kPa – μονώροφο κτίριο) εμφανίζει σημαντική αύξηση στις μέγιστες αρνητικές καμπτικές ροπές (3-3.5 φορές), συμπεριφορά που παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες αναλύσεις. Αντίθετα, στην περίπτωση που η πλάκα φορτίζεται με συγκεντρωμένα φορτία ισοδύναμα των 120kPa (δεκαώροφο κτίριο),

οι αυξήσεις στις μέγιστες αρνητικές ροπές εξακολουθούν να παρουσιάζουν αύξηση σε σχέση με τις αρχικές κάμψεις, αλλά πολύ μικρότερης τάξεως, περίπου 30%.



Σχήμα 10.16: Επίδραση μεγέθους φόρτισης στις καμπτικές ροπές πλάκας που φορτίζεται με συγκεντρωμένα φορτία στο κέντρο και στα άκρα της: α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15.

Παρόμοια εικόνα παίρνουμε και στην περίπτωση όπου η πλάκα φορτίζεται με 5 συγκεντρωμένα φορτία (Αναλύσεις # 80, 81, 82, 83) σε απόσταση 5m μεταξύ τους (Σχήμα 10.17), με τις προσαυξήσεις της ξηράς περιόδου για μονώροφο κτίριο να είναι ακόμη πιο μεγάλες. Οι προσαυξήσεις εντατικών μεγεθών στην πλάκα θεμελίωσης του δεκαώροφου κτιρίου στο τέλος της υγρής και της ξηράς περιόδου είναι σαφώς μικρότερες, αλλά όχι αμελητέες αφού ένας διπλασιασμός των αρνητικών ροπών (Σχήμα 10.17) μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αστοχία, αν δεν έχει ληφθεί υπόψη στην όπλιση της θεμελίωσης. Πάντως, για πολυώροφα κτίρια αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την ομοιόμορφα φορτιζόμενη πλάκα, το σχήμα των διαγραμμάτων ροπών παραμένει με το πέρασμα των μηνών ποιοτικά το ίδιο με την αρχική κατάσταση. Δηλαδή, οι μέγιστες θετικές ροπές εμφανίζονται εξακολουθητικά στις θέσεις επιβολής των συγκεντρωμένων φορτίων (θέσεις υποστυλωμάτων) ενώ οι μέγιστες (κατ' απόλυτο τιμή) αρνητικές ροπές περί τα μέσα των φατωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανικός στην πράξη για να λάβει υπόψη στο σχεδιασμό τις εντάσεις που προκαλεί η διογκωσιμότητα του εδάφους θα κληθεί απλά να αυξήσει το πλήθος ή/και τη διατομή του οπλισμού χωρίς να αλλάξει το πέλμα (άνω ή κάτω) στο οποίο τοποθετείται ο πρόσθετος οπλισμός.



Σχήμα 10.17: Επίδραση μεγέθους φόρτισης στις καμπτικές ροπές πλάκας που φορτίζεται με 5 συγκεντρωμένα φορτία (κέντρο, άκρα και ενδιάμεσα): α) απουσία και β) παρουσία υδροφόρου για το υδρολογικό έτος 2014/15.

10.4 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των συζευγμένων αναλύσεων μηχανικής παραμόρφωσης-ροής που πραγματοποιήθηκαν έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση διάφορων παραμέτρων στην ανάπτυξη εντατικών μεγεθών στην πλάκα θεμελίωσης μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συγκεντρωτικά συμπεράσματα:

Τα ακραία κλιματολογικά δεδομένα του υδρολογικού έτους 2018/19 οδηγούν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων καμπτικών ροπών από ότι για ένα τυπικό έτος (π.χ. 2014/15). Εντούτοις, ακόμη και στην περίπτωση συνήθων υδρολογικών συνθηκών, οι ροπές που προκαλούν οι ογκομετρικές παραμορφώσεις του εδάφους λόγω μεταβολών στην περιεχόμενη υγρασία είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που θα υπολόγιζε κάποιος αγνοώντας τη διογκωσιμότητα του εδάφους. Αυτό αφορά ιδιαίτερα την ξηρά περίοδο όπου αναπτύσσονται σημαντικές αρνητικές ροπές (εφελκυσμός άνω ίνας). Η κρισιμότητα της ξηράς περιόδου μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η διογκωση του εδάφους περιορίζεται από την επιβολή φορτίων στο έδαφος και την ανάπτυξη αντιδράσεων στη διεπιφάνεια πλάκας θεμελίωσης εδάφους, ενώ αντίθετα η συστολή (είτε υπό μορφή συρρίκνωσης λόγω ξηράνσεως ή κατάρρευσης κατά τη διαβροχή) ενισχύεται.

Παρά το γεγονός ότι οι αναλύσεις αφορούσαν τη σκληρή μάργα Λευκωσίας, η οποία είναι ένα μέτρια διογκώσιμο έδαφος, οι επιπλέον ροπές που οφείλονται στις μεταβολές

εδαφικής υγρασίας είναι ικανές σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσουν σε αστοχία μια πλάκα θεμελίωσης πάχους 50cm που είναι οπλισμένη με τον ελάχιστο απαιτούμενο οπλισμό, κατασκευαστική διαμόρφωση που είναι αρκετά συνήθης για θεμελιώσεις κτιρίων ενός-δύο ορόφων (οικίες). Αντίθετα, η ανάπτυξη πρόσθετων ροπών λόγω διογκωσιμότητας του εδάφους αμβλύνεται όσο μεγαλύτερα είναι τα φορτία που επιβάλλει η ανωδομή.

Η κατανομή καμπτικών ροπών της πλάκας είναι πιο ευαίσθητη σε μεταβολές της παραμέτρου ξ_a της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (SWCC) συγκριτικά με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Αντίθετα, ο παράγοντας που επηρεάζει λιγότερο την εντατική κατάσταση της πλάκας είναι το σχήμα της θεμελίωσης. Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι κυκλική θεμελίωση και θεμελιολωρίδα δίδουν πρακτικώς τις ίδιες καμπτικές ροπές.

Η μέθοδος της προδιαβροχής δεν φαίνεται εκ των αποτελεσμάτων να ενδείκνυται για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν εξαιτίας των διογκώσιμων εδαφών σε ξηρά κλίματα, όπως αυτό της Κύπρου. Εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη πρακτική απουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα, οι καμπτικές ροπές παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένες τιμές εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων υγρασίας κατά μήκος της διεπαφής πλάκας-εδάφους. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που υπάρχει ένας ρηχός υδροφόρος ορίζοντας αλλά σε μικρότερο βαθμό λόγω της ανόδου υγρασίας που οφείλεται στις τριχοειδείς δυνάμεις και τη διατήρηση σε μεγαλύτερο βαθμό της υγρασίας της προδιαβροχής. Αντίθετα, η αντικατάσταση του φυσικού εδάφους από στρώση αμμοχάλικου πάχους 1m φαίνεται να είναι ικανή να ανακατανείμει τις διογκώσεις/συρρίκνώσεις που συμβαίνουν κάτω από αυτή και κατ' επέκταση να συντελέσει σε αρκετά μειωμένα εντατικά μεγέθη στη γενική κοιτόστρωση. Προϋπόθεση για να είναι αποτελεσματική η αντικατάσταση εδάφους με ένα υλικό σχετικά μεγάλης διαπερατότητας, όπως είναι το αμμοχάλικο, είναι να μην υπάρχει άμεση πρόσβαση νερού προς το αμμοχάλικο, το οποίο εν συνεχεία να διαβρέξει το υποκείμενο διογκώσιμο έδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 - ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ WINKLER

11.1 Εισαγωγή

Το τελευταίο μέρος αυτής της ερευνητικής προσπάθειας αφορά στη στατική ανάλυση γενικών κοιτοστρώσεων με το έδαφος να αναπαρίσταται από γραμμικά ελατήρια Winkler, όπως γίνεται τις περισσότερες φορές στην πράξη στα έργα πολιτικού μηχανικού. Γνωρίζοντας πλέον το προφίλ των μετατοπίσεων της πλάκας (ανυψώσεων/καθιζήσεων) που προκύπτει ως αποτέλεσμα από τις συζευγμένες αναλύσεις (μηχανικής μετατόπισης-ροής) αλληλεπίδρασης γενικής κοιτόστρωσης-διογκώσιμου εδάφους, έγινε εξαγωγή της κατανομής των δυσκαμψιών ισοδύναμων γραμμικά ελαστικών ελατηρίων Winkler. Οι κατανομές ελατηρίων Winkler που προέκυψαν, προορίζονται για χρήση στο σχεδιασμό γενικών κοιτοστρώσεων επί μέτρια διογκώσιμου εδάφους στην πράξη με κοινά προγράμματα δομοστατικής ανάλυσης, όπως για παράδειγμα SAP2000, ETABS κ.α., επιτρέποντας τη σωστή πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών (π.χ. καμπτικές ροπές) και παραμορφώσεων, και κατ' επέκταση την επαρκή όπλιση τους. Η χρήση μιας τέτοιας μεθοδολογίας στον δομοστατικό σχεδιασμό έναντι παλαιότερων μεθόδων, οι οποίες βασίζονται στον ορισμό αρχικού διακένου (gap) μεταξύ θεμελίωσης και άνω άκρου ελατηρίου (π.χ. μέθοδοι Lytton 1970, Walsh 1978, Mitchell, 1980), παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν εισάγει μη-γραμμικότητα στο πρόβλημα (κάτι που θα συνεπαγόταν με τον ορισμό διάκενου) και η ανάλυση ενός κτιρίου μπορεί να γίνει με γραμμικό αλγόριθμο επίλυσης, διατηρώντας έτσι το υπολογιστικό κόστος σχεδόν ίδιο με μια ανάλυση που δεν λαμβάνει υπόψη τη διογκωσιμότητα του εδάφους.

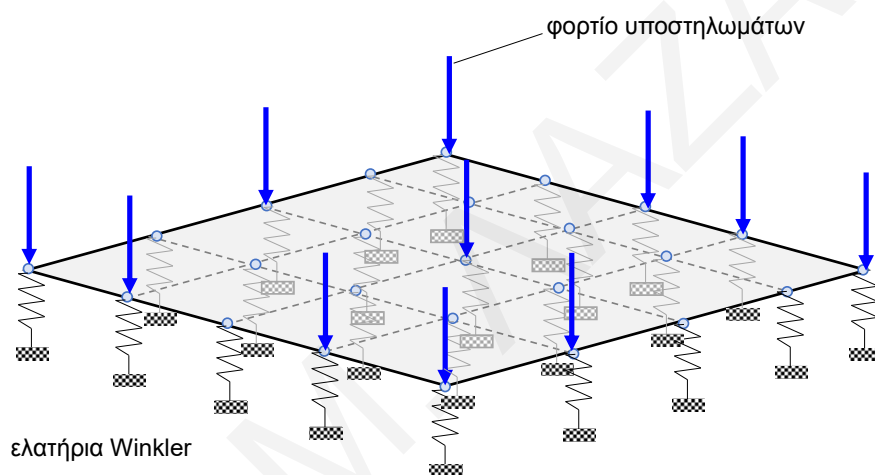
11.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η πιο κοινή μέθοδος στατικής ανάλυσης γενικής κοιτόστρωσης ακόμη και σήμερα, παραμένει η προσέγγιση με ελατήρια Winkler (Winkler, 1867), όπου το έδαφος αναπαριστάται στην ανάλυση με κατακόρυφα γραμμικώς ελαστικά ελατήρια που υποστηρίζουν την πλάκα θεμελίωσης.

Τα ελατήρια Winkler συνδέονται με τη γενική κοιτόστρωση στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων στους οποίους διακριτοποιείται η κοιτόστρωση, που στις πλείστες των περιπτώσεων είναι πρωτοβάθμια (4-κομβικά) στοιχεία πλάκας ή κελύφους (Σχήμα 11.1). Η σταθερά δυσκαμψίας των ελατηρίων Winkler (K_s) στον εκάστοτε κόμβο εκφράζεται ως το γινόμενο της επιφάνειας επιρροής του κόμβου επί την παράμετρο που ονομάζεται δείκτης εδάφους k_s και ορίζεται ως:

$$k_s = \frac{q}{w} \quad \text{Εξίσωση 11.1}$$

όπου q η πίεση που ασκείται από τη θεμελίωση στο έδαφος στο θεωρούμενο σημείο και w η προκύπτουσα καθίζηση.



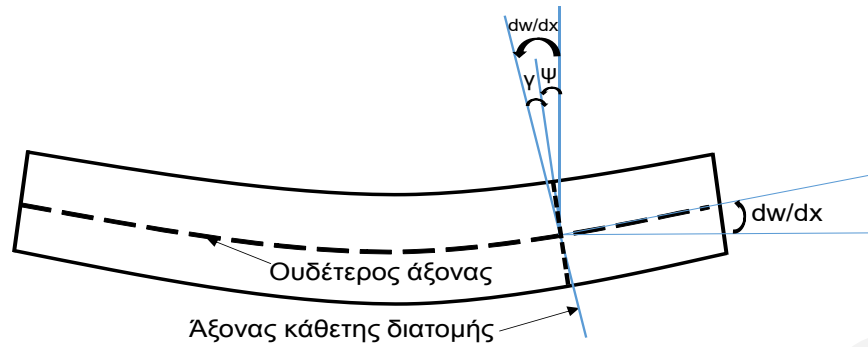
Σχήμα 11.1: Στατικό ανάλογο γενικής κοιτόστρωσης πάνω σε ελατήρια Winkler.

Η μέθοδος των ελατηρίων Winkler δεν αποτελεί μια ακριβή μέθοδο επίλυσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ανεξάρτητα μεταξύ τους ελατήρια δεν αλληλεπιδρούν (είναι «ασύζευκτα»), με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία στην αναπαράσταση της συνεισφοράς της διάτμησης του εδάφους στην αλληλεπίδρασή του με τη θεμελίωση. Για παράδειγμα μια πλάκα φορτιζόμενη με ομοιόμορφο φορτίο στην πραγματικότητα παραμορφώνεται και παίρνει καμπύλο σχήμα με τα κοίλα προς τα πάνω. Εντούτοις, ένα στατικό ανάλογο με τα ελατήρια Winkler που να βασίζονται στην ίδια τιμή δείκτη εδάφους k_s (αδιαφοροποίητη κατά μήκος και κατά πλάτος της κοιτόστρωσης) προβλέπει ότι η πλάκα δεν θα καμφθεί καθόλου (θα παραμείνει εντελώς επίπεδη). Για αυτό τον λόγο, στη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών αναπτύχθηκε ένας αριθμός συζευγμένων μεθοδολογιών (Horvath, 1989), οι οποίες όμως είναι αρκετά πολύπλοκες γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουν τύχει ακόμη ευρείας χρήσης στην πράξη.

Μια απλούστερη προσέγγιση, η οποία λαμβάνει εμμέσως υπόψη τη διάτμηση στο έδαφος θεμελίωσης, είναι η επικαλούμενη ψευδο-συζευγμένη μέθοδος στην οποία η τιμή του δείκτη εδάφους δεν έχει σταθερή κατανομή σε όλη την έκταση της γενικής κοιτόστρωσης αλλά οι τιμές του είναι σημαντικά αυξημένες στην περιμετρική περιοχή της (Bowles 1996, Coduto 2001, Loukidis & Tamiolakis 2017). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ακριβέστερη πρόβλεψη των παραμορφώσεων και εντατικών μεγεθών. Παρόλο που η ψευδο-συζευγμένη μέθοδος ελατηρίων Winkler αποτελεί μια αδρή προσέγγιση της πραγματικότητας, εξακολουθεί να αποτελεί συνήθη πρακτική χάρη στην απλότητά της και στο ότι εμπεριέχεται ή μπορεί να εφαρμοστεί με ευκολία στην πλειοψηφία των προγραμμάτων H/Y στατικής ανάλυσης. Μάλιστα, η τάση τις δύο τελευταίες δεκαετίες σε ότι αφορά τον σχεδιασμό κτιρίων και άλλων έργων είναι η στατική ανάλυση της θεμελίωσης να γίνεται ταυτόχρονα με αυτήν της ανωδομής σε ένα κοινό στατικό προσομοίωμα.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της πλάκας θεμελίωσης ως καμπτόμενο μέλος οφείλει να βασίζεται στη θεώρηση Reissner-Mindlin (Mindlin, 1951) και Timoshenko (1921), όταν αναλύεται το πρόβλημα σε δύο ή μια διάσταση, αντίστοιχα, οι οποίες, σε αντίθεση με τις θεωρίες Kirchhoff και Euler-Bernoulli, λαμβάνουν υπόψη την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων και δεν επιβάλλουν η διατομή του παραμορφωμένου μέλους να είναι κάθετη στον ουδέτερο άξονα (Σχήμα 11.2). Για την περίπτωση της πλάκας θεμελίωσης επί ελαστικού υπόβαθρου, η θεώρηση αυτή είναι απαραίτητη επειδή συνήθως δέχεται ισχυρές τέμνουσες δυνάμεις από τα αξονικά φορτία των υποστλωμάτων.

Αντίθετα με ότι υποθέτουν οι παραπάνω θεωρίες κάμψεως, οι διατομές των καμπτόμενων μελών στην πραγματικότητα δεν παραμένουν επίπεδες. Λόγω της παραβολικής κατανομής των διατμητικών τάσεων κατά τη διεύθυνση του ύψους της διατομής προκαλείται κύρτωσή της. Εντούτοις, παρόλο που οι θεωρίες Reissner-Mindlin και Timoshenko δεν λαμβάνουν υπόψη την κύρτωση της διατομής του καμπτόμενου μέλους, παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς βρίσκονται σε σχετική συμφωνία με αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας αυστηρά τη θεωρία ελαστικότητας (Μορφίδης, 2003).



ψ: στροφή διατομής λόγω κάμψης
 γ: διατμητική παραμόρφωση
 dw/dx: κλίση ουδέτερου άξονα
 w: ολική κατακόρυφη μετατόπιση (λόγω καμπτικής και διατμητικής παραμόρφωσης)

Σχήμα 11.2: Σχηματική απεικόνιση υπόθεσης παραμορφωμένης δοκού Timoshenko.

11.3 Μεθοδολογία

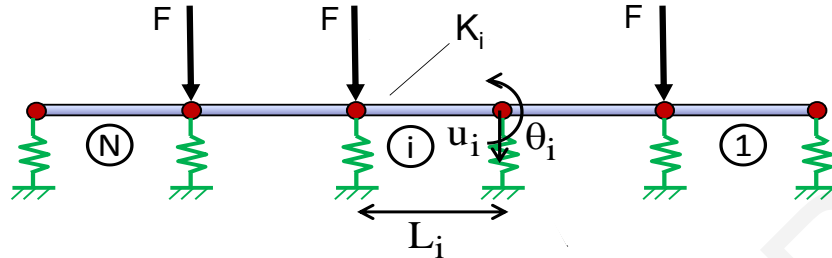
Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η μεθοδολογία εύρεσης της κατανομής της σταθεράς των ισοδύναμων ελατηρίων Winkler κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφθούν στο σχεδιασμό οι επιπλέον εντάσεις που αναπτύσσονται σε αυτή λόγω των ογκομετρικών μεταβολών (διόγκωση/συρρίκνωση) του εδάφους. Γνωρίζοντας τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων της θεμελίωσης (u) και των κατακόρυφα επιβαλλόμενων επικόμβιων φορτίων (F) σε αυτήν, μπορεί να υπολογιστούν μέσω του συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων στατικής ισορροπίας πλήθους N (N : ο αριθμός των κόμβων της γενικής κοιτόστρωσης) του στατικού αναλόγου της πλάκας επί ελατηρίων (Εξίσωση 11.2) οι N άγνωστες τιμές σταθεράς ελατηρίων Winkler K_s :

$$[K_{pl}]\{u\} + [K_s]\{u\} = \{F\} \quad \text{Εξίσωση 11.2}$$

Στην Εξίσωση 11.2, $[K_{pl}]$ είναι το ολικό μητρώο δυσκαμψίας της πλάκας θεμελίωσης και $[K_s]$ ένα μητρώο με μόνο διαγώνιους όρους που αντιστοιχούν στις ζητούμενες σταθερές των ελατηρίων.

Ο προσδιορισμός της κατανομής σταθερών ελατηρίων Winkler έγινε μόνο με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων επίπεδης παραμόρφωσης (θεμελιολωρίδα). Το στατικό ανάλογο σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από μια αλληλουχία στοιχείων δοκού (πλάτους 1m) με συνολικό μήκος 20m, όσο δηλαδή και της πλάκας θεμελίωσης (10m εκμεταλλεζόμενοι τη συμμετρία τους προβλήματος). Κάθε στοιχείο δοκού είχε μήκος 1m. Συνεπώς στο διακριτοποιημένο ήμισυ της πλάκας υπάρχουν έντεκα κόμβοι, με κάθε κόμβο να έχει δύο

βαθμούς ελευθερίας, την κατακόρυφη μετατόπιση (u_i) και τη στροφή (θ_i) (Σχήμα 11.3). Η συνεισφορά των αξονικών παραμορφώσεων θεωρείται αμελητέα αφού δεν επιβάλλονται αξονικά φορτία και ως εκ τούτου παραλείπεται.



Σχήμα 11.3: Σχηματική απεικόνιση στατικού ανάλογου απειρομήκουσ πλάκας πάνω σε ελατήρια Winkler.

Το μητρώο δυσκαμψίας του κάθε στοιχείου δοκού βασίζεται στη θεωρία Timoshenko και έχει τη μορφή (Cook et al., 2001):

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^3} & \frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & -\frac{12EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^3} & \frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} \\ \frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & \frac{(4+\varphi)EI}{(1+\varphi)\Delta L_i} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & \frac{(2-\varphi)EI}{(1+\varphi)\Delta L_i} \\ -\frac{12EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^3} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & \frac{12EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^3} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} \\ \frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & \frac{(2-\varphi)EI}{(1+\varphi)\Delta L_i} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)\Delta L_i^2} & \frac{(4+\varphi)EI}{(1+\varphi)\Delta L_i} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 11.3}$$

όπου φ ο αδιάστατος συντελεστής διατμητικής διόρθωσης που δίδεται από τη σχέση:

$$\varphi = \frac{12EI}{AG\Delta L_i^2} \kappa \quad \text{Εξίσωση 11.4}$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της θεμελίωσης (σκυρόδεμα), I η ροπή αδράνειας, A το εμβαδόν διατομής, G το μέτρο διάτμησης του υλικού της θεμελίωσης, ΔL το μήκος του στοιχείου και κ ο συντελεστής σχήματος, που για την περίπτωση συμπαγούς ορθογωνικής διατομής ισούται με 1.2.

Το μέτρο ελαστικότητας E της πλάκας λήφθηκε ίσο με 32MPa (C30/37), ο λόγος του Poisson ν ίσος με 0.2, το μέτρο διάτμησης $G (= \frac{E}{2(1+\nu)})$ ίσο με 13.3 MPa για όλες τις αναλύσεις. Για πάχος πλάκας d είναι ίσο με 0.5m, το εμβαδόν ορθογωνικής διατομής A του στοιχείου προκύπτει ίσο με 0.5m^2 ενώ η ροπή αδράνειας I , που δίδεται από τη σχέση $\frac{bh^3}{12}$, ίση με 0.0104m^3 .

Το συνολικό τετραγωνικό μητρώο δυσκαμψίας 22x22 της πλάκας θεμελίωσης έχει την εξής μορφή:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11}^{(1)} & K_{12}^{(1)} & K_{13}^{(1)} & K_{14}^{(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_{21}^{(1)} & K_{22}^{(1)} & K_{23}^{(1)} & K_{24}^{(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_{31}^{(1)} & K_{32}^{(1)} & K_{33}^{(1)} + K_{11}^{(2)} & K_{34}^{(1)} + K_{12}^{(2)} & K_{13}^{(2)} & K_{14}^{(2)} & \dots & 0 \\ K_{41}^{(1)} & K_{42}^{(1)} & K_{43}^{(1)} + K_{21}^{(2)} & K_{44}^{(1)} + K_{22}^{(2)} & K_{23}^{(2)} & K_{24}^{(2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \dots & \dots & K_{44}^{(11)} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 11.5}$$

Στον άξονα συμμετρίας του προβλήματος (μέσο της θεμελίωσης), η στροφή οφείλει να είναι ίση με μηδέν. Για την επιβολή αυτής της συνοριακής συνθήκης μέσω της μεθόδου penalty, στο στοιχείο $K_{22}^{(1)}$ του μητρώου δυσκαμψίας τίθεται μια μεγάλη τιμή (έξι φορές μεγαλύτερη). Έχοντας διαμορφώσει το μητρώο δυσκαμψίας της πλάκας θεμελίωσης, πραγματοποιήθηκε αντίστροφη ανάλυση (back-calculation analysis) αναζητώντας τις τιμές σταθεράς των ελατηρίων έτσι ώστε να αναπαραχθούν από το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια τα προφίλ μετατοπίσεων $\{u\}$ της πλάκας όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D.

Η αναζήτηση της κατανομής των ελατηρίων έγινε με μη γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας το εργαλείο Excel solver στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ κατακόρυφων μετατοπίσεων πλάκας που παρήγαγαν οι αναλύσεις Plaxis (u_{plax}) και αυτές που προβλέπει το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια (u_{st}). Οι διαφορές αυτές κανονικοποιούνται ως προς τις u_{plax} ώστε να επιτυγχάνεται καλή προσαρμογή σε όλο το εύρος τιμών μετατοπίσεων, δηλ. τόσο στις μικρές όσο και στις μεγάλες τιμές. Η συνάρτηση βελτιστοποίησης (objective function) του προβλήματος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\text{minimize } f = \sum_{i=1}^N \left(\frac{u_{plax,i} - u_{st,i}}{u_{plax,i}} \right)^2 \quad \text{Εξίσωση 11.6}$$

με τα $u_{st,i}$ να προκύπτουν από την επίλυση της Εξ. 11.2 αλλάζοντας κάθε φορά τα $K_{s,i}$ (μεταβλητές βελτιστοποίησης). Στη διαδικασία βελτιστοποίησης δεν επιβάλλονται άλλοι περιορισμοί (constraints).

Επειδή οι κόμβοι του στατικού αναλόγου δεν συμπίπτουν απαραίτητα με κόμβους του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων του προβλήματος στο Plaxis, γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των κόμβων στο Plaxis που βρίσκονται επί του ουδέτερου άξονα της

πλάκας ώστε να προσδιοριστούν κατακόρυφες μετατοπίσεις u_{plax} ακριβώς στις θέσεις των κόμβων του στατικού αναλόγου. Επίσης, επειδή για την εξαγωγή των ισοδύναμων ελατηρίων ενδιαφερόμαστε στην ουσία για τις διαφορικές μετατοπίσεις και όχι για τις ολικές καθιζήσεις, μιας και από αυτές εξαρτώνται τα εντατικά μεγέθη στην πλάκα, οι μετατοπίσεις στο κέντρο της πλάκας για τους μήνες Μάρτιο και Σεπτέμβριο τέθηκαν, μέσω παράλληλης μετάθεσης, ίσες με τις μετατοπίσεις της αρχικής κατάστασης (κοινή στάθμη αναφοράς). Με αυτό τον τρόπο το $u_{plax,i}$ στις περισσότερες αναλύσεις είναι μια θετική ποσότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, π.χ. αναλύσεις με το ακραίο υδρολογικά έτος 2018/19 και τοποθέτηση της πλάκας θεμελίωσης τον Σεπτέμβριο, απαιτήθηκε περαιτέρω μετάθεση προς τα κάτω ώστε $u_{plax,i} > 0$. Το πρόβλημα εύρεσης των ισοδύναμων ελατηρίων εφαρμόστηκε ανά ανάλυση για τρεις περιπτώσεις: α) την αρχική κατάσταση (εγκατάσταση πλάκας), β) το τέλος της χειμερινής-βροχερής περιόδου (Μάρτιος) και γ) το τέλος της θερινής-ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος).

11.4 Αποτελέσματα

11.4.1 Βέλτιστη κατανομή

Στο Σχήμα 11.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε για την ανάλυση #38 του Πίνακα 10.1. Στο Σχήμα 11.4α φαίνεται ότι υπάρχει μια αρκετά καλή προσαρμογή των αποτελεσμάτων επίλυσης του στατικού αναλόγου στα αποτελέσματα του Plaxis 2D μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, με το μέσο αναμεταξύ των κόμβων σφάλμα να είναι μικρότερο της τάξεως του 10^{-21} m για τη φάση εγκατάστασης της πλάκας, 10^{-6} m για τον Μάρτιο και 10^{-4} m για τον Σεπτέμβριο. Στο Σχήμα 11.4β φαίνονται οι προκύπτουσες κατανομές των ελατηρίων. Παρατηρείται ότι για την αρχική περίπτωση (εγκατάσταση πλάκας) η σταθερά των ελατηρίων μέχρι και τα 8m από το κέντρο του θεμελίου έχει περίπου σταθερή τιμή (10000kN/m) ενώ πέρα από αυτό το σημείο αλλάζει (αύξηση σε 13000kN/m) λόγω του εφελκυσμού της κάτω ίνας (κάμψη με τα κοίλα προς τα πάνω) που οφείλεται αποκλειστικά στα κατακόρυφα φορτία που επιβάλλονται σε αυτήν. Η τιμή ελατηρίου στο άκρο της πλάκας είναι μεγαλύτερη από ότι στα υπόλοιπα σημεία παρά το γεγονός ότι το εμβαδόν επιρροής του ακραίου κόμβου είναι το μισό από ότι αυτό των εσωτερικών κόμβων. Παρόμοια περίπου τάση ακολουθεί και η κατανομή των ελατηρίων στο τέλος της βροχερής περιόδου (Μάρτιος) με τη διαφορά ότι από τα 5m σημειώνονται

κάποιες αυξομειώσεις στις τιμές των ελατηρίων ($\pm 7000\text{kN/m}$) μέχρι τον μηδενισμό της στα 9m και ακολούθως έχουμε μεγάλη και απότομη αύξηση του K_s στο άκρο της πλάκας στα περίπου 30000kN/m . Η μεγάλη αυτή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνο το σημείο της πλάκας παρατηρούνται διογκώσεις του εδάφους (με έντονο εφελκυσμό της κάτω ίνας). Ωστόσο, η ακραία τιμή θα μπορούσε να ήταν μικρότερη αν στα 9m επιβαλλόταν η τιμή της σταθεράς K_s να ήταν μη μηδενική, εξομαλύνοντας έτσι τις διαφορές δυσκαμψίας που παρατηρούνται. Αντίθετα, η κατανομή της σταθεράς των ελατηρίων στο τέλος της άνυδρης περιόδου (Σεπτέμβριος) είναι πολύ διαφορετική εξαιτίας της συρρίκνωσης του εδάφους στην περιφερειακή περιοχή, με αποτέλεσμα να εφελκύεται η άνω ίνα της πλάκας (κάμψη με τα κοίλα προς τα κάτω). Εξαιτίας των μεγάλων αρνητικών καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται σε αυτή την περίοδο, οι τιμές μέχρι και τα 7m από το κέντρο της πλάκας πρακτικώς μηδενίζονται, ως να υπάρχει απώλεια στήριξης στην ακραία περιοχή της πλάκας, ενώ η μέγιστη τιμή K_s προκύπτει στα 6m ίση με 26000kN/m περίπου.

Στο Σχήμα 11.5 φαίνονται τα αποτελέσματα της αντίστοιχης ανάλυσης αλλά με απουσία υδροφόρου ορίζοντα (ανάλυση #41). Στην αρχική κατάσταση η κατανομή των ελατηρίων είναι πρακτικώς η ίδια με αυτήν του Σχήματος 11.4β ενώ τον Μάρτιο η μέγιστη τιμή στο άκρο της πλάκας ανέρχεται στα 14000kN/m , δηλαδή σχεδόν η μισή της ανάλυσης με παρουσία υδροφόρου. Σε αυτή την περίπτωση όμως η τιμή της σταθεράς στα 9m δεν μηδενίζεται, αλλά μειώνεται ελάχιστα συγκριτικά με την τιμή της σταθεράς ελατηρίου του προηγούμενου κόμβου (δηλ. στα 8m), με αποτέλεσμα η τιμή στο άκρο να είναι μικρότερη. Η κατανομή των ελατηρίων τον Σεπτέμβριο δίδει μέγιστες τιμές περίπου στα ίδια σημεία με την ανάλυση 38 (Σχήμα 11.4β) (στα 1m και 6m $K_s = 15000\text{kN/m}$ και 26000kN/m , αντίστοιχα).

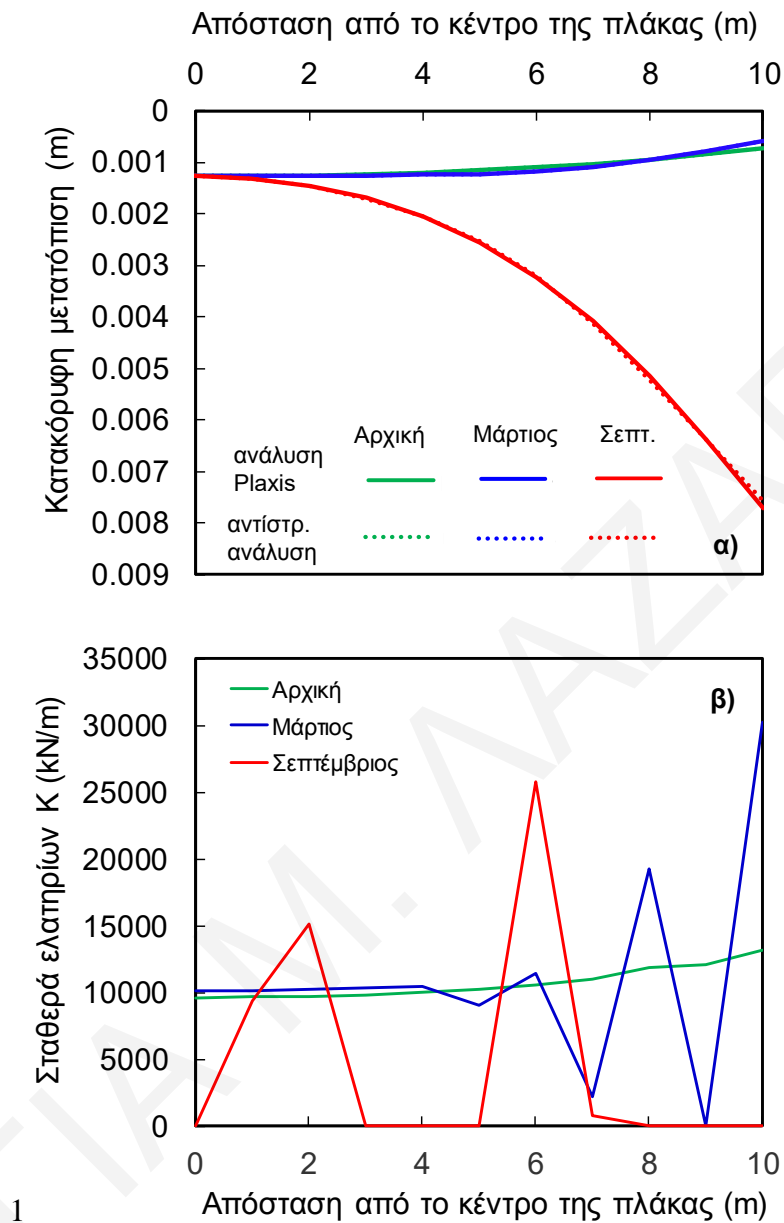
Στα Σχήματα 11.6 και 11.7 παρουσιάζονται οι κατανομές των ελατηρίων για την περίπτωση πλάκας με φόρτιση 3 σημειακών φορτίων (στα άκρα και στο κέντρο της πλάκας) με παρουσία (ανάλυση #76) και απουσία υδροφόρου ορίζοντα (ανάλυση #78), αντίστοιχα. Για την πρώτη περίπτωση, έχοντας απόλυτη προσαρμογή στα αποτελέσματα μετατοπίσεων του Plaxis (Σχήμα 11.6α), η κατανομή των ελατηρίων (Σχήμα 11.6β) ξεκινά με μια μέγιστη τιμή στο κέντρο της πλάκας (θέση επιβολής φορτίου), 20000kN/m , 17500kN/m και 15000kN/m για την αρχική κατάσταση, τον Μάρτιο και τον Σεπτέμβριο, αντίστοιχα. Στη συνέχεια ακολουθεί μείωση των τιμών μέχρι το μέσο του φατνώματος και ακολούθως αυξάνονται ξανά οι τιμές των ελατηρίων στα 20000kN/m και 26000kN/m , για την αρχική κατάσταση και τον Μάρτιο αντίστοιχα, ενώ για τον Σεπτέμβριο η αύξηση

σημειώνεται στα 8m (μέχρι τα 7500kN/m) και στο άκρο της πλάκας μηδενίζεται λόγω απώλειας της στήριξης.

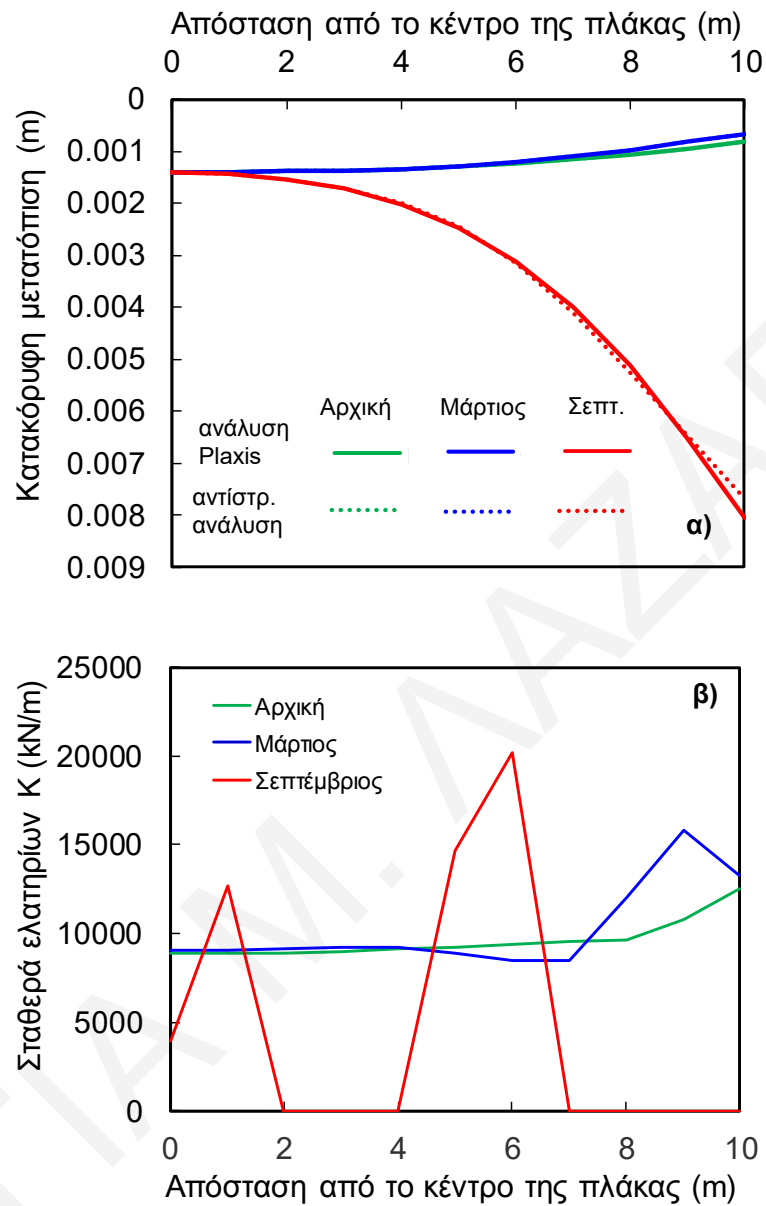
Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος ορίζοντας απουσιάζει (Σχήμα 11.7), οι κατανομές έχουν περίπου την ίδια μορφή με την προηγούμενη περίπτωση (Σχήμα 11.6β) με τη διαφορά ότι στα σημεία μέγιστης μείωσης των τιμών σταθερών των ελατηρίων αυτές σχεδόν μηδενίζονται (Σχήμα 11.7β).

Οι κατανομές των ελατηρίων για την περίπτωση φόρτισης της πλάκας θεμελίωσης με 5 σημειακά φορτία (3 στο ήμισυ του προσομοιώματος: στο άκρο, στο μέσο και στο κέντρο της πλάκας) που αντιστοιχούν σε κατανεμημένο φορτίο 120kPa (δεκαώροφο κτίριο), με παρουσία (ανάλυση #81) και απουσία υδροφόρου ορίζοντα (ανάλυση #83), φαίνονται στα Σχήματα 11.8 και 11.9, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 11.8β οι κατανομές των ελατηρίων και για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζουν μέγιστα στα σημεία επιβολής στο κέντρο ($x=0m$) και στο άκρο ($x=5m$) ενώ ενδιάμεσα (0m-5m) λαμβάνουν μια σταθερή τιμή. Από τα 5m μέχρι και τα 8m οι τιμές παρουσιάζουν μείωση και στη συνέχεια αυξάνονται μέχρι το άκρο της πλάκας. Για τον Μάρτιο, οι ογκομετρικές μεταβολές που σημειώνονται εξαιτίας της διείσδυσης υγρασίας κάτω από την περιμετρική περιοχή της πλάκας οδηγούν σε μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας των εκεί ισοδύναμων ελατηρίων. Αντίθετα, η τιμή της σταθεράς ελατηρίου τον Σεπτέμβριο στο άκρο της πλάκας είναι χαμηλότερη από ότι στα άλλα σημεία επιβολής φορτίων εξαιτίας της συρρίκνωσης του εδάφους στην περιμετρική περιοχή.

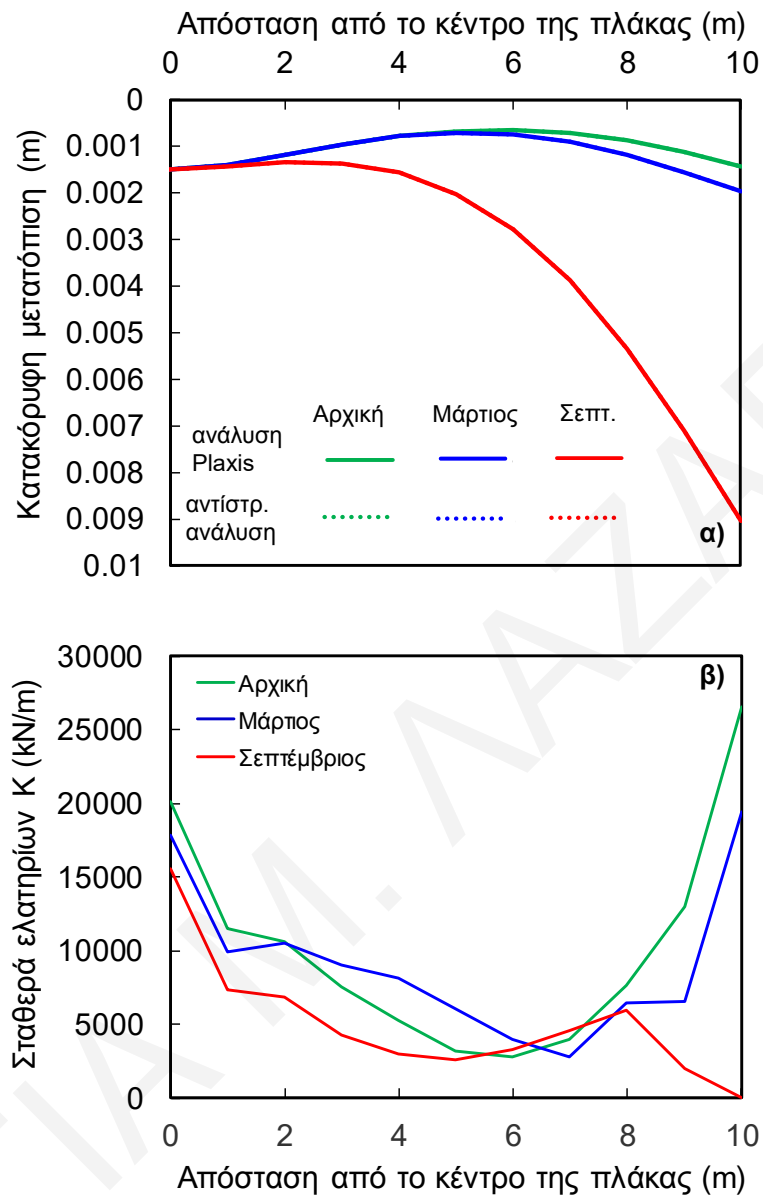
Αντίστοιχη μορφή έχουν και οι κατανομές του Σχήματος 11.9β, με τη διαφορά ότι οι τιμές ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας είναι μικρότερες συγκριτικά με την περίπτωση παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 11.8β).



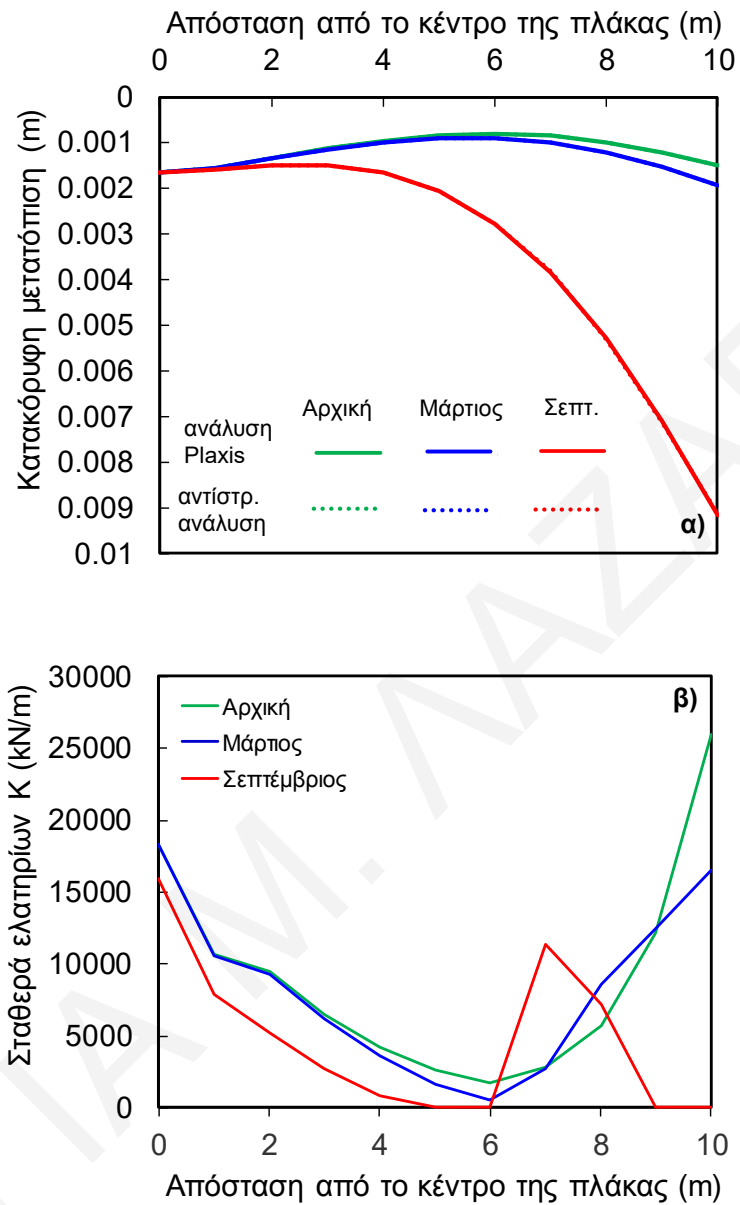
Σχήμα 11.4: Ανάλυση με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



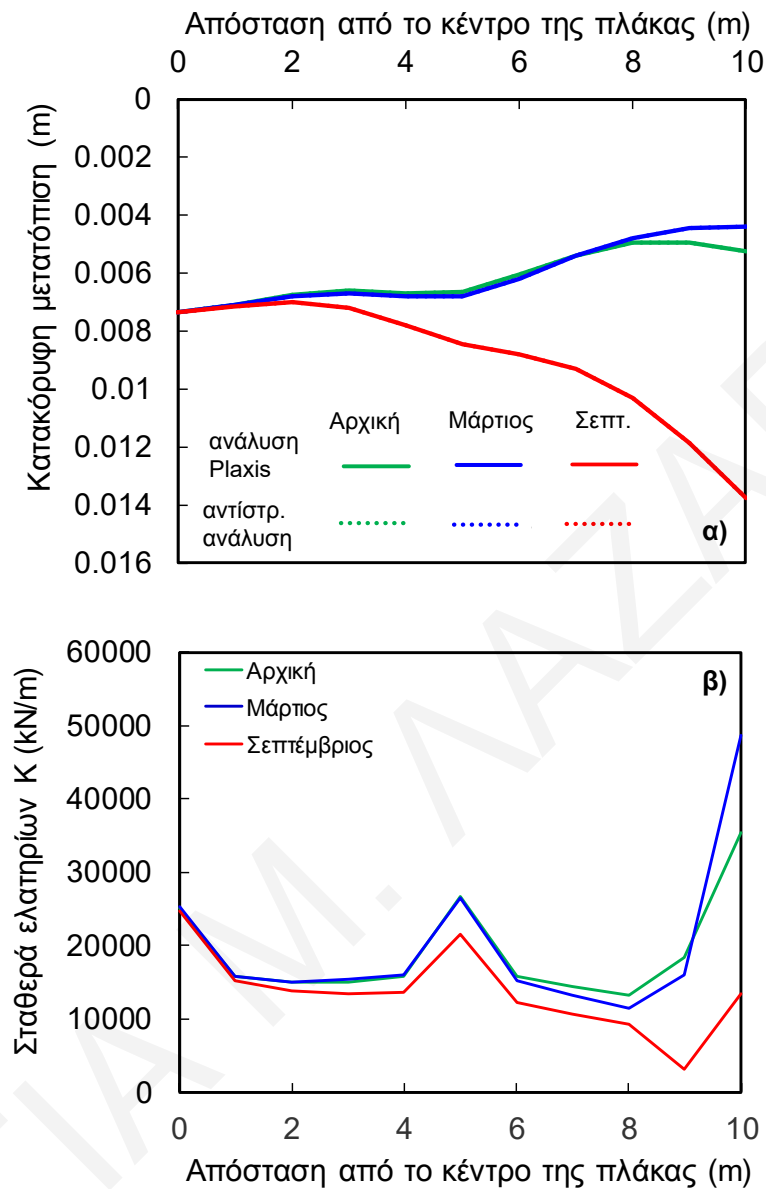
Σχήμα 11.5: Ανάλυση με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



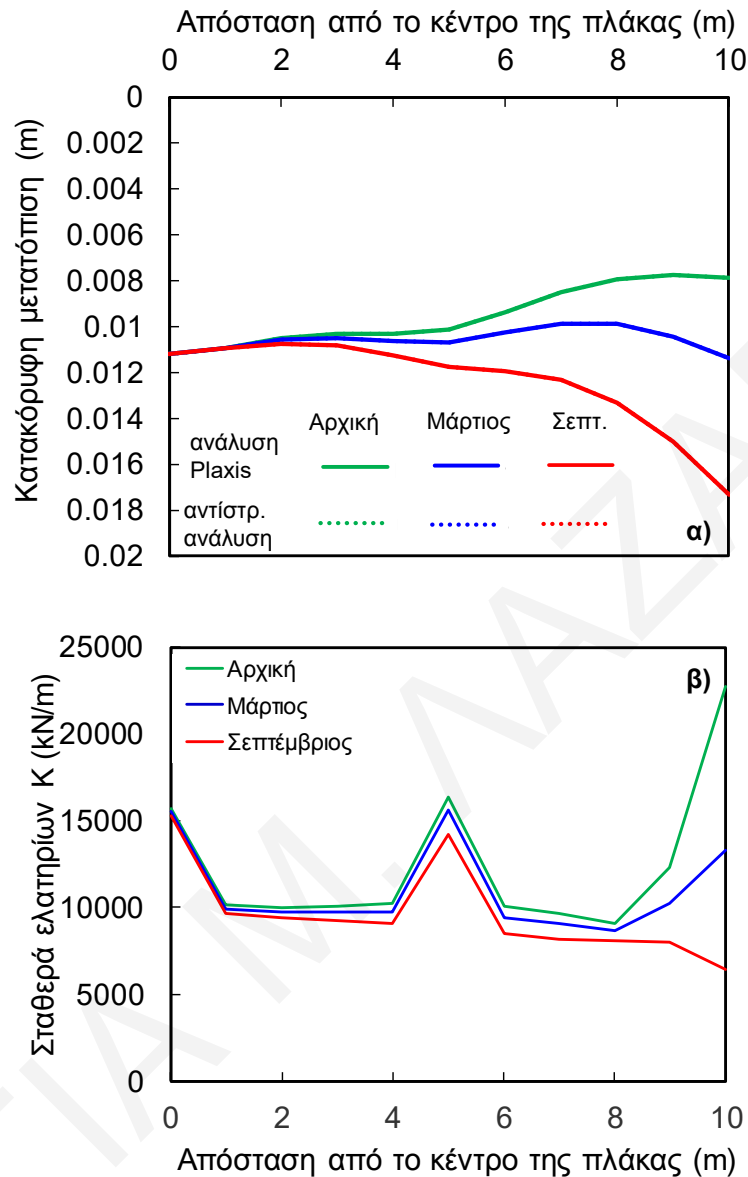
Σχήμα 11.6: Ανάλυση με τρία σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



Σχήμα 11.7: Ανάλυση με τρία σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_l=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



Σχήμα 11.8: Ανάλυση με πέντε σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_r=-5$, προφίλ A, $d=0.5m$, με Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

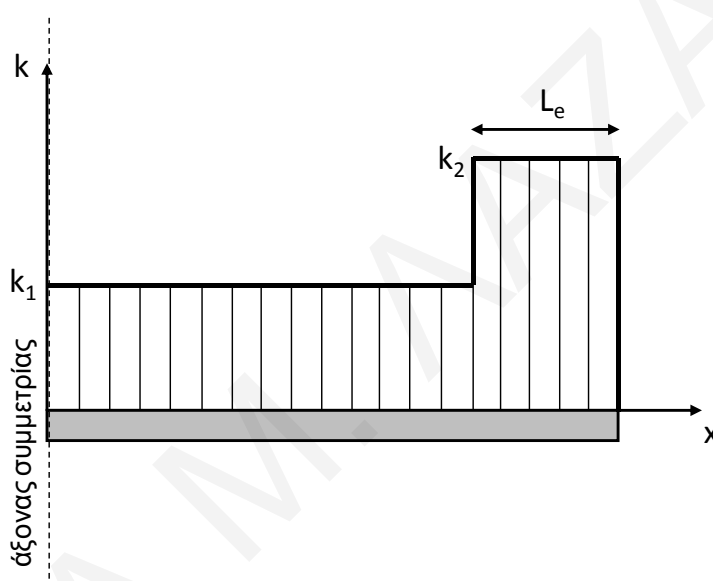


Σχήμα 11.9: Ανάλυση με πέντε σημειακά φορτία με $g_a=0,016$ $g_i=-5$, προφίλ A, $d=0,5$ m, χωρίς Υ.Ο., α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

11.4.2 Διζωνική κατανομή

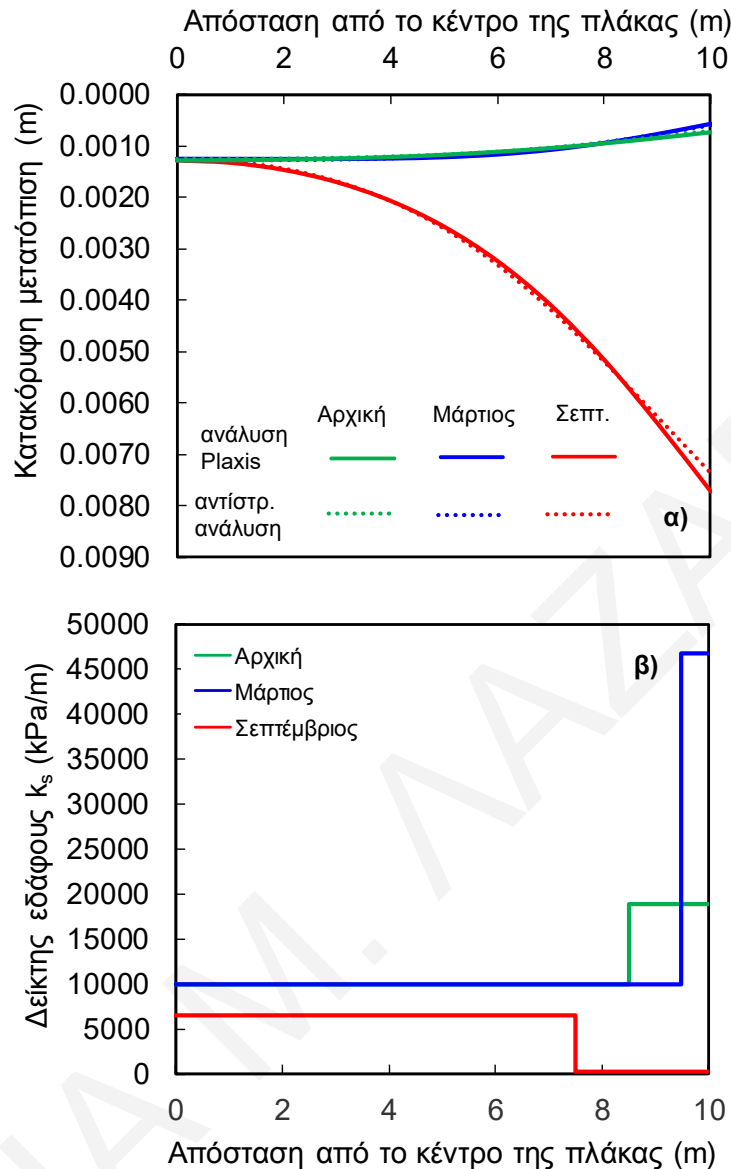
Αν και η υιοθέτηση των πιο πάνω κατανομών ελατηρίων αποτελεί την ιδανική επιλογή αφού έτσι προκύπτει σχεδόν απόλυτη ταύτιση των κάμψεων της κοιτόστρωσης με αυτές των αναλύσεων Plaxis (αμελητέο σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων Plaxis και της αντίστροφης ανάλυσης της πλάκας με ελατήρια), η χρήση τους σε ένα

δομοστατικό πρόγραμμα ανάλυσης κατασκευών δεν αποτελεί την πιο πρακτική λύση, αφού σε κάθε κόμβο πρέπει να εισάγεται από τον χρήστη διαφορετική τιμή της σταθεράς του ελατηρίου. Για να απλοποιηθεί η διαδικασία καταχώρησης τιμών στο δομοστατικό πρόγραμμα και να είναι πιο συστηματικός ο καθορισμός της κατανομής, θεωρήθηκε κατανομή μορφής αναβαθμού, δηλαδή εφαρμόζοντας μόνο δύο διαφορετικές τιμές του δείκτη εδάφους κατά μήκος της πλάκας (2-step function) σε δύο ζώνες, μια κεντρική και μια περιμετρική. Έτσι, η μη γραμμική παλινδρόμηση για την αντίστροφη ανάλυση της πλάκας με ελατήρια γίνεται πλέον μεταβάλλοντας τις δυο τιμές δείκτη εδάφους k_1 και k_2 αλλά και του πλάτους L_e της περιμετρικής ζώνης (δηλ. την απόσταση από το άκρο της κοιτόστρωσης όπου θα αλλάζει η τιμή του δείκτη εδάφους από k_2 σε k_1) (Σχήμα 11.10).



Σχήμα 11.10: Σχηματική απεικόνιση της διζωνικής (2-step function) κατανομής ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης.

Στο Σχήμα 11.11 παρουσιάζεται η νέα κατανομή ελατηρίων (2-step function) για την ανάλυση 38. Είναι εμφανές ότι εφαρμόζοντας αυτή την πρακτική δεν υπάρχει πλέον πλήρης ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του Plaxis 2D και του στατικού αναλόγου πλάκας πάνω σε ελατήρια (Σχήμα 11.11α). Εντούτοις, το σφάλμα εξακολουθεί να είναι μικρό. Οι νέες κατανομές ελατηρίων για την ανάλυση 38 παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.11β. Για την περίπτωση της αρχικής κατάστασης, η τιμή δείκτη εδάφους έχει μια χαμηλή τιμή μέχρι τα 8.5m ενώ στο άκρο της πλάκας η τιμή αυτή διπλασιάζεται. Για τον Μάρτιο, ο δείκτης εδάφους στην περιμετρική περιοχή είναι 2.5 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Αντίθετα, τον Σεπτέμβριο οι τιμές δείκτη εδάφους είναι πρακτικώς μηδενικές από τα 7.5m μέχρι και το άκρο της πλάκας.



Σχήμα 11.11: Ανάλυση 38 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

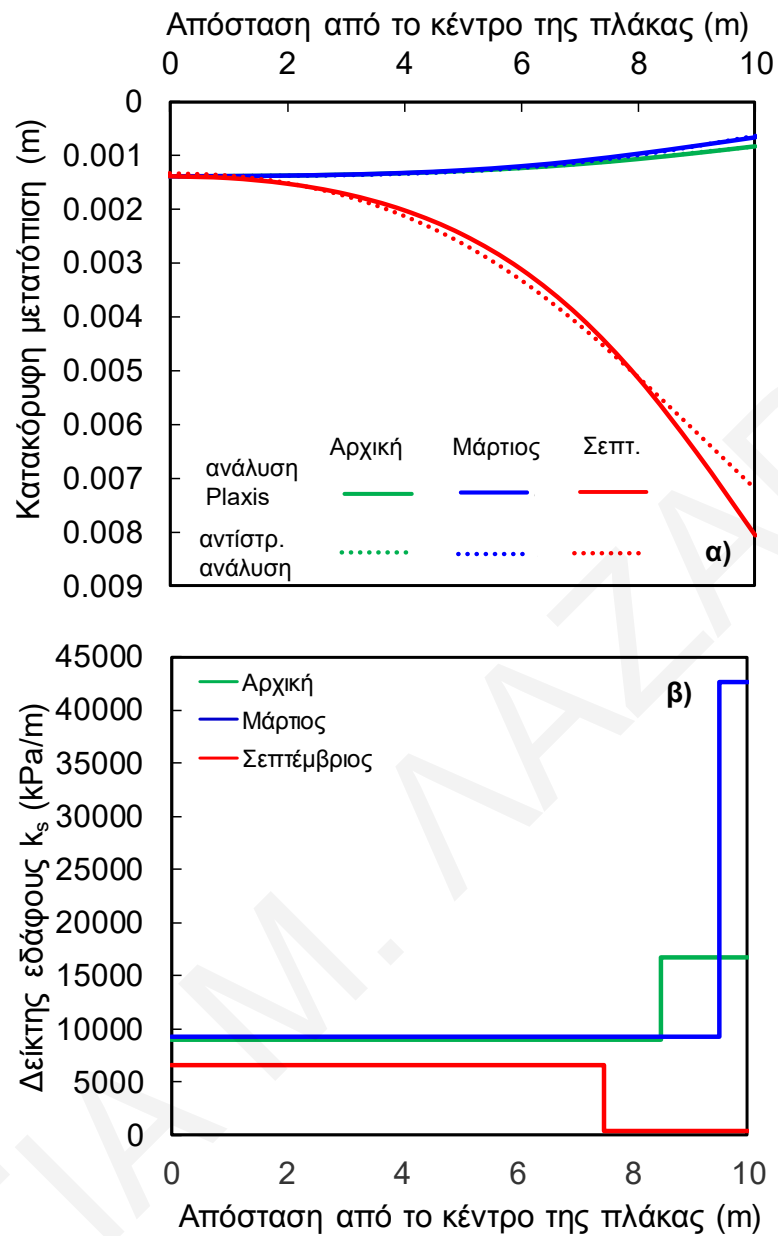
Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα για την κατανομή 2 τιμών δείκτη εδάφους (2-step function). Όπως φαίνεται στους Πίνακες 11.1 – 11.3, τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων που έγιναν με τη θεώρηση 2 ζωνών δείκτη εδάφους αναζητώντας τις βέλτιστες τιμές k_1 και k_2 , αλλά και του μήκους L_e , δίνουν μεγαλύτερα σφάλματα (μικρότερο συντελεστή συσχέτισης R^2) σε σχέση με τα αποτελέσματα που έδωσαν οι αναλύσεις των Σχημάτων 11.4-11.9.

11.4.2.1 Επίδραση Φορτίων Πλάκας

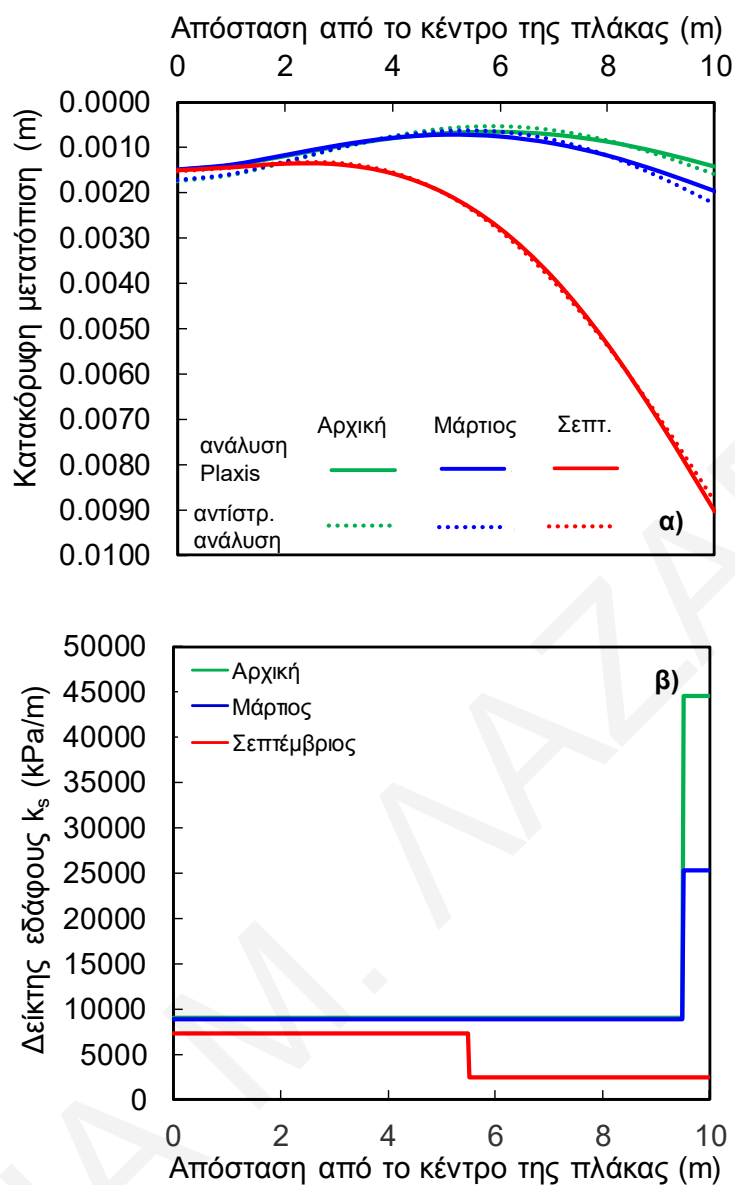
Το Σχήμα 11.12 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης 41, η οποία είναι όμοια με την ανάλυση 38 αλλά χωρίς την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. Οι κατανομές των ελατηρίων (Σχήμα 11.12β) για κάθε περίπτωση είναι παρόμοιες με αυτές της ανάλυσης με παρουσία υδροφόρου (ανάλυση 38), με τον λόγο k_2/k_1 να είναι 1.85, 4.61 και 0.050 για την αρχική κατάσταση, τον Μάρτιο και τον Σεπτέμβριο, αντίστοιχα, για την ανάλυση 41, έναντι 1.90, 4.71 και 0.035 της ανάλυσης 38.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τρία συγκεντρωμένα φορτία (ένα στο κέντρο και δυο στα άκρα σε απόσταση 10m μεταξύ τους) (ανάλυση 76) με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.13. Φαίνεται ότι η κατανομή των ελατηρίων στην αρχική κατάσταση και στο τέλος Μαρτίου (Σχήμα 11.13β) είναι πανομοιότυπη στο μεγαλύτερο μήκος (κεντρική περιοχή) της πλάκας, ενώ στο άκρο της ο δείκτης εδάφους k_2 είναι περίπου διπλάσιος για την αρχική κατάσταση σε σχέση με τον Μάρτιο. Αυτό αντιτίθεται με τα αποτελέσματα που έδωσε η ανάλυση 38 (αφού η τιμή της σταθεράς του ελατηρίου ήταν μεγαλύτερη τον Μάρτιο) γεγονός που ίσως να οφείλεται στην επιβολή του συγκεντρωμένου φορτίου στο άκρο της πλάκας και τη συγκέντρωση πίεσης επαφής εκεί, με συνέπεια αυτό να συντείνει στην κατάρρευση του εδαφικού ιστού αντί στην ανάπτυξη διόγκωσης. Τον Σεπτέμβριο ο δείκτης εδάφους k_2 σε μια περιμετρική περιοχή πλάτους 4.5m, είναι σαφώς μικρότερος από αυτόν στην κεντρική περιοχή. Η κατανομή των ελατηρίων για την ίδια περίπτωση αλλά με απουσία υδροφόρου (Σχήμα 11.14) (ανάλυση 78) δίνει σε όλες τις φάσεις τιμές δείκτη εδάφους μόλις 10%-20% σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ το L_e για τον Σεπτέμβριο είναι στα 3.5m (Σχήμα 11.14β).

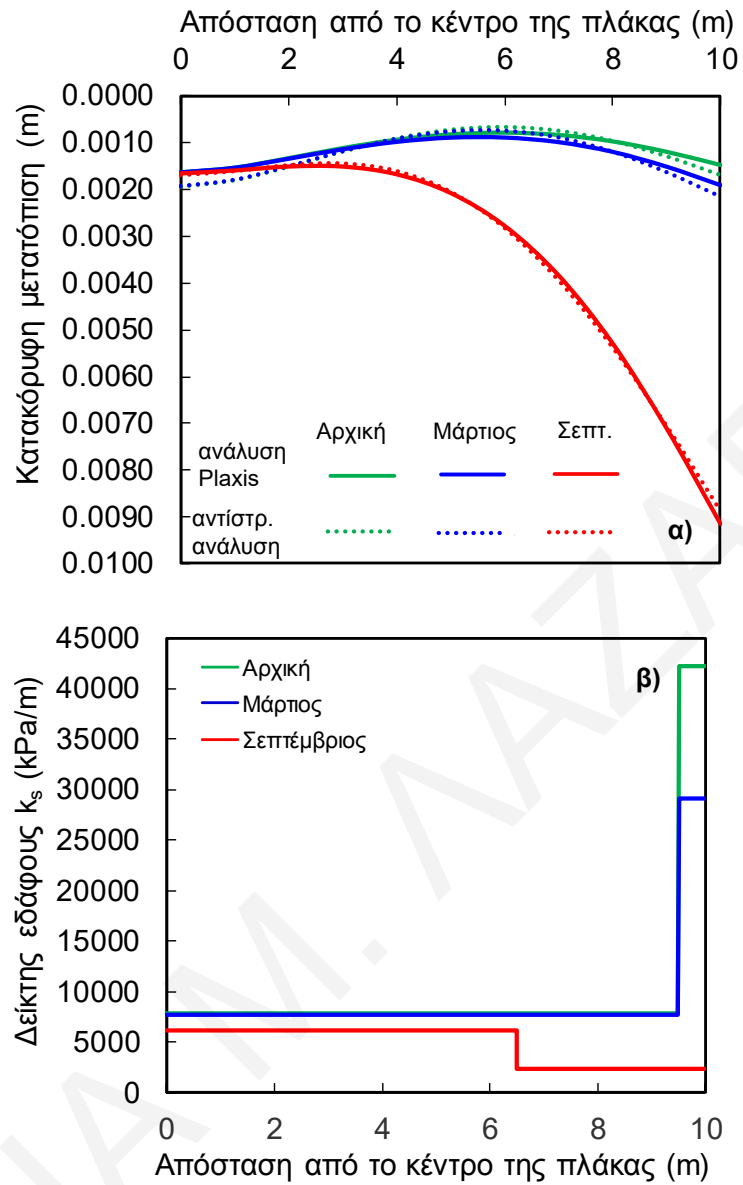
Στα Σχήματα 11.15 και 11.16 φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με συγκεντρωμένα φορτία στο μέσο (1200kN/m) και στα άκρα της πλάκας (600kN/m) που αντιστοιχούν σε κατανεμημένο φορτίο 120kPa, με (ανάλυση 77) και χωρίς υδροφόρο (ανάλυση 79), αντίστοιχα. Η κατανομή δείκτη εδάφους του Σχήματος 11.15β εμφανίζει τιμή k_1 γύρω στα 8100kPa/m μέχρι τα 9.5m και για τις τρεις περιπτώσεις, ενώ το k_2 (9.5m έως 10m) μειώνεται από την τιμή των 42800kPa/m της αρχικής κατάστασης σε 31470kPa/m τον Μάρτιο και 24000kPa/m τον Σεπτέμβριο. Στο Σχήμα 11.16β, ο δείκτης εδάφους k_2 στην περιμετρική περιοχή της πλάκας έχει τιμή 1.75 και 2.77 φορές μικρότερη τον Μάρτιο και τον Σεπτέμβριο, αντίστοιχα, από ότι στην αρχική κατάσταση. Η μείωση του k_2 στο τέλος της χειμερινής περιόδου σε σχέση με την αρχική κατάσταση είναι απόρροια της τάσης για κατάρρευση της μέτρια διογκώσιμης μάργας κατά τη διαβροχή σε τιμές κατακόρυφης πίεσης μεγαλύτερες από 100kPa.



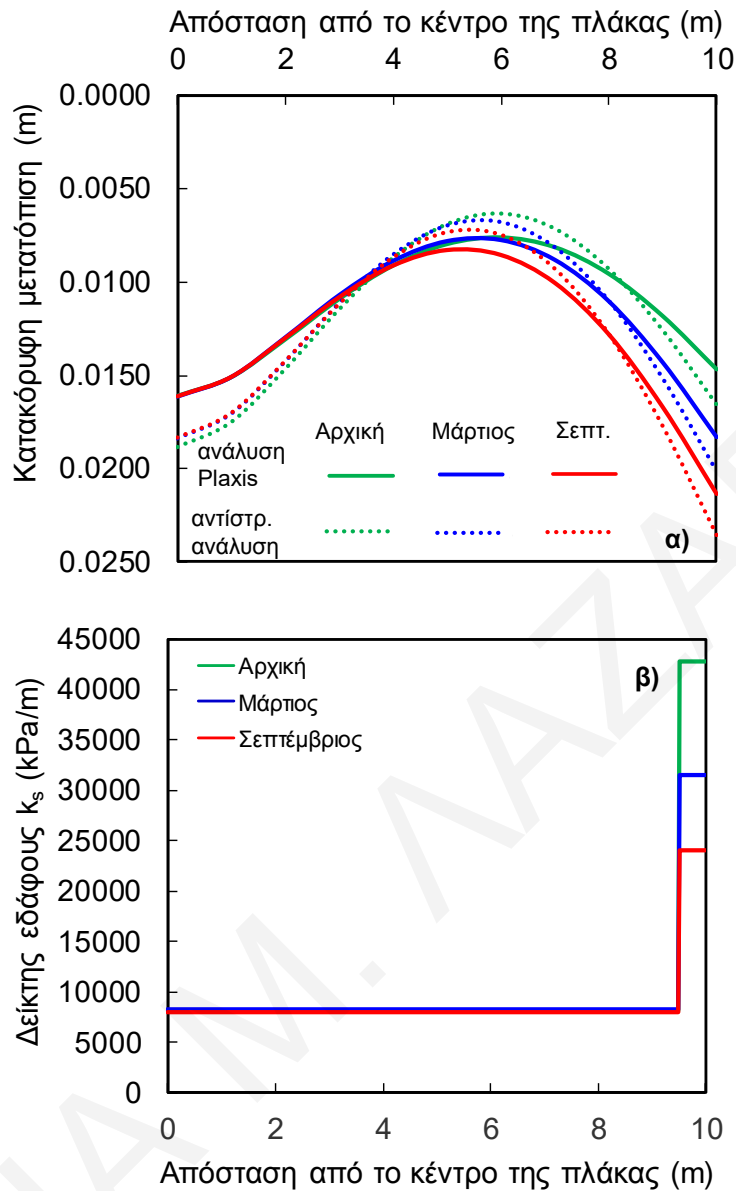
Σχήμα 11.12: Ανάλυση 41 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



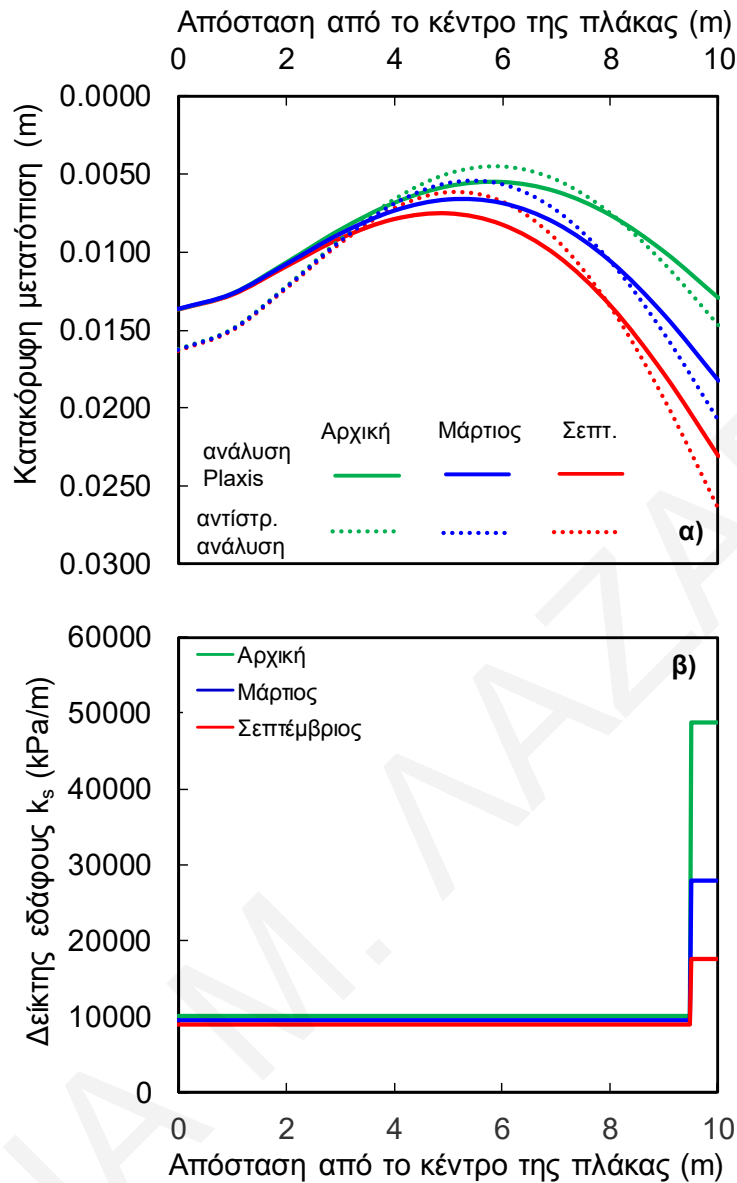
Σχήμα 11.13: Ανάλυση 76 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



Σχήμα 11.14: Ανάλυση 78 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



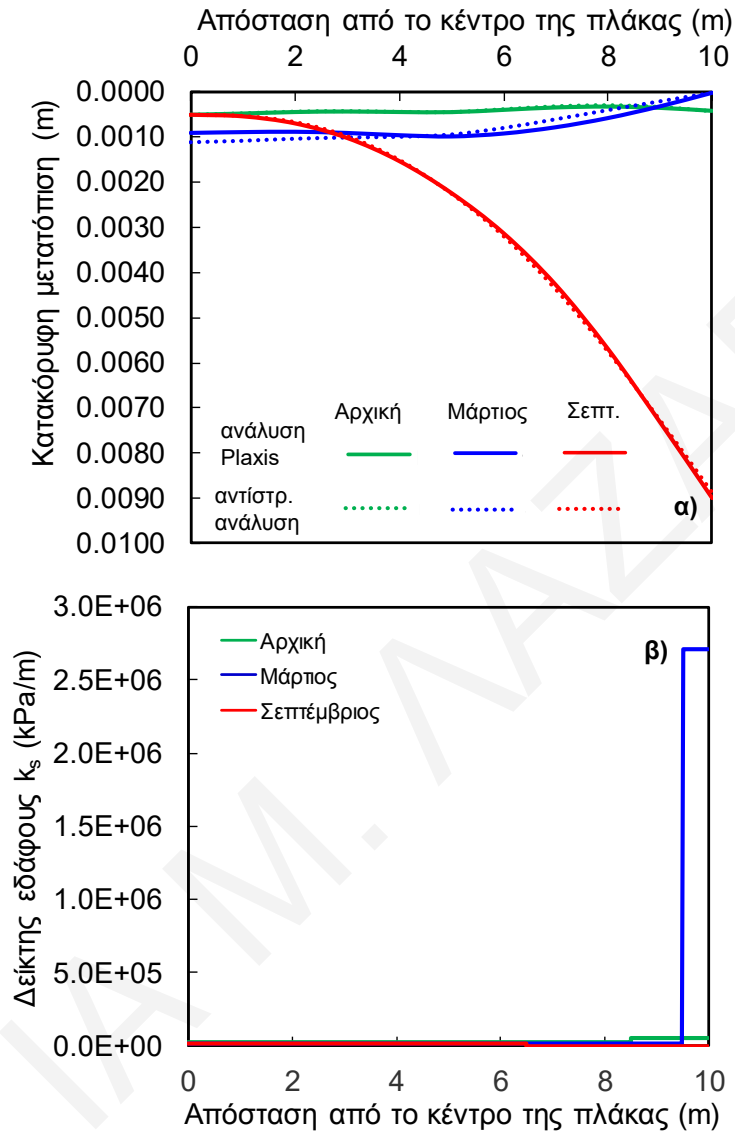
Σχήμα 11.15: Ανάλυση 77 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.



Σχήμα 11.16: Ανάλυση 79 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

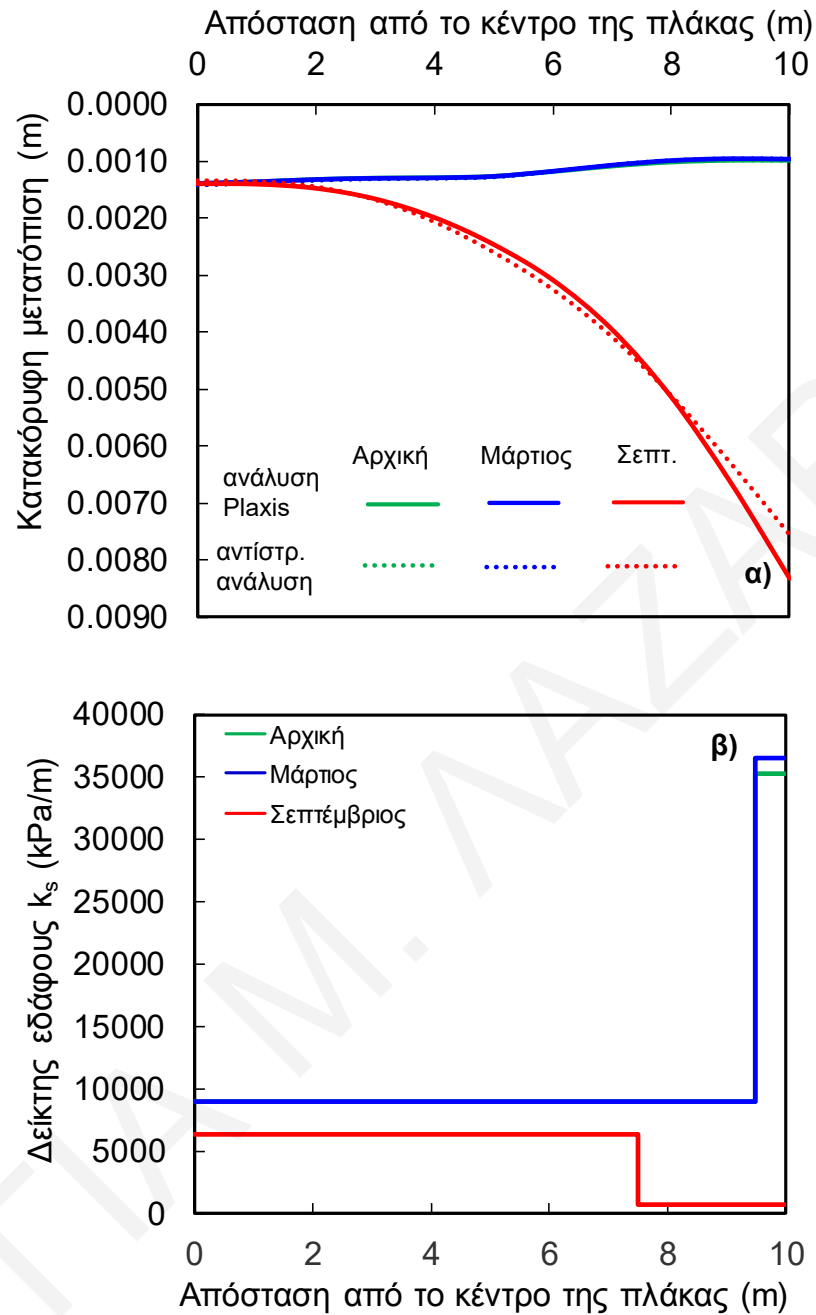
Στο Σχήμα 11.17 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην οποία η πλάκα φορτίζεται με 5 σημειακά φορτία σε απόσταση 5m μεταξύ τους (ανάλυση 80) με παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα, ενώ στο Σχήμα 11.18 τα αποτελέσματα της αντίστοιχης ανάλυσης χωρίς υδροφόρο (ανάλυση 82). Παρατηρείται μεγάλη αύξηση του δείκτη εδάφους στο άκρο της πλάκας στο τέλος της βροχερής περιόδου, ενώ οι τιμές για το τέλος της ξηρής περιόδου είναι πολύ μικρότερες. Οι τιμές της συγκεκριμένης ανάλυσης δεν κρίνονται αρκετά αξιόπιστες, ειδικά για την κατανομή Μαρτίου, αφού το σφάλμα μεταξύ των

αποτελεσμάτων του Plaxis και της αντίστροφης ανάλυσης της πλάκας πάνω σε ελατήρια είναι σχετικά μεγάλο (Πίνακας 11.2 και Σχήμα 11.17α).



Σχήμα 11.17: Ανάλυση 80 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

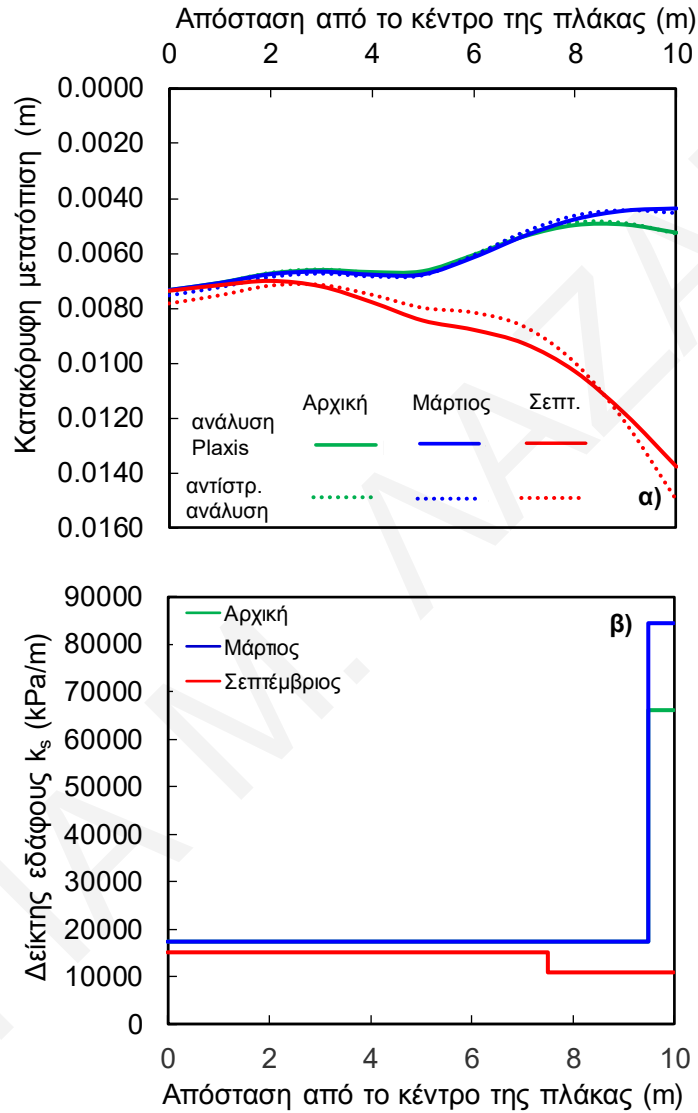
Το προφίλ κατανομής ελατηρίων για την ανάλυση χωρίς υδροφόρο (Σχήμα 11.18β) δίνει πιο λογικά αποτελέσματα αφού οι κατανομές είναι όμοιες στην αρχική κατάσταση και τον Μάρτιο, με μια ελαφρά αύξηση του k_2 αυτής της περιόδου. Τον Σεπτέμβριο η τιμή k_2 σε μια περιμετρική ζώνη πλάτους 2.5m είναι περίπου 50 φορές μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή της αρχικής κατάστασης.



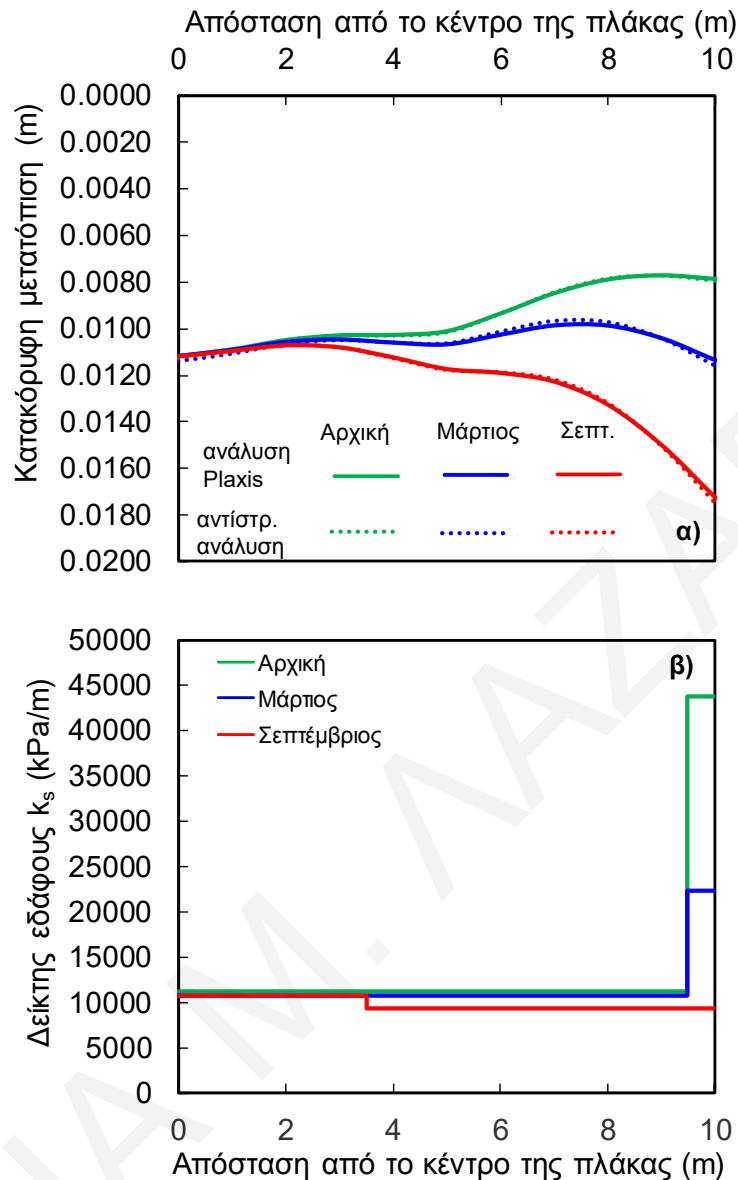
Σχήμα 11.18: Ανάλυση 82 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

Στα Σχήματα 11.19 και 11.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με την εφαρμογή πέντε σημειακών φορτίων (600kN/m-κέντρο πλάκας, 600kN/m-5.0m, 300kN/m-άκρο πλάκας) που αντιστοιχούν σε κατανεμημένο φορτίο 120kN/m, με παρουσία (ανάλυση 81) και απουσία υδροφόρου ορίζοντα (ανάλυση 83) αντίστοιχα.

Αξιοσημείωτη είναι η μεταβολή της σταθεράς ελατηρίου στο τέλος της ξηρής περιόδου σε απόσταση 3.5m από το κέντρο της πλάκας όπου το k_2 και γίνεται ίσο με 9400kPa/m (Σχήμα 11.20β). Η αντίστοιχη μεταβολή στην περίπτωση με παρουσία υδροφόρου (Σχήμα 11.19β) σημειώνεται στα 7.5m από το κέντρο της πλάκας με μείωση του k από 15000kPa/m σε 11000kPa/m.



Σχήμα 11.19: Ανάλυση 81 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

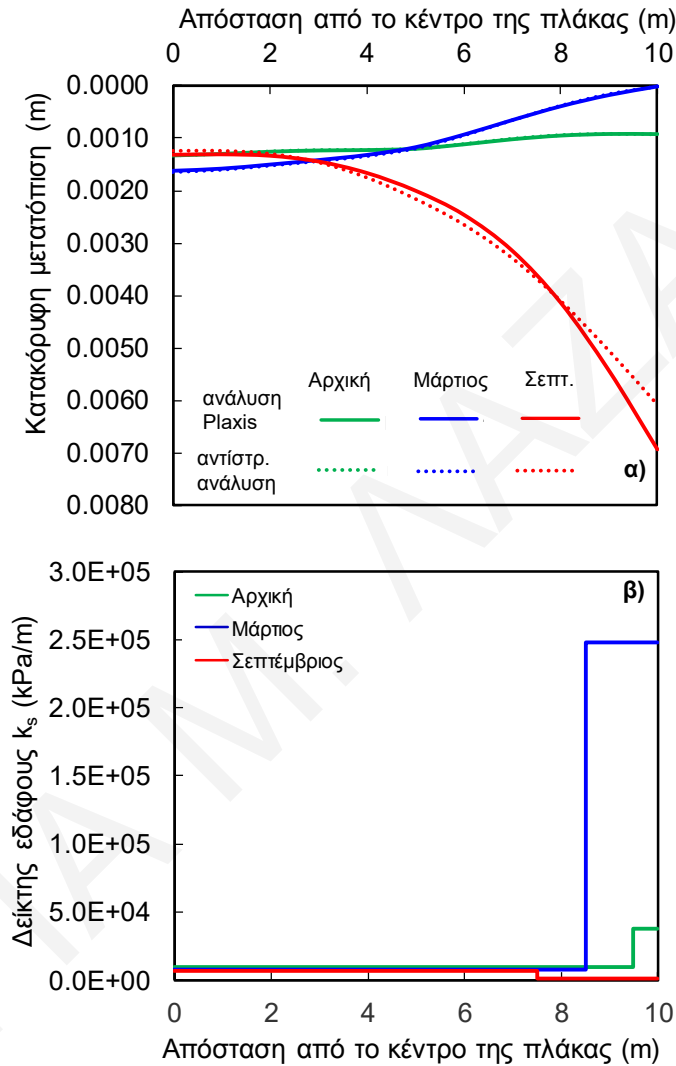


Σχήμα 11.20: Ανάλυση 83 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

11.4.2.2 Επίδραση Περιόδου Εγκατάστασης της Πλάκας

Το Σχήμα 11.21 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης 84 όπου η εγκατάσταση της πλάκας γίνεται στη διάρκεια ξηρής περιόδου (συγκεκριμένα τον Σεπτέμβριο) του υδρολογικού έτους 2014/15. Αρχικά η κατανομή (Σχήμα 11.21β) ξεκινά με ένα k_1 της τάξεως των 7200kPa/m-9500kPa/m και στη συνέχεια αυξάνεται σε k_2 της τάξεως των

38000kPa/m και 250000kPa/m για την αρχική κατάσταση και τον Μάρτιο αντίστοιχα, ενώ αντίθετα τον Σεπτέμβριο μειώνεται σε περίπου 1200kPa/m. Οι συγκριτικά μεγάλες διαφορές μεταξύ αρχικής κατάστασης και Μαρτίου σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις οφείλονται στο ότι η πλάκα εφαρμόζεται στο έδαφος στην ξηρή περίοδο, έχοντας έτσι μεγαλύτερη δυνατότητα να διογκωθεί τη χειμερινή περίοδο.

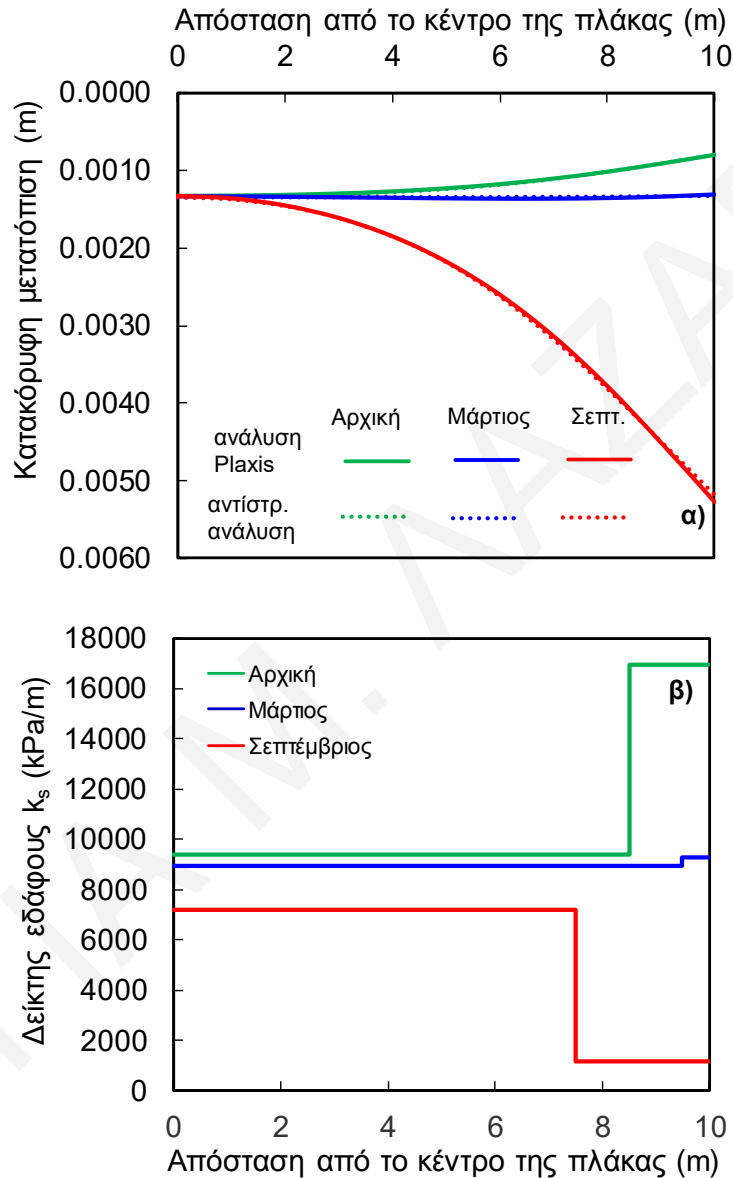


Σχήμα 11.21: Ανάλυση 84 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

11.4.2.3 Αντικατάσταση Φυσικού Εδάφους με Χονδρόκοκκο Υλικό

Στο Σχήμα 11.22 φαίνεται η επίδραση της αντικατάστασης του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους 1.0m (ανάλυση 87) στην κατανομή των ελατηρίων της πλάκας

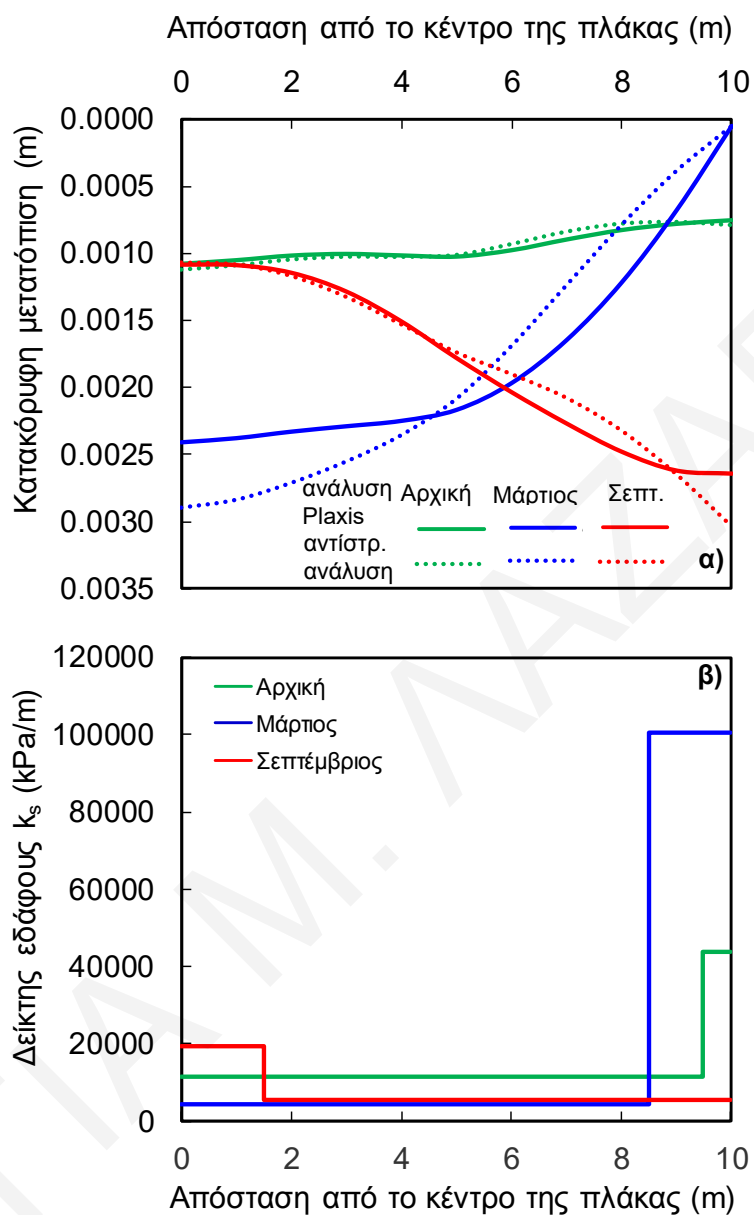
για το υδρολογικό έτος 2014/15, η οποία φορτίζεται με κατανεμημένο φορτίο 12kN/m. Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του Plaxis και της αντίστροφης ανάλυσης της πλάκας πάνω σε ελατήρια (Σχήμα 11.22α) είναι αρκετά καλή, με σφάλμα της τάξεως του 10^{-4} m .



Σχήμα 11.22: Ανάλυση 87 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

Στα Σχήματα 11.23 και 11.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τοποθέτηση χονδρόκοκκου υλικού κάτω από την πλάκα θεμελίωσης, η οποία φορτίζεται με 5 σημειακά φορτία μεγέθους 60kN/m στο κέντρο της πλάκας, 60kN/m στα 5.0m από το κέντρο της πλάκας και 30kN/m στο άκρο της πλάκας, που αντιστοιχούν σε κατανεμημένο

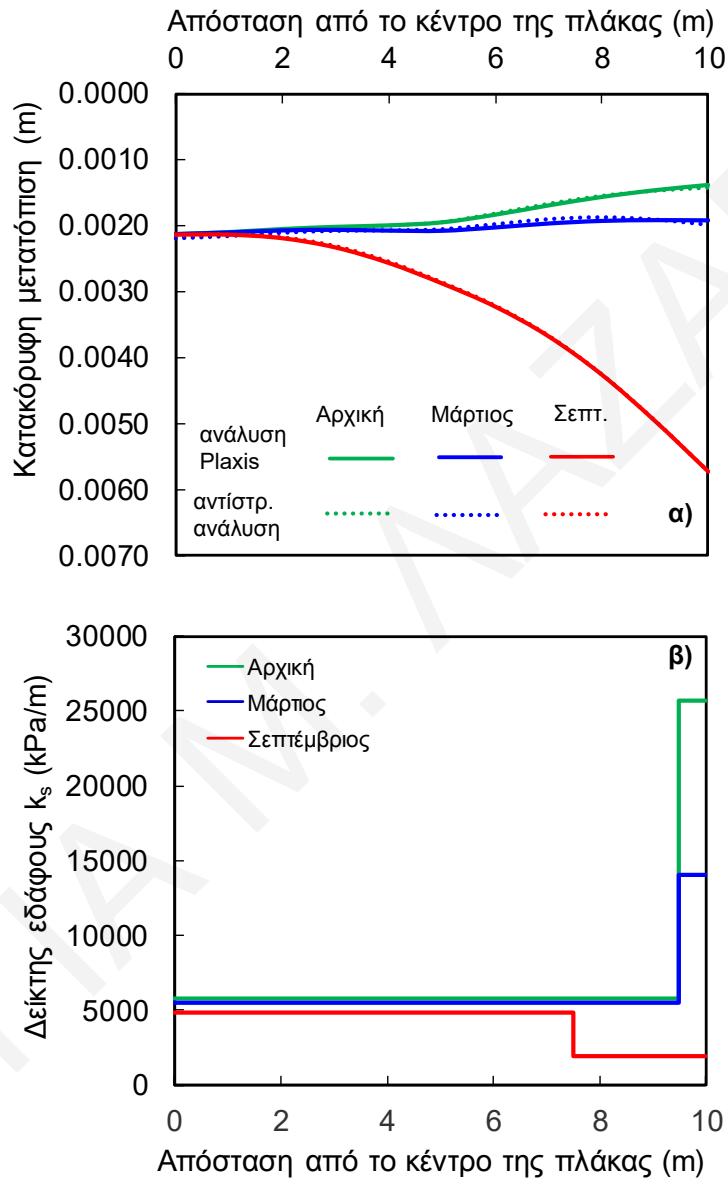
φορτίο 12kN/m, στην παρουσία (ανάλυση 89) και απουσία υδροφόρου ορίζοντα (ανάλυση 88) αντίστοιχα.



Σχήμα 11.23: Ανάλυση 89 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

Η κατανομή της σταθεράς των ελατηρίων στην περίπτωση ύπαρξης ενός ρηχού υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 11.23β) για την αρχική κατάσταση παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από την αντίστοιχη στην οποία ο υδροφόρος απουσιάζει (Σχήμα 11.24β). Στο τέλος Μαρτίου στην παρουσία υδροφόρου υπάρχει σημαντική αύξηση στην τιμή k_2 . Η

μεγάλη αυτή αύξηση που σημειώνεται πιθανόν να οφείλεται στην όχι τόσο καλή προσαρμογή που έχουν τα αποτελέσματα μετατοπίσεων της αντίστροφης ανάλυσης σε αυτά του Plaxis και (Σχήμα 11.23α). Αντίθετα, η καλή απόκριση των αποτελεσμάτων του Σχήματος 11.24α δίνει συγκριτικά πιο λογικά αποτελέσματα.



Σχήμα 11.24: Ανάλυση 88 με τη μέθοδο 2 τιμών (2-step function), α) σύγκριση κατακόρυφης μετατόπισης από Plaxis και από επίλυση στατικού αναλόγου πλάκας με ελατήρια και β) κατανομή δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.

Πίνακας 11.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για την αρχική κατάσταση (εγκατάσταση πλάκας).

Αριθμός Ανάλυσης	R ² (βέλτιστη κατανομή)	R ² (διζωνική κατανομή)	L _e (m)	k ₁ (kPa/m)	k ₂ (kPa/m)	k ₂ /k ₁
38	9.00E-21	6.19E-04	1.5	9950.5	18889.1	1.90
41	1.09E-20	1.15E-04	1.5	8982.1	16636.6	1.85
76	1.44E-20	1.52E-01	0.5	9065.2	44470.5	4.91
77	2.00E-21	1.55E-01	0.5	8130.9	42809.1	5.26
78	3.50E-21	1.65E-01	0.5	7895.7	42234.0	5.35
79	1.68E-21	1.92E-01	0.5	10024.3	48782.1	4.87
80	1.53E-21	5.81E-03	1.5	26424.2	51602.8	1.95
81	3.62E-21	6.70E-04	0.5	17433.2	66159.5	3.80
82	1.27E-11	2.84E-04	0.5	8944.6	35234.3	3.94
83	3.54E-21	2.13E-04	0.5	11261.2	43758.8	3.89
84	2.44E-17	1.73E-04	0.5	9466.0	38161.1	4.03
85	6.02E-04	1.42E-03	0.5	8462.1	39688.3	4.69
86	3.28E-20	2.03E-03	0.5	5761.5	27328.4	4.74
87	6.82E-21	1.12E-04	1.5	9372.6	16933.2	1.81
88	3.78E-20	2.10E-03	0.5	5754.3	25647.8	4.46
89	8.71E-07	1.62E-02	0.5	11315.9	43766.8	3.87

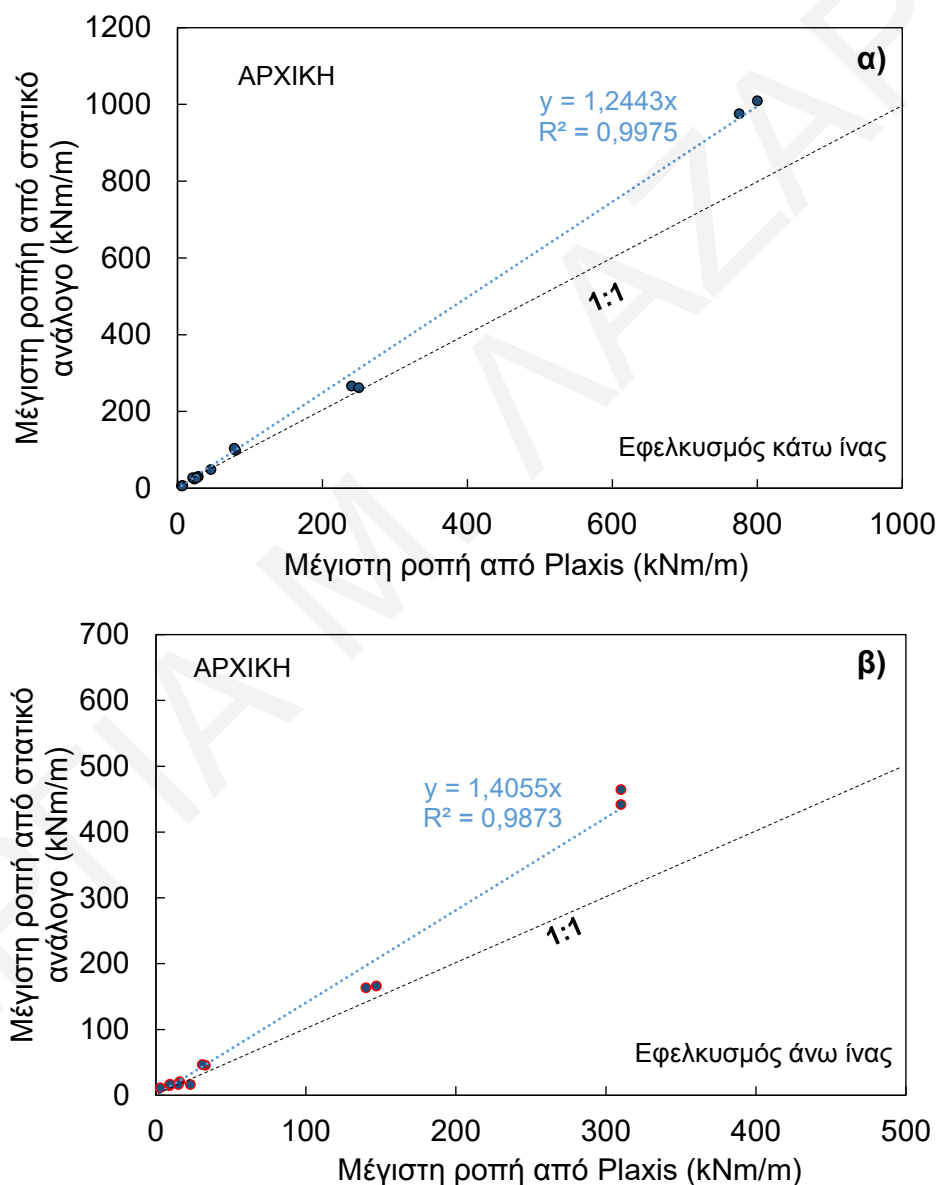
Πίνακας 11.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για το τέλος της χειμερινής περιόδου (Μάρτιος).

Αριθμός Ανάλυσης	R ² (βέλτιστη κατανομή)	R ² (διζωνική κατανομή)	L _e (m)	k ₁ (kPa/m)	k ₂ (kPa/m)	k ₂ /k ₁
38	4.71E-06	4.06E-03	0.5	9894.7	46677.7	4.71
41	4.59E-21	2.35E-03	0.5	9235.4	42619.9	4.61
76	1.54E-20	1.27E-01	0.5	8860.8	25353.9	2.86
77	1.19E-21	9.76E-02	0.5	8192.4	31465.8	3.84
78	1.41E-21	1.45E-01	0.5	7677.3	29063.7	3.79
79	2.14E-21	1.87E-01	0.5	9521.2	27938.0	2.93
80	1.36E-02	4.23E-01	0.5	12226.9	2714040.6	222.0
81	4.62E-21	4.93E-03	0.5	17265.4	84332.7	4.88
82	1.93E-11	1.92E-04	0.5	8947.2	36531.3	4.08
83	3.21E-21	1.66E-03	0.5	10803.8	22388.8	2.07
84	3.24E-02	1.18E-02	1.5	8013.3	248433.5	31.0
85	1.01E-05	8.56E-03	1.5	5913.3	181356.3	30.7
86	3.39E-20	3.01E-03	3.5	5587.7	13445.3	2.41
87	1.09E-11	8.75E-04	0.5	8912.7	9271.4	1.04
88	1.50E-10	5.21E-03	0.5	5534.1	14091.9	2.55
89	5.92E-03	5.17E-01	1.5	4447.0	100486.2	22.6

Πίνακας 11.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ελατηρίων για το τέλος της θερινής περιόδου (Σεπτέμβριος).

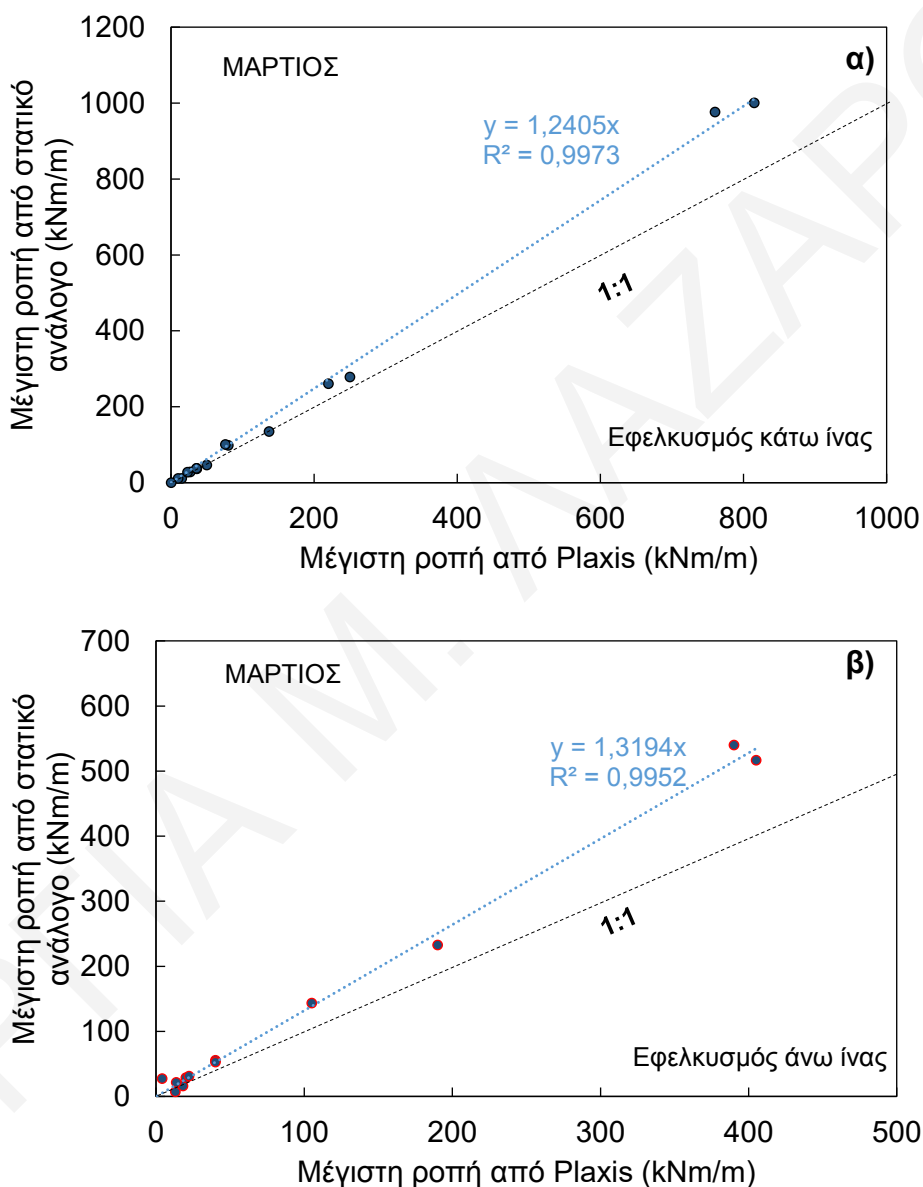
Αριθμός Ανάλυσης	R ² (βέλτιστη κατανομή)	R ² (διζωνική κατανομή)	L _e (m)	k ₁ (kPa/m)	k ₂ (kPa/m)	k ₂ /k ₁
38	7.80E-04	4.59E-03	2.5	6767.0	237.9	0.035
41	3.82E-03	3.11E-02	2.5	6601.9	329.4	0.050
76	9.37E-09	2.71E-03	4.5	7284.2	2495.1	0.340
77	2.65E-21	9.79E-02	0.5	7980.1	24014.7	3.010
78	2.83E-05	6.55E-03	3.5	6094.1	2294.5	0.380
79	2.46E-21	1.96E-01	0.5	9030.4	17589.7	1.950
80	1.64E-05	3.92E-03	3.5	11206.5	683.2	0.061
81	2.02E-20	3.00E-02	2.5	15067.2	10927.4	0.725
82	1.35E-03	2.30E-02	2.5	6370.6	720.7	0.113
83	3.89E-21	3.61E-04	6.5	10777.3	9390.3	0.871
84	1.91E-03	4.34E-02	2.5	7226.6	1255.9	0.174
85	7.43E-02	1.01E-01	7.5	26028.5	0.0	0.000
86	1.76E-04	9.84E-03	1.5	4598.4	121.8	0.026
87	1.17E-05	6.11E-04	2.5	7213.1	1149.8	0.159
88	1.54E-19	1.03E-04	2.5	4832.7	1932.5	0.400
89	1.54E-03	4.02E-02	8.5	19232.2	5488.1	0.285

Στα παρακάτω σχήματα πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των μέγιστων θετικών και μέγιστων αρνητικών ροπών (Πίνακας 11.4) που προέκυψαν μέσω των προσομοιώσεων του Plaxis και αυτών που προβλέπει το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια χρησιμοποιώντας τις τιμές δείκτη εδάφους k_1 , k_2 και του L_e των Πινάκων 11.1-11.3 για την περίπτωση της αρχικής κατάστασης, δηλαδή απουσία διόγκωσης/συρρίκνωσης του εδάφους (Σχήμα 11.25), του τέλους της υγρής περιόδου (Σχήμα 11.26) και του τέλους της ξηρής περιόδου (Σχήμα 11.27).

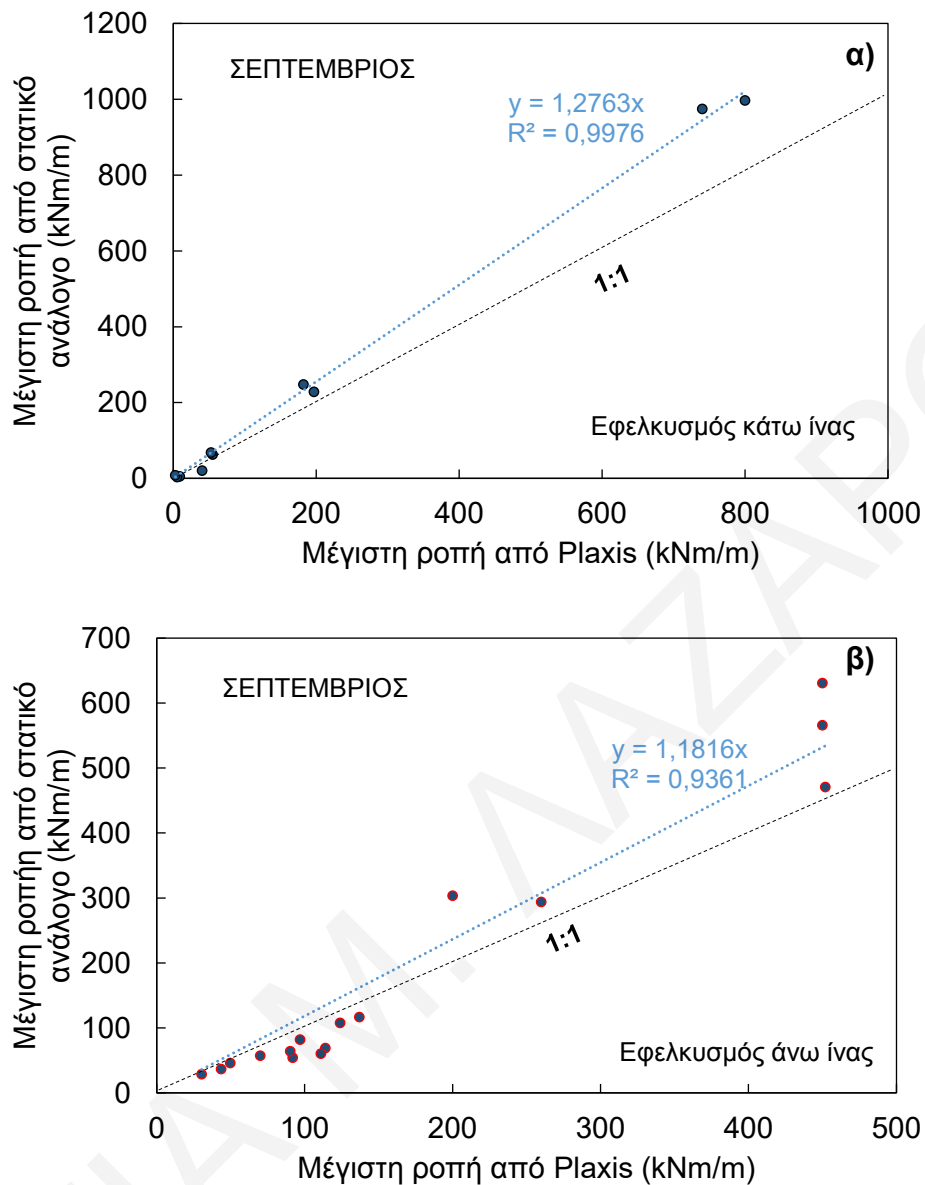


Σχήμα 11.25: Σύγκριση μέγιστων καμπτικών ροπών για την αρχική κατάσταση από τις προσομοιώσεις Plaxis με αυτές που προβλέπει το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων των Πινάκων 11.1-11.3.

Παρατηρούμε ότι για τις περιπτώσεις αρχικής κατάστασης και τέλους υγρής περιόδου, τόσο οι μέγιστες θετικές ροπές, που προκαλούν τον εφελκυσμό της κάτω ίνας της πλάκας (Σχήματα 11.25α & 11.26α), όσο και οι μέγιστες αρνητικές ροπές, που προκαλούν τον εφελκυσμό της άνω ίνας (Σχήματα 11.25β & 11.26β), γενικά υπερεκτιμούνται από το στατικό ανάλογο της πλάκας πάνω σε ελατήρια, κάτι που είναι υπέρ της ασφαλείας..



Σχήμα 11.26: Σύγκριση μέγιστων καμπτικών ροπών για το τέλος υγρής περιόδου από τις προσομοιώσεις Plaxis με αυτές που προβλέπει το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων των Πινάκων 11.1-11.3.



Σχήμα 11.27: Σύγκριση μέγιστων καμπτικών ροπών για το τέλος ξηρής περιόδου από τις προσομοιώσεις Plaxis με αυτές που προβλέπει το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων των Πινάκων 11.1-11.3.

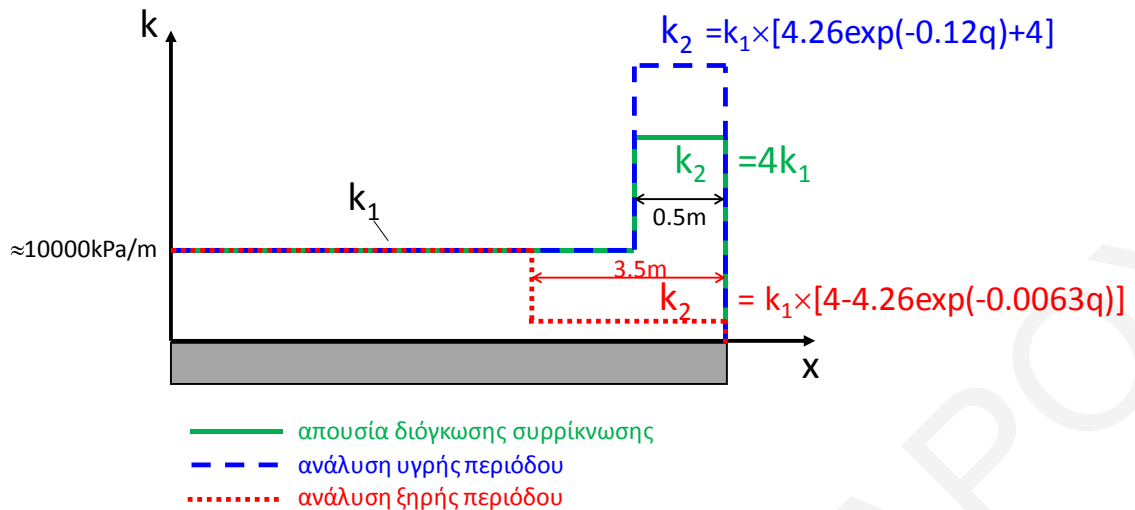
Το ίδιο μπορεί να λεχθεί για τις μέγιστες θετικές ροπές στο τέλος της ξηράς περιόδου (Σχήμα 11.27α). Αντίθετα, οι τιμές των ροπών εφελκυσμού άνω ίνας στο τέλος της ξηρής περιόδου (Σχήμα 11.27β) εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά πέριξ της γραμμής 1:1. Μάλιστα, οι ροπές φαίνεται να είναι υποτιμημένες από το στατικό ανάλογο στην περίπτωση χαμηλών φορτίων ανωδομής.

11.4.3 Ομοιογενοποιημένη κατανομή

Για να υιοθετηθεί η χρήση της βαθμιδωτής κατανομής στην πράξη, είναι αναγκαίο να καταστεί εύκολη και συστηματική η επιλογή των παραμέτρων της από τον δομοστατικό μηχανικό. Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται ομοιογενοποίηση των τιμών των παραμέτρων k_1 , k_2 και L_e συμπύσσοντας τις κατανομές που εξήχθησαν παραπάνω στις τρεις κατανομές που φαίνονται στο Σχήμα 11.28. Η πράσινη κατανομή αφορά στην περίπτωση όπου δεν λαμβάνονται υπόψη οι διογκώσεις/συρρικνώσεις του υλικού, η μπλε προορίζεται για ανάλυση υγρής περιόδου και η κόκκινη για ανάλυση ξηρής περιόδου. Οι κατανομές αυτές έχουν ως στόχο να προβλέψουν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε μια κοιτόστρωση χωρίς την παρουσία εξυγιαντικής στρώσης και υπό συνθήκες ενός τυπικού υδρολογικού έτους.

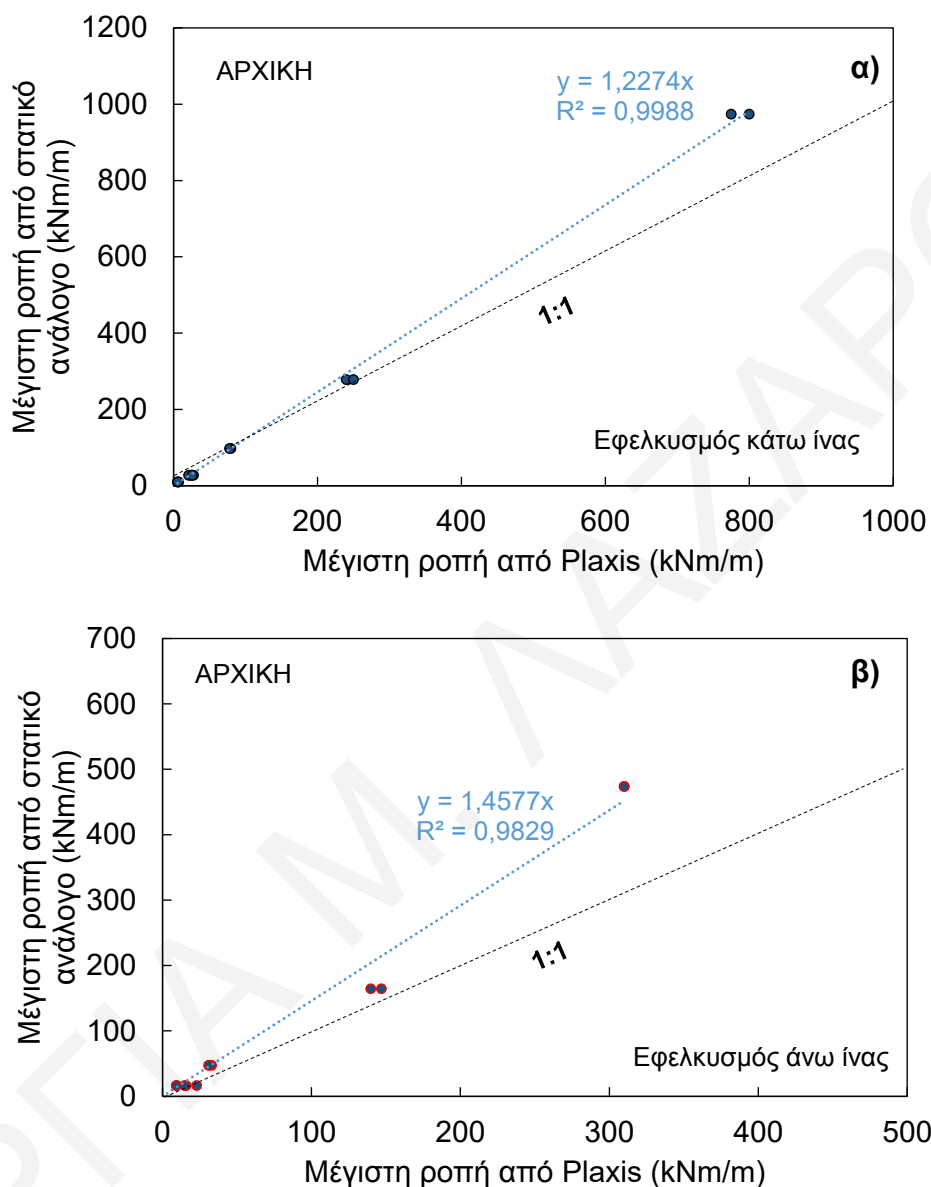
Η τιμή του δείκτη εδάφους στην κεντρική περιοχή (k_1) είναι κοινή και για τις τρεις κατανομές και μπορεί να εκτιμηθεί από σχέσεις που δίνουν το δείκτη εδάφους με βάση θεωρία ελαστικότητας (π.χ. Loukidis & Tamiolakis, 2017). Η τιμή μέτρου του Young που πρέπει να εισαχθεί σε αυτές τις σχέσεις μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την Εξ. 9.5, με την ενεργό τάση σ'_v να λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη μύζησης στο μερικώς κορεσμένο έδαφος. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της μάργας Λευκωσίας όπως αυτά προέκυψαν από τριαξονικές δοκιμές και λαμβάνοντας υπόψη τη μύζηση για βαθμό κορεσμού 55% ($s=2700\text{kPa}$) και τη γεωμετρία της εξεταζόμενης θεμελίωσης, προκύπτει μια προσεγγιστική τιμή k_1 ίση με 10000kPa/m , η οποία είναι αρκετά κοντά στον μέσο όρο των τιμών k_1 των Πινάκων 11.1-11.3.

Η κατανομή για ανάλυση υγρής περιόδου για κτίρια λίγων ορόφων (κτίρια 1-2 ορόφων) προβλέπει δείκτη εδάφους σε μια περιμετρική περιοχή πλάτους 0.5m πέντε φορές μεγαλύτερο σε σχέση με την κεντρική περιοχή. Η τιμή αυτή μειώνεται καθώς η αυξάνεται η μέση πίεση επαφής q που επιβάλλεται από την ανωδομή στο έδαφος, προσεγγίζοντας ασυμπτωτικά την τιμή $4k_1$ για κτίρια άνω των 10 ορόφων). Η κατανομή που προορίζεται για ανάλυση ξηρής περιόδου προβλέπει δείκτη εδάφους k_2 σε μια περιμετρική περιοχή πλάτους 3.5m ίση με 5% του k_1 για την περίπτωση χαμηλών κτιρίων. Η τιμή αυτή αυξάνεται προοδευτικά για πολυώροφα κτίρια. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων έγινε με γνώμονα οι μέγιστες καμπτικές ροπές εφελκυσμού άνω ίνας να μην υποεκτιμούνται σημαντικά, ανεξαρτήτως τύπου και μεγέθους φόρτισης.



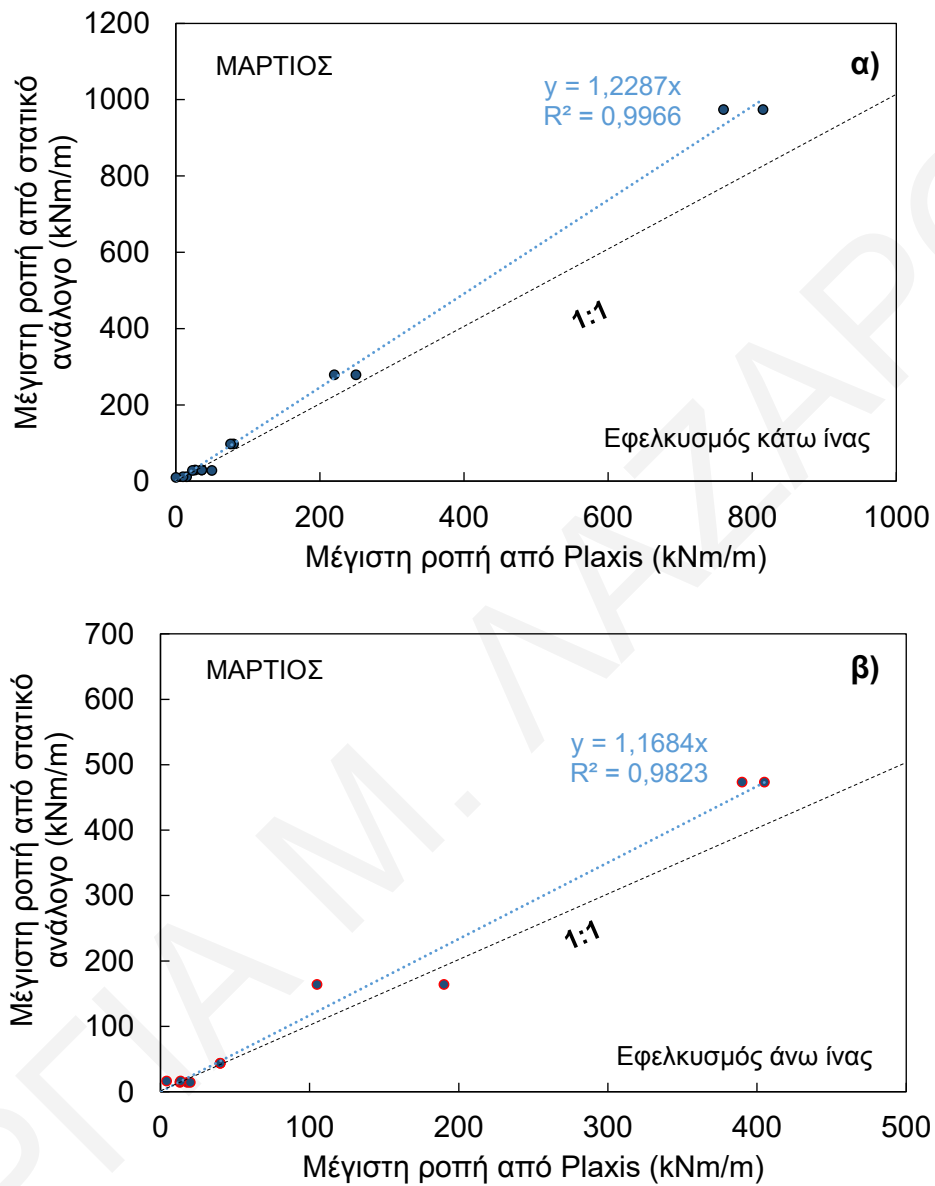
Σχήμα 11.28: Ομοιογενοποιημένη διζωνική (βαθμιδωτή) κατανομή δείκτη εδάφους.

Με βάση λοιπόν τις τρεις προτεινόμενες κατανομές του Σχήματος 11.28, πραγματοποιείται εκ νέου σύγκριση μεταξύ των μέγιστων καμπτικών ροπών που προβλέπονται από το στατικό ανάλογο πλάκας σε ελατήρια και των αντίστοιχων που προκύπτουν από τις συζευγμένες αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis. Η σύγκριση γίνεται για τις αναλύσεις #38,41,76-84, δηλαδή για μετεωρολογικά δεδομένα τυπικού υδρολογικού έτους, χωρίς αντικατάσταση εδάφους από αμμοχάλικο. Στα Σχήματα 11.29-11.31 παρατηρούμε ότι με τη χρήση της ομοιογενοποιημένης κατανομής οι καμπτικές ροπές που προβλέπονται από το στατικό ανάλογο πλάκας πάνω σε ελατήρια εξακολουθούν να είναι μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπει το Plaxis.

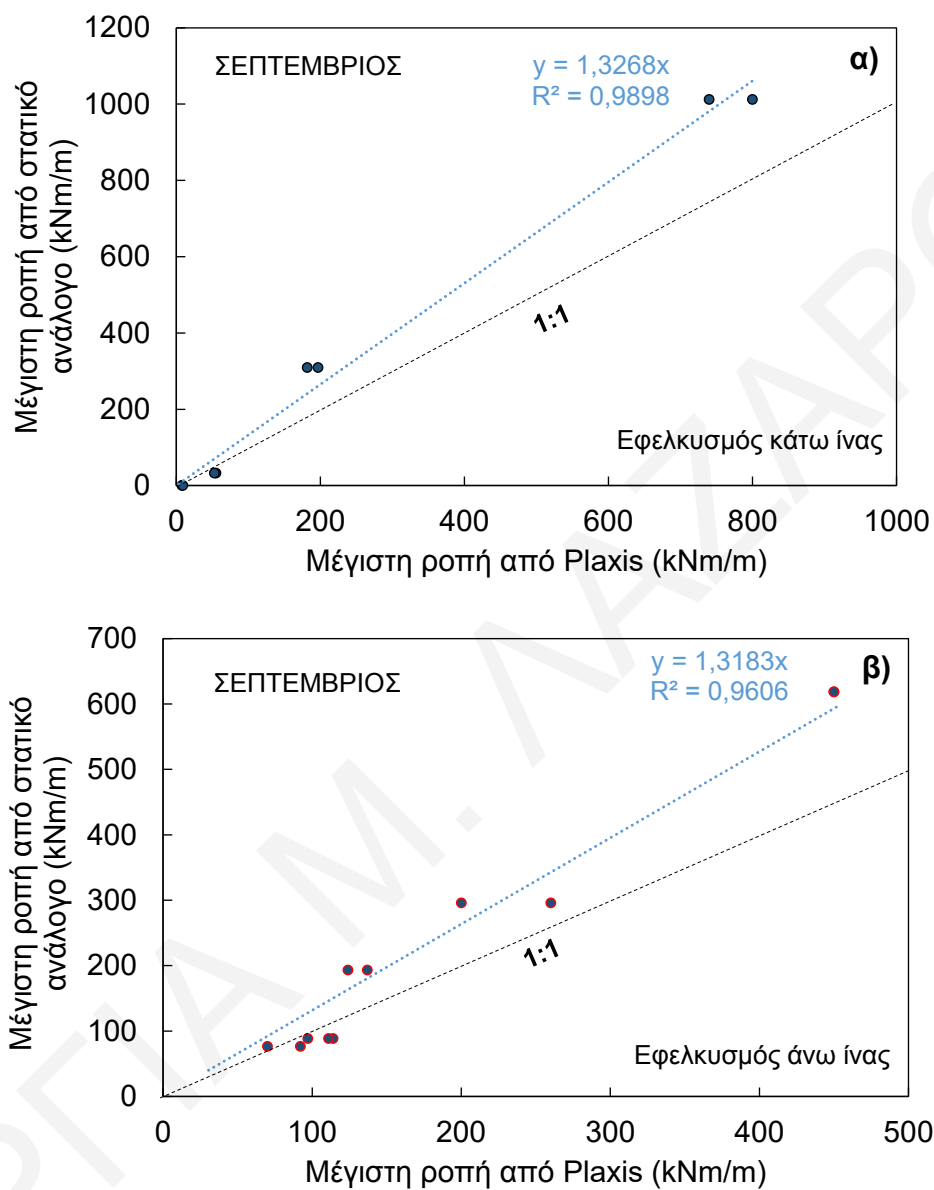


Σχήμα 11.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας αρχικής κατάστασης με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.

Εντούτοις, παρατηρείται μια σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση και διασπορά των αποτελεσμάτων, κυρίως όσον αφορά τις μέγιστες αρνητικές καμπτικές ροπές (εφελκυσμός κάτω ίνας της πλάκας).



Σχήμα 11.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας για το τέλος της υγρής περιόδου με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.



Σχήμα 11.31: Σύγκριση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων Plaxis και του στατικού αναλόγου πλάκας για το τέλος της υγρής περιόδου με βάση την ομοιογενοποιημένη κατανομή για α) τις μέγιστες θετικές ροπές και β) τις μέγιστες αρνητικές ροπές.

11.5 Συμπεράσματα

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της κατανομής δυσκαμψίας ισοδύναμων ελατηρίων Winkler. Γνωρίζοντας το προφίλ των μετατοπίσεων της πλάκας από τις συζευγμένες αναλύσεις στο Plaxis 2D, πραγματοποιήθηκαν αντίστροφες αναλύσεις της πλάκας πάνω σε ελατήρια με μη γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας τον Excel solver. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν οι κατανομές ελατηρίων με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε προγράμματα στατικής ανάλυσης, όπως για παράδειγμα το SAP2000, το ETABS κ.α., έτσι ώστε να γίνεται ορθότερη πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται σε μια πλάκα θεμελίωσης επί μέτρια διογκώσιμου εδάφους. Τα συμπεράσματα που εξάγονται συνοψίζονται πιο κάτω ως εξής:

1. En τη απουσία διόγκωσης ή συρρίκνωσης του εδάφους, ο δείκτης εδάφους πρέπει να είναι 2 με 4 φορές μεγαλύτερος σε μια περιμετρική ζώνη εύρους 0.5m με 1.5m από ότι στην κεντρική περιοχή της γενικής κοιτόστρωσης. Σε αναλύσεις για τη χειμερινή περίοδο, η προσαύξηση είναι μεγαλύτερη και μπορεί να φτάσει μέχρι και 50 φορές στην περίπτωση ενός ακραίου υδρολογικού έτους με την κατασκευή της κοιτόστρωσης στο τέλος της θερινής περιόδου. Αντίθετα, για ανάλυση θερινής (ξηρής) περιόδου, η τιμή του δείκτη εδάφους σε μια περιμετρική ζώνη τουλάχιστον 3m πλάτους οφείλει να είναι 3 με 25 φορές μικρότερη από ότι στον κεντρικό τομέα της κοιτόστρωσης.
2. Η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα σε ένα εδαφικό προφίλ δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή δυσκαμψίας των ελατηρίων κατά μήκος της πλάκας.
3. Η σύμπτυξη των κατανομών δείκτη εδάφους προβλέπει για την ανάλυση υγρής περιόδου δείκτη εδάφους σε μια περιμετρική περιοχή πλάτους 0.5m πέντε φορές μεγαλύτερο από ότι στην κεντρική περιοχή για κατασκευές 1-2 ορόφων, με την τιμή να μειώνεται για κτίρια περισσότερων ορόφων. Η κατανομή για ανάλυση ξηράς περιόδου προβλέπει ότι ο δείκτης εδάφους σε μια περιμετρική περιοχή πλάτους 3.5m είναι το 5% του δείκτη εδάφους στην κεντρική περιοχή στην περίπτωση χαμηλών κτιρίων, με την τιμή αυτή να αυξάνεται προοδευτικά για πολυώροφα κτίρια.
4. Οι προτεινόμενες κατανομές δυσκαμψίας των ελατηρίων Winkler που προκύπτουν από την ομοιογενοποίηση της διζωνικής (βαθμιδωτής) κατανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ως επί το πλείστον συντηρητική εκτίμηση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται σε μια γενική κοιτόστρωση λόγω των διογκώσεων και συρρικνώσεων του εδάφους θεμελίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 - ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ερευνητική προσπάθεια που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος έγινε πειραματικός προσδιορισμός των ιδιοτήτων της μάργας Λευκωσίας που σχετίζονται με τη διογκωσιμότητα και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της μέσω εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών. Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D, με στόχο τη μελέτη της μετακίνησης εποχιακής υγρασίας από και προς τον χώρο κάτω από μια γενική κοιτόστρωση και της ανάπτυξης κάμψεων σε αυτήν λόγω των συνεπαγόμενων διογκώσεων/συρρικνώσεων του εδάφους θεμελίωσης. Για την πραγματοποίηση των συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους – γενικής κοιτόστρωσης καταστρώθηκε ένα απλό καταστατικό προσομοίωμα που βαθμονομήθηκε πάνω στα πειραματικά δεδομένα της μέτρια διογκώσιμης σκληρής μάργας Λευκωσίας που απαντάται επιφανειακά στο νέο campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος αυτής της μελέτης αφορούσε στην εξαγωγή των ισοδύναμων ελατηρίων Winkler χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα προφίλ των διαφορικών μετατοπίσεων (ανυψώσεων/καθιζήσεων) της πλάκας που προέκυψαν ως αποτέλεσμα των συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης. Στόχος αυτού είναι η χρήση των προτεινόμενων κατανομών ελατηρίων στην ανάλυση και σχεδιασμό γενικών κοιτοστρώσεων στην πράξη ώστε να επιτυγχάνεται η ορθή πρόβλεψη των εντατικών μεγεθών (καμπτικές ροπές) και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε μια πλάκα θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση) εδραζόμενης επί διογκώσιμου εδάφους σε συνήθη προγράμματα δομοστατικής ανάλυσης, όπως SAP2000, ETABS, κ.α.

12.1 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα με πρακτικές προεκτάσεις:

1. Ανάλογα με την περιεκτικότητά της σε άργιλο, η μάργα Λευκωσίας κυμαίνεται από μέτρια έως πολύ διογκώσιμη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για μικρές τιμές

κατακόρυφης τάσης έχει σχετικά μεγάλο δυναμικό διογκωσιμότητας παρά τη συγκριτικά μικρή πίεση διόγκωσης. Αυτό σημαίνει ότι η μάργα Λευκωσίας, εκτός από τη διογκωσιμότητά της, χαρακτηρίζεται και από έναν εδαφικό ιστό ο οποίος είναι επιρρεπής σε κατάρρευση σε τιμές κατακόρυφης τάσης που επιβάλλουν στο έδαφος μεμονωμένα πέδιλα και πεδילוδοκοί (ακόμη και για κτίρια ενός ή δυο ορόφων). Συνεπώς, η χρήση τέτοιων τύπων θεμελίωσης στη μάργα Λευκωσίας είναι απαγορευτική και η επιλογή της λύσης της γενικής κοιτόστρωσης είναι επιβεβλημένη, ακόμη και για τη μέτρια διογκώσιμη σκληρή μάργα.

2. Κατά τις ξηρές περιόδους το έδαφος συρρικνώνεται με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ρωγμές οι οποίες εκτείνονται σε βάθος λίγων μέτρων. Με την έναρξη των βροχερών περιόδων το νερό βρίσκει δίοδο μέσω αυτού του δικτύου ρωγμών με αποτέλεσμα να διηθείται με ευκολία σε αυτά τα βάθη, να ενυδατώνει το έδαφος μέχρι τη διόγκωσή του και τελικά να σημειώνεται ξανά το κλείσιμο των ρωγμών.
3. Κατά τη θερινή περίοδο οι τιμές μύζησης εδαφικού ιστού είναι πολύ μεγάλες, της τάξεως των μερικών MPa. Εντούτοις, βροχερά έτη είναι δυνατό να οδηγήσουν σε δραματική μείωση της μύζησης, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη των ρωγμών συρρίκνωσης. Σύμφωνα με την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος διαβροχής, η φαινόμενη υδραυλική διαπερατότητα σε συνθήκες πλήρους κορεσμού της αποξηραμένης κρούστας είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την υδραυλική διαπερατότητα που μετρήθηκε στο εργαστήριο σε αδιατάρακτα δείγματα μάργας.
4. Σύμφωνα με τις αναλύσεις ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι εποχιακές διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού S_r και της μύζησης s παρατηρούνται σε μια ζώνη πλάτους 1.5m-5.0m από το άκρο της πλάκας. Το εύρος των διακυμάνσεων εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (SWCC) και τις υδραυλικές ιδιότητες του εδαφικού προφίλ. Όσο λιγότερο ενεργή (μεγάλο g_a) ή/και λιγότερο διαπερατή είναι η άργιλος τόσο στενότερη είναι η ζώνη διακύμανσης της υγρασίας. Επιπλέον, το εύρος αυτής της ζώνης και οι εντός αυτής διακυμάνσεις υγρασίας και μύζησης είναι παράμετροι πρακτικώς ανεξάρτητες του σχήματος της θεμελίωσης.
5. Η παρουσία ενός ρηχού υδροφόρου ορίζοντα έχει ως αποτέλεσμα τη μέσο-μακροπρόθεσμη συσσώρευση υγρασίας κάτω από την πλάκα θεμελίωσης. Αυτό οφείλεται στην τριχοειδή ανύψωση υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα, η οποία στη συνέχεια εγκλωβίζεται κάτω από τη θεμελίωση που δρα ως αδιαπέρατο σύνορο με

αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η διαφυγή της προς την ατμόσφαιρα. Αντίθετα, η απώλεια υγρασίας κάτω από την περίμετρο της θεμελίωσης συνεχίζει να παρατηρείται, οδηγώντας έτσι σε μεγάλες διακυμάνσεις του βαθμού κορεσμού κατά μήκος της πλάκας.

6. Στη διάρκεια ενός εξαιρετικά βροχερού χειμώνα και του ξηρού καλοκαιριού που ακολουθεί αναπτύσσονται παραμορφώσεις μεγαλύτερης έντασης (σχεδόν διπλάσιες) συγκριτικά με αυτές που αναπτύσσονται για ένα τυπικό υδρολογικό έτος.
7. Τα ακραία κλιματικά δεδομένα του υδρολογικού έτους 2018/19 προκαλούν καμπτικές ροπές τέτοιου μεγέθους που μπορούν να οδηγήσουν ακόμη και σε κατάσταση αστοχίας μια γενική κοιτόστρωση πάχους 0.5m εδραζόμενη σε μέτρια διογκώσιμη μάργα Λευκωσίας και οπλισμένη βάσει εντατικών μεγεθών από αναλύσεις που αγνοούν τις επιπλέον δράσεις λόγω διογκωσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης (για χαμηλά κτίρια συχνά προκύπτει ο ελάχιστος οπλισμός). Η αστοχία συμβαίνει κυρίως λόγω μεγάλων αρνητικών ροπών (εφελκυσμός άνω ίνας), αλλά μπορεί να συμβεί και λόγω θετικών ροπών (εφελκυσμός κάτω ίνας) αν η πλάκα έχει κατασκευαστεί κατά το τέλος της ξηράς περιόδου. Στην περίπτωση πολυώροφων κτιρίων, οι διογκώσεις/ συρρικνώσεις της μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας οδηγούν σε αύξηση των μέγιστων καμπτικών ροπών κατά 40% με 80%. Οι επιπλέον αυτές εντάσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό της όπλισης της θεμελίωσης ώστε να μην συμβούν αστοχίες και ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων στην κοιτόστρωση.
8. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων κατέδειξαν ότι η προδιαβροχή του εδάφους δεν αποτελεί κατάλληλη μέθοδο υπό τις κλιματολογικές συνθήκες της Κύπρου για μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλούνται από τα διογκώσιμα εδάφη. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή απώλεια με τον χρόνο του υψηλού βαθμού κορεσμού που δημιουργεί η προδιαβροχή, ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας σε μικρό βάθος, με αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις στον βαθμό κορεσμού και στη μύζηση κατά μήκος της πλάκας θεμελίωσης να είναι αρκετά μεγάλες προκαλώντας έτσι σημαντική αύξηση των καμπτικών ροπών.
9. Αντίθετα, η αντικατάσταση του φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό (αμμοχάλικο) σε βάθος 1m κάτω από την πλάκα θεμελίωσης δεν οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές στο προφίλ μετανάστευσης υγρασίας. Αυτό σημαίνει ότι η μετανάστευση υγρασίας εντός της μάργας κάτω από τη θεμελίωση δεν επιδεινώνεται από την παρουσία του σχετικά διαπερατού στρώματος (με την προϋπόθεση ότι δεν υφίσταται απευθείας πρόσβαση του

νερού της βροχής σε αυτό). Ως εκ τούτου, ενώ η τάση για ανάπτυξη διόγκωσης κάτω από την επίχωση είναι πρακτικά η ίδια με την περίπτωση που η πλάκα εδράζεται απευθείας σε διογκώσιμο έδαφος, οι σχετικές πιέσεις που ασκούνται από το διογκώσιμο έδαφος διαχέονται πρώτα στο χονδρόκοκκο στρώμα πριν φθάσουν στην πλάκα θεμελίωσης, με αποτέλεσμα οι καμπτικές ροπές της πλάκας να εμφανίζονται αισθητά μειωμένες. Προϋπόθεση για να είναι αποτελεσματική η αντικατάσταση εδάφους με ένα υλικό σχετικά μεγάλης διαπερατότητας όπως είναι το αμμοχάλικο είναι το να μην υπάρχει άμεση πρόσβαση νερού προς τη αμμοχάλικο, το οποίο εν συνεχεία να διαβρέξει το υποκείμενο διογκώσιμο έδαφος. Επειδή στην πράξη αυτό είναι μάλλον δύσκολο να επιτευχθεί, καλό είναι, ως προληπτικό μέτρο, η εκσκαφή στην οποία τοποθετείται το αμμοχάλικο να είναι επενδυμένη με στεγανωτική γεωμεμβράνη, ώστε νερό που ενδεχομένως κατεισδύσει στο αμμοχάλικο να μη καταλήξει να εμποτίσει το υποκείμενο φυσικό έδαφος.

10. Η κατανομή καμπτικών ροπών της πλάκας είναι πιο ευαίσθητη σε μεταβολές της παραμέτρου g_a της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (SWCC) συγκριτικά με κάθε άλλη παράμετρο που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη. Μικρότερες τιμές g_a , οι οποίες υποδηλώνουν μεγαλύτερη ενεργότητα της αργίλου, δύναται να παράξουν εξαιρετικά μεγάλες καμπτικές ροπές σε σχέση με μικρότερες τιμές g_a . Αντίθετα, ο παράγοντας που επηρεάζει λιγότερο την εντατική κατάσταση της πλάκας είναι το σχήμα της θεμελίωσης. Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι κυκλική θεμελίωση και θεμελιολωρίδα αναπτύσσουν πρακτικώς τις ίδιες μέγιστες καμπτικές ροπές.
11. Εν τη απουσία διόγκωσης ή συρρίκνωσης του εδάφους, ο δείκτης εδάφους πρέπει να είναι 2 με 4 φορές μεγαλύτερος σε μια περιμετρική ζώνη εύρους 0.5m με 1.5m από ότι στην κεντρική περιοχή της γενικής κοιτόστρωσης. Σε αναλύσεις για τη χειμερινή περίοδο, η προσαύξηση είναι μεγαλύτερη και μπορεί να φτάσει μέχρι και 50 φορές στην περίπτωση ενός ακραίου υδρολογικού έτους με την κατασκευή της κοιτόστρωσης στο τέλος της θερινής περιόδου. Αντίθετα, για ανάλυση θερινής (ξηρής) περιόδου, η τιμή του δείκτη εδάφους σε μια περιμετρική ζώνη τουλάχιστον 3m πλάτος οφείλει να είναι 3 με 25 φορές μικρότερη από ότι στον κεντρικό τομέα της κοιτόστρωσης.

12.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής καταστρώθηκε ένα απλό μονοδιάστατο καταστατικό προσομοίωμα που βαθμονομήθηκε πάνω στα πειραματικά δεδομένα της μέτρια

διογκώσιμης σκληρής μάργας Λευκωσίας έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν συζευγμένες αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους – γενικής κοιτόστρωσης. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα βασίστηκε αποκλειστικά πάνω στη συμπεριφορά της μέτρια διογκώσιμης μάργας Λευκωσίας και ενδεχομένως να αδυνατεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά πιο διογκώσιμων εδαφών. Επίσης, το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα δεν λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές παραμορφώσεις και δεν εμπεριέχει την έννοια της διατμητικής αντοχής. Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας θα πρέπει να αποτελέσει η ανάπτυξη ενός πλήρους, τρισδιάστατου καταστατικού προσομοιώματος για τη μάργα Λευκωσίας. Το καταστατικό προσομοίωμα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να περιγράφει αναλυτικά τη συμπεριφορά, τόσο των μέτρια διογκώσιμων, όσο και των εξαιρετικά διογκώσιμων εδαφών. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου καταστατικού προσομοιώματος θα επιτρέψει την επέκταση της παρούσας έρευνας, μέσω πραγματοποίησης συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης και εξαγωγή κατανομών ελατηρίων Winkler, στην περίπτωση των πλέον διογκώσιμων και προβληματικών εδαφών της Κύπρου, όπως π.χ. η μάργα του παλαιού campus του Πανεπιστημίου Κύπρου και οι μπεντονιτικές άργιλοι. Ιδανικώς, οι συζευγμένες αναλύσεις θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την υστέρηση της SWCC, τις μεταβολές στη διαπερατότητα λόγω ανοίγματος και κλεισίματος των ρωγμών συρρίκνωσης και τις επιδράσεις της μετανάστευσης της αέριας φάσης.

Η βαθμιδωτή κατανομή δείκτη εδάφους που προτάθηκε εδώ, γενικά υπερεκτιμά τις μέγιστες ροπές και οι προβλέψεις της εμφανίζουν σημαντική διασπορά. Συνεπώς, αξίζει να εξεταστεί αν μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα με το να επιβάλλονται μετατοπίσεις στο κάτω άκρο ορισμένων εκ των ελατηρίων Winkler. Σε αυτή την περίπτωση, θα μπορούσε η κατανομή δείκτη εδάφους να διατηρείται σε αυτή που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί απουσία διογκωσιμότητας και να επιβάλλεται μια κατανομή μετατοπίσεων (θετικών για ανάλυση υγρής περιόδου και αρνητικών για ανάλυση ξηρής περιόδου) στους εξώτερους (κάτω) κόμβους των ελατηρίων Winkler, εντός μιας περιμετρικής ζώνης.

Η παρούσα διατριβή εξέτασε τις εντάσεις που προκαλούν στις κοιτοστρώσεις κυρίως οι εποχιακές μεταβολές της εδαφικής υγρασίας. Σημαντικός είναι όμως, ο αριθμός των περιπτώσεων όπου προβλήματα παρουσιάζονται σε κτίρια λόγω διαρροής σωληνώσεων ύδρευσης ή αποχέτευσης, με τις συνεπαγόμενες διογκώσεις του εδάφους να είναι εντοπισμένες, ασύμμετρες και μονοτονικού χαρακτήρα, και να μπορούν να συμβούν οπουδήποτε στην κάτοψη του κτιρίου (όχι μόνο στην περιμετρική περιοχή). Συνεπώς, η

ανάπτυξη μεθοδολογίας στατικής ανάλυσης που θα λαμβάνει υπόψη αυτές τις αιτίες διόγκωσης χρήζει ξεχωριστής διερεύνησης.

Μια πρακτική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης που δεν εξετάστηκε εδώ αλλά αξίζει να διερευνηθεί στο μέλλον είναι η αντικατάσταση του εδάφους θεμελίωσης από συμπυκνωμένη στρώση λεπτόκοκκου εδάφους χαμηλής διογκωσιμότητας (Katti, 1978). Τα αποτελέσματα των συζευγμένων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι η τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης αμμοχάλικου πάχους 1m οδηγεί σε σημαντική μείωση των καμπτικών ροπών στην πλάκα θεμελίωσης. Εντούτοις, η πρακτική αυτή ενέχει τον κίνδυνο νερό από την επιφάνεια του εδάφους να έρθει σε απευθείας επαφή με την εξυγιαντική στρώση (μέσω αρμών, ρωγμών ή κατασκευαστικών ατελειών) και, λόγω της σχετικά μεγάλης διαπερατότητας του χονδρόκοκκου υλικού όταν αυτό είναι πλήρως κορεσμένο, να κατορθώσει να διαβρέξει το υποκείμενο διογκώσιμο έδαφος. Ακόμη και αν τα τοιχώματα της εκσκαφής που θα δεχθεί το αμμοχάλικο επενδυθούν με στεγανωτική γεωμεμβράνη, εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος διαβροχής του υποκείμενου φυσικού εδάφους, μιας και δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου έχει συμβεί οι μεμβράνες να διατηρηθούν ή να σκιστούν (κυρίως στις συνδέσεις τους) κατά τη διάρκεια ζωής του έργου (Chen, 1975). Το πρόβλημα της κατείσδυσης νερού μέσα στην εξυγιαντική στρώση δεν αναμένεται να υπάρχει αν αντί χονδρόκοκκου υλικού γίνει χρήση λεπτόκοκκου εδάφους χαμηλής διογκωσιμότητας, χάρη στη σημαντικά μικρότερη διαπερατότητα του δεύτερου.

Τέλος, πολλά υφιστάμενα κτίρια που κατασκευάστηκαν στη Λευκωσία από το 1940 έως το 2000 είναι θεμελιωμένα με πεδילוδοκούς (Constantinou et al., 2002β). Η ενίσχυση αυτών των κατασκευών, είτε στα πλαίσια αντιμετώπισης συγκεκριμένα του προβλήματος του διογκώσιμου υπεδάφους ή στα πλαίσια της αναγκαίας αντισεισμικής αναβάθμισης, απαιτεί την εκ νέου δομοστατική ανάλυσή τους. Η παρούσα ερευνητική προσπάθεια θα μπορούσε μελλοντικά να επεκταθεί και στην περίπτωση της εσχάρας πεδילוδοκών με στόχο να εξαχθούν κατανομές ελατηρίων Winkler για να χρησιμοποιηθούν στην αναβάθμιση του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. AASHTO M 147 (2017). Standard Specification for Materials for Aggregate and Soil–Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses.
2. Abdelmalak, R. I. (2007). Soil structure interaction for shrink-swell soils “A new design procedure for foundation slabs on shrink-swell soils”. PhD Thesis, Texas A&M University.
3. Abduljawad, S. N., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A. Al-Buraim, I. A. (1998). Laboratory and field studies of response of structures to heave of expansive clay. *Géotechnique*, vol. 48, p. 103-121.
4. Aitchison, G. D., Richards, B. G. (1965). A broadscale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia, *Moisture in Soils beneath Covered Areas*, Butterworths, Australia, p. 198-204.
5. Albrecht, B. A., Benson, C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127(1), p.67–75.
6. Al Haj, K. M. A., Standing, J. R. (2016). Soil water retention curves representing two tropical clay soils from Sudan. *Geotechnique*, vol. 66 (1), p. 71-84.
7. Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, vol. 40(3), p. 405-430.
8. Alonso, E. E., Vaunat, J., Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, vol. 54(1), p. 173-183.
9. Anagnostopoulos, A. G., Kalteziotis, N., Tsiambaos, G. K., Kavvadas, M. (1991). Geotechnical properties of the Corinth Canal marls. *Geotechnical & Geological Engineering*, vol. 9(1), p. 1-26.
10. Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kaspar, T. C., Horton, R. (1991). Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 55(2), p. 467–470.
11. Arifin, Y. F., Schanz, T. (2009). Osmotic suction of highly plastic clays. *Acta Geotechnica*, vol. 4(3), p. 177–191.
12. AS 2870 (1996). The Australian standard for the design and construction of residential slabs and footings. Standard Australia.
13. AS 2870.2 (1990). Residential slab and footings, Part 2: Guide to design by engineering principles. Standards Association of Australia, Sydney, Australia.

14. ASTM (1996) D2435-96. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
15. ASTM (2004) D 4767-04. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
16. ASTM (2007) D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
17. ASTM (2008) D4546-08. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils.
18. ASTM (2010) D 5084-10. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.
19. ASTM (2010) D2487-11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
20. ASTM (2010) D5298-10. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
21. Bardanis, M., Grifiza, S. (2012). Soil–water characteristic curves and evolution of the tensile and unconfined compression strength of drying slurried soils. Unsaturated soils: research and applications, In: Mancuso et al. (ed) Proceedings of the 2nd European conference on unsaturated soils, vol. 1. Springer, Naples, p.249–256.
22. Bardanis, M. E., Kavvas, M. J. (2008). Modifying the Barcelona Basic Model to account for the residual void ratio and subsequent decrease of shear strength relative to suction. Proceedings of the 1st Europe Conference E-UNSAT, Durham, UK, p. 589-595.
23. Barnes, G. (2010). Soil mechanics: principles and practice. Basingstoke, Macmillan International Higher Education.
24. Benchouk A., Derfouf M., Abou-Bekr N., Taibi S. (2013). Behavior of some clays on drying and wetting paths. Arab Journal of Geosciences, vol. 6, p. 4564-4573.
25. Benson, C. H., Hardianto, F. S., Motan, E. S., Mussatti, D. S. (1992). Comparison of laboratory and in situ hydraulic conductivity measurements on a full-scale test pad. Environmental Geotechnology, Rotterdam.
26. Benson, C., Gribb, M. (1997). Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and the field. Unsaturated soil engineering practice, Geotechnical Special Publication. ASCE, Reston, p. 113–168.
27. Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. Teknick Ukeblad, vol. 39, p. 859-863.
28. Bowles, J. E. (1996). Foundation Engineering. Mc Graw-Hill.

29. Briaud, J. L., Abdelmalak, R., Zhang, X., Magbo, C. (2016). Stiffened slab-on-grade on shrink-swell soil: New design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 142 (7): 04016017.
30. Briaud, J. L., Zhang, X., Moon, S. (2003). Shrinkage test – water content method for shrinkage and swell predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129(7), p. 590-600.
31. Broms, B. B. (1991). Stabilization of soil with lime columns. In *Foundation Engineering Handbook*, Springer, p. 833-855.
32. Bulut, R. (2001). Finite element method analysis of slabs on elastic half space expansive soil foundations, PhD Dissertation, Texas A&M University.
33. Burdine, N. T. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data, *Trans. AIME*, vol. 198, p. 71-77.
34. Buzzi, O., Fityus, S., Giacomini, A. (2011). Towards a dimensionless description of soil swelling behaviour. *Gèotechnique*, vol. 61, p. 271–277.
35. Buzzi, O., Fityus, S., Sloan, S. W. (2010). Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 47(6), p. 623-634.
36. Byer, J. (1980). Treatment of expansive clay canal lining. *Proceeding of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, USA.
37. Chao, K. C. (2007). Design principles for foundations on expansive soils. Dissertation submitted in partial requirement for the Ph.D. Degree, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
38. Chakraborty, T., Salgado, R., Loukidis, D. (2013). A two-surface plasticity model for clay. *Computers and Geotechnics*, vol. 49, p. 170-190.
39. Charlie, W. A., ASCE, M., Osman, M. A., Ali E. M. (1984). Construction on expansive soils in Sudan. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 110(3), ASCE.
40. Charlie, W. A., Osman, M. A., Ali, E. M. (1984). Construction on expansive soils in Sudan. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 110, p. 359-374.
41. Chen, A. J. (2004). An experimental study of the use of lime to improve expansive soil embankment on the Nan- You highway. M.Sc. Thesis Changsha University of Science and Technology, Changsha, China.
42. Chen, F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

43. Childs, E. C., Collis-George, N. (1950). The permeability of porous materials, Proceedings of Royal Society, London, Ser. A, vol. 201, p. 392-405.
44. Coduto, D. P. (2001). Foundation design – principles and practices (2nd ed.), Prentice Hall.
45. Coduto, D. P. (2015). Foundation design: principles and practices. Prentice Hall.
46. Constantinou, G., Panagides, I., Xenophontos, K., Afrodisis, S., Michaelides, P., Kramvis, S. (2002 α). The geology of Cyprus. Bulletin No. 10, Cyprus Geological Survey Department, Nicosia.
47. Constantinou, G., Petrides, G., Kyrou, K., Chrysostomou, C. (2002 β). Swelling Clays: A Continuous Threat to the Built Environment of Cyprus. UNOPS Project Final Report, Technical Chamber of Cyprus, Nicosia, Cyprus.
48. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha M. E., Witt R. J. (2001). Concepts and applications of finite element analysis, Wiley.
49. Dafalla, M. A., Al-Shamrani, M. A. (2011). Road damage due to expansive soils: Survey of the phenomenon and measures for improvement. Proceedings of the II GeoHunan International Conference: Emerging Technologies for Design, Construction, Rehabilitation, and Inspection of Transportation Infrastructure, ASCE Geotechnical Special Publication No. 219, Curran Associates, New York, p. 73–80.
50. Darcy, H. (1856). Histoire des fontaines publique de Dijon, Paris, Dalmont, p.590-594.
51. Day, R. W. (1994). Performance of slab-on-grade foundations on expansive soil. Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 8(2), p. 129-138.
52. Dhowian, A. W. (1990 α). Heave prediction techniques and design consideration on expansive soils. Journal of King Saud University - Engineering Science, vol. 2, p. 355-377.
53. Dhowian, A. W. (1990 β). Field performance of expansive shale formation. Journal of King Abdulaziz University (Engineering Sciences), vol. 2, p.165-182.
54. Diamond, S., Kinter, E. B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. Highway research record, 92, 83-102.
55. Driscoll, R., Crilly, M. (2000). Subsidence damage to domestic buildings. Lessons learned and questions asked. Building Research Establishment, London.
56. Ducloz, C. (1965). Revision of Pliocene and Quaternary stratigraphy of the central Mesaoria. Annual Report for 1964, Cyprus Geological Survey Department, Nicosia, p. 31-42.

57. Eaton, S. (1987). The sedimentology of mid to late Miocene carbonates and evaporites in southern Cyprus. PhD thesis, University of Edinburgh, United Kingdom.
58. Elarabi, A. H. (2004). Factors influencing swelling behavior of expansive soils. *Journal of Building and Road Research*, vol. 6, p. 20-29.
59. Fardipour, M., Gad, E., Sivagnanasundram, S., Rajeev, P., Karunarathne, A., Wilson J. (2016). Interaction analysis of waffle slabs supporting houses on expansive soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 1 (20).
60. Feng, M., Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. (1998). A laboratory study of swelling pressure using various test methods. *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT-98)*, Beijing, vol. 1, p. 350–355.
61. Fityus, S. G., Cameron, D. A., Walsh, P. F. (2005). The shrink swell test. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 28(1), p. 1-10.
62. Fityus, S. G., Smith, D. W., Allman, M. A. (2004). Expansive soil test site near Newcastle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, p. 686-695.
63. Fityus, S., Smith, D. W. (1998). A simple model for the prediction of free surface movements in swelling clay profiles. *Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing, China, p. 473-478.
64. Fraser, R. A., Wardle, J. L. (1975). The analysis of stiffened raft foundation on expansive soils. *Proceedings of the Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behaviour and their Application to Geotechnical Structures*, Sydney, Australia, p. 89-98.
65. Fredlund, D. G, Rahardjo, H., Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soils Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
66. Fredlund, D. G. (1979). Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. 2nd Canadian Geotechnical Colloquium. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 16 (1), p. 121-139.
67. Fredlund, D. G. (1983). Prediction of ground movements in swelling clays. 31st Annual Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. University of Minnesota, Minneapolis.
68. Fredlund, D. G. (2002). Use of soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: *Proceedings of the 3rd international conference on unsaturated soils*. CRC Press, Recife, p. 20–23.

69. Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). *Soils mechanics for unsaturated soils*. Wiley, Hoboken.
70. Fredlund, D. G., Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, p. 521-532.
71. Galavi, V. (2010). Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D (p. 290). Internal Report, Delft, Netherlands: PLAXIS bv Research Department.
72. Gallipoli, D., Bruno, A. W., D'Onza, F., Mancuso, C. (2015). A bounding surface hysteretic water retention model for deformable soils. *Geotechnique*, vol. 65 (10), p. 793-804.
73. Gass, I. G. (1960). The geology and mineral resources of the Dhali area. Bulletin No. 4, Cyprus Geological Survey Department, Nicosia.
74. Gercek, H. (2007). Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 44(1), p. 1-13.
75. Germaine, J. T., Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*, New Jersey: John Wiley and Sons.
76. Hamberg, D. J., Nelson, J. D. (1984). Prediction of floor slab heave. Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, p. 137-140.
77. Hardin, B., O., Richart, Jr., F., E. (1963). The nature of stress-strain behavior of soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 89(1), p. 33-65.
78. Head, K. H. (2006). *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1*, 3rd ed., Scotland: Whittles Publishing. CRC Press.
79. Head, K. H., Epps, R. J. (2014). *Manual of soil laboratory testing, volume III: effective stress tests*. Whittles Publishing, Dunbeath.
80. Hillel, D., Krentos, V. D., Stylianou, Y. (1972). Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, vol. 114(5), p. 395-400.
81. Hobbs, P. R. N., Loucaides, G., Petrides, G. (1986). Geotechnical properties and behavior of Pliocene marl in Nicosia, Cyprus: Engineering geology of cohesive soils associated with ophiolites, with particular reference to Cyprus Rep. EGARP Res. Group Br. Geol. Surv., No. EGARP-KW 86/1; Rep. Geol. Surv. Cyprus, No. G/EG/12.

82. Holtz, W. G., Gibbs, H. J. (1954). Engineering properties of expansive clays. Proceedings, ASCE, and Foundations Division, vol. 80(516), p. 1-28.
83. Hong, W. T., Jung, Y. S., Kang, S., Lee, J. S. (2016). Estimation of soil-water characteristic curves in multiple-cycles using membrane and TDR system. Materials, vol. 9, 1019.
84. Horvath, J. S. (1989). Subgrade models for soil-structure interaction analysis. In: Foundation engineering: current principles and practices. New York: American Society of Civil Engineers, p. 599–612.
85. Hulseman, J. (1966). An Inventory of Marine Carbonate Materials, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 36, p. 622-625.
86. Jahangir, E., Deck, O., Masrouri, F. (2012). Estimation of ground settlement beneath foundations due to shrinkage of clayey soils. Canadian Geotechnical Journal, vol. 49(7), p. 835-852.
87. Jahangir, E., Deck, O., Masrouri, F. (2013). An analytical model of soil–structure interaction with swelling soils during droughts. Computers and Geotechnics, vol. 54, p. 16-32.
88. Jefferies, M. G. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. Geotechnique, vol. 43(1), p. 91-103.
89. Johnson, L. D. (1978). Predicting potential heave and heave with time in swelling foundation soils. Technical report S-78-7, USA WES.
90. Jones, J. B. Jr. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press, Boca Raton.
91. Jones, L. D, Jefferson I. (2012). Expansive soils. In: Burland, J., Chapman, T., Skinner, H., Brown, M. (eds.) ICE manual of geotechnical engineering. vol. 1: geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation. ICE Publishing, London, p. 413–441.
92. Katti, R. K. (1978). Search for solutions to problems in black cotton soils. Indian Institute of Technology.
93. Kikumoto, M., Kyokawa, H., Nakai, T., Shahin, H. M. (2011). A simple elasto-plastic model for unsaturated soils and interpretations of collapse and compaction behaviors. Unsaturated Soils (EE Alonso and A. Gens, eds.), Barcelona, Spain, 2010: p. 849-855.
94. Komine, H. (2004) Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. Engineering Geology, vol. 71(3), p. 265–279.

95. Konrad, J. M., Ayad, R. (1997). Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34(6), p. 929–942.
96. Kuo, J. (2014). *Practical design calculations for groundwater and soil remediation*. CRC Press, Boca Raton.
97. Lamas, F., Irigaray, C., Oteo, C., Chacon, J. (2005). Selection of the Most Appropriate Method to Determine the Carbonate Content for Engineering Purposes with Particular Regard to Marls, *Elsevier: Engineering Geology*, vol. 81, p. 32-41.
98. Lazarou, G., Loukidis, D., Bardanis, M. (2019). Moisture migration under mat foundations in Nicosia marl. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, p.1585-1608.
99. Lee, L. M., Kassim, A., Gofar, N. (2011). Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils. *Engineering Geology*, vol. 117(1–2), p. 78–89.
100. Li, J. (1996). *Analysis and Modelling of Performance of Footings on Expansive Soils*. PhD Thesis, University of South Australia.
101. Li, J., Cameron, D. A., Mills, K. G. (1995). Investigation and analysis of the performance of raft footings for courtyard houses on expansive soils. *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering*, vol. 37(1), p. 79-88.
102. Li, X. S. (2005). Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths. *Computers and Geotechnics*, vol. 32, p. 133-137.
103. Loret, B., Khalili, N. (2000). A three-phase model for unsaturated soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 24(11), p.893-927.
104. Loukidis, D., Tamiolakis, G. P. (2017). Spatial distribution of Winkler spring stiffness for rectangular mat foundation analysis. *Engineering Structures*, vol. 153, p. 443-459.
105. Loukidis, D., Tzampoglou, P., Lazarou, G., Stylianou, T. (2020). *EXPASOL - The Effects of Soil Expansion/Shrinkage on Building Foundations and their Mitigation: Interim Technical Report*. RIF Project INTEGRATED/0916/0049, Nicosia.
106. Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
107. Lytton, R. L. (1970). Analysis for design of foundation on expansive clay. *Proceedings of the Symposium on Soils and Earth Structures in Arid Climates*, Adelaide, Australia.
108. Madhyannapu, R. S., Puppala, A. J., Nazarian, S., Yuan, D. (2009). Quality assessment and quality control of deep soil mixing construction for stabilizing

- expansive subsoils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 136(1), p. 119-128.
109. Marei, N., Abdel-motaleb, A., Elashaal, A. (2000). Improvement of expansive soil in waterways using different replacement cushions. *Journal of the Egyptian Geotechnical Society*, vol. 11, p. 35-63.
110. McCartney, J. S., Villar, L., Zornberg, J. G. (2007). Estimation of the hydraulic conductivity function of unsaturated clays using an infiltration column test. *Proceedings of the 6th Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Salvador, Brazil*, vol. 1, p. 321-328.
111. Metochis, C. (1977). Potential evapotranspiration of lucerne. *Bulletin No. 21, Agricultural Research Institute, Ministry of Agricultural and Natural Resources, Nicosia*.
112. Messing, I., Jarvis, N. J. (1990). Seasonal variation in field-saturated hydraulic conductivity in two swelling clay soils in Sweden. *Journal of Soil Science*, vol. 41, p. 229–237.
113. Mindlin, R. D. (1951). Thickness-shear and flexural vibrations of crystal plates. *Journal of applied physics*, vol. 22(3), p. 316-323.
114. Mitchell, P. W. (1980). The structural analysis of footings on expansive soil. *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA*, p. 438-447.
115. Mitchell, P. W., Avalle, D. L. (1984). A technique to predict expansive soils movement. *Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, Australia*, p. 124-130.
116. Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, vol. 12(3), p. 513–522.
117. Nayak, N. V, Christensen, R. W. (1971). Swelling characteristics of compacted expansive soils. *Clay and Clay Minerals*, vol. 19(4), p. 251-261.
118. Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D., Nelson, E. J. (2015). *Foundation engineering for expansive soils*. Wiley, New York, p. 416.
119. Nelson, J. D., Miller, D. J. (1992). *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons, New York.
120. Nelson, J. D., Reichler, D. K., Cumbers, J. M. (2006). Parameters for heave prediction by oedometer tests. *Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils. Carefree, Arizona*, p. 951 – 961.

121. Nelson, E. J., Chao, K. C., Nelson, J. D., Overton, D. D. (2017). Lessons learned from foundation and slab failures on expansive soils. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 31(3), p. D4016007.
122. NF P 94-048 (1996) “Sols: Reconnaissance et Essais: Détermination de la Teneur en Carbonate, Méthode du Calcimètre”.
123. Ng, C. W. W., Zhan, L. T., Bao, C. G., Fredlund, D. G., Gong, B. W. (2003). Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration. *Géotechnique*, vol. 53(2), p. 143-157.
124. Ng, C. W., Menzies, B. (2007). *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*. CRC Press, Boca Raton.
125. Nuhfer, E. B. (1994). What's a geologic hazard. *Geotimes*, p. 4.
126. Palamakumbura, R. N., Robertson, A. H. F. (2018). Pliocene–Pleistocene sedimentary–tectonic development of the Mesaoria (Mesarya) Basin in an incipient, diachronous collisional setting: facies evidence from the north of Cyprus, *Geological Magazine*, vol. 155(5), p. 997-1022.
127. Palit, R. M. (1953). Determination of swelling pressure of black cotton soil. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Switzerland.
128. Pantazis, T. M. (1967). The geology and mineral resources of the Pharmakas-Kalavassos area. *Bulletin No.8*, Cyprus Geological Survey Department, Nicosia.
129. Pedroso, D. D., Williams, D. J. (2010). A novel approach for modelling soil water characteristic curves with hysteresis. *Computers and Geotechnics*, vol. 37 (3), p. 374-380.
130. Petry, T. M., Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14(6), p. 447-460.
131. Poulos, H. G. (1984). Parametric solutions for strip footings on swelling and shrinking soils. *Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils*, Australia.
132. PTI (1978). *Design and construction of post-tensioned slabs-on-ground*. Post-Tensioning Institute, Arizona, USA.
133. Pullin, A. J. (2004). Comparative investigation of various soil water content measurement techniques for small scale agriculture, Seminar, School of Bioresources

- Engineering and Environmental Hydrology, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa.
134. Puppala, A. J., Punthutaecha, K., Vanapalli, S. K. (2006). Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132(6), p. 736-751.
135. Rampino, C., Manusco, C., Vinale, F. (2000). Experimental behavior and modelling of an unsaturated compacted soil. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37(4), p. 748-763.
136. Ridley, A. M. (1993). The measurement of soil moisture suction, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
137. Rimmer, D. L., Greenland, D. J. (1976). Effects of calcium carbonate on the swelling behavior of a soil clay. *Soil Science Journal*, vol. 27, p.129-139.
138. Romero, E., Gens, A., Lloret, A. (2003). Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions. *Géotechnique*, vol. 53(1), p. 65-81.
139. Roscoe, K. H., Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behavior of ‘wet’ clay, *Engineering Plasticity* (eds. Heyman, J., Leckie, F. A.) p. 535-609, Cambridge University Press.
140. Rushton, K. R. (2004). *Groundwater hydrology: conceptual and computational models*. Wiley, Hoboken.
141. Schneider, G. L., Poor, A. R. (1974). The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay. Research Report TR-9-74, Construction Research Center, University of Texas.
142. Seed, H. B., Woodward, R. J., Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division ASCE*, vol. 88, p. 53-87.
143. Shahid, S. A. (2013). Developments in soil salinity assessment, modeling, mapping, and monitoring from regional to sub-microscopic scales. In: *Developments in soil salinity assessment and reclamation*. Springer, Netherlands, p. 3–43.
144. Sitarenios P., Bardanis M., Kavvasdas M. (2012) Evaluation of various soil-water characteristic curve models for soils from Greece. In: Mancuso C., Jommi C., D’Onza F. (eds) *Unsaturated Soils: Research and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg.
145. Snethen, D. R. (1980). Characterization of expansive soils using soil suction data, *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Colorado, p. 54–75.

146. Sreedeeep, S., Singh, D. N. (2006). Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 24(5), p. 1469–1479.
147. Tang, A. M., Cui, Y. J. (2005). Controlling suction by vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, p.287–296.
148. Tang, G. X., Graham, J. (2002). A possible elastic plastic framework for unsaturated soils with high-plasticity. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39(4), p. 894-907.
149. Thakur, V. K. S., Sreedeeep, S., Singh, D. N. (2005). Parameters affecting soil water characteristic curves of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, vol. 131(4), p. 521–524.
150. Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38(1), p. 55–94.
151. Timoshenko, S. P. (1921). On the correction for shear of differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *Philosophical Magazine*, vol. 41, p.744-746.
152. Tinjum, J. M., Benson, C. H., Blotz, L. R. (1997). Soil-water characteristic curves for compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, p. 1060-1069.
153. Toll, D. G., Mendes, J., Gallipoli, D., Glendinning, S., Hughes, P. N. (2012). Investigating the impacts of climate change on slopes: field measurements. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, vol. 26(1), p. 151–161.
154. Tsaparas, I., Toll, D. G. (2002). Numerical analysis of infiltration into unsaturated residual soil slopes. In: *Proceedings of the 3rd international conference on unsaturated soils*, vol 2. Swets & Zeitlinger, Recife, p. 755–762.
155. Tsiamposi, A., Zdravkovic, L., Potts, D. M. (2013). A three-dimensional hysteretic soil-water retention curve. *Geotechnique*, vol. 63 (2), p. 155-164.
156. US Department of the Army (1983). *Technical Manual TM 5-818-7, Foundations in Expansive Soils*. Washington DC, USA.
157. van der Merwe, D. H. (1975). Plasticity index and percentage clay fraction of soils. *Proceedings of the 4th Regional Conference in Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2, p. 166-167.
158. van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, vol. 44(5), p. 892–898.

159. Vanapalli, S. K., Salinas, L. M., Avila, D., Karube. D. (2004). Suction and storage characteristics of unsaturated soils, State-of-the-art report, Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Brazil, vol. 3, p. 1045-1069.
160. Vanapalli S. K., Nicotera M. V., Sharma R. S. (2008). Axis translation and negative water column techniques for suction control. Geotechnical Geology Engineering, vol. 26, p. 645-660.
161. Vanapalli, S. K., Lu L. (2012). A state-of-the art review of 1-D heave prediction methods for expansive soils. International Journal of Geotechnical Engineering, vol. 6, p. 15-41.
162. Vu, H. Q., Fredlund, D. G. (2004). The prediction of one-, two-, and three-dimensional heave in expansive soils. Canadian Geotechnical Journal, vol. 41(4), p. 713-737.
163. Walsh, P. F. (1978). The analysis of stiffened rafts on expansive clays. Technical Paper No. 23, CSIRO, Division of Building Research, Melbourne, Australia.
164. Wheeler, S. J., Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. Geotechnique, vol. 45(1), p. 35-53.
165. Williams, A. A. B., Donaldson, G. (1980). Building on Expansive Soils in South Africa: 1973-1980. Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, ASCE, vol. 2, p. 834-844.
166. Winkler E. (1867). Die Lehre von Elastizitat und Festigkeit. Prague: H. Dominicus.
167. Wray, W. K. (1980). Analysis of stiffened slabs-on-ground over expansive soil. Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, p. 558-581.
168. Wray, W. K. (1984). The principle of soil suction and its geotechnical engineering practice. 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, p. 170-174.
169. Wray, W. K. (1989). Field measurement of edge moisture variation distance. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, p. 663-666.
170. Yoshida, R. T., Fredlund, D. G., Hamilton, J. J. (1983). The prediction of total heave of a slab-on-grade floor on Regina Clay. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20, p. 69-81.
171. Zhang, L., Dawes, W. R., Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resour Res, vol. 37(3). p. 701-708.

172. Zhang, F., Ikariya, T. (2011). A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables. *Soils and Foundations*, vol. 51(1), p. 67-81.
173. Zhao, H., Liu, J., Guo, J., Zhao, C., Gong, B. W. (2015). Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27(1), 04014108.
174. Zumrawi, M. D. (2015). Construction problems of light structures founded on expansive soils in Sudan. *International Journal of Science and Research*, vol. 4(8), p. 896-902.
175. Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν. (2002). *Τεχνική Γεωλογία*, Αθήνα: Παπασωτηρίου.
176. Κωσταντίνου, Α. Κ. (2004). Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής Λάρνακας-Βασιλικού, Κύπρου, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα.
177. Λουκίδης, Δ., Πατσάλη, Σ., Κωνσταντίνου, Γ., Κύρου, Κ., Πετρίδης, Γ., Χρυσοστόμου, Κ. (2019). Διογκούμενες άργιλοι: Μια συνεχής απειλή για το δομημένο περιβάλλον της Κύπρου. Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, Ελλάδα.
178. Μορφίδης, Κ. (2003). Διερεύνηση και ανάπτυξη μεθοδολογιών προσομοίωσης δομικών στοιχείων θεμελίωσης και εδάφους. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ελλάδα.
179. Μπαρδάνης, Μ. Ε. (2016). Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
180. Μπαρδάνης, Μ. Ε. (2019). Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας μη κορεσμένων εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 1-42.
181. Μπαρδάνης, Μ. Ε., Λουκίδης, Δ. (2019). Μακροχρόνιες μετρήσεις μύζησης στην Ελλάδα και στην Κύπρο, Πρακτικά Εσπερίδας μη κορεσμένων εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 155-185.
182. Σιταρένιος, Π. Χ. (2019). Καταστατική προσομοίωση μη κορεσμένων εδαφών. Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 127-154.
183. Τσιαμπούση, Α. (2019). Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού και η σημασία της. Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 43-66.

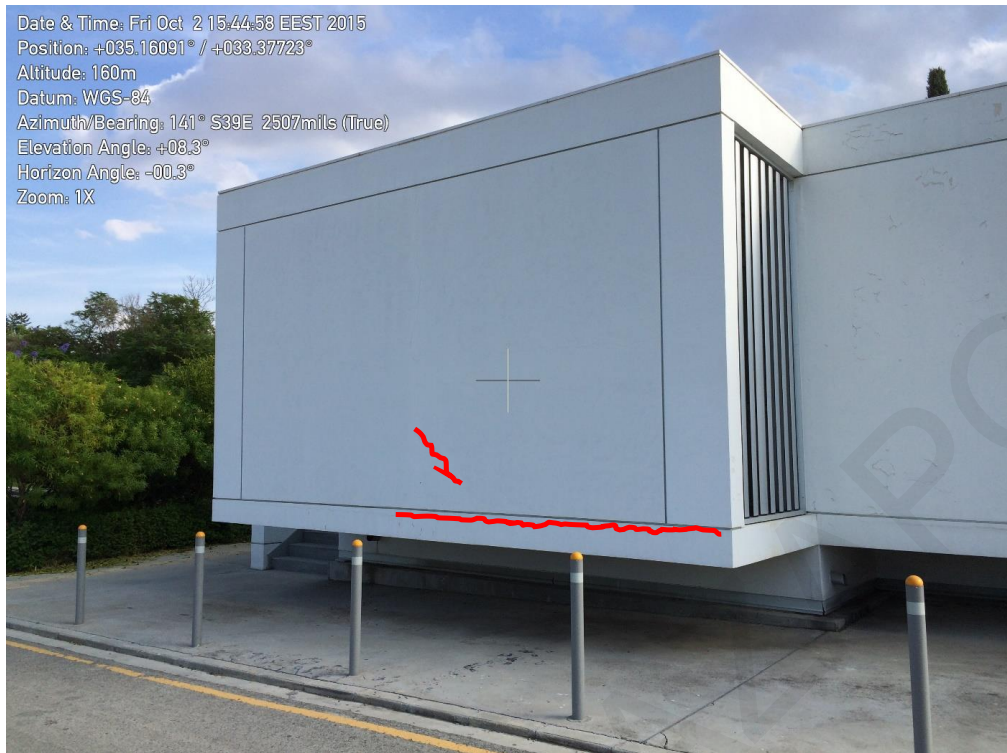
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΟΝΤΑΙ ΣΕ ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΑ ΕΛΔΑΦΗ



Σχήμα Α.1: Αστοχίες τοιχίων στο παλιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.



Σχήμα Α.2: Ρηγματώσεις στο οδόστρωμα στους χώρους του παλαιού campus του Πανεπιστημίου
Κύπρου.



Σχήμα Α.3: Ρηγματώσεις τοίχων πλήρωσεως στο κτίριο της Πτέρυγας Β στο παλαιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου.



Σχήμα Α.4: Ρηγματώσεις τοίχων πλήρωσεως της αίθουσας τελετών στο παλαιό campus του Πανεπιστημίου Κύπρου το 2015 (το εν λόγω κτίριο κατεδαφίστηκε το 2016 και ανακατασκευάστηκε εκ θεμελίων).



Σχήμα Α.5: Ανάπτυξη διαγώνιων ρωγμών στους τοίχους πληρώσεως 6-όροφου κτιρίου στη Λευκωσία.



Σχήμα Α.6: Διαγώνια ρωγμή στον τοίχο πληρώσεως σε διώροφο κτίριο στη Λευκωσία.

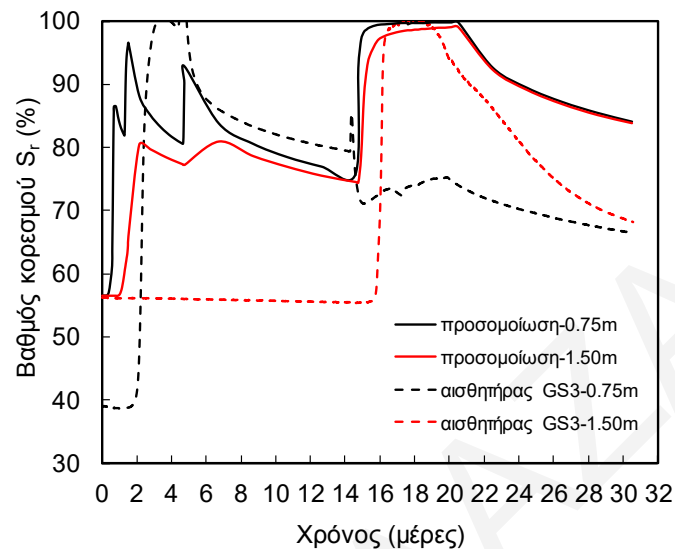


Σχήμα Α.7: Διαγώνια ρωγμή σε τοίχο πληρώσεως σε κτίριο αποθήκης που βρίσκεται στο βορειοανατολικό σύνορο της Πανεπιστημιούπολης του Πανεπιστημίου Κύπρου.

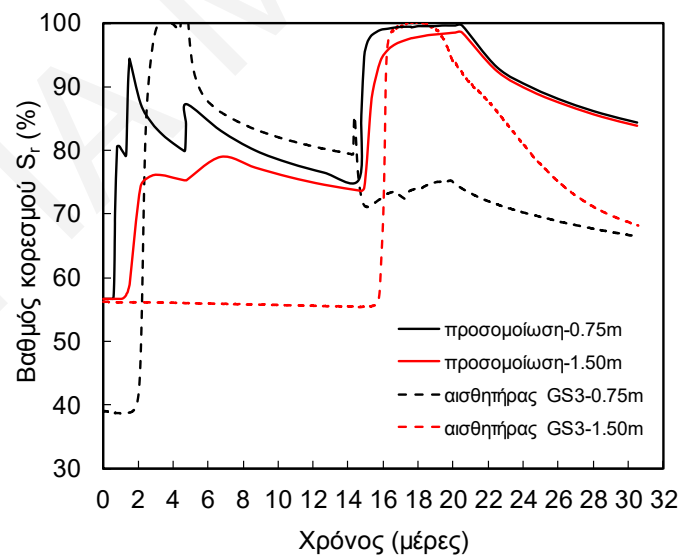


Σχήμα Α.8: Διαγώνιες ρωγμές σε τοίχο πληρώσεως σε οικία στην Αθηαίνου.

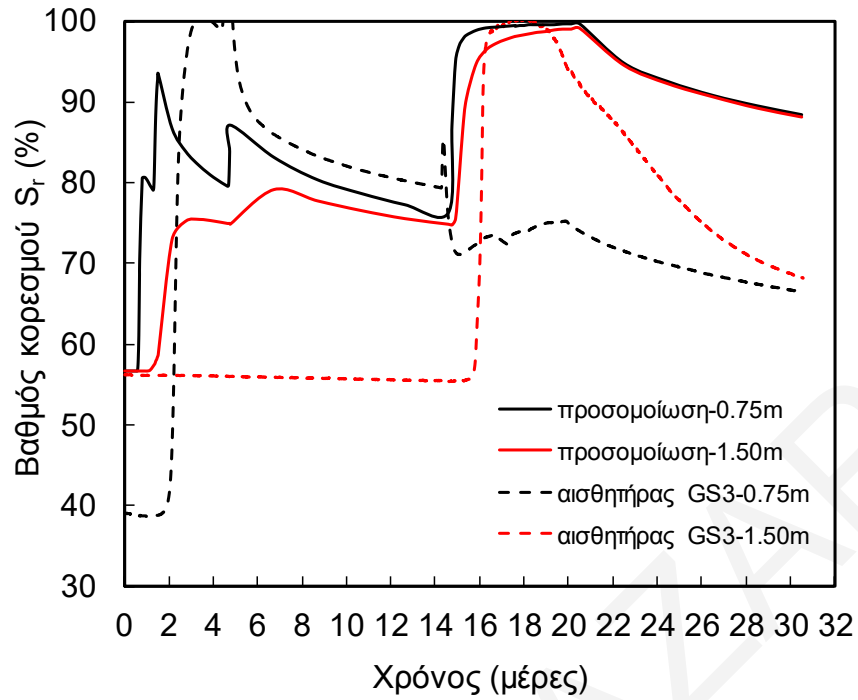
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ



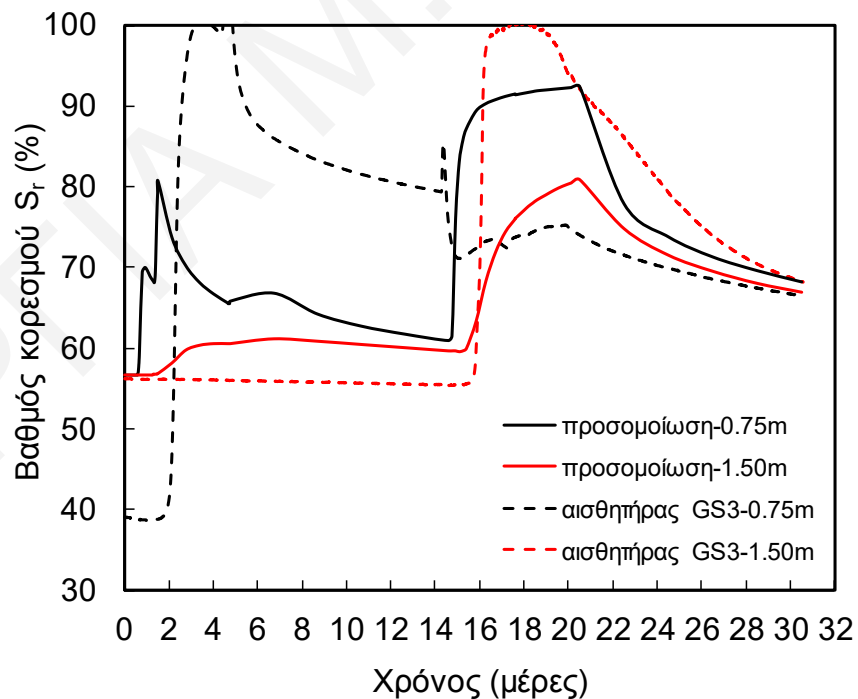
Σχήμα Β1: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_I=2$, $k_x=0.00034\text{m/day}$, $k_y=0.034\text{m/day}$.



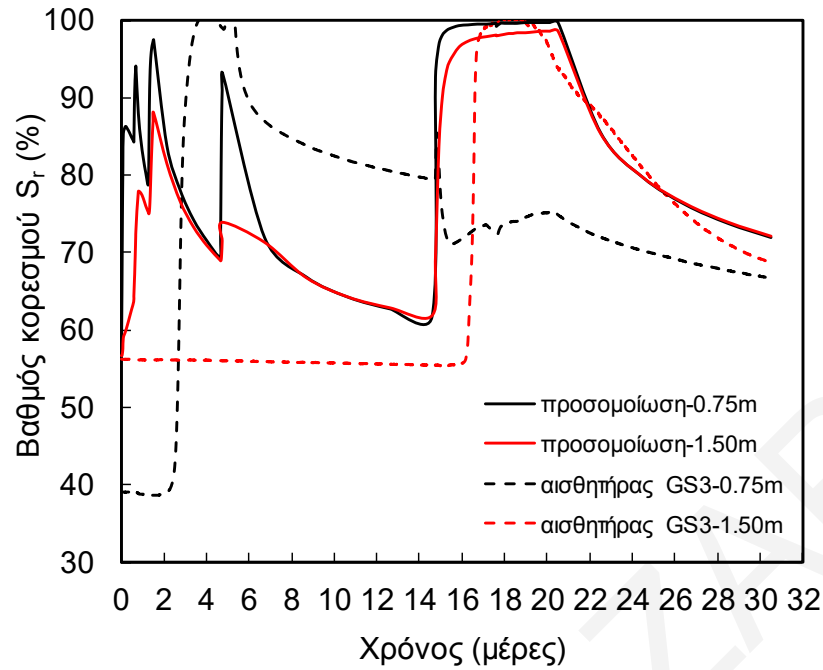
Σχήμα Β2: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_I=1$, $k_x=0.000224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



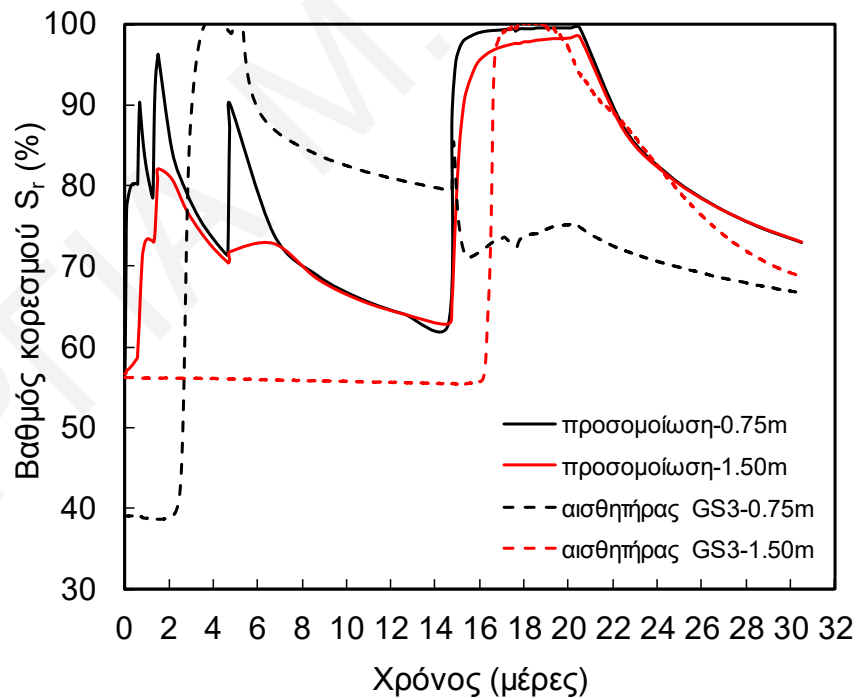
Σχήμα Β3: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_l=1$, $k_x=0.00000224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



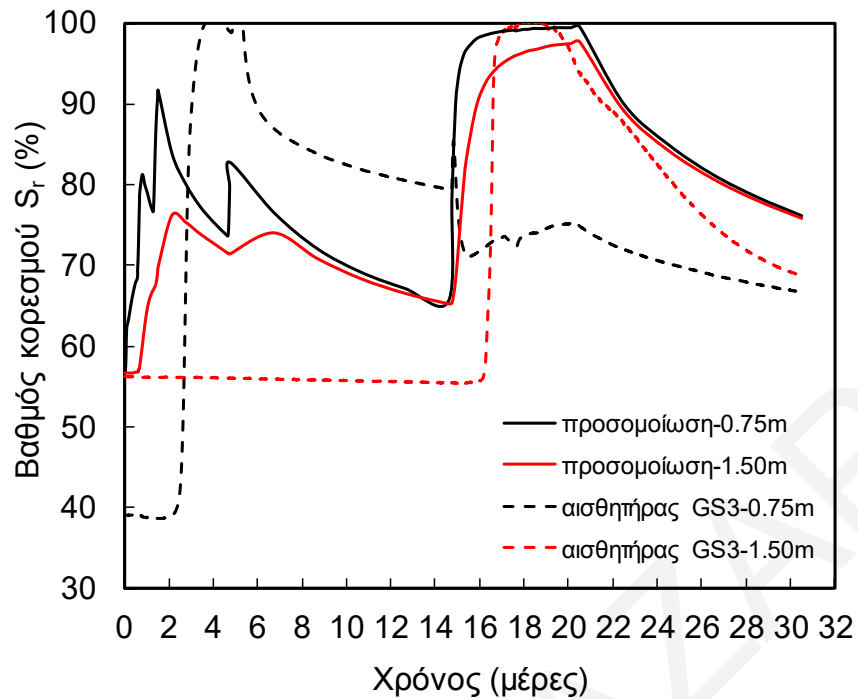
Σχήμα Β4: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_l=1$, $k_x=0.0224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



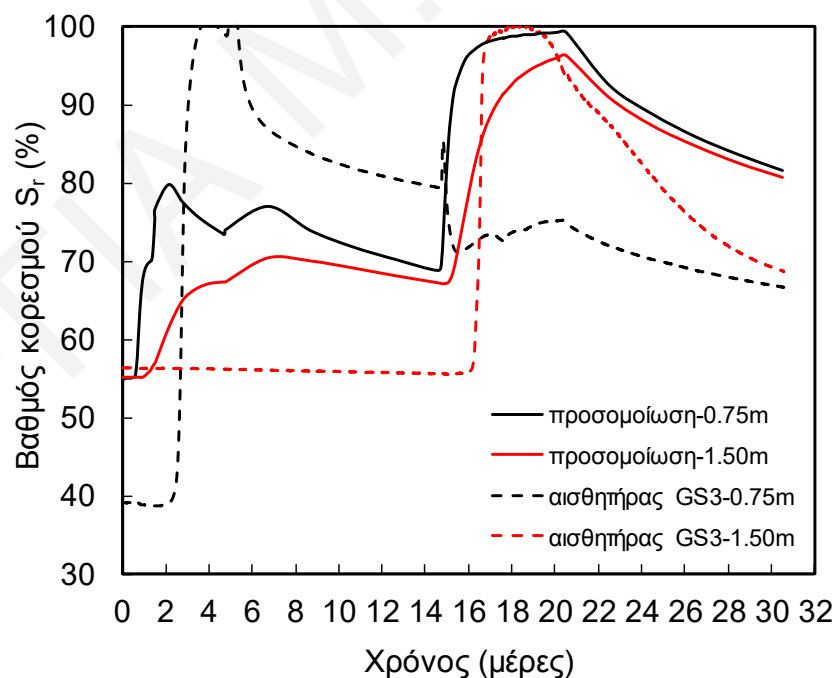
Σχήμα Β5: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.000672\text{m/day}$, $k_y=0.0672\text{m/day}$.



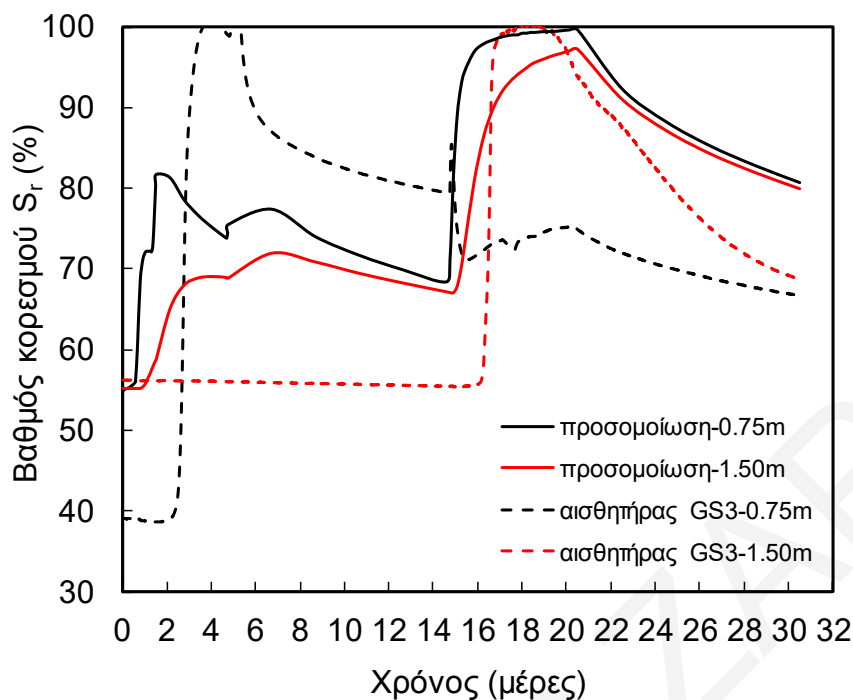
Σχήμα Β6: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.000448\text{m/day}$, $k_y=0.0448\text{m/day}$.



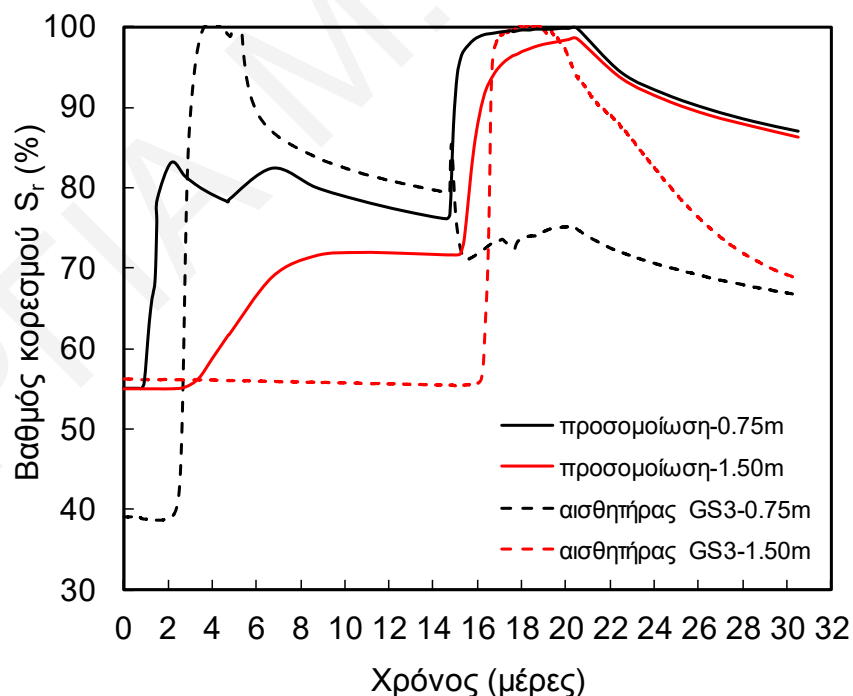
Σχήμα Β7: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.02$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.000224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



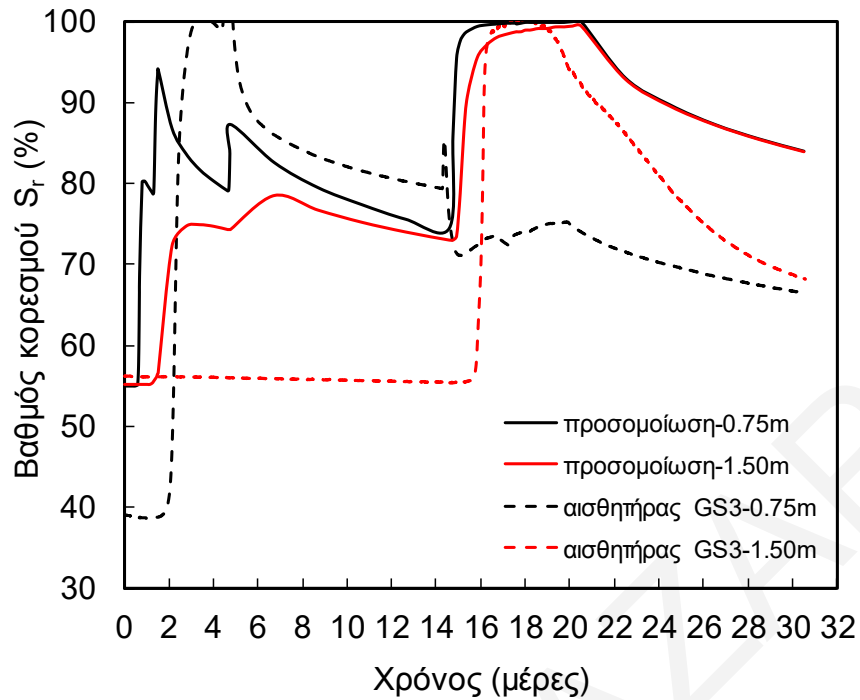
Σχήμα Β8: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_l=-2.7$, $k_x=0.000224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



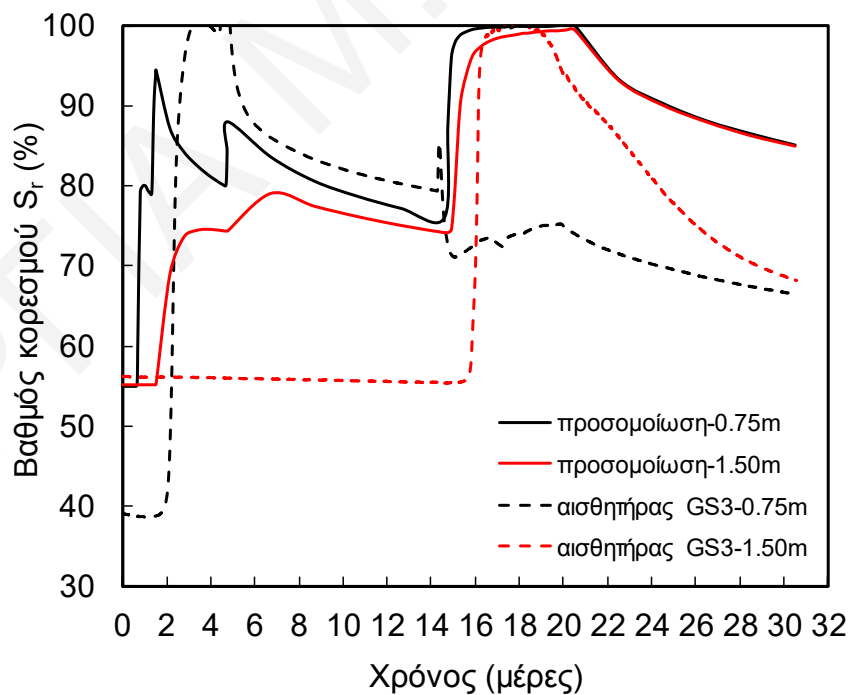
Σχήμα Β9: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_i=-2.7$, $k_x=0.00028\text{m/day}$, $k_y=0.028\text{m/day}$.



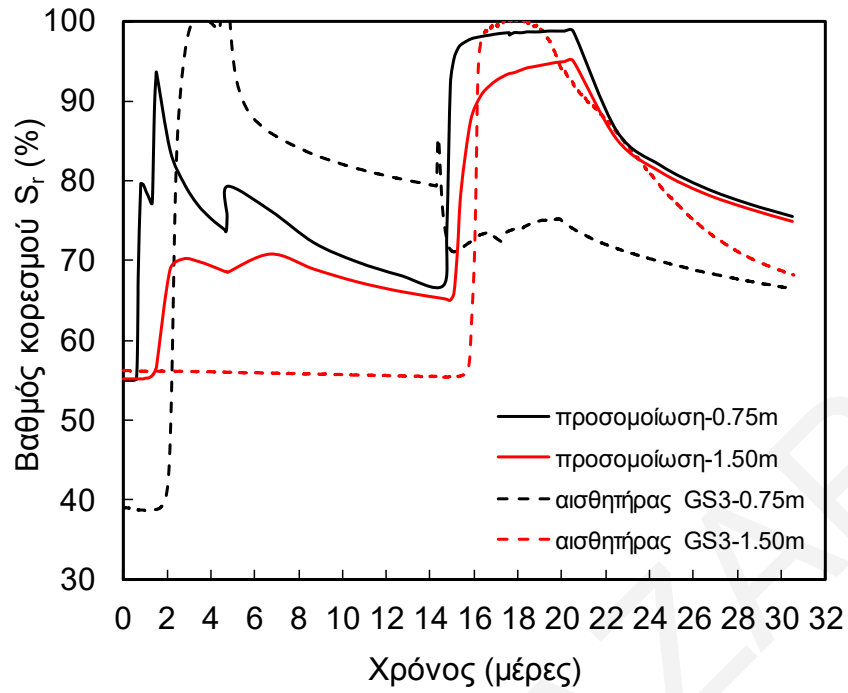
Σχήμα Β10: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_i=1$, $k_x=0.00028\text{m/day}$, $k_y=0.028\text{m/day}$.



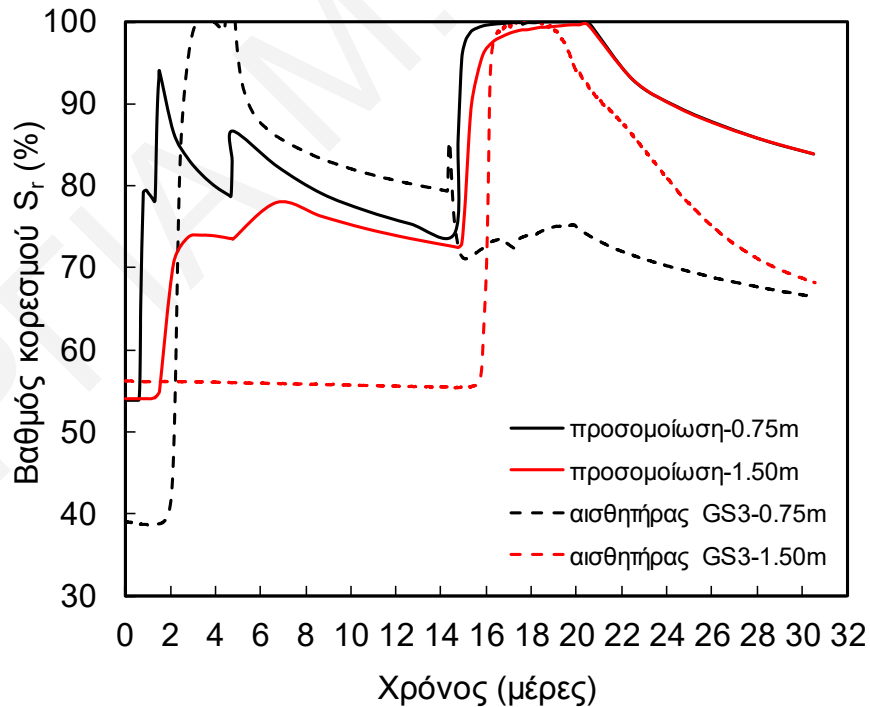
Σχήμα Β11: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_i=1$, $k_x=0.00056\text{m/day}$, $k_y=0.056\text{m/day}$.



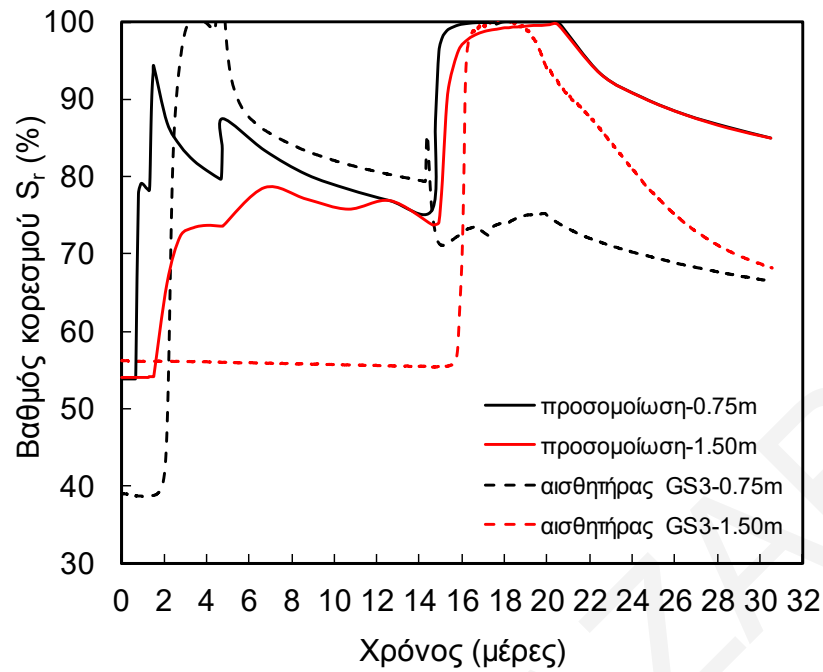
Σχήμα Β12: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_i=2$, $k_x=0.00056\text{m/day}$, $k_y=0.056\text{m/day}$.



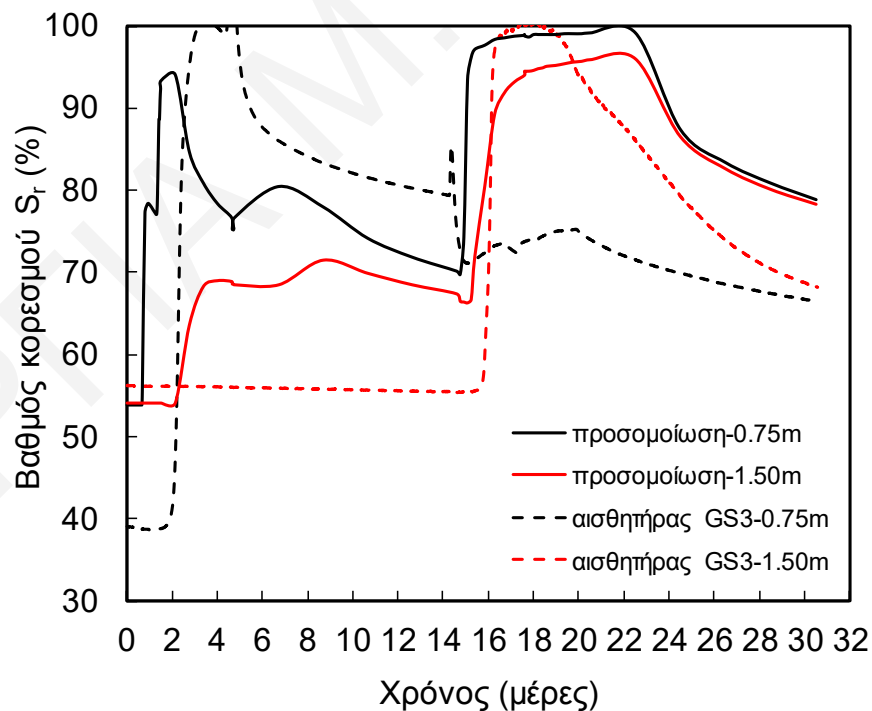
Σχήμα B13: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.05$, $g_l=1$, $k_x=0.0056\text{m/day}$, $k_y=0.056\text{m/day}$.



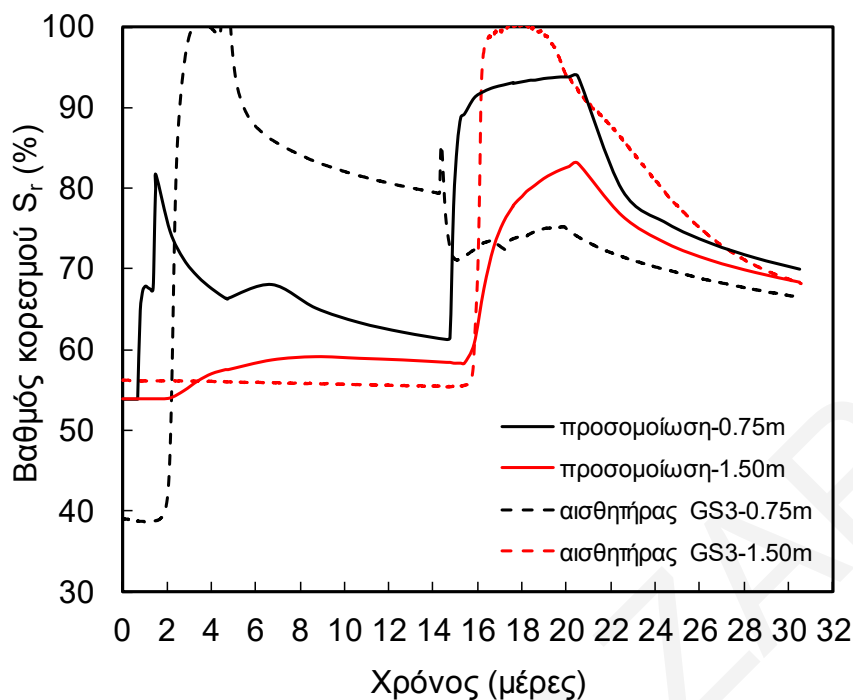
Σχήμα B14: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.06$, $g_l=1$, $k_x=0.00066\text{m/day}$, $k_y=0.066\text{m/day}$.



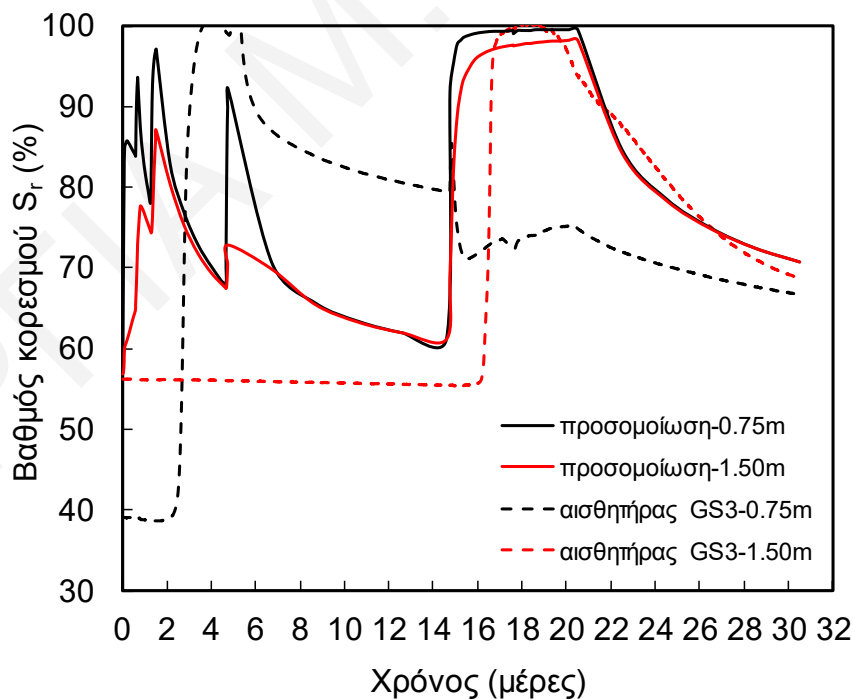
Σχήμα B15: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.06$, $g_i=2$, $k_x=0.00066\text{m/day}$, $k_y=0.066\text{m/day}$.



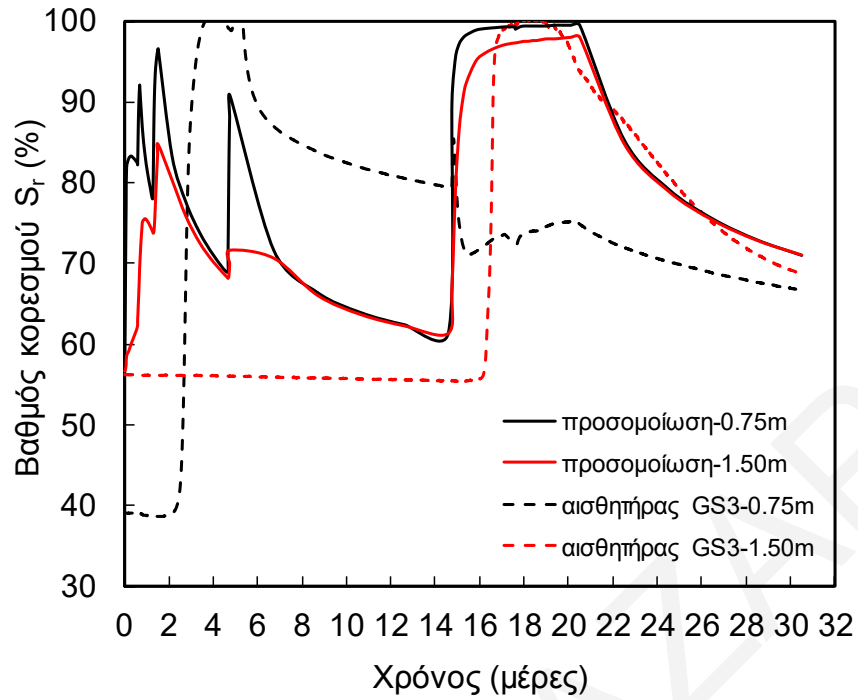
Σχήμα B16: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.06$, $g_i=2$, $k_x=0.0066\text{m/day}$, $k_y=0.066\text{m/day}$.



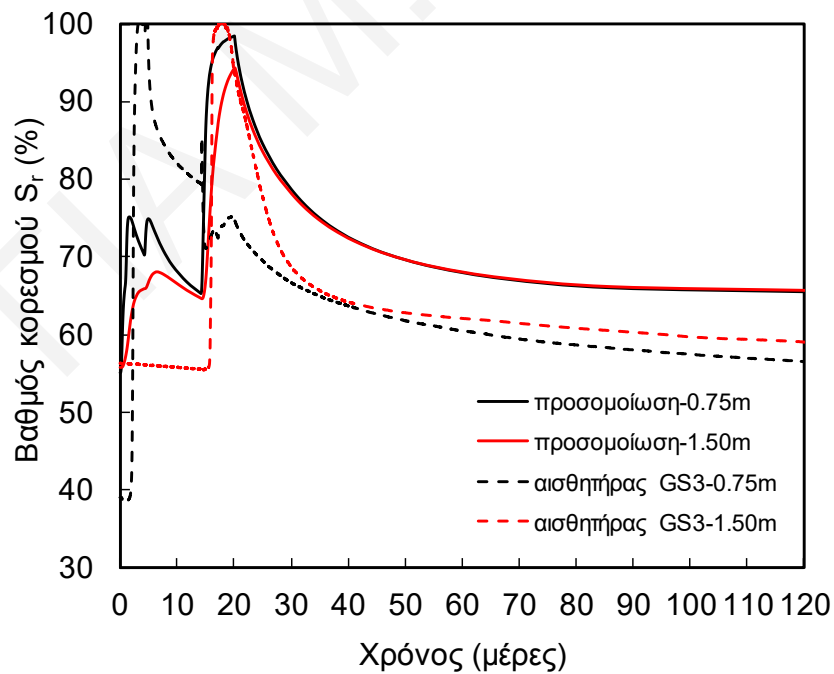
Σχήμα B17: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.06$, $g_l=2$, $k_x=0.066\text{m/day}$, $k_y=0.066\text{m/day}$.



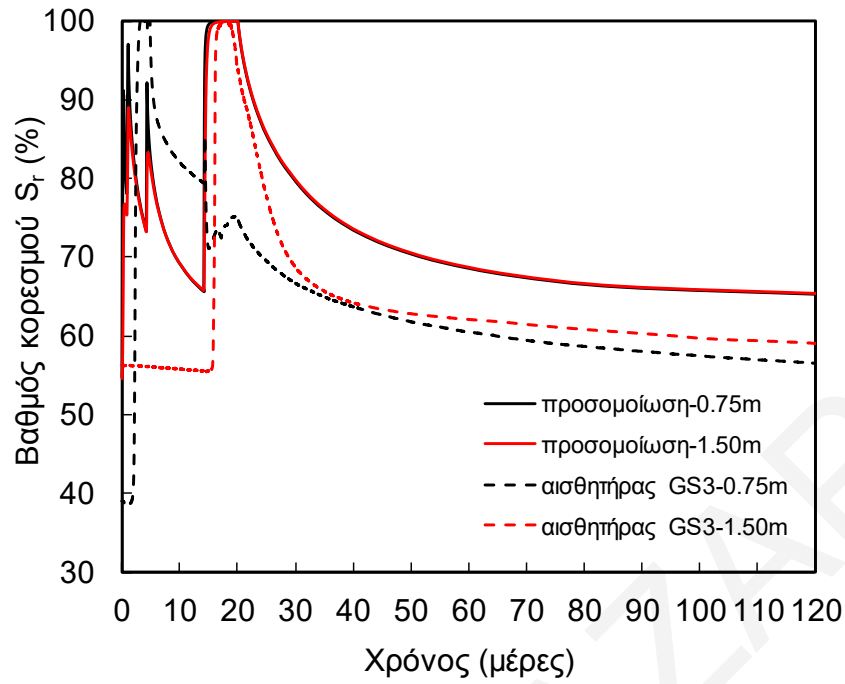
Σχήμα B18: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.008$, $g_l=-3.7$, $k_x=0.000268\text{m/day}$, $k_y=0.0268\text{m/day}$.



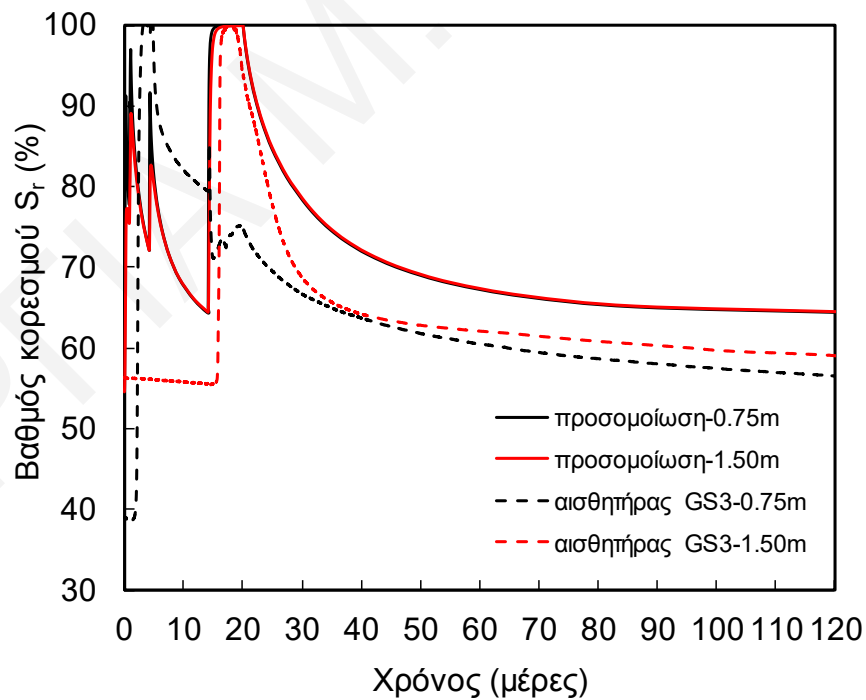
Σχήμα B19: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.008$, $g_i=-3.7$, $k_x=0.000224\text{m/day}$, $k_y=0.0224\text{m/day}$.



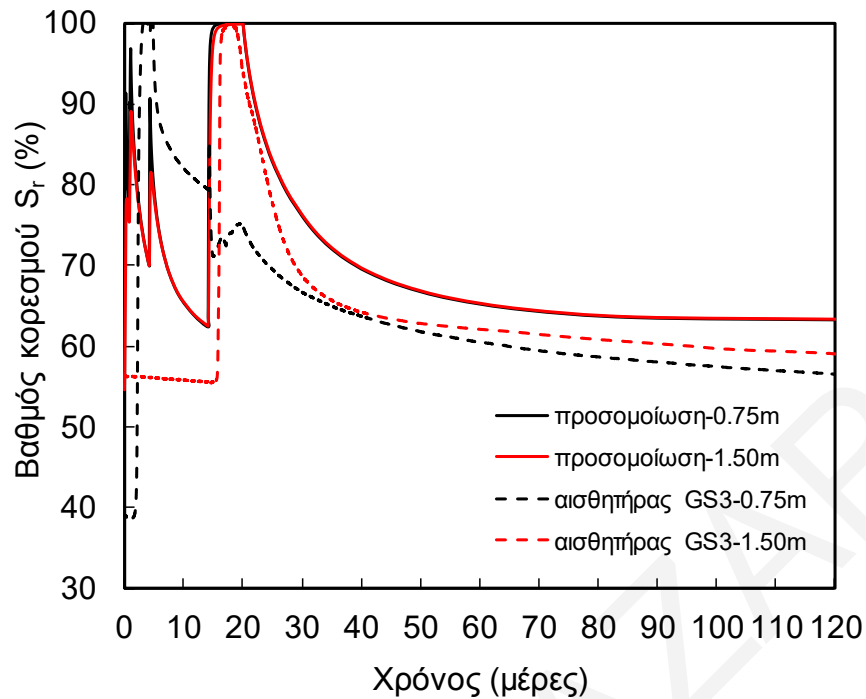
Σχήμα B20: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-3.2$, $k_x=0.000225\text{m/day}$, $k_y=0.00675\text{m/day}$.



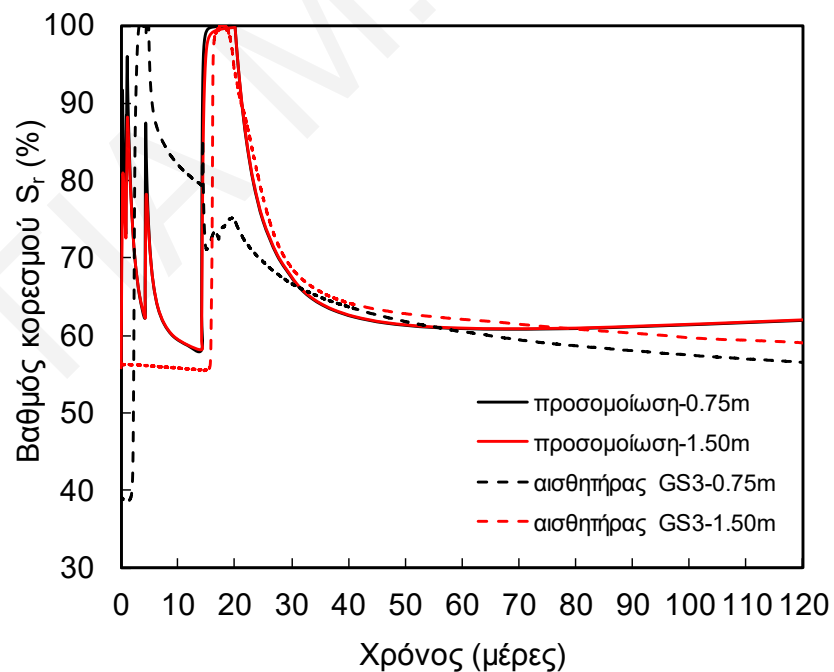
Σχήμα B21: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-3.2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$.



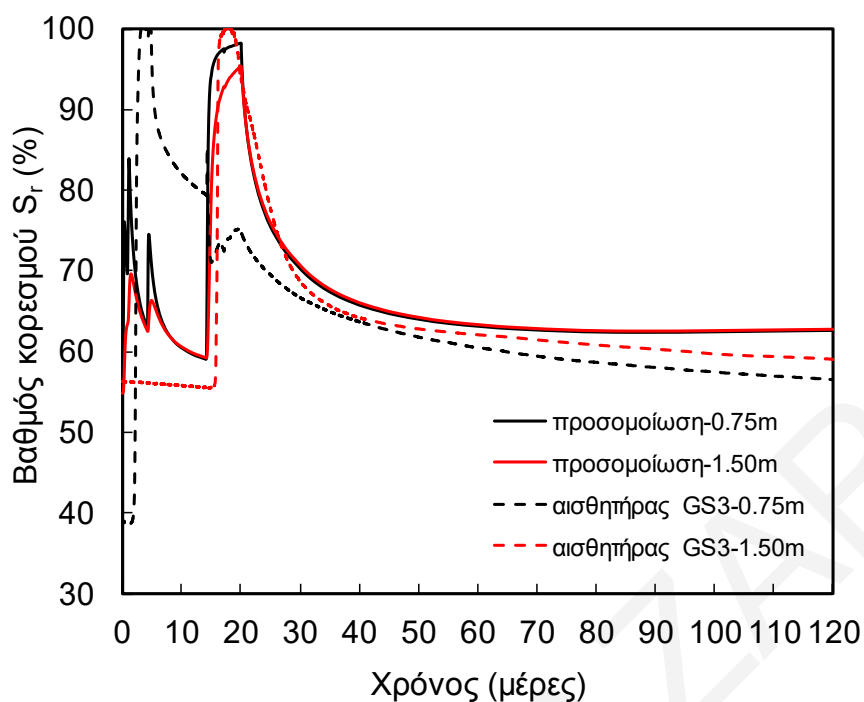
Σχήμα B22: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-3.7$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$.



Σχήμα B23: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-4.5$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$.



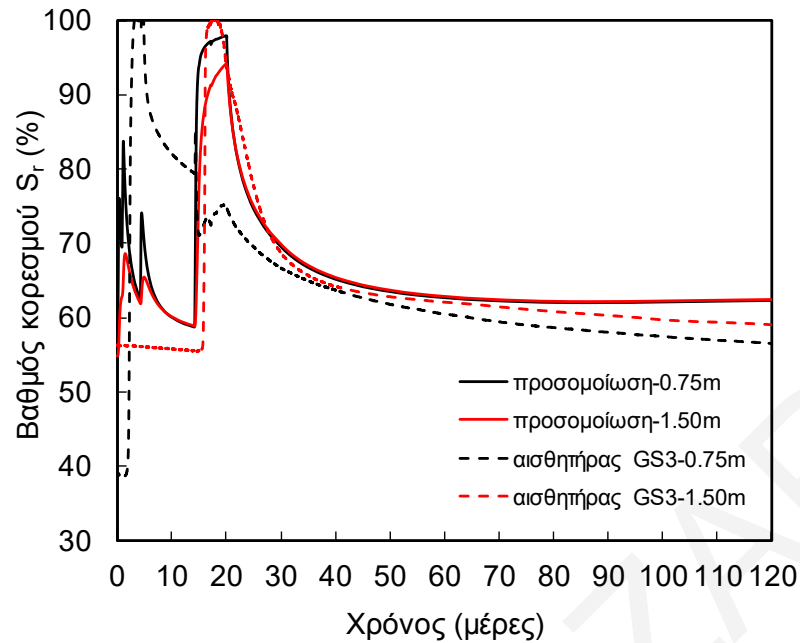
Σχήμα B24: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-7$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$.



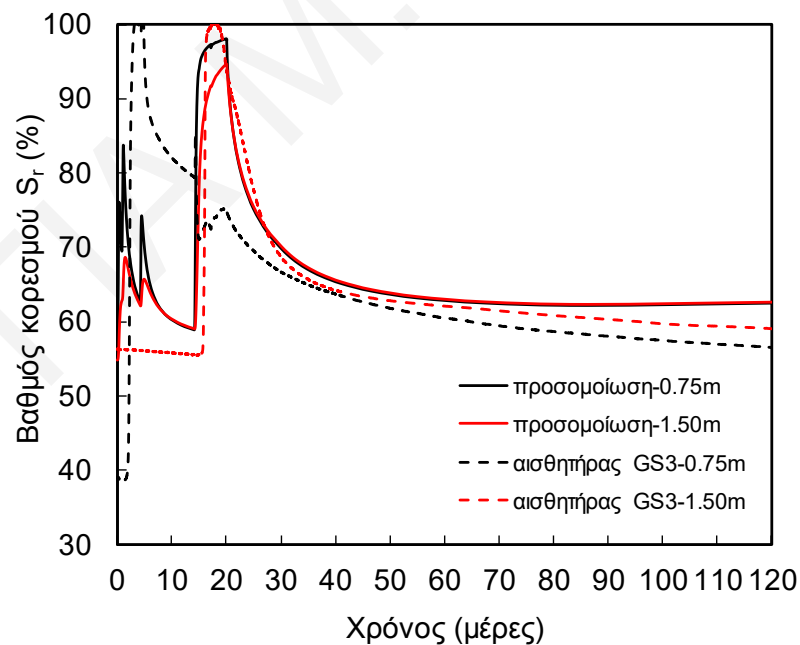
Σχήμα B25: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$.

Σημείωση: Οι αναλύσεις που φαίνονται στα Σχήματα B1-B25 έγιναν με τη θεώρηση ενός ενιαίου εδαφικού προφίλ. Οι αναλύσεις που παρατίθενται στα επόμενα Σχήματα έγιναν αφού χωρίστηκε το εδαφικό προφίλ σε 6 στρώματα με σκοπό την εισαγωγή διαφορετικών υδραυλικών διαπερατοτήτων έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόκριση όσον αφορά την προσομοίωση του πειράματος διαβροχής στο πεδίο.

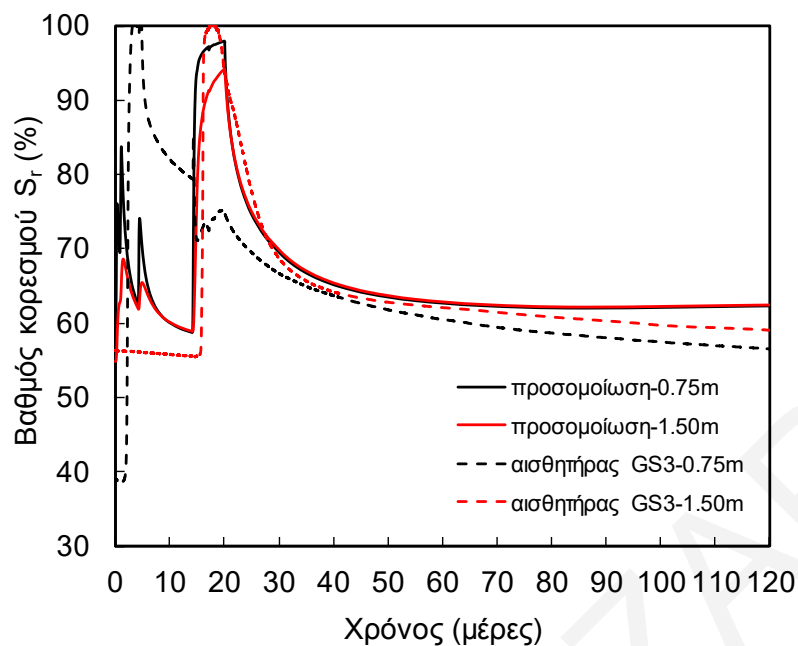
Ο συντελεστής K ισούται με $k_{\text{στρώματος}1}/k_{\text{στρώματος}N}$. Ο συντελεστής $K_{\text{στρ}}$ ($=k_{\text{στρώματος}N}/k_{\text{στρώματος}1}$) για τις αναλύσεις των Σχημάτων B26-B37 ισούται με 10 για όλα τα εδαφικά στρώματα ενώ για τις αναλύσεις των Σχημάτων B38-B41 μεταβάλλεται.



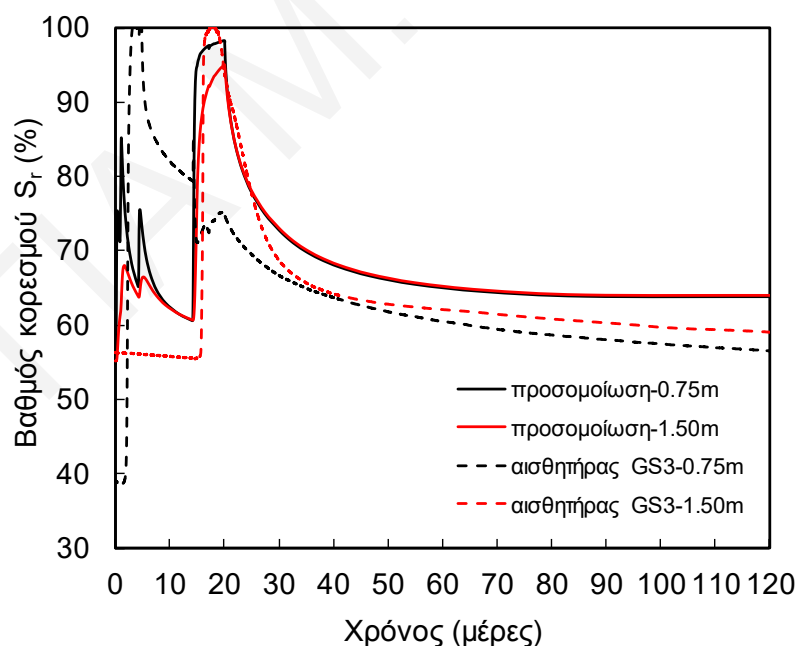
Σχήμα B26: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 20, 50, 70 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



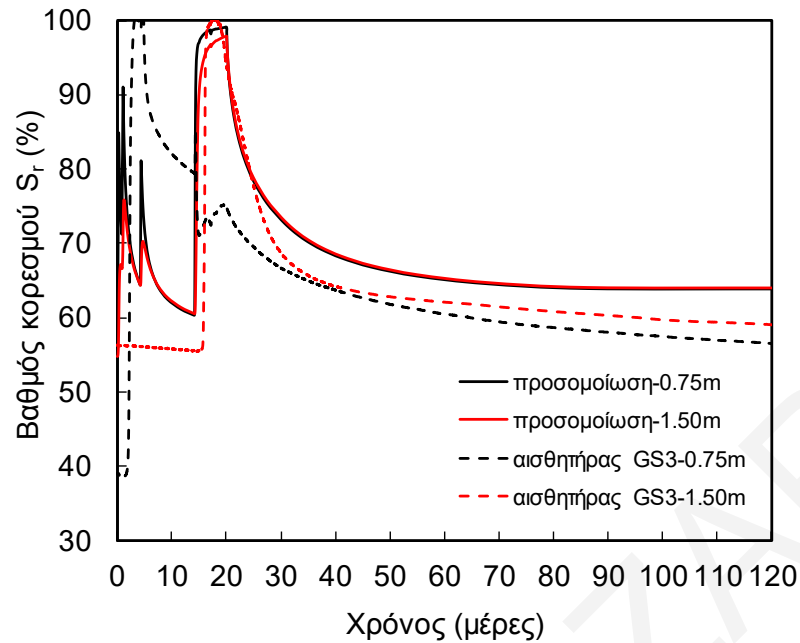
Σχήμα B27: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-3.2$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 5, 50, 70 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



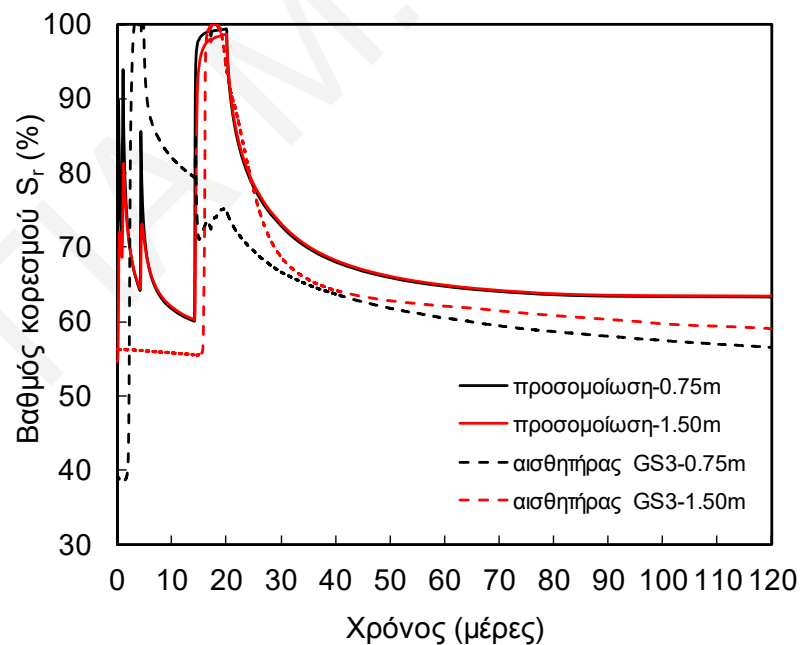
Σχήμα B28: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 5, 50, 70 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



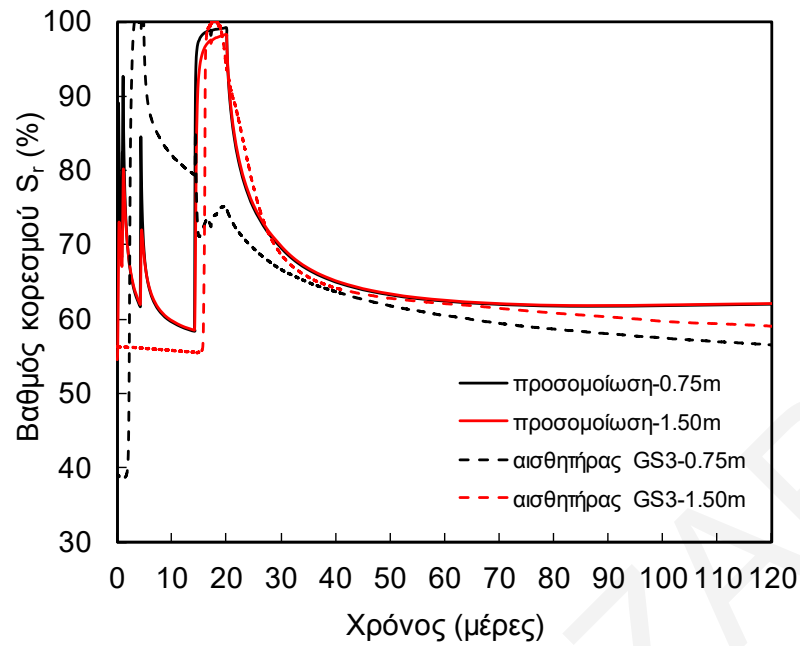
Σχήμα B29: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 5, 50, 100 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



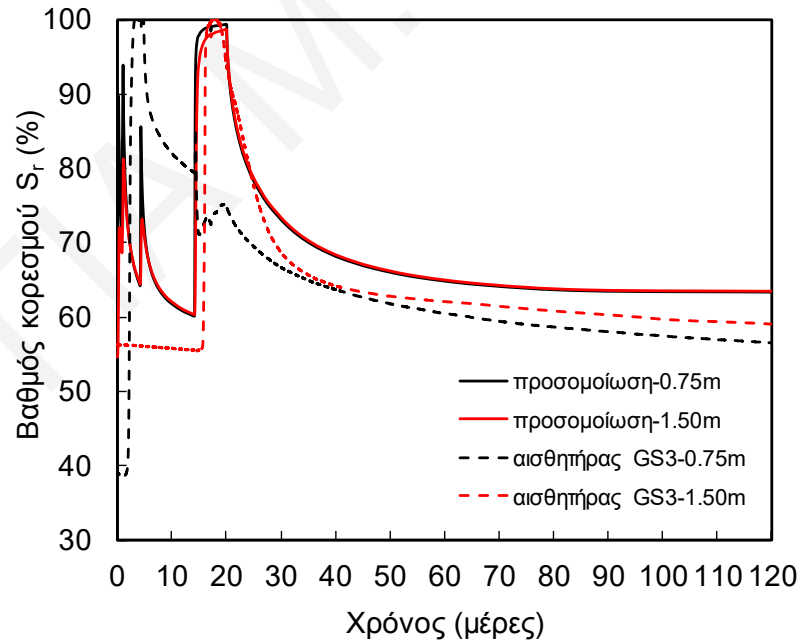
Σχήμα B30: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.0045\text{m/day}$, $k_y=0.045\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 2, 50, 100 και 200 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



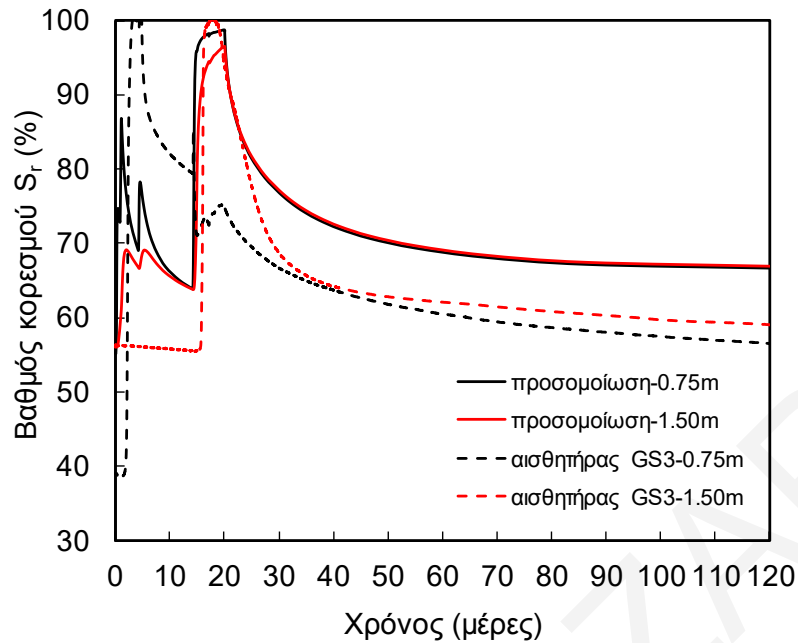
Σχήμα B31: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 2, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



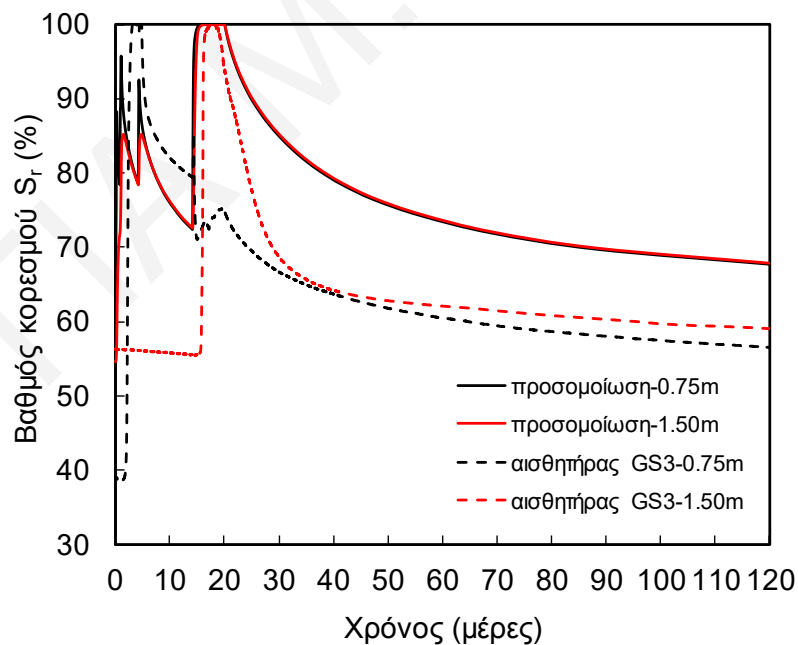
Σχήμα B32: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-3.2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 2, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



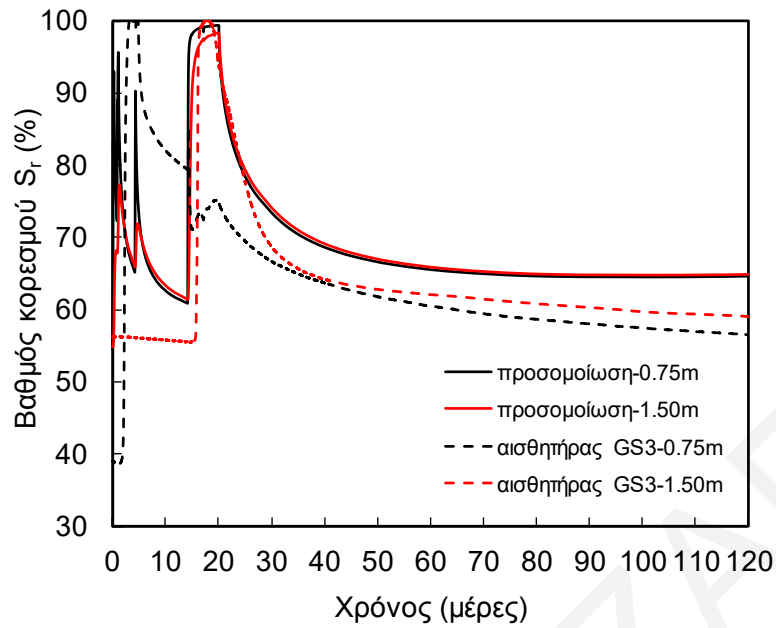
Σχήμα B33: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



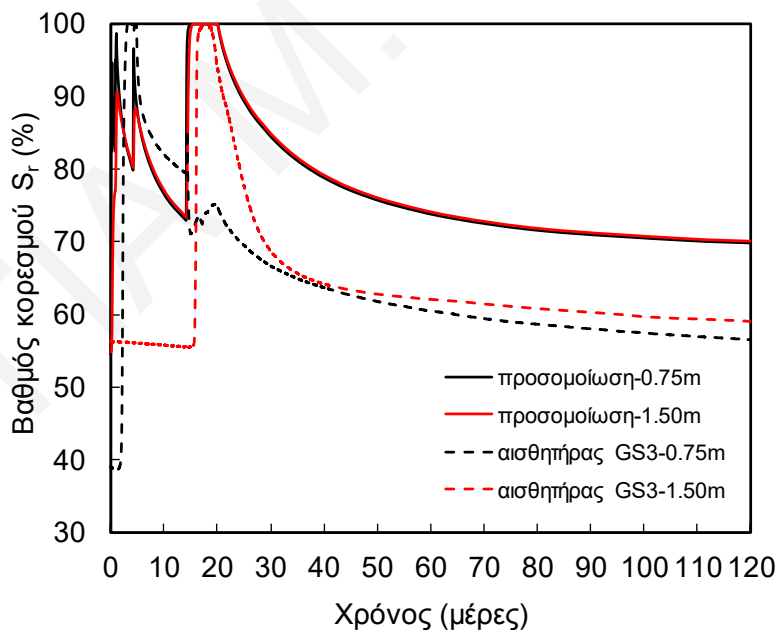
Σχήμα B34: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-0.5$, $k_x=0.00225\text{m/day}$, $k_y=0.0225\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και 2, 5, 50, 70 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



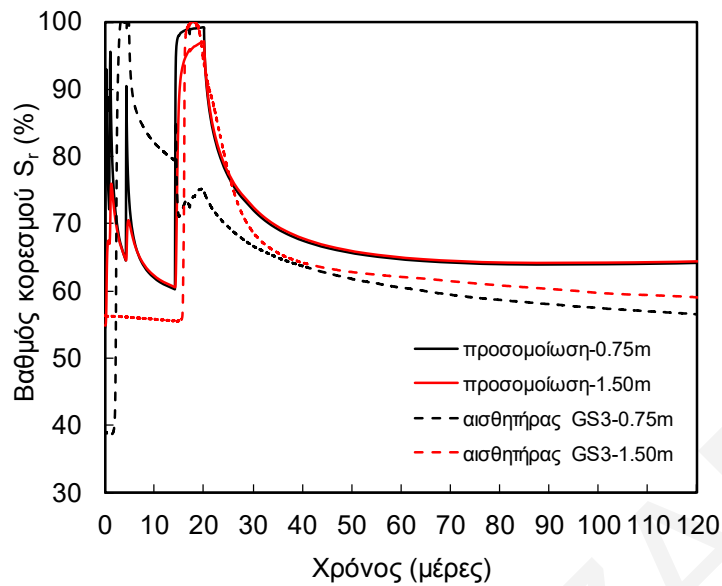
Σχήμα B35: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_l=-2$, $k_x=0.0004\text{m/day}$, $k_y=0.04\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 2, 70, 100 και 100 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα.



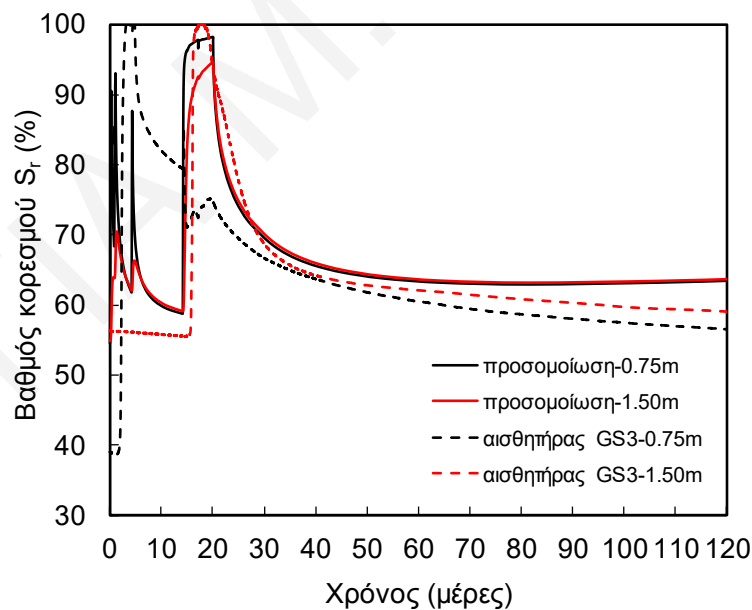
Σχήμα B36: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους H.



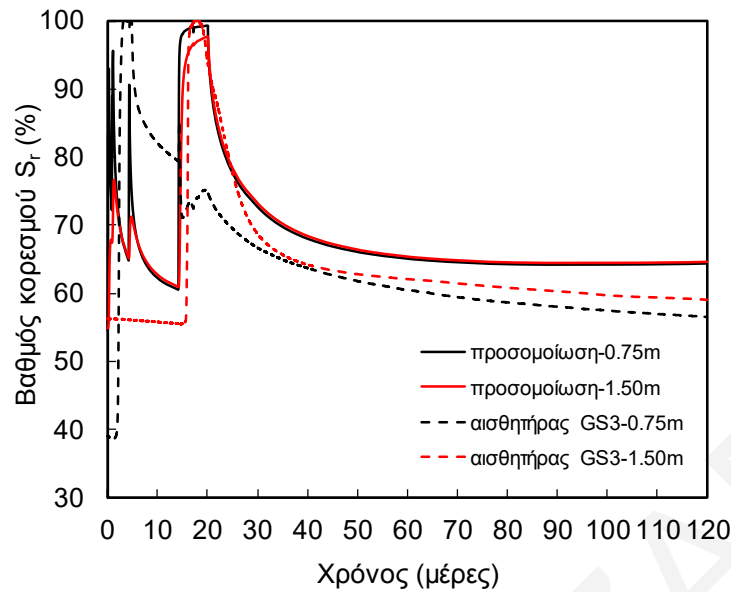
Σχήμα B37: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.000675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους H.



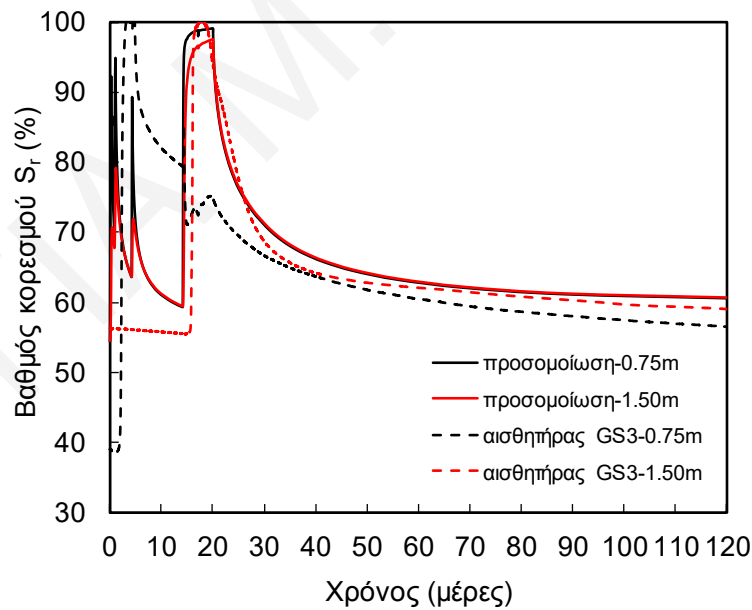
Σχήμα B38: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 με $K_{\text{στρ}}$ 5, 2, 1, 1, 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους Η.



Σχήμα B39: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.0135\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 με $K_{\text{στρ}}$ 3, 2, 1, 1, 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους Η.



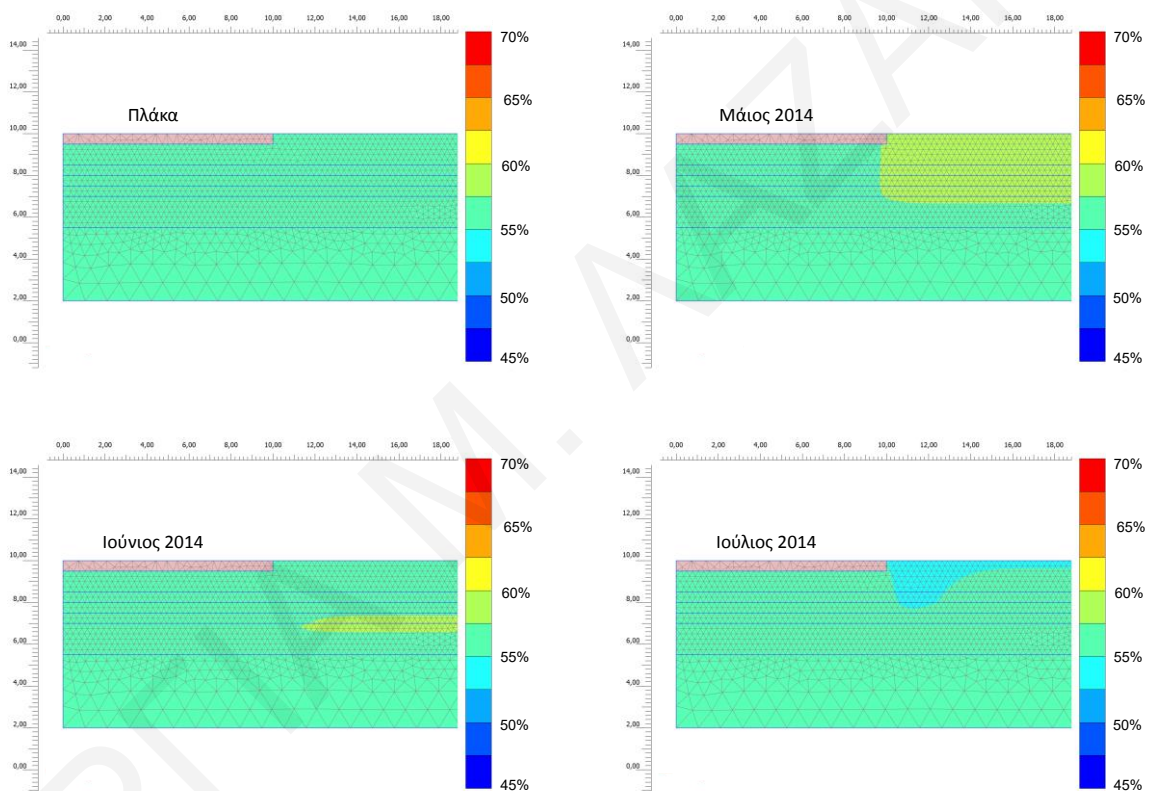
Σχήμα B40: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 με $K_{στρ}$ 7, 3, 1, 1, 1 και K 1, 1, 30, 100 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους Η.



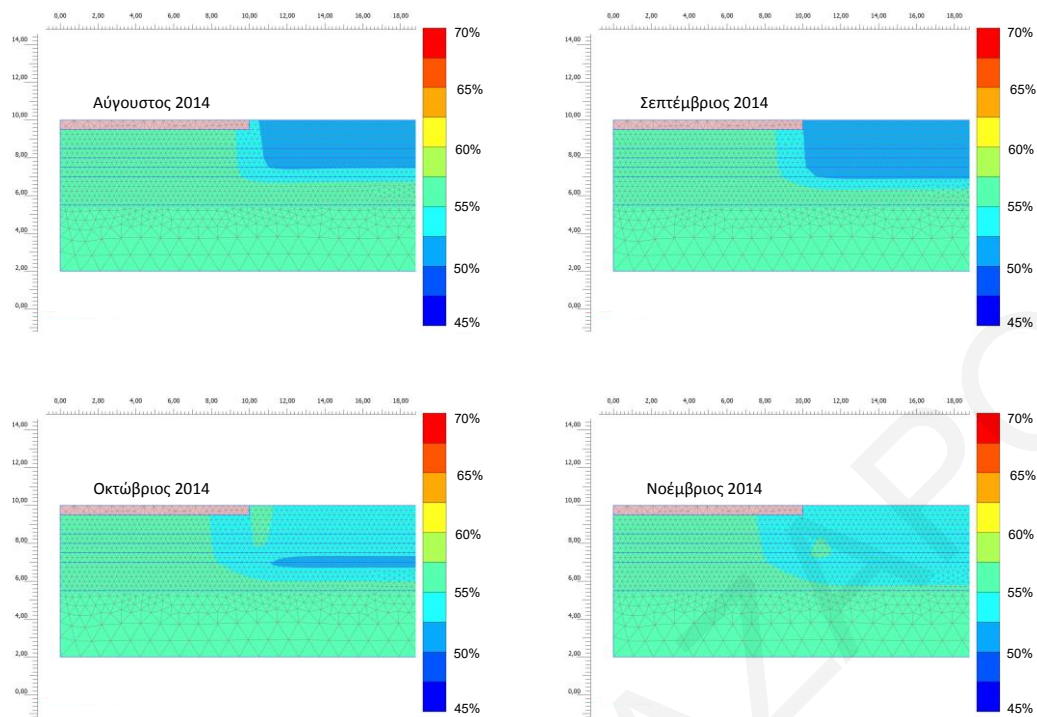
Σχήμα B41: Καταγραφές αισθητήρων πεδίου και αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος διαβροχής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με παραμέτρους $g_a=0.016$, $g_i=-2$, $k_x=0.00675\text{m/day}$, $k_y=0.0675\text{m/day}$ για το στρώμα 1 με $K_{στρ}$ 10, 5, 2, 1, 1 και K 1, 2, 38, 300 και 300 φορές μικρότερες διαπερατότητες για τα στρώματα 2-6 αντίστοιχα για εδαφικό μοντέλο μικρότερου ύψους Η.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

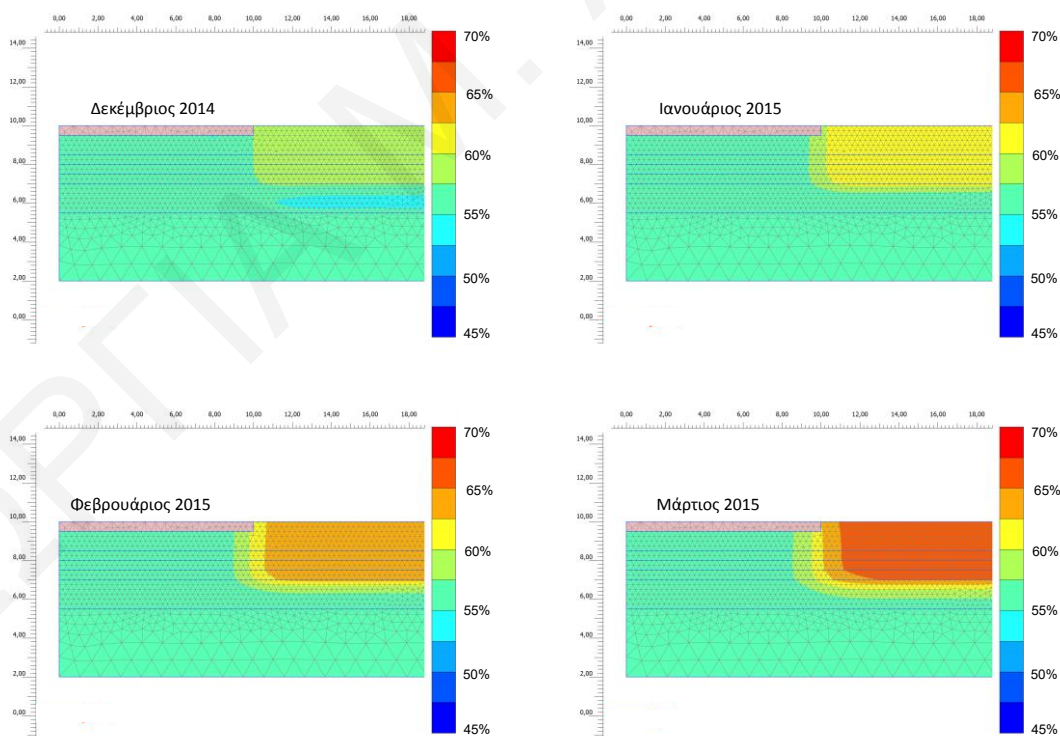
Γ1. Αποτελέσματα αναλύσεων χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Λ και πάχος πλάκας $d=0.5m$



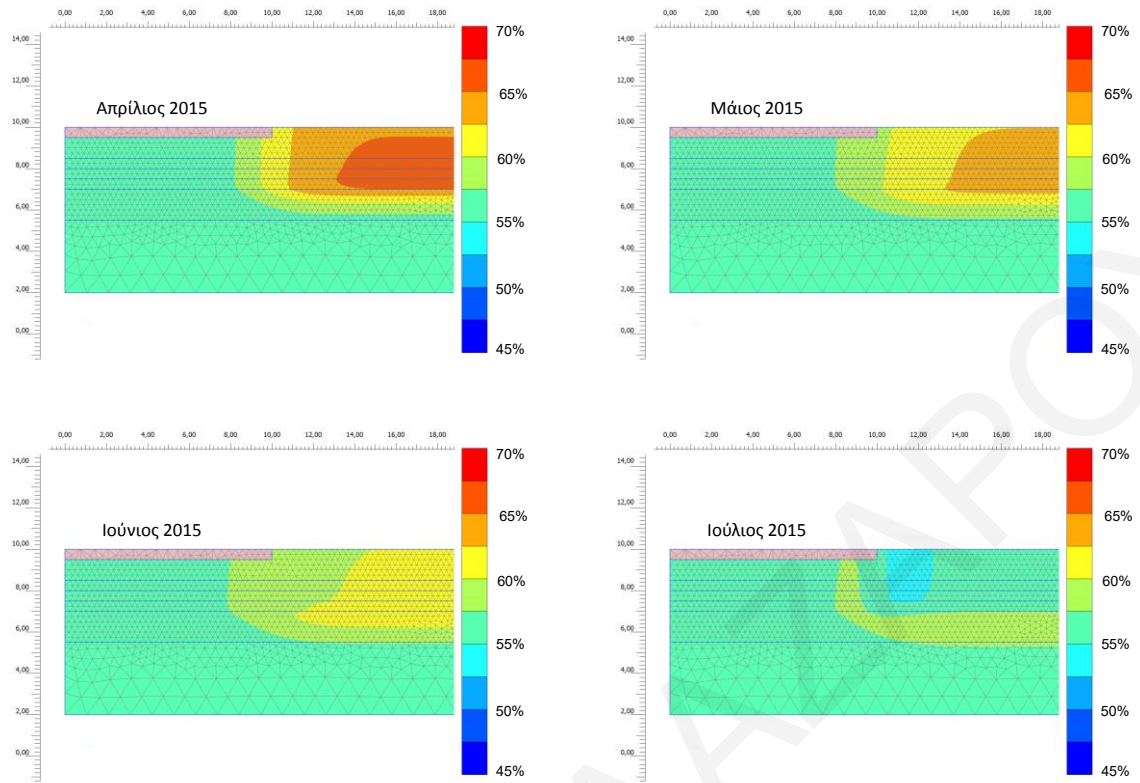
Σχήμα Γ.1: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Λ και $d=0.5m$.



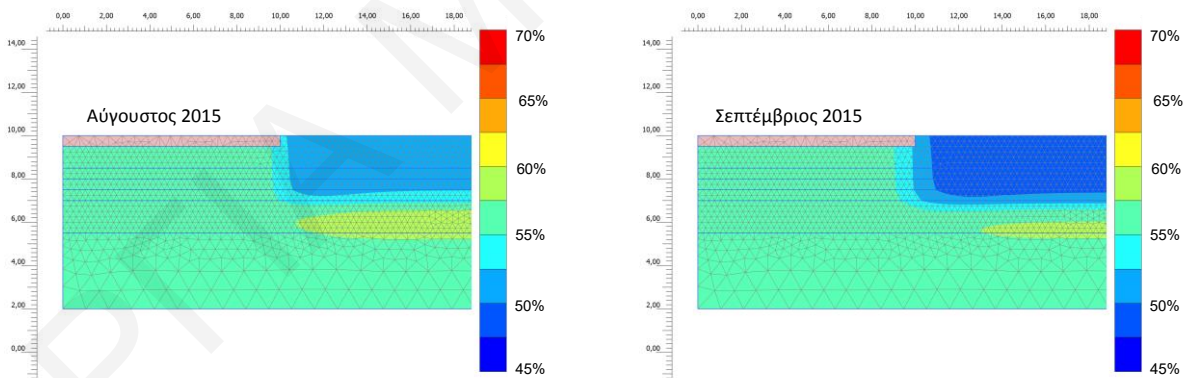
Σχήμα Γ.2: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



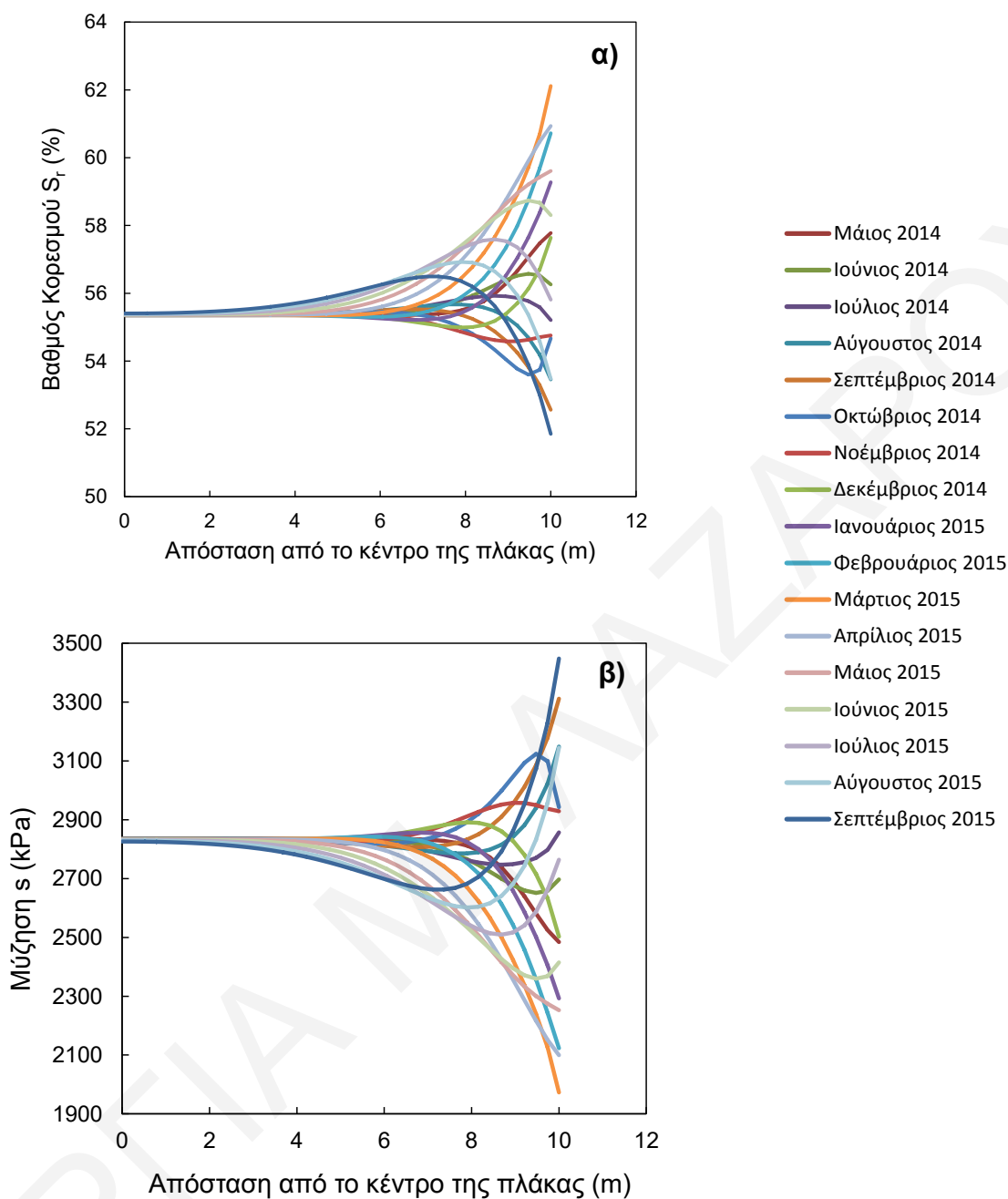
Σχήμα Γ.3: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



Σχήμα Γ.4: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α και $d=0.5m$.

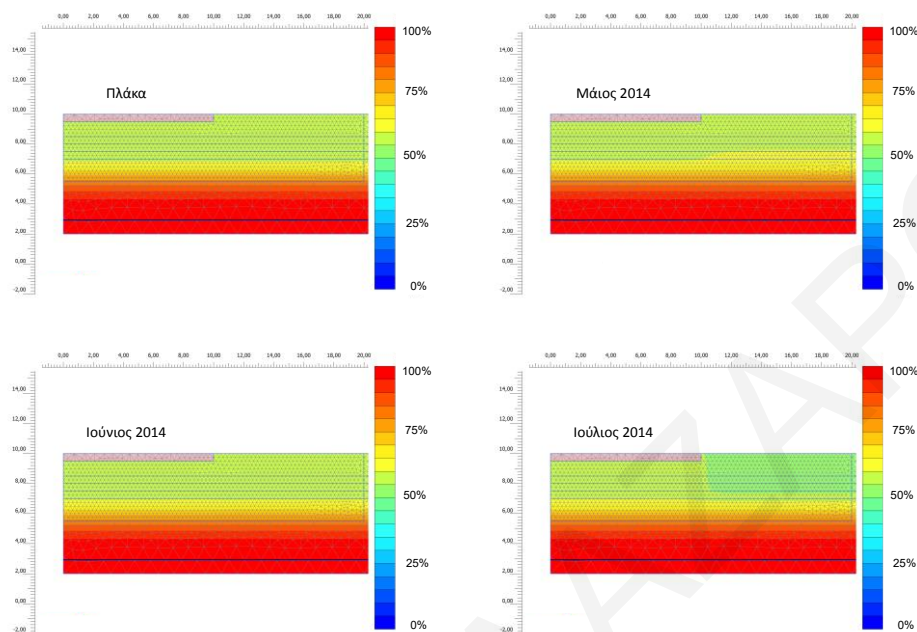


Σχήμα Γ.5: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2015 έως το τέλος Σεπτεμβρίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α και $d=0.5m$.

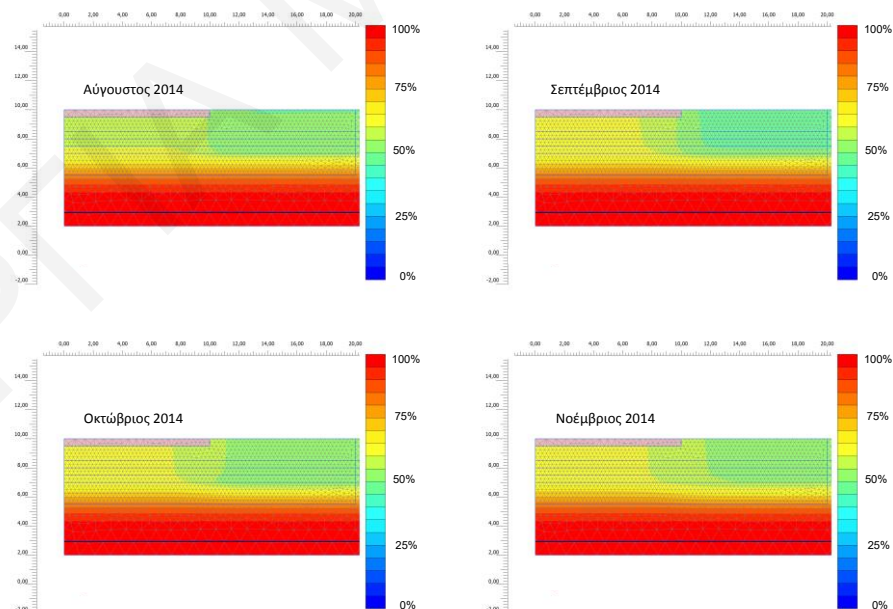


Σχήμα Γ.6: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

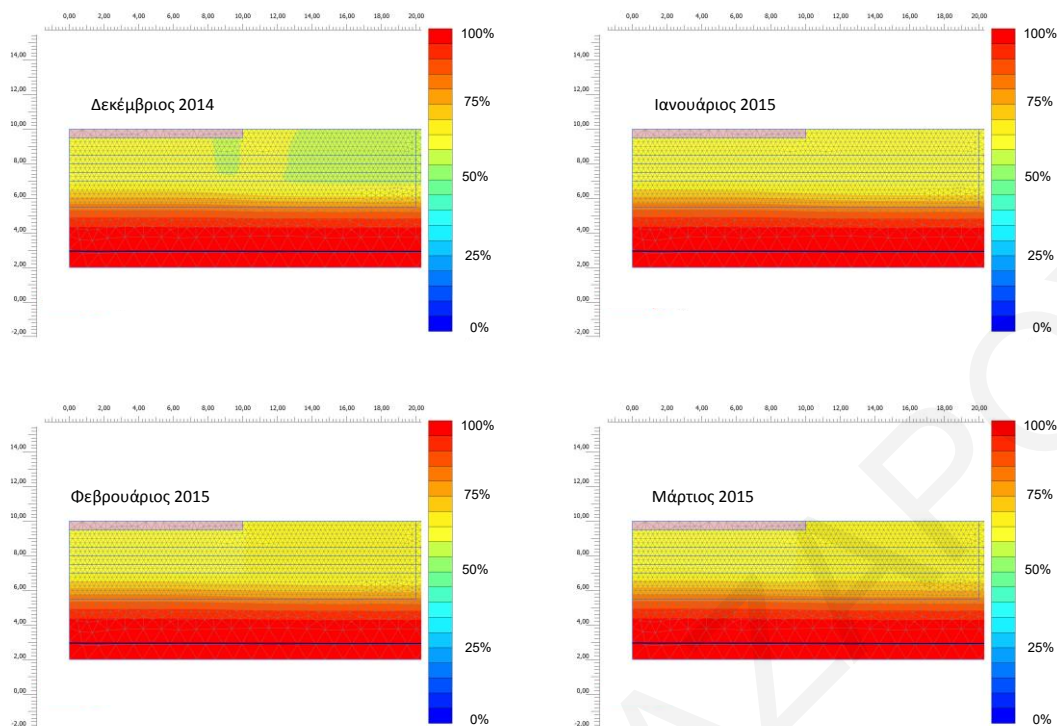
Γ2. Αποτελέσματα αναλύσεων με υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και πάχος πλάκας $d=0.5m$.



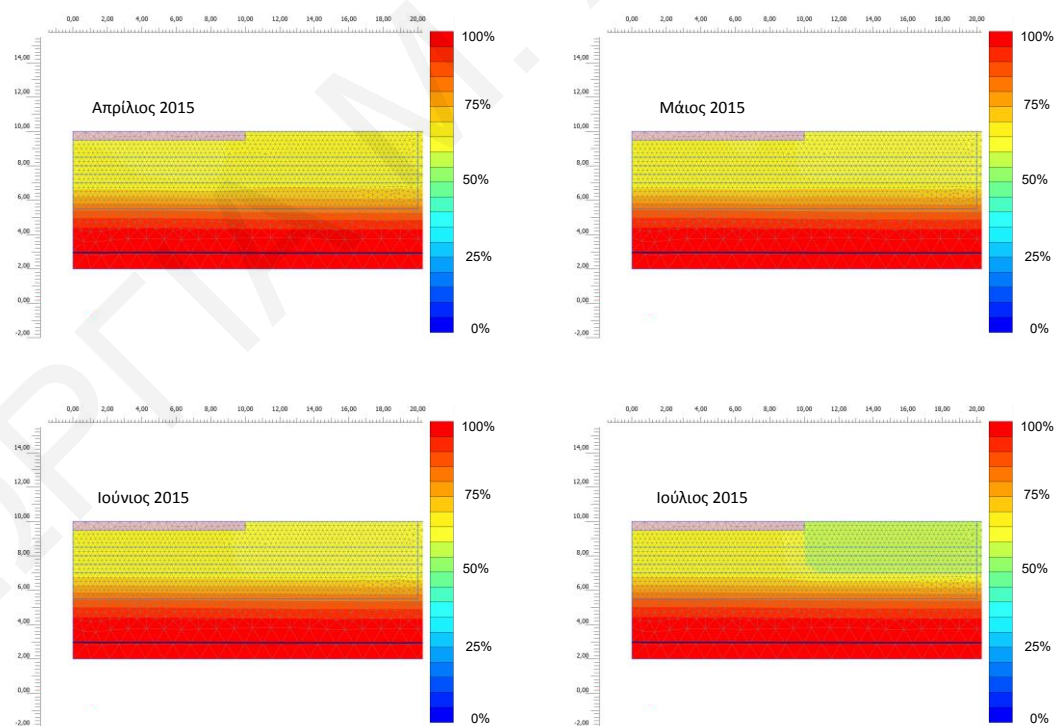
Σχήμα Γ.7: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



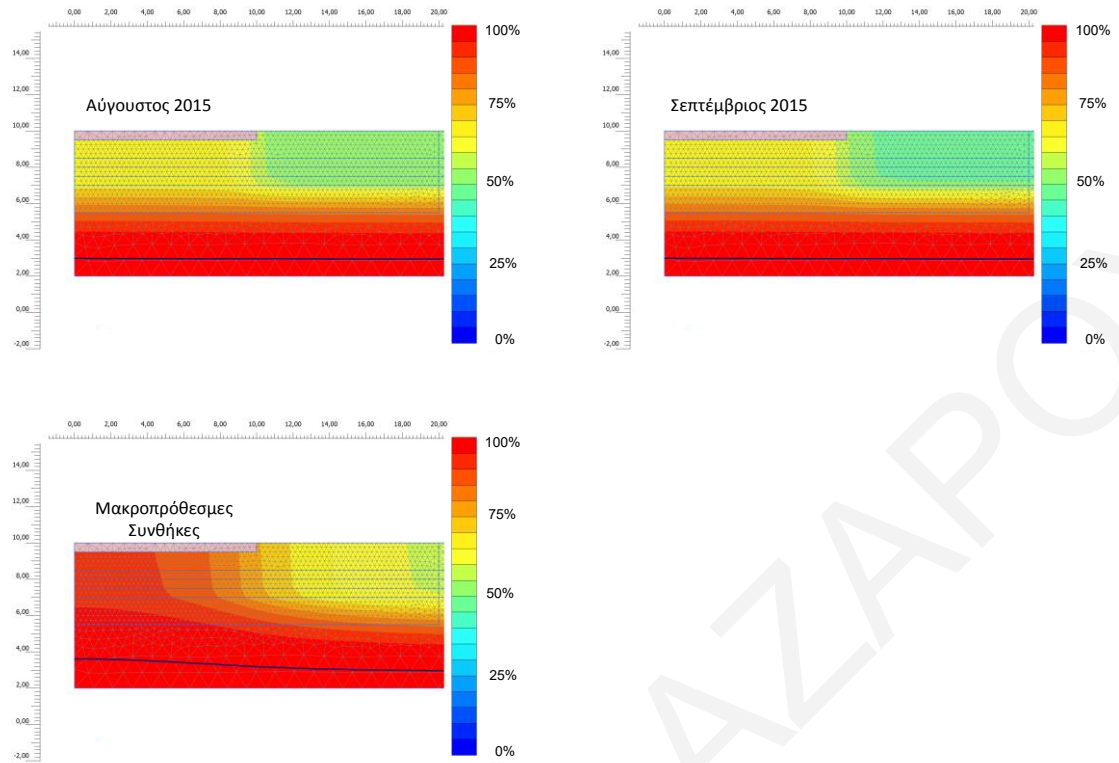
Σχήμα Γ.8: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



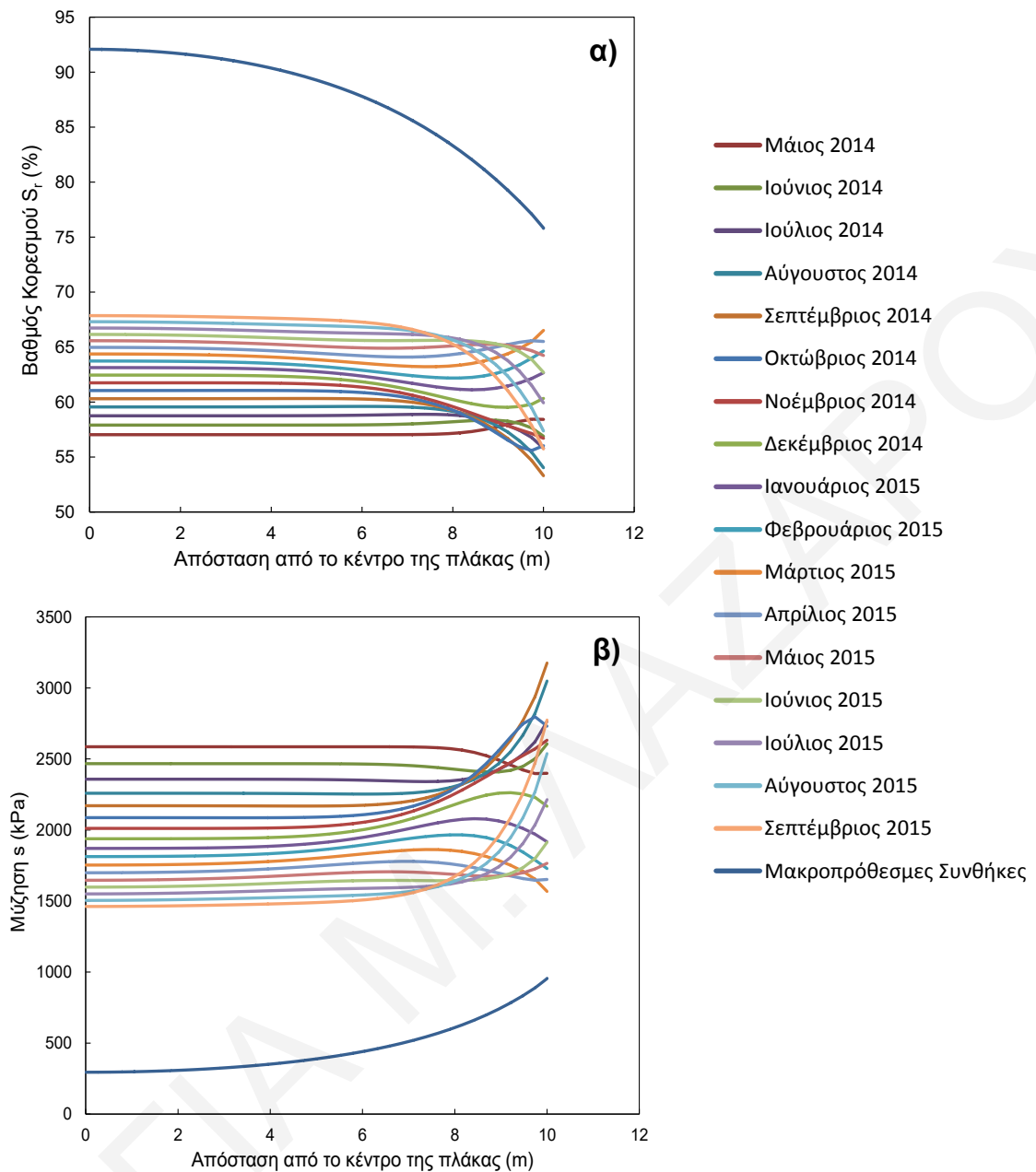
Σχήμα Γ.9: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



Σχήμα Γ.10: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

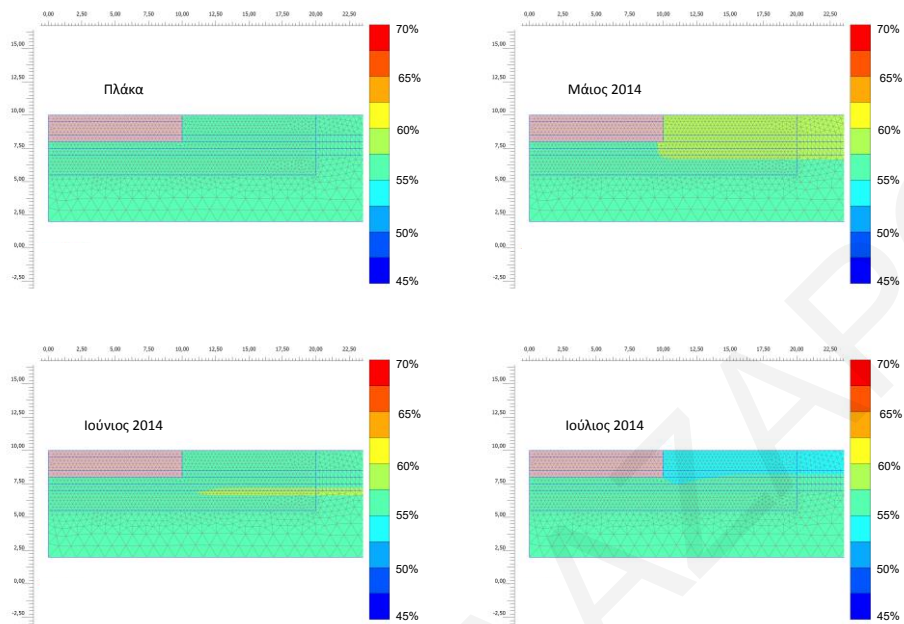


Σχήμα Γ.11: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2015 έως το τέλος των μακροπρόθεσμων συνθηκών από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

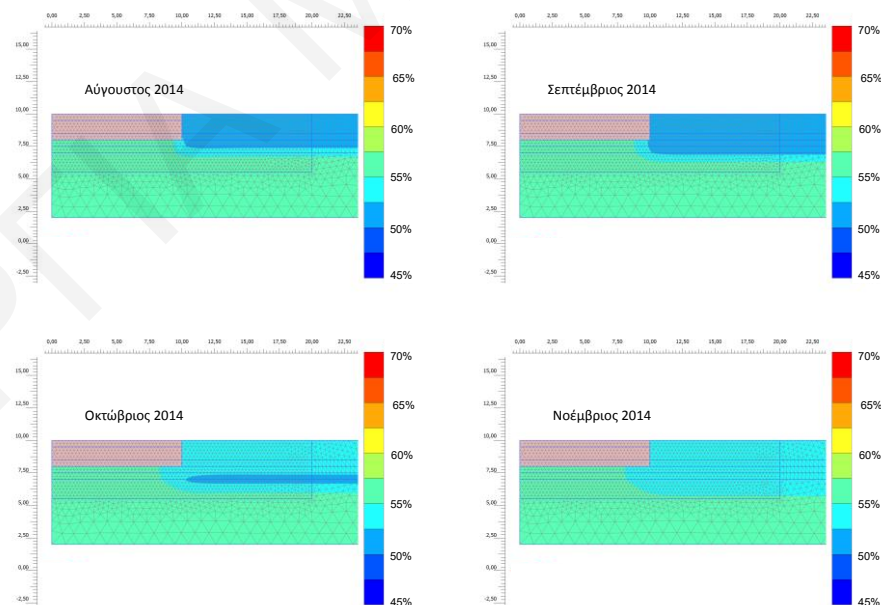


Σχήμα Γ.12: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

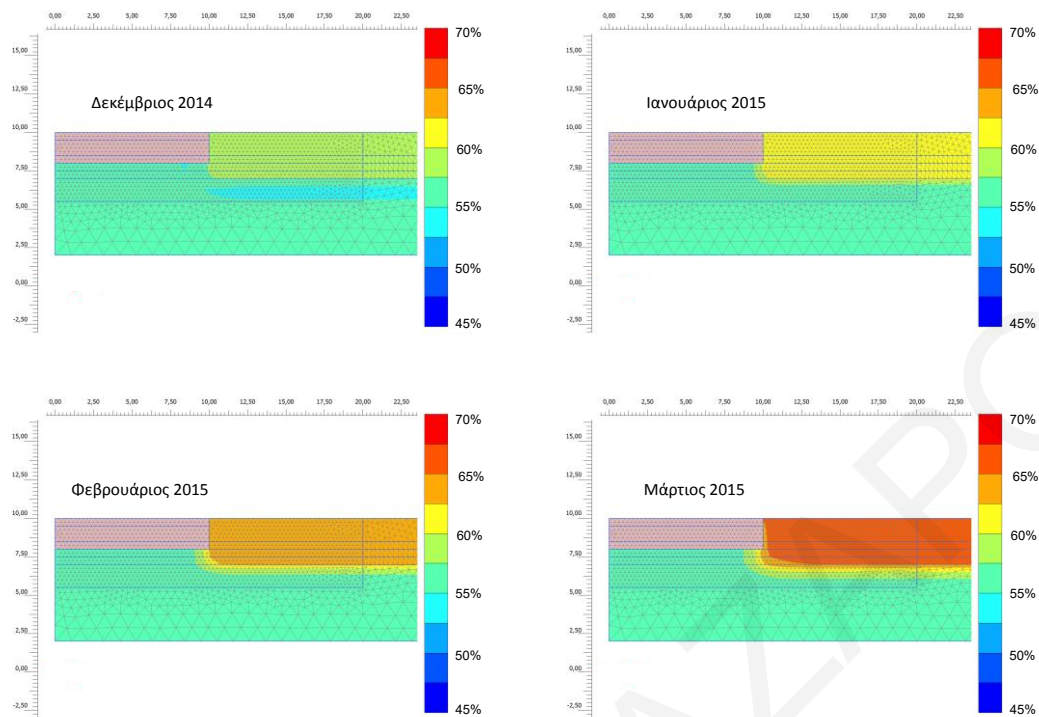
Γ3. Αποτελέσματα αναλύσεων χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α και πάχος πλάκας $d=2.0m$



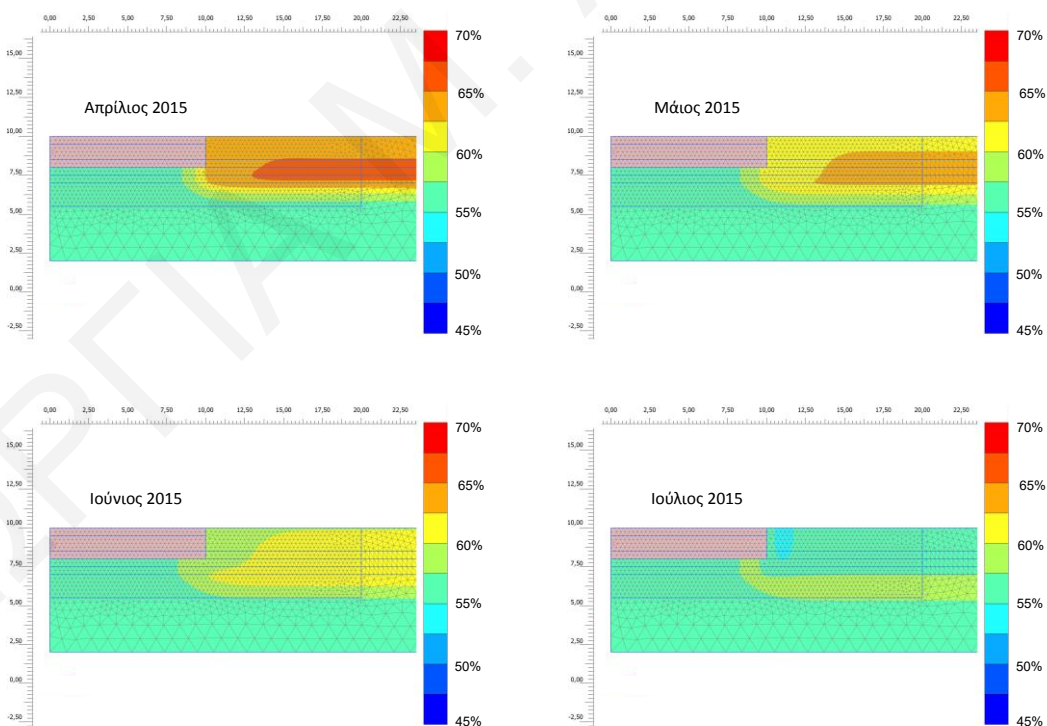
Σχήμα Γ.13: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α και $d=2.0m$.



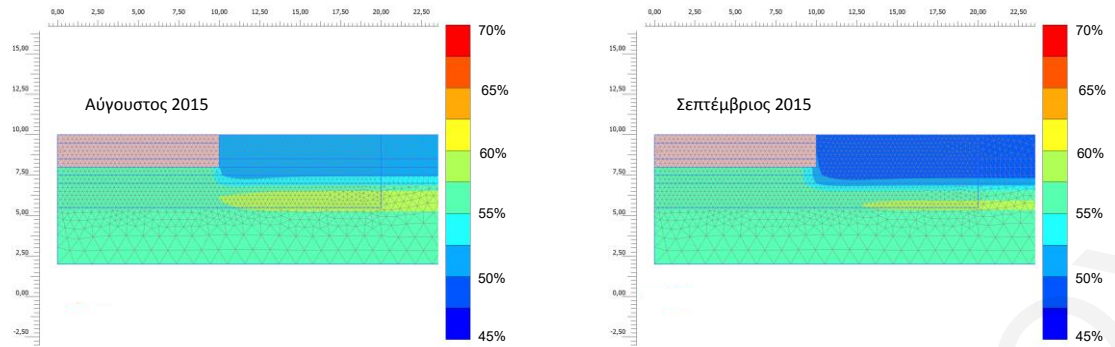
Σχήμα Γ.14: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Α και $d=2.0m$.



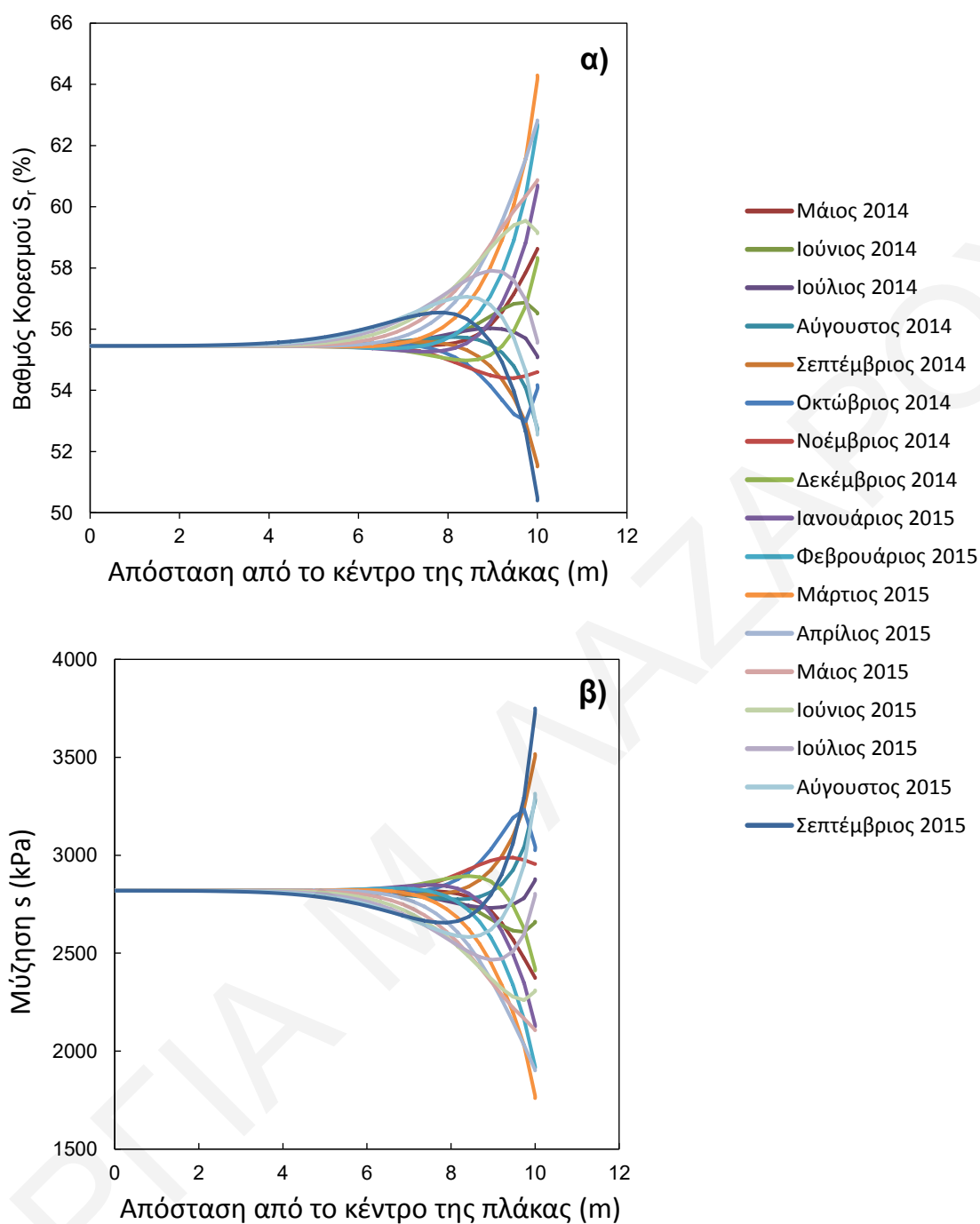
Σχήμα Γ.15: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=2.0m$.



Σχήμα Γ.16: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=2.0m$.

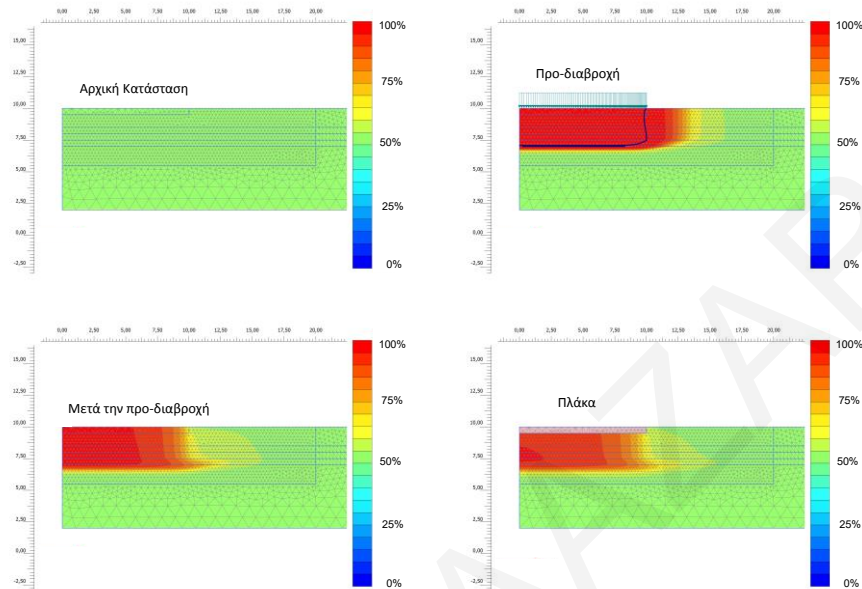


Σχήμα Γ.17: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2015 έως το τέλος Σεπτεμβρίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=2.0m$.

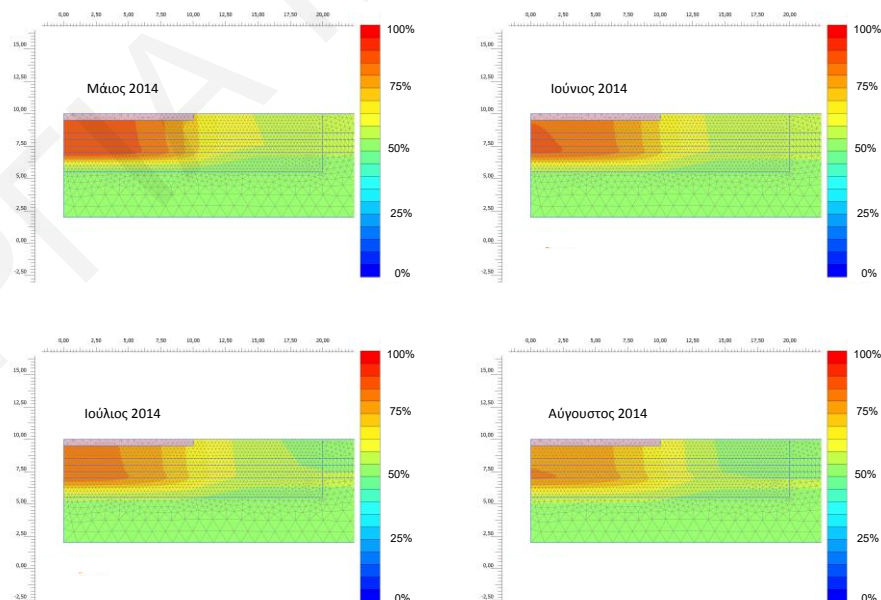


Σχήμα Γ.18: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφανείας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=2.0m$.

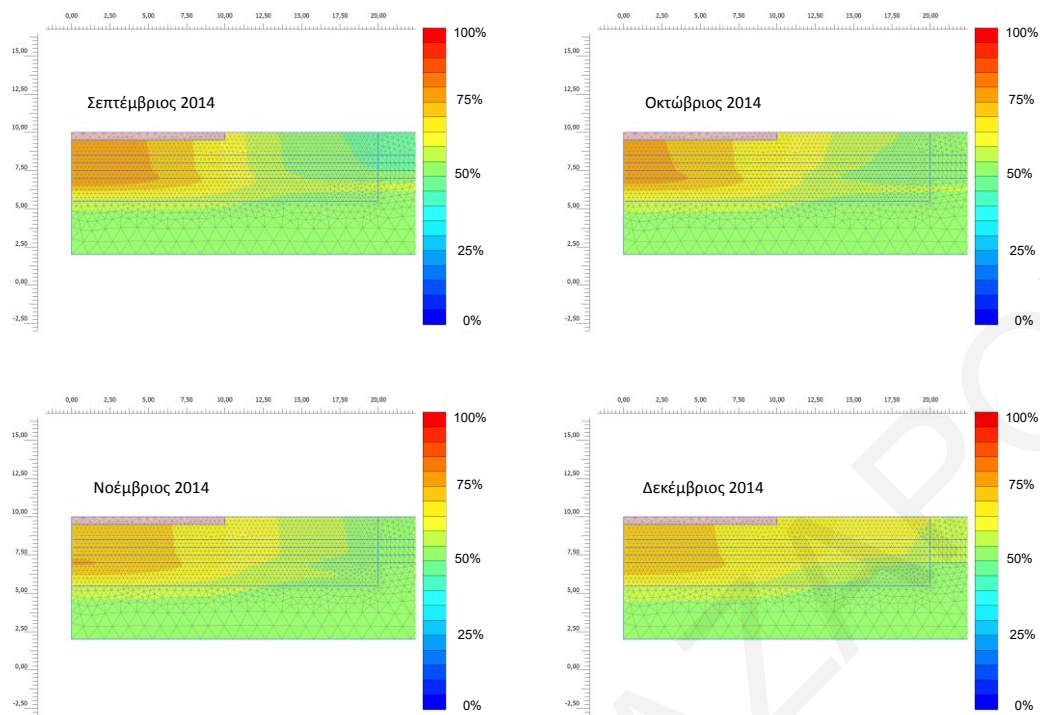
Γ4. Αποτελέσματα αναλύσεων χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, πάχος πλάκας $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



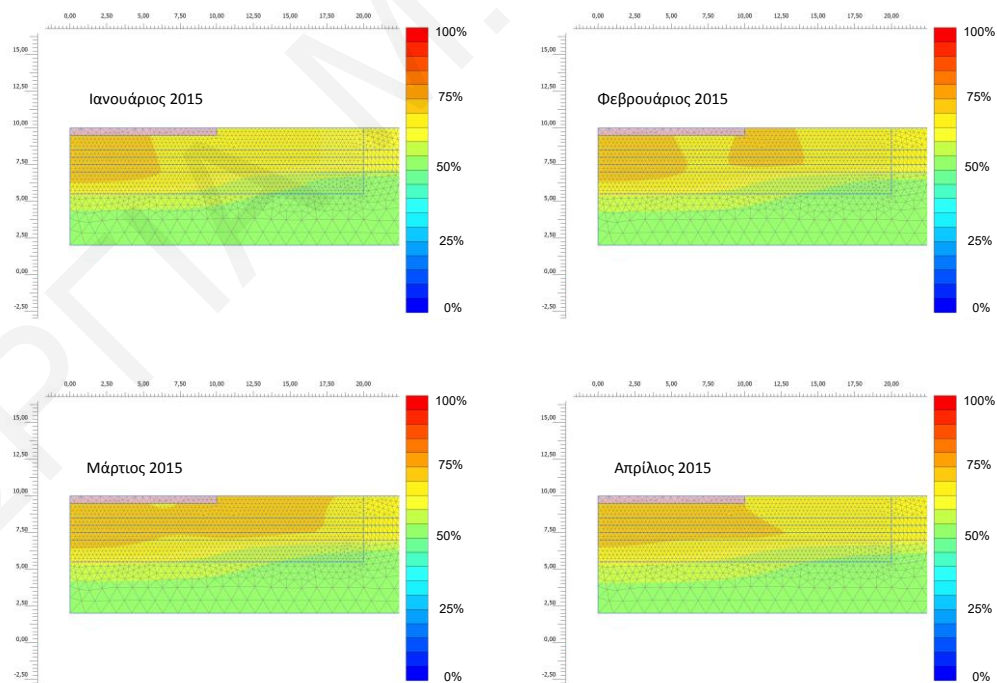
Σχήμα Γ.19: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την αρχική κατάσταση του εδάφους έως την εγκατάσταση της πλάκας από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



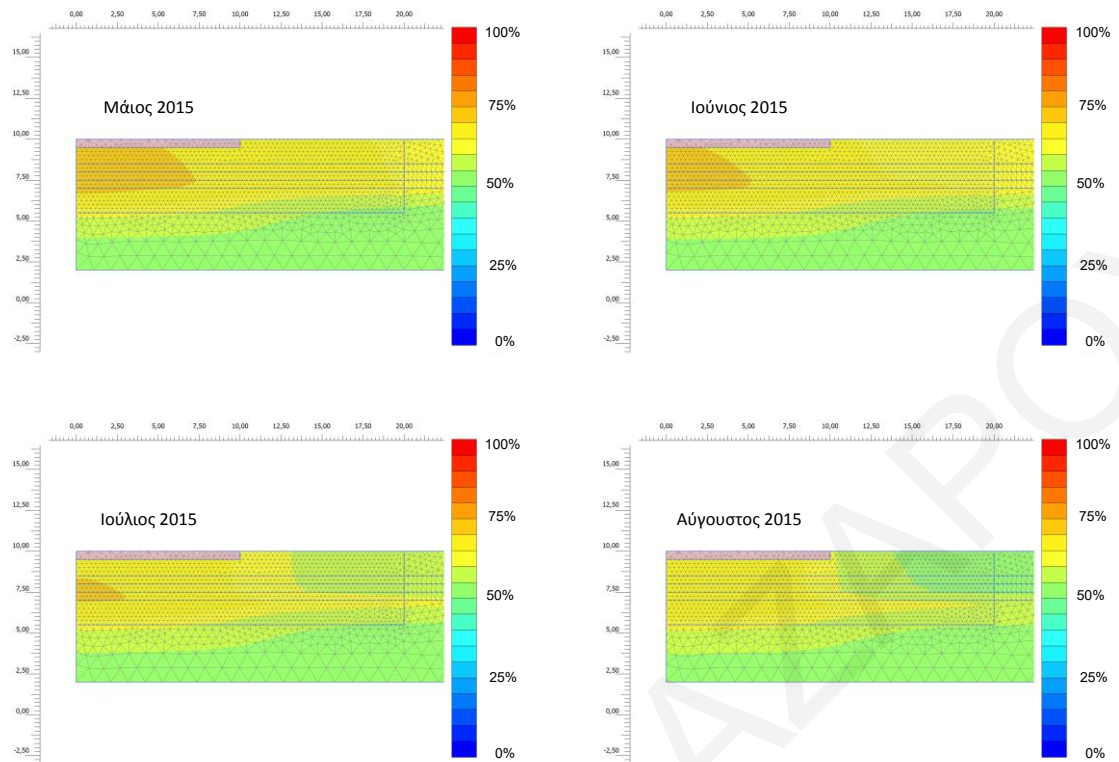
Σχήμα Γ.20: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Μάιο 2014 έως τον Αύγουστο 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



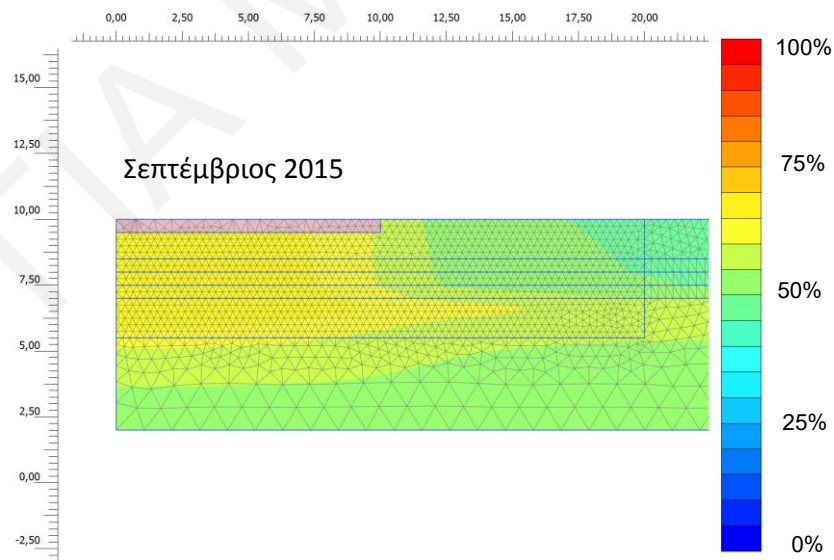
Σχήμα Γ.21: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Σεπτέμβριο 2014 έως τον Δεκέμβριο 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



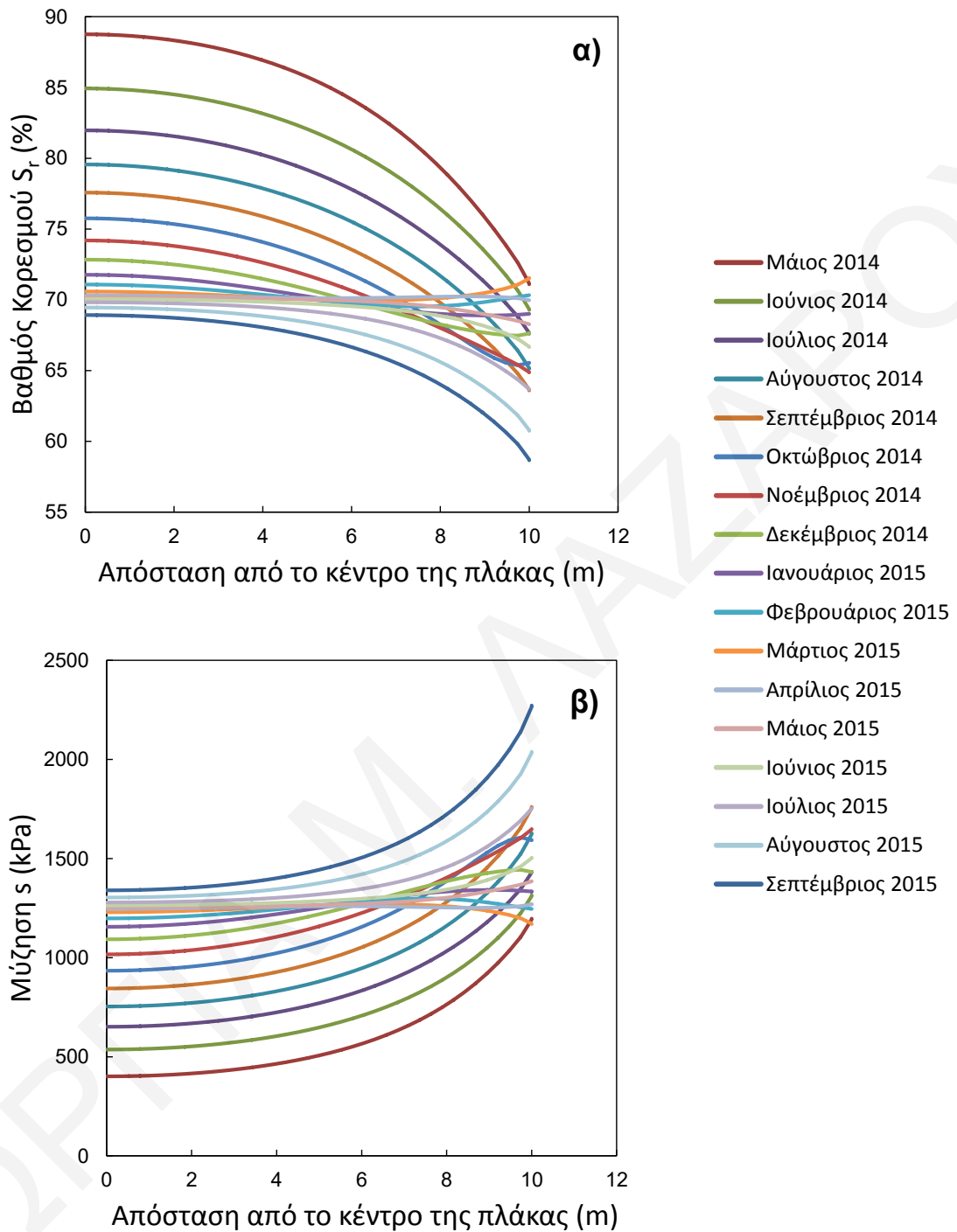
Σχήμα Γ.22: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Ιανουάριο 2015 έως τον Απρίλιο 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



Σχήμα Γ.23: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Μάιο 2015 έως τον Αύγουστο 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.

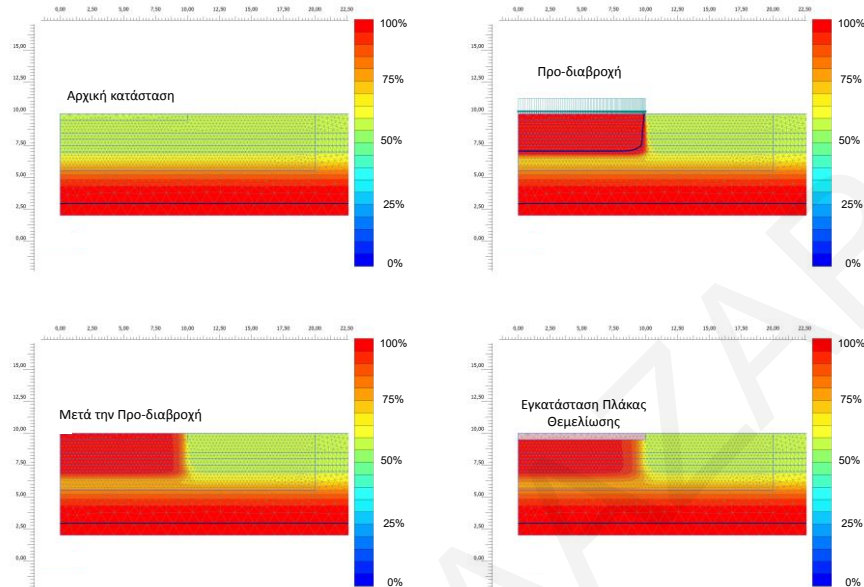


Σχήμα Γ.24: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους τον Σεπτέμβριο 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.

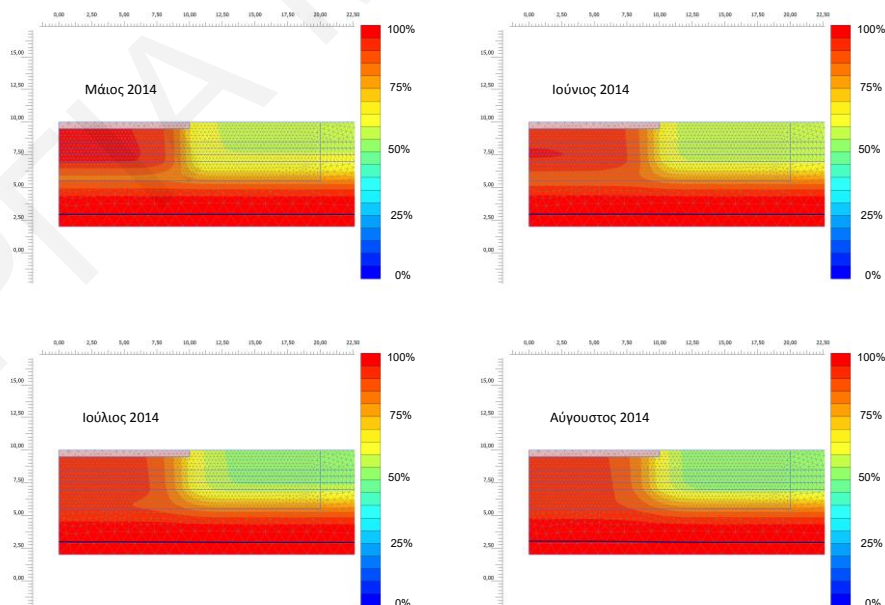


Σχήμα Γ.25: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5\text{m}$ και προδιαβροχή εδάφους.

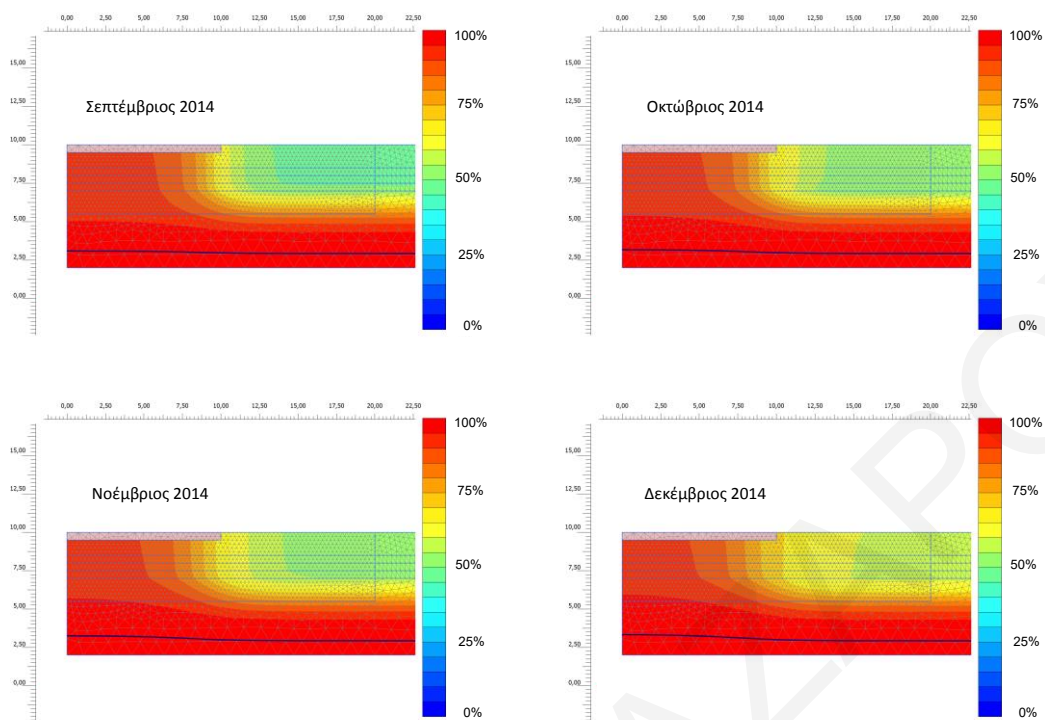
Γ5. Αποτελέσματα αναλύσεων με υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, πάχος πλάκας $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



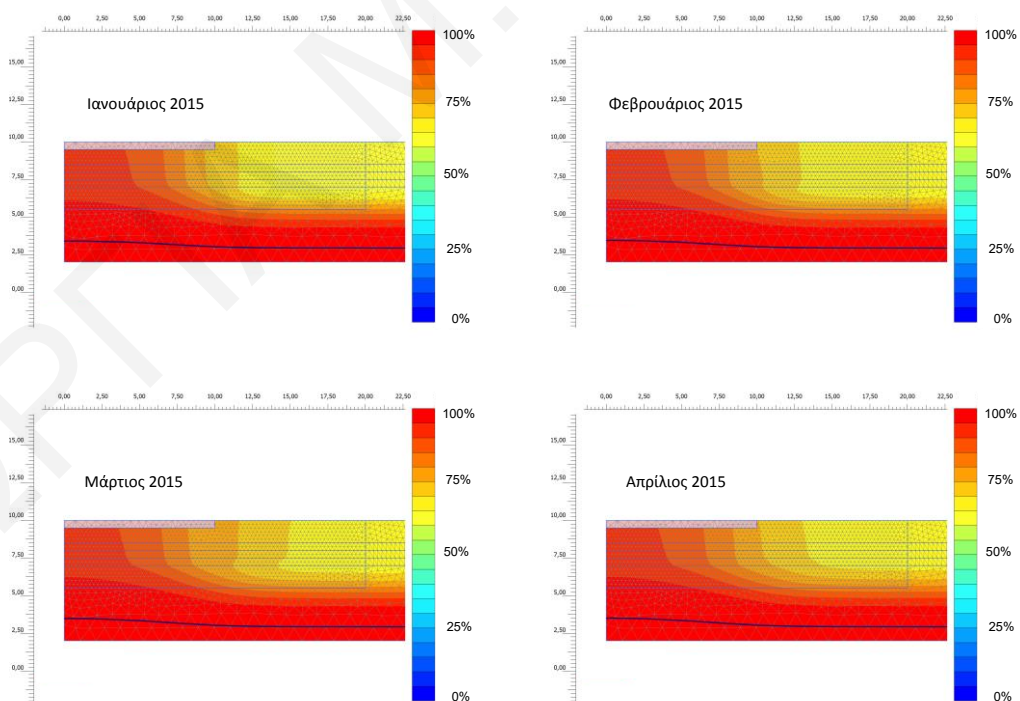
Σχήμα Γ.26: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την αρχική κατάσταση του εδάφους έως την εγκατάσταση της πλάκας από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



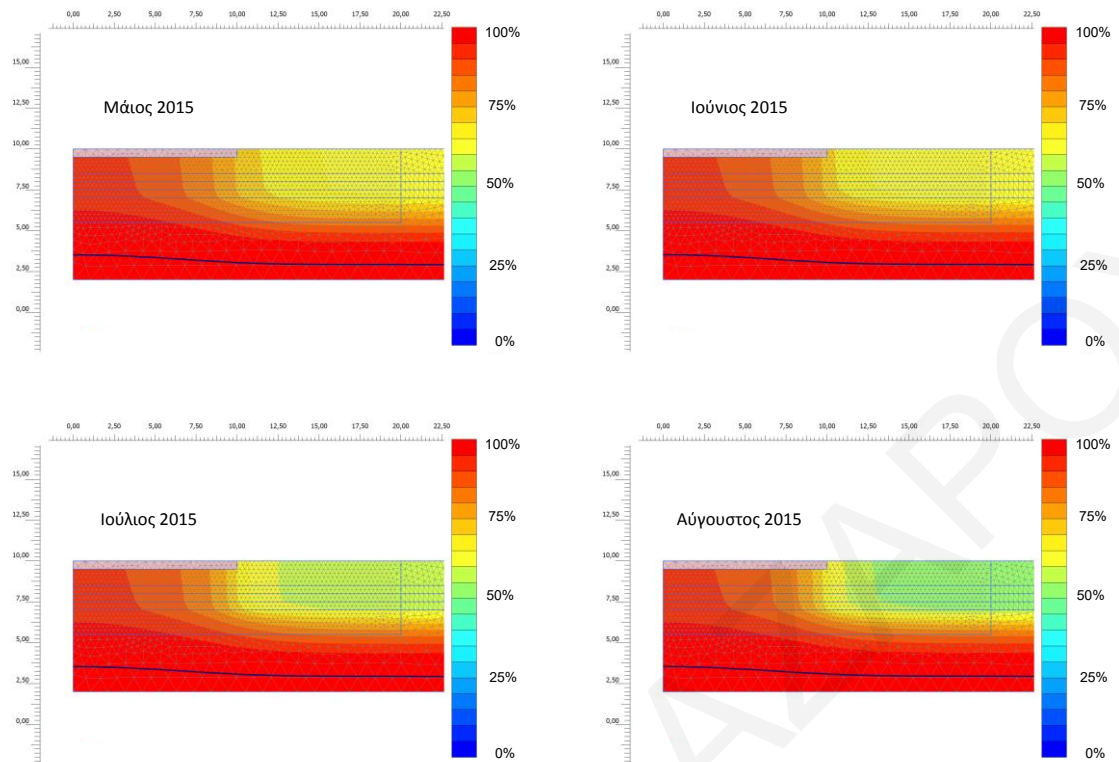
Σχήμα Γ.27: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Μάιο 2014 έως τον Αύγουστο 2014 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



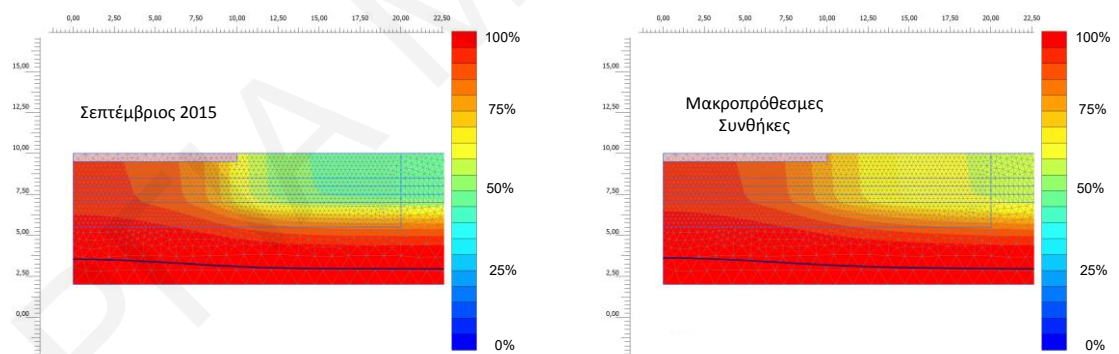
Σχήμα Γ.28: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Σεπτέμβριο 2014 έως τον Δεκέμβριο 2014 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



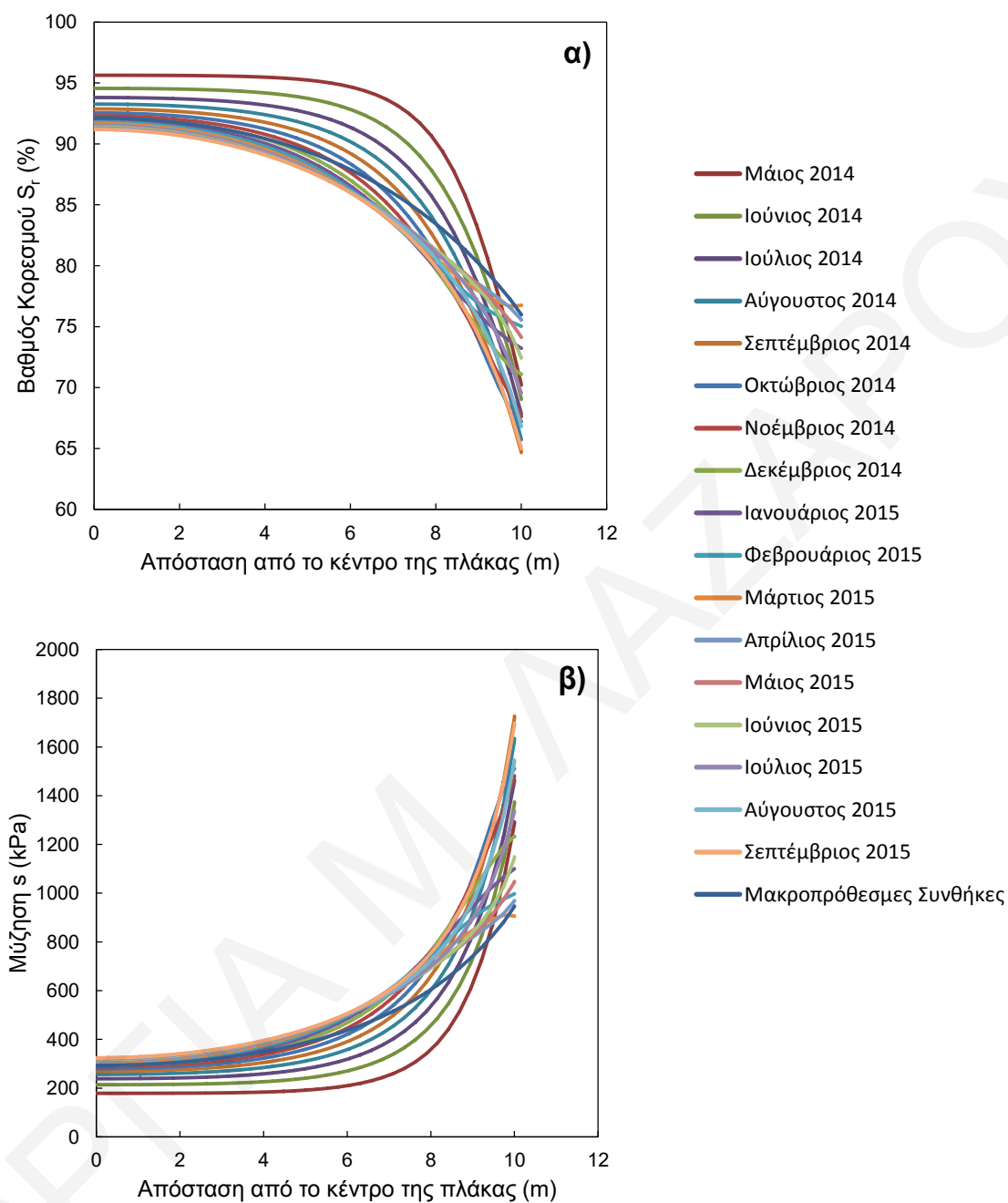
Σχήμα Γ.29: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Ιανουάριο 2015 έως τον Απρίλιο 2015 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.



Σχήμα Γ.30: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους από τον Μάιο 2015 έως τον Αύγουστο 2015 από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.

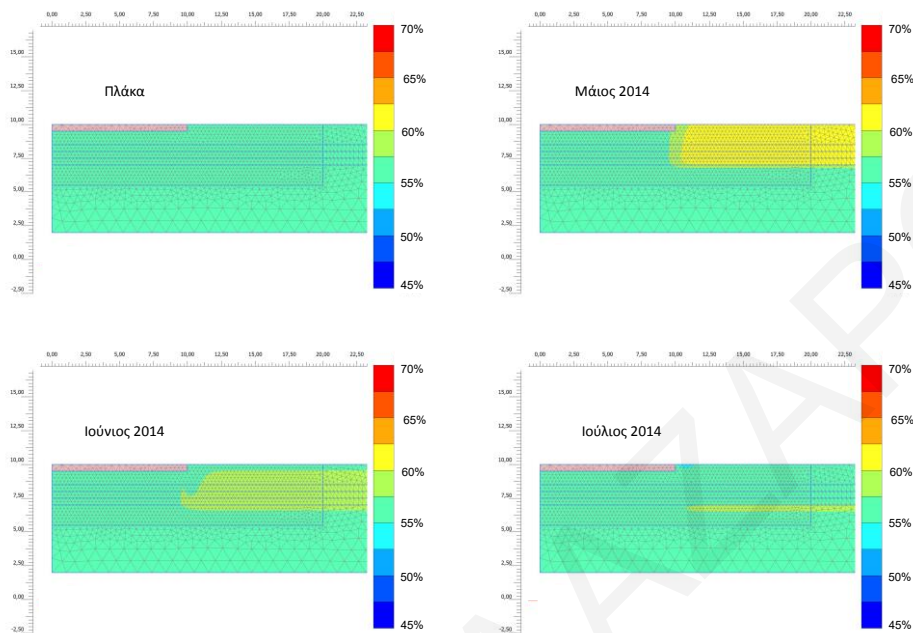


Σχήμα Γ.31: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού του εδάφους τον Σεπτέμβριο 2015 και των μακροπρόθεσμων συνθηκών από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και προδιαβροχή εδάφους.

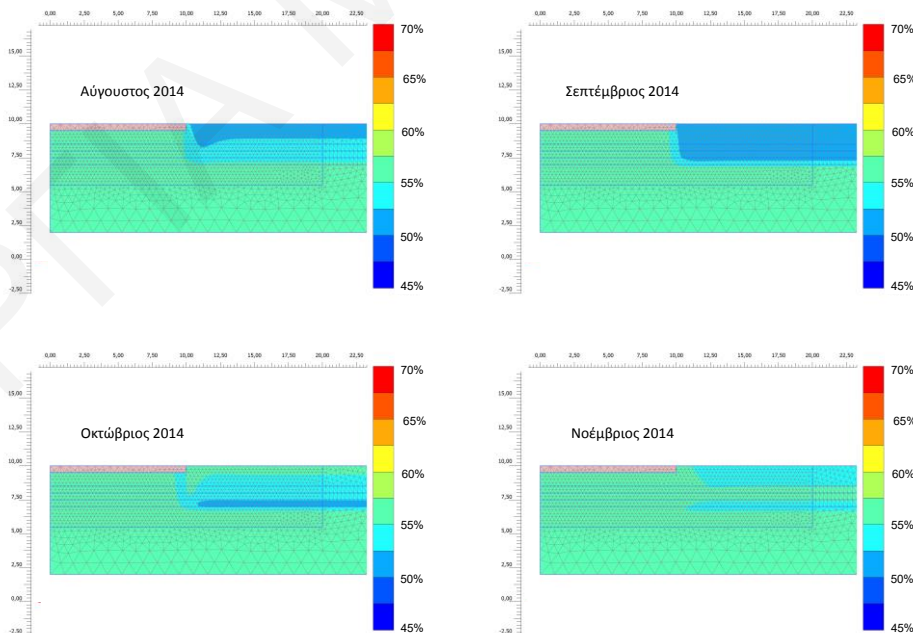


Σχήμα Γ.31: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση με υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5\text{m}$ και προδιαβροχή εδάφους.

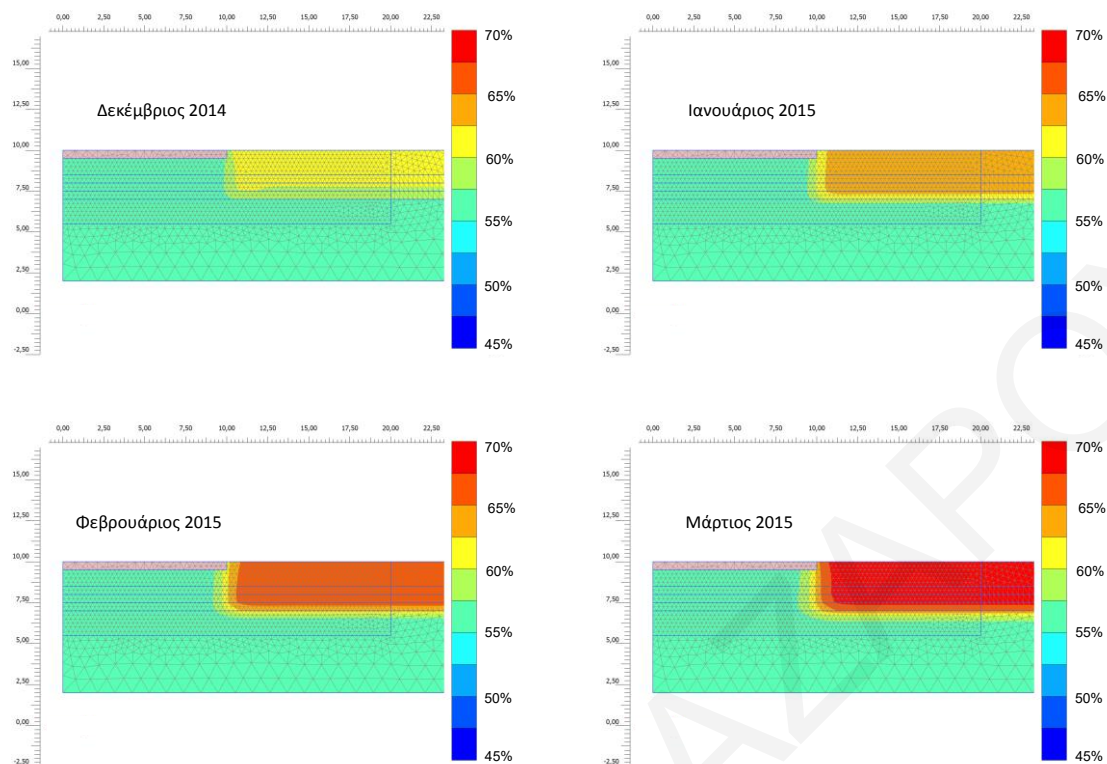
Γ6. Αποτελέσματα αναλύσεων με υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.05$ και $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και πάχος πλάκας $d=0.5m$.



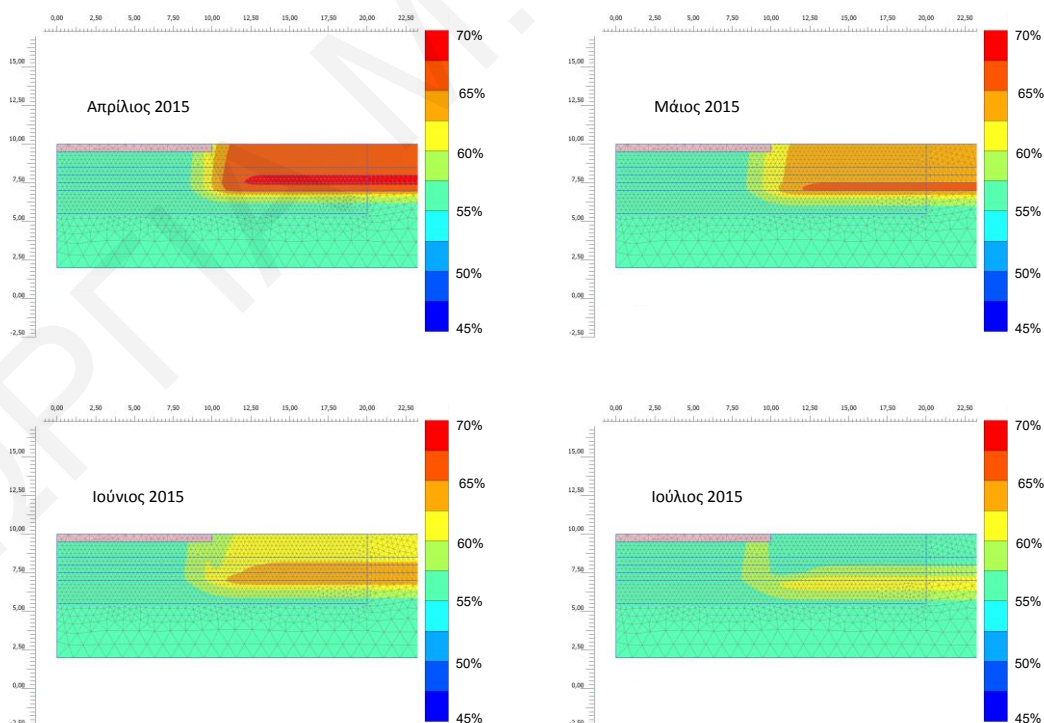
Σχήμα Γ.32: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



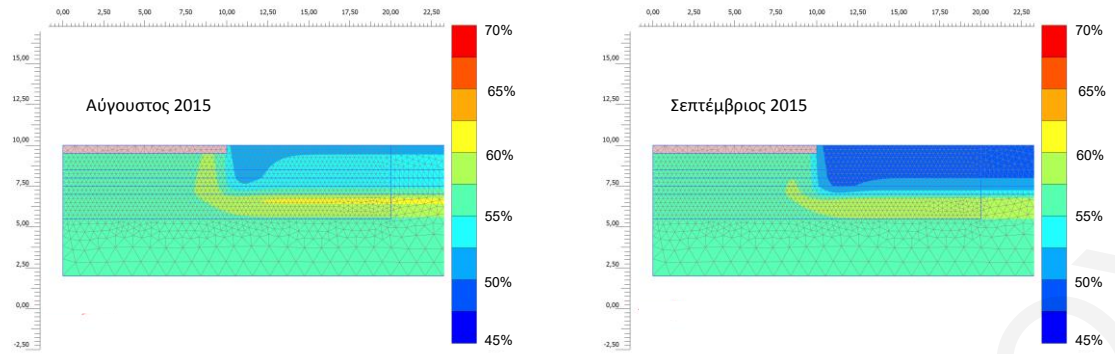
Σχήμα Γ.33: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



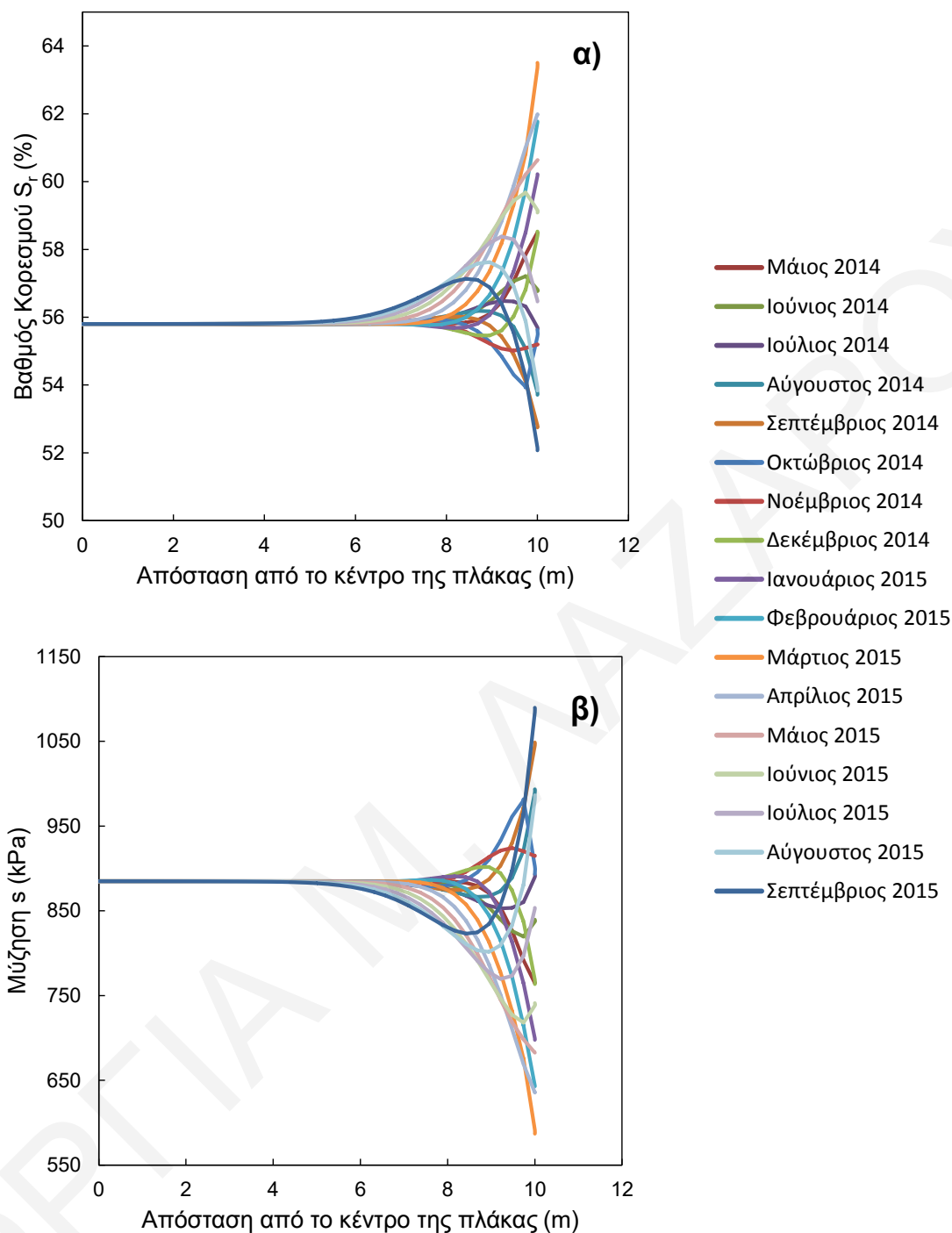
Σχήμα Γ.34: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.



Σχήμα Γ.35: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

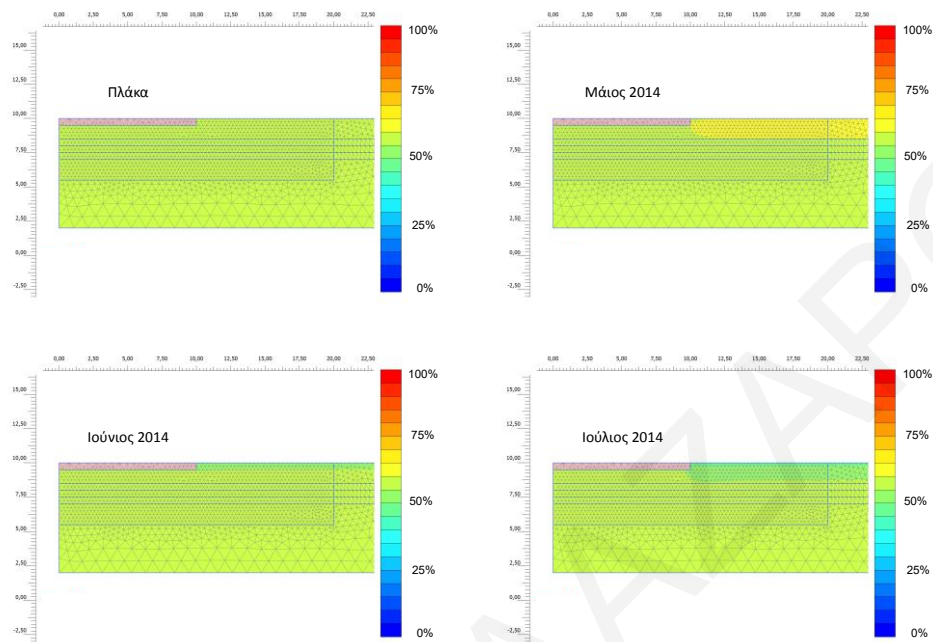


Σχήμα Γ.36: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2015 έως το τέλος Σεπτεμβρίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

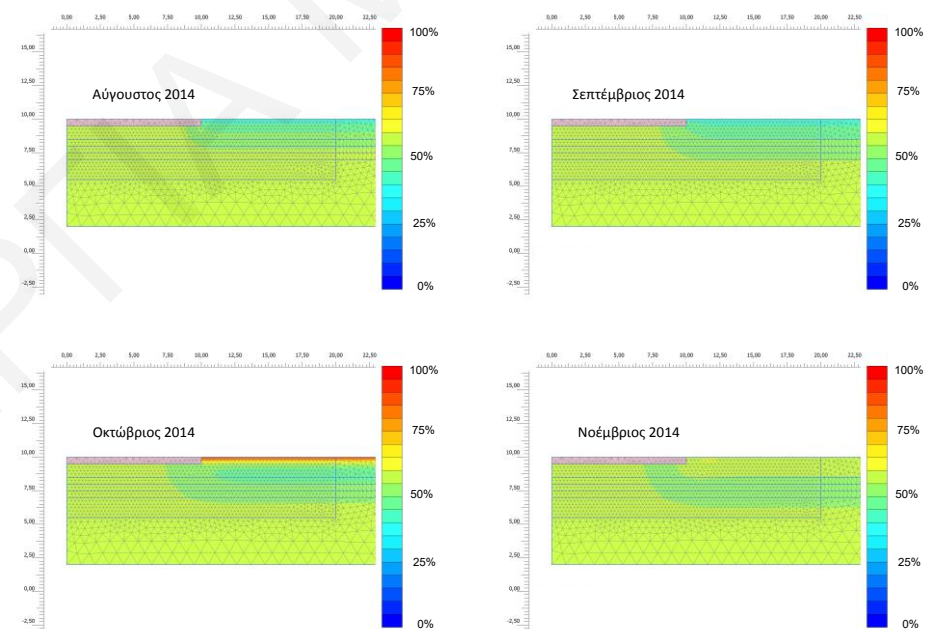


Σχήμα Γ.37: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.05$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A και $d=0.5m$.

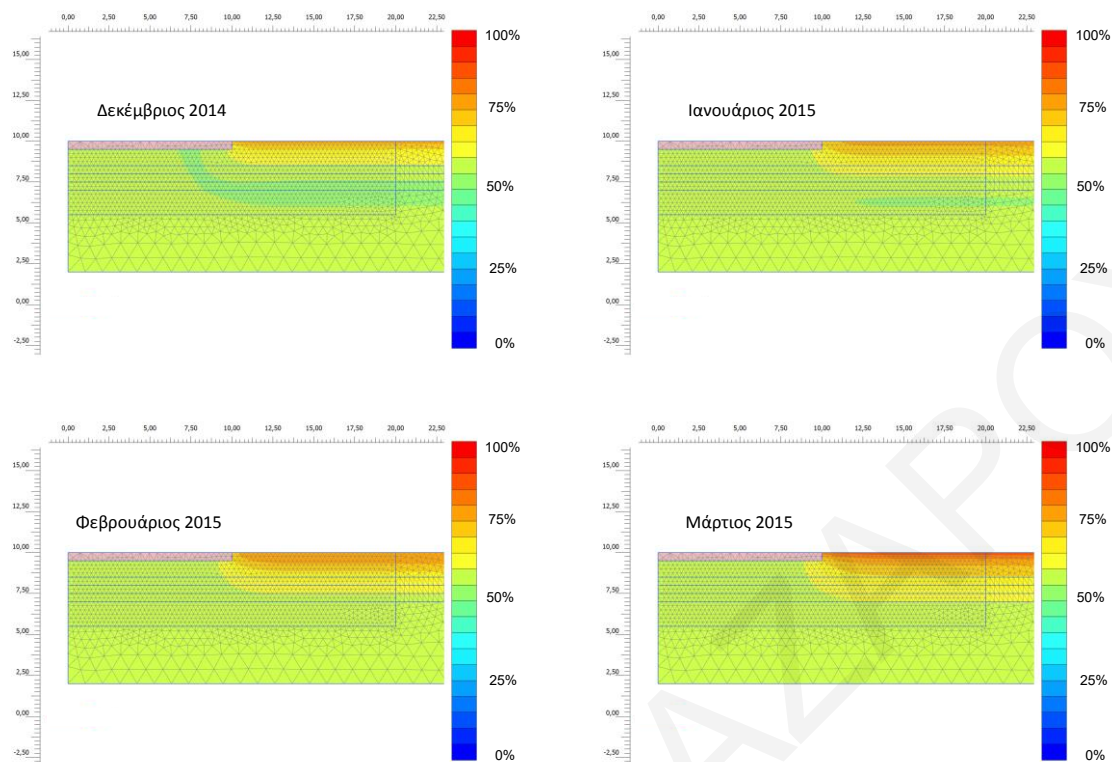
Γ7. Αποτελέσματα αναλύσεων με υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και πάχος πλάκας $d=0.5m$.



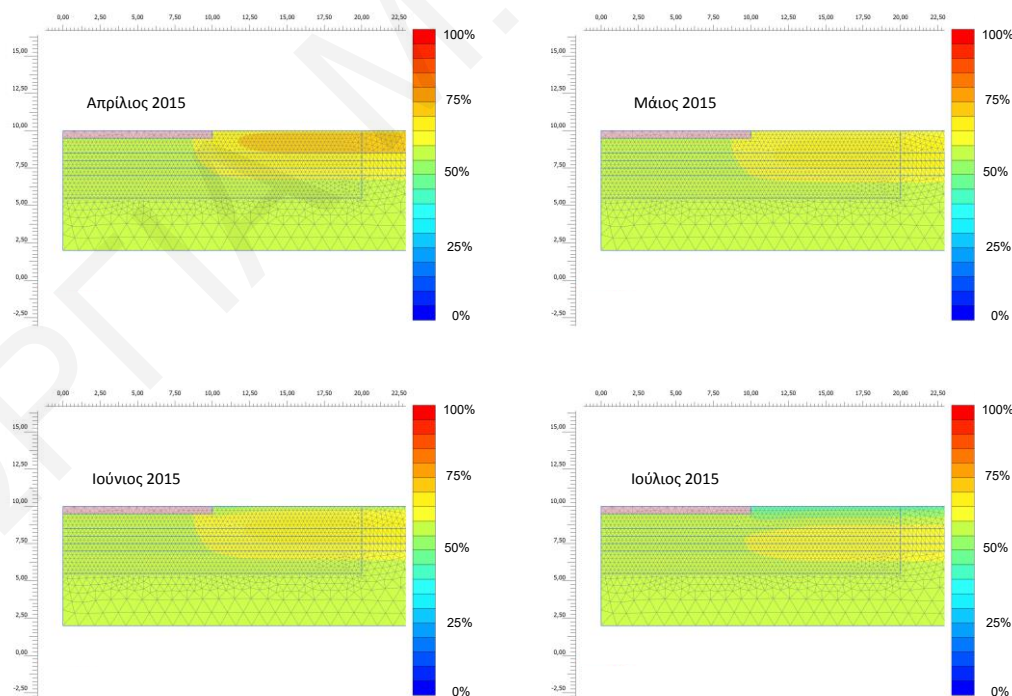
Σχήμα Γ.38: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.



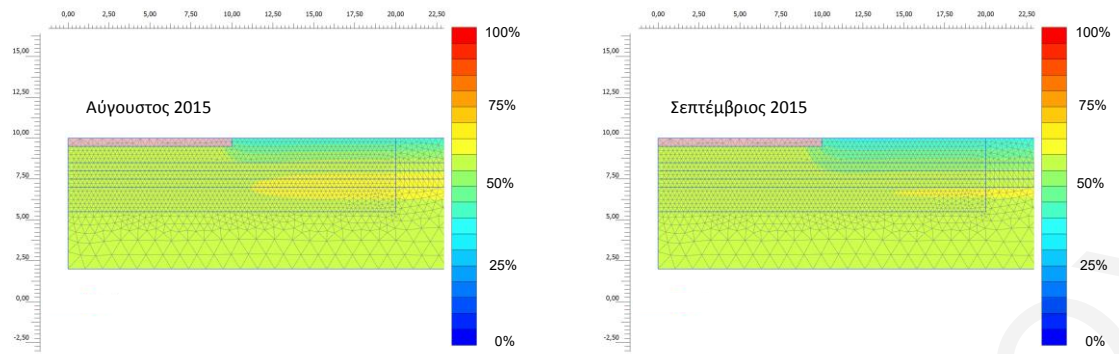
Σχήμα Γ.39: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.



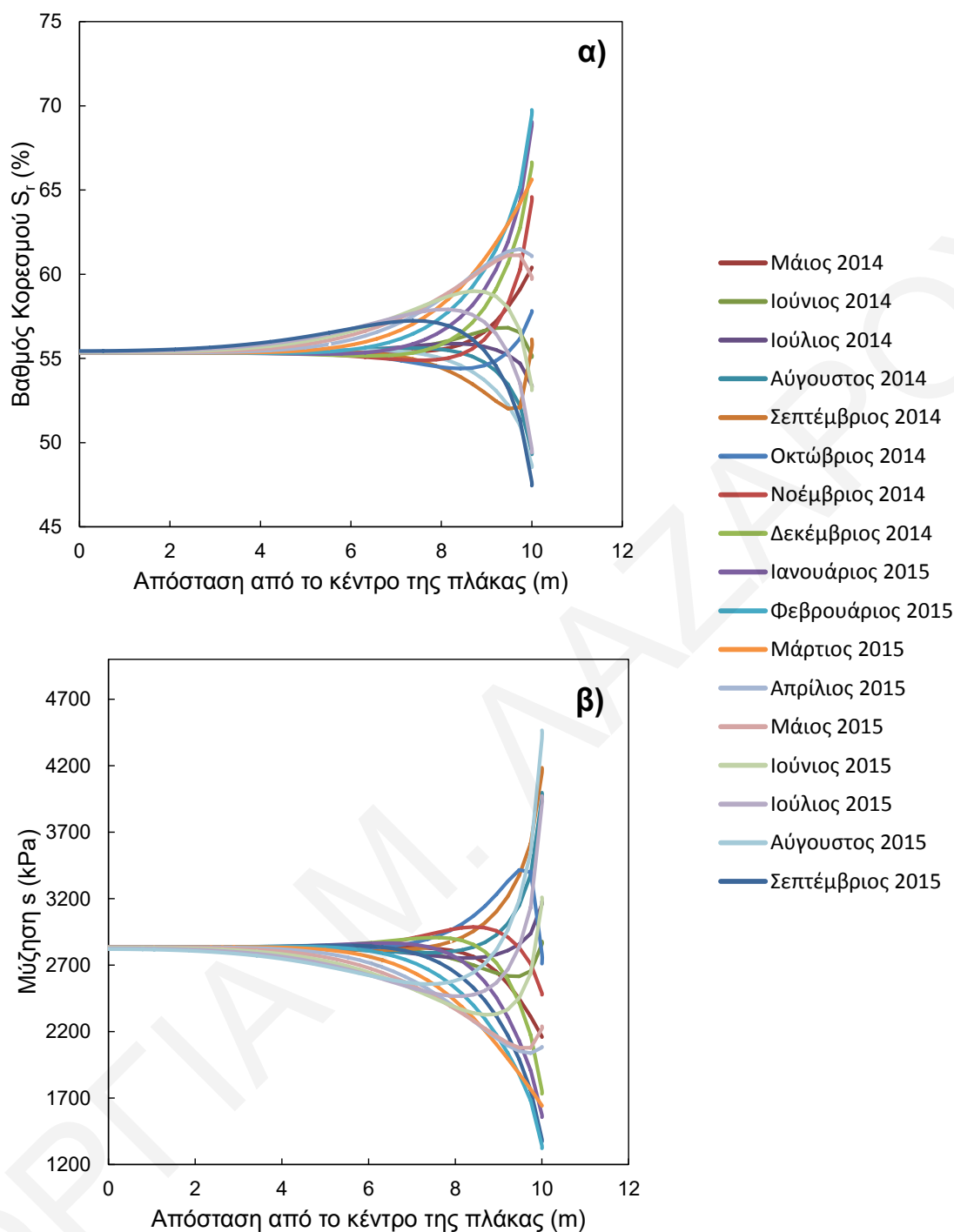
Σχήμα Γ.40: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.



Σχήμα Γ.41: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.

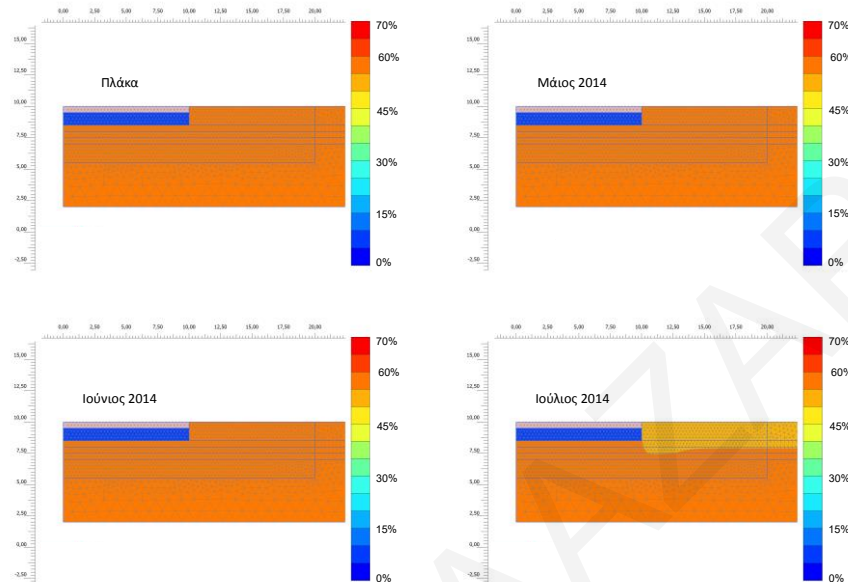


Σχήμα Γ.42: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2015 έως το τέλος Σεπτεμβρίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.

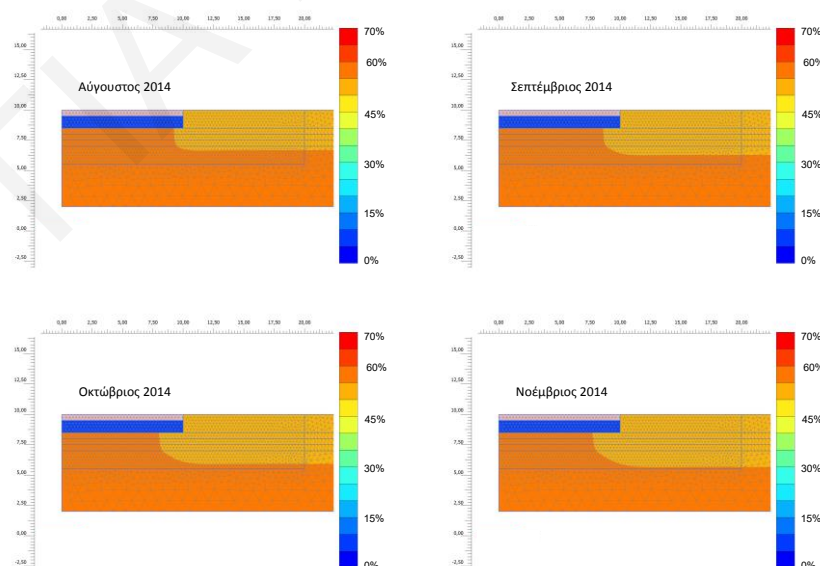


Σχήμα Γ.43: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_l=-5$, προφίλ διαπερατότητας Γ και $d=0.5m$.

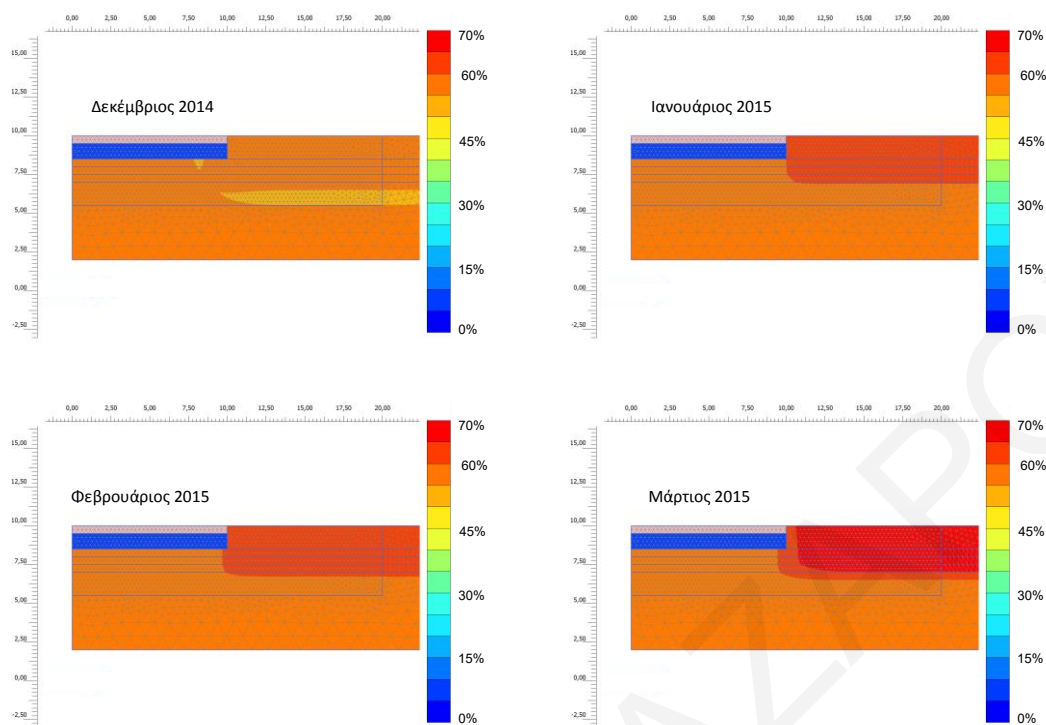
Γ8. Αποτελέσματα αναλύσεων χωρίς υδροφόρο ορίζοντα με παραμέτρους $g_a=0.016$ και $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, πάχος πλάκας $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους $1.0m$.



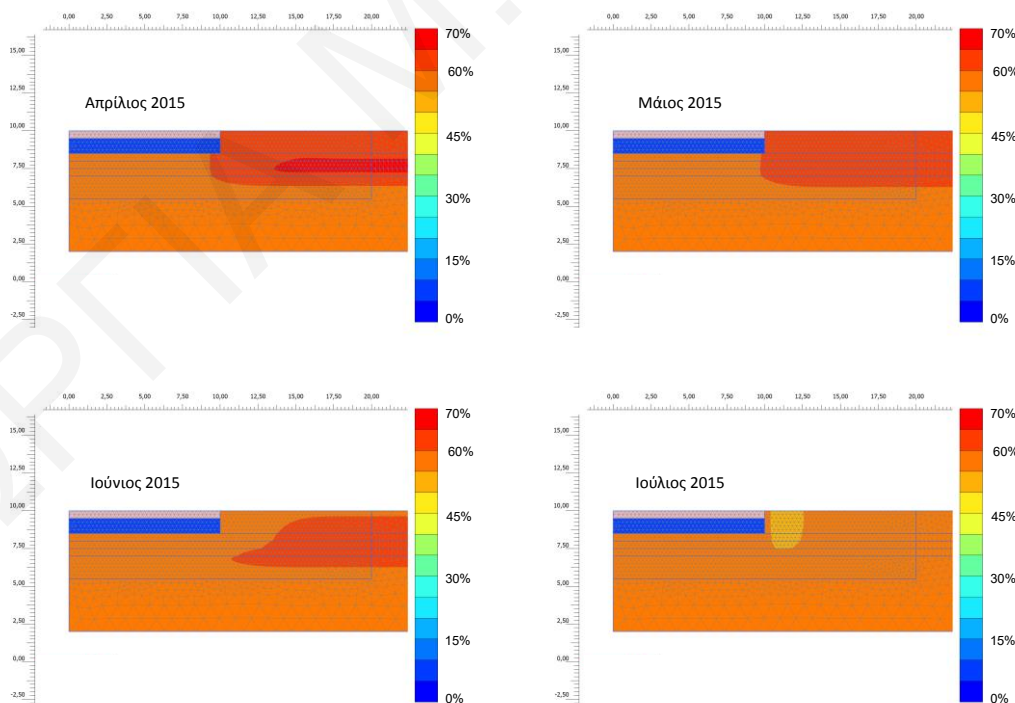
Σχήμα Γ.44: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από την φάση εγκατάστασης της πλάκας θεμελίωσης έως το τέλος Ιουλίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους $1.0m$.



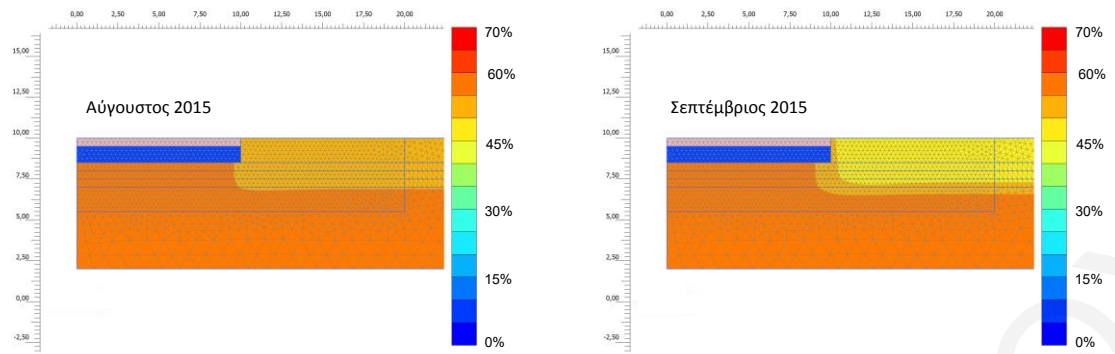
Σχήμα Γ.45: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Αύγουστο 2014 έως το τέλος Νοεμβρίου 2014 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους $1.0m$.



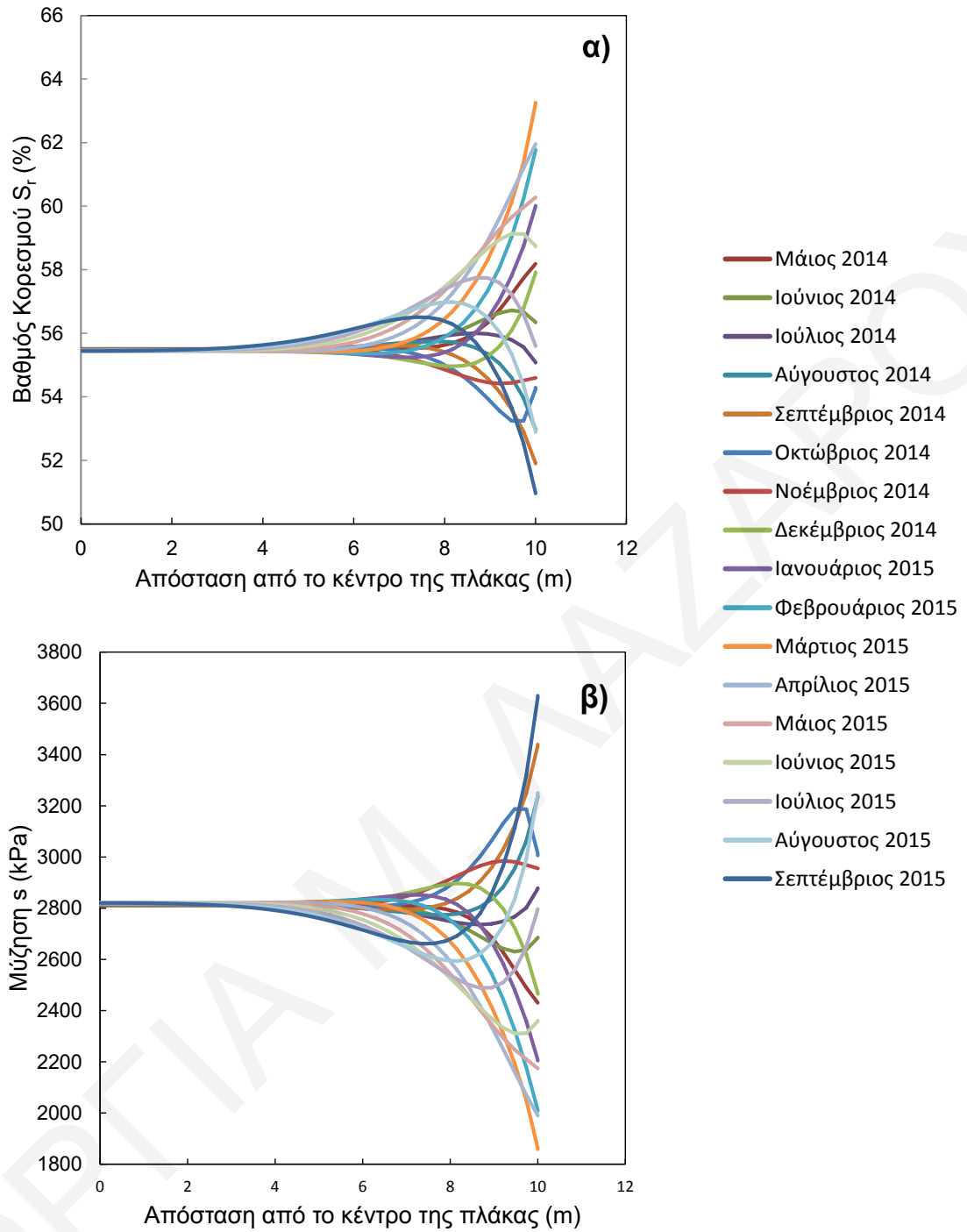
Σχήμα Γ.46: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Δεκέμβριο 2014 έως το τέλος Μαρτίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους 1.0m.



Σχήμα Γ.47: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού από τον Απρίλιο 2015 έως το τέλος Ιουλίου 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους 1.0m.



Σχήμα Γ.48: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού τον Αύγουστο 2015 και τον Σεπτέμβριο 2015 από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A, $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους 1.0m.



Σχήμα Γ.49: Εξέλιξη της κατανομής α) βαθμού κορεσμού και β) μύζησης με τον χρόνο κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ εδάφους και πλάκας θεμελίωσης από την ανάλυση χωρίς υδροφόρο με $g_a=0.016$, $g_i=-5$, προφίλ διαπερατότητας A , $d=0.5m$ και αντικατάσταση φυσικού εδάφους με χονδρόκοκκο υλικό πάχους 1.0m.

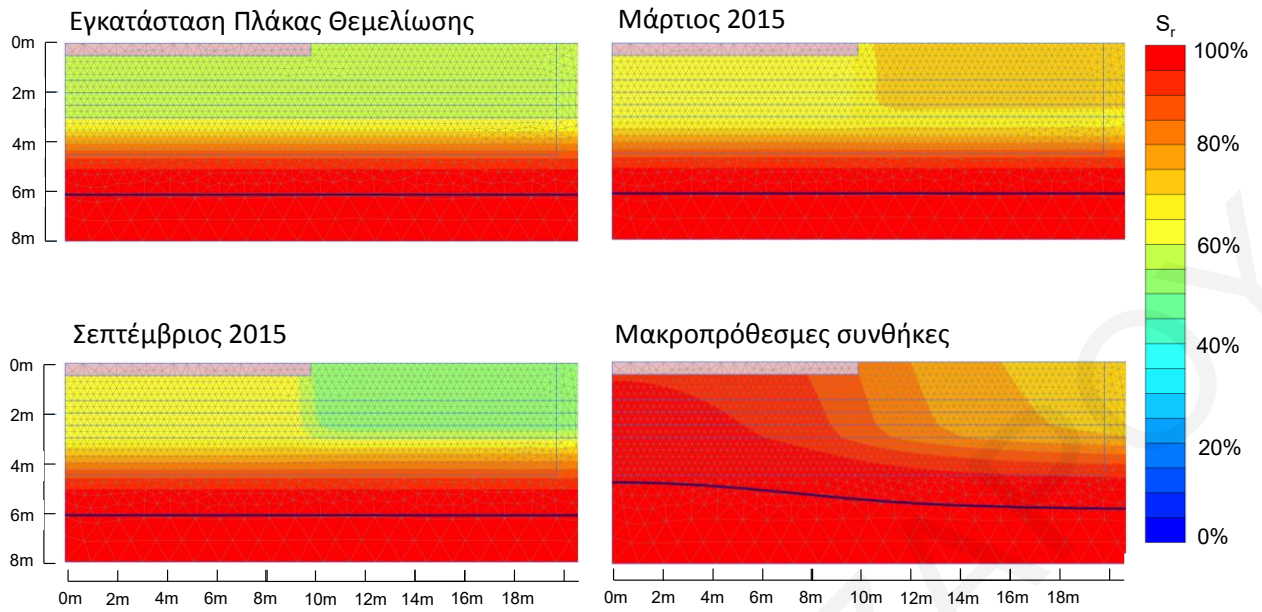
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΓΕΝΙΚΗ ΚΟΙΤΟΣΤΡΩΣΗ

Πίνακας Δ.1: Κατάλογος παραμετρικών αναλύσεων ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis.

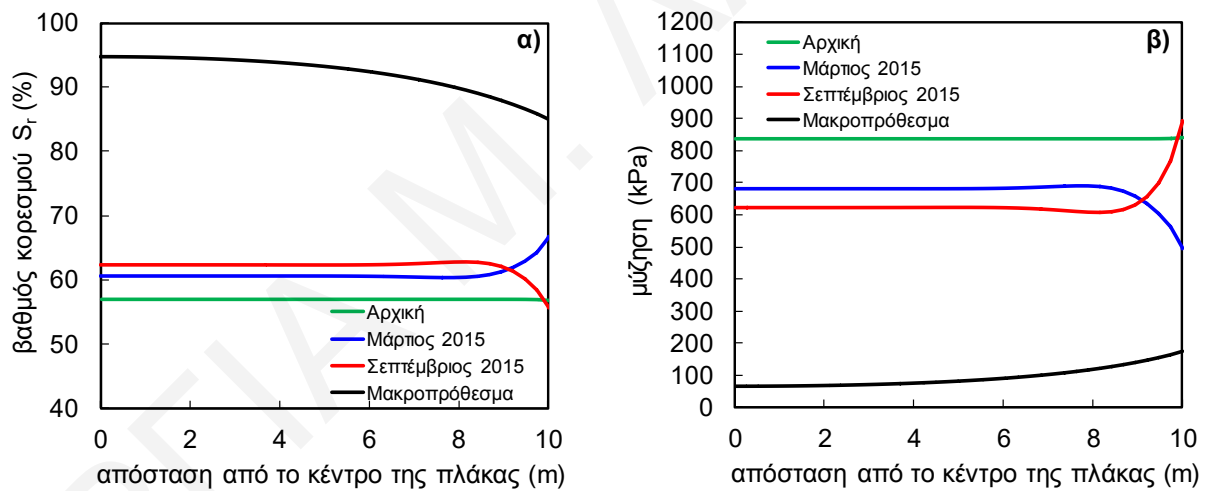
Αριθμός ανάλυσης	g_a	g_l	Προφίλ διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Χαλίκι	Προ- διαβροχή	Αξονοσυμμετρική	Επίπεδης Παραμόρφωσης	Υδροφόρος Ορίζοντας
1	0.05	-5	A	0.5			√		√
2	0.05	-5	A	0.5			√		
3	0.05	-5	A	0.5		√	√		
4	0.005	-5	A	0.5			√		√
5	0.005	-5	A	0.5			√		
6	0.005	-5	A	0.5		√	√		
7	0.016	-7	A	0.5			√		
8	0.016	-7	A	0.5		√	√		
9	0.016	-2	A	0.5			√		
10	0.016	-2	A	0.5		√	√		
11	0.016	-5	B	0.5			√		√
12	0.016	-5	B	0.5	1.0m		√		
13	0.016	-5	B	0.5			√		
14	0.016	-5	B	0.5		√	√		
15	0.016	-5	A	0.5			√		√
16	0.016	-5	A	0.5				√	√
17	0.016	-5	A	0.5		√	√		√
18	0.016	-5	A	2.0			√		√
19	0.016	-5	A	0.5	2.0m		√		√
20	0.016	-5	A	0.5	1.0m		√		

Πίνακας Δ.1 (συνέχεια): Κατάλογος παραμετρικών αναλύσεων ροής που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis

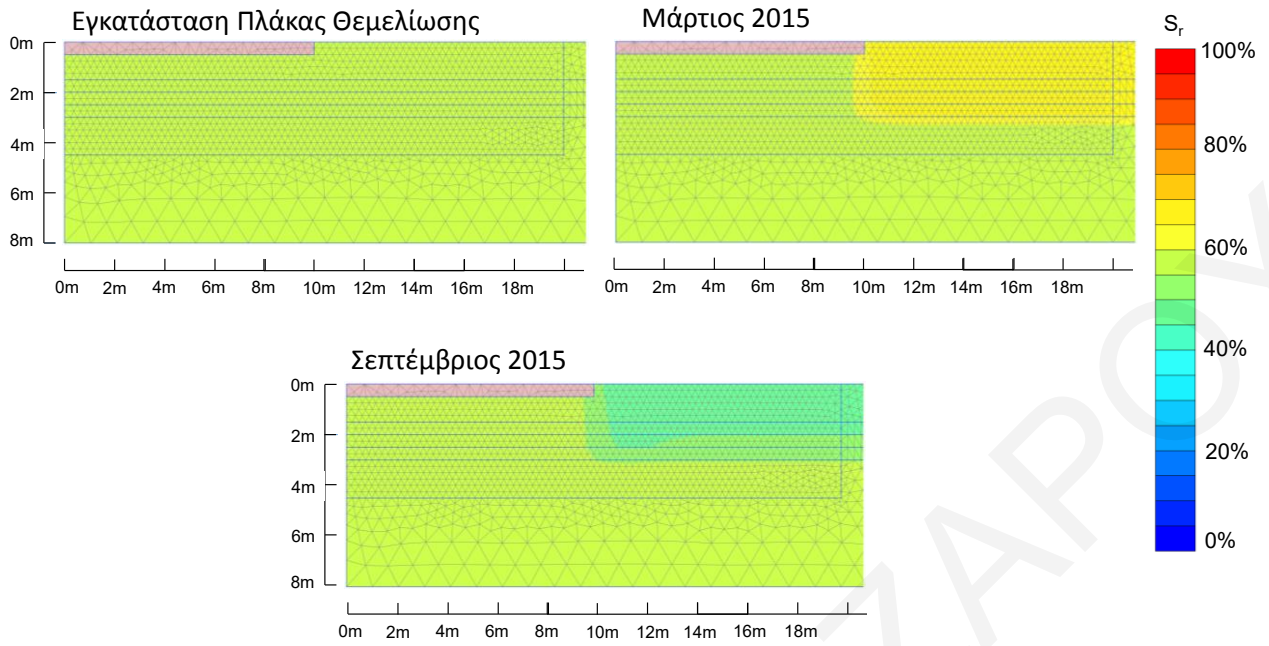
Αριθμός ανάλυσης	ξ_a	ξ_l	Προφίλ διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Χαλίκι	Προ- διαβροχή	Αξονοσυμμετρική	Επίπεδης Παραμόρφωσης	Υδροφόρος Ορίζοντας
21	0.016	-5	A	0.5	2.0m		√		
22	0.016	-5	A	0.5			√		
23	0.016	-5	A	0.5				√	
24	0.016	-5	A	0.5		√	√		
25	0.016	-5	A	1.0			√		
26	0.016	-5	A	2.0			√		
27	0.016	-5	Γ	0.5			√		√
28	0.016	-5	Γ	0.5	1.0m		√		
29	0.016	-5	Γ	0.5			√		
30	0.016	-5	Γ	0.5		√	√		
31	0.016	-5	Γ	1.0			√		
32	0.016	-5	Γ	2.0			√		



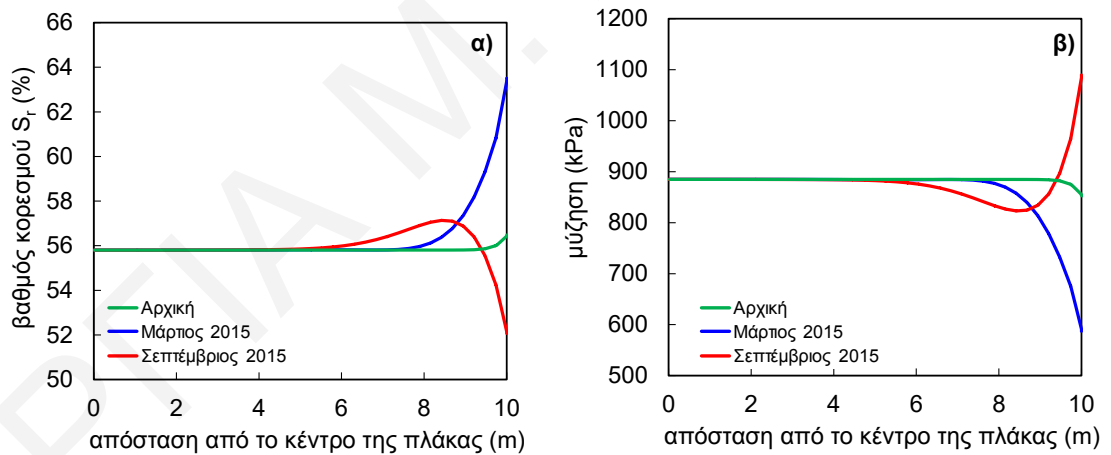
Σχήμα Δ.1: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 1.



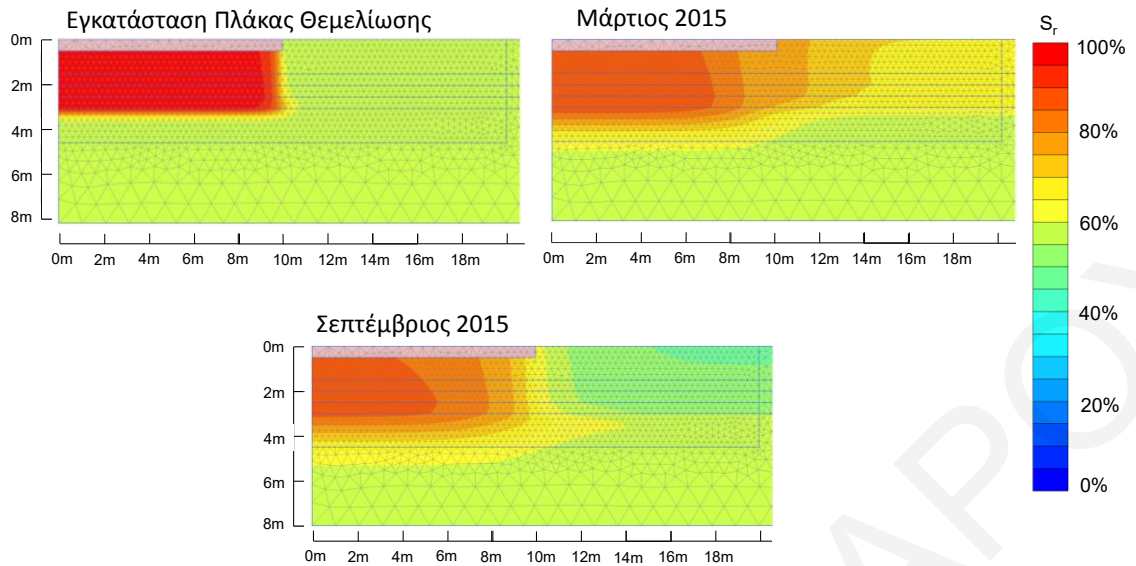
Σχήμα Δ.2: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 1.



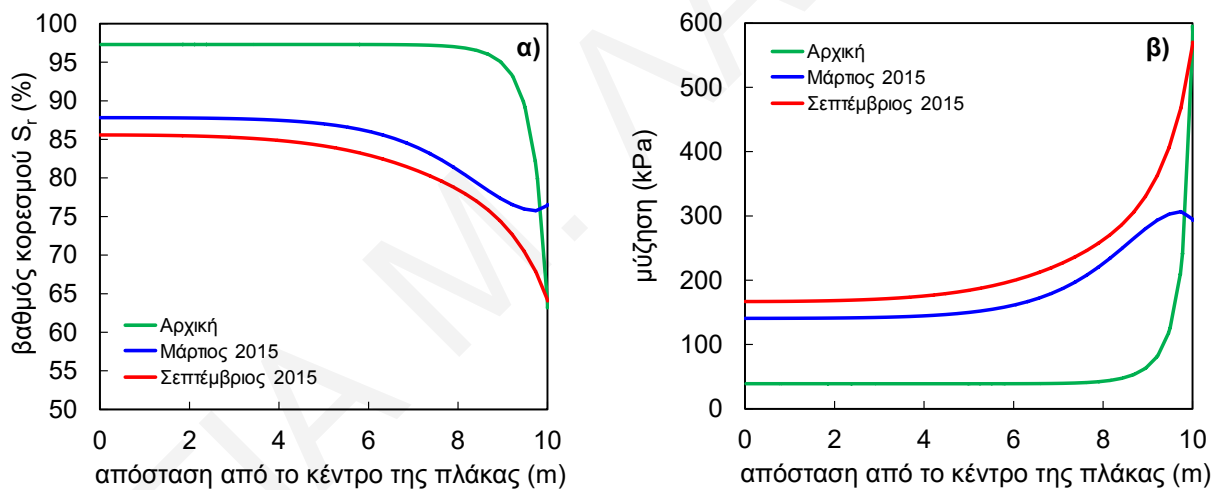
Σχήμα Δ.3: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 2.



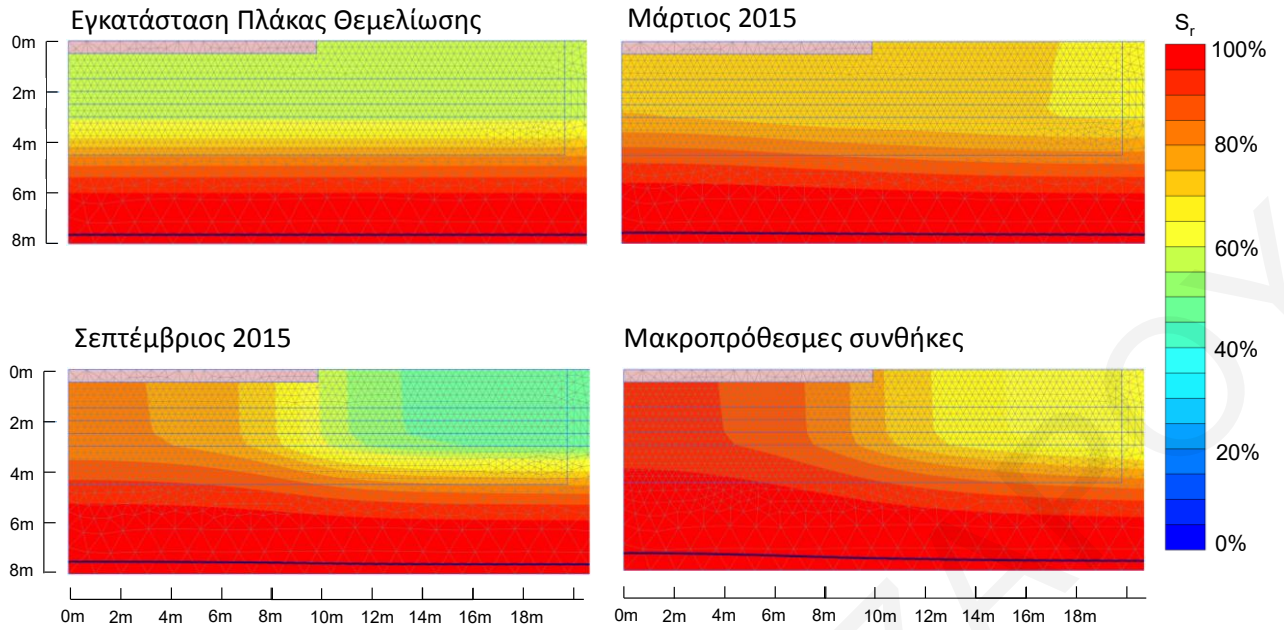
Σχήμα Δ.4: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 2.



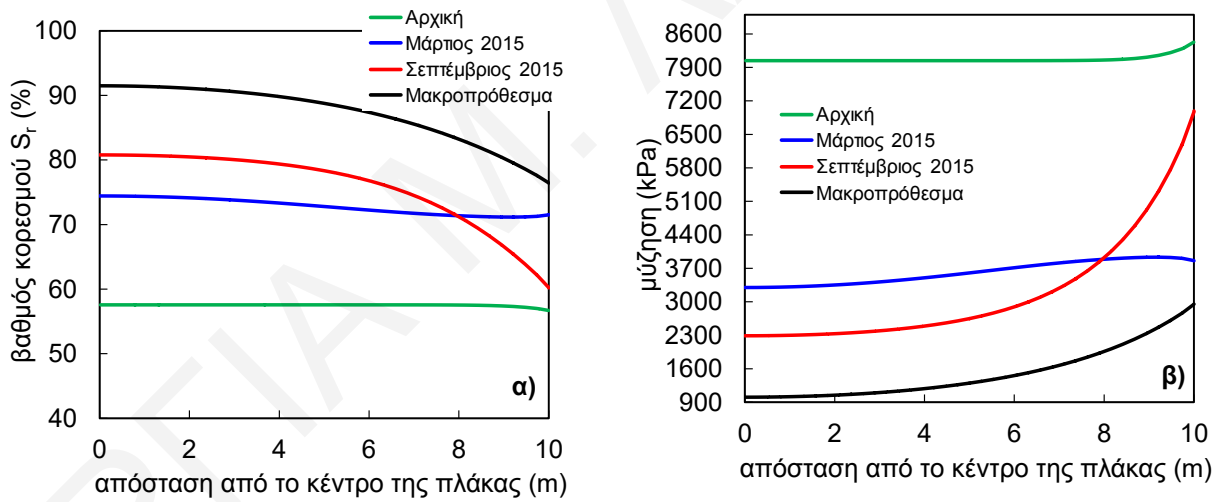
Σχήμα Δ.5: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 3.



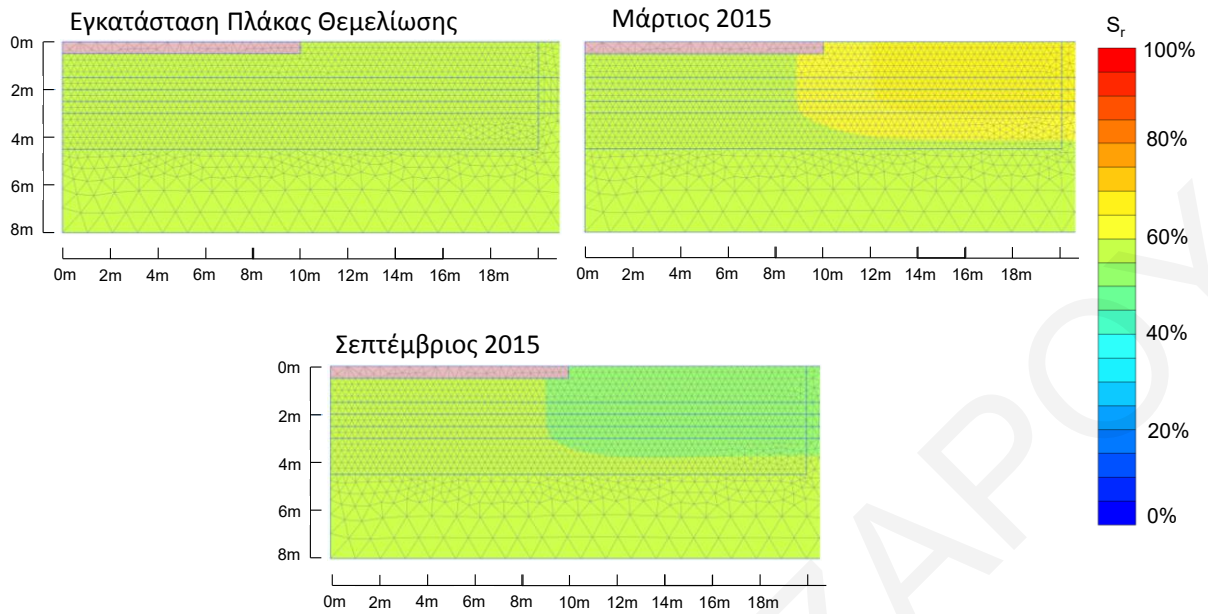
Σχήμα Δ.6: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 3.



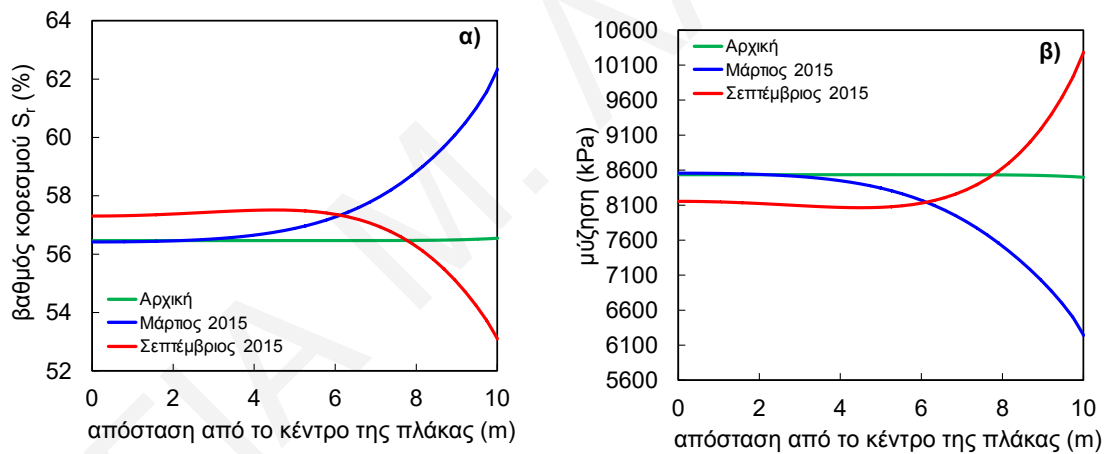
Σχήμα Δ.7: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 4.



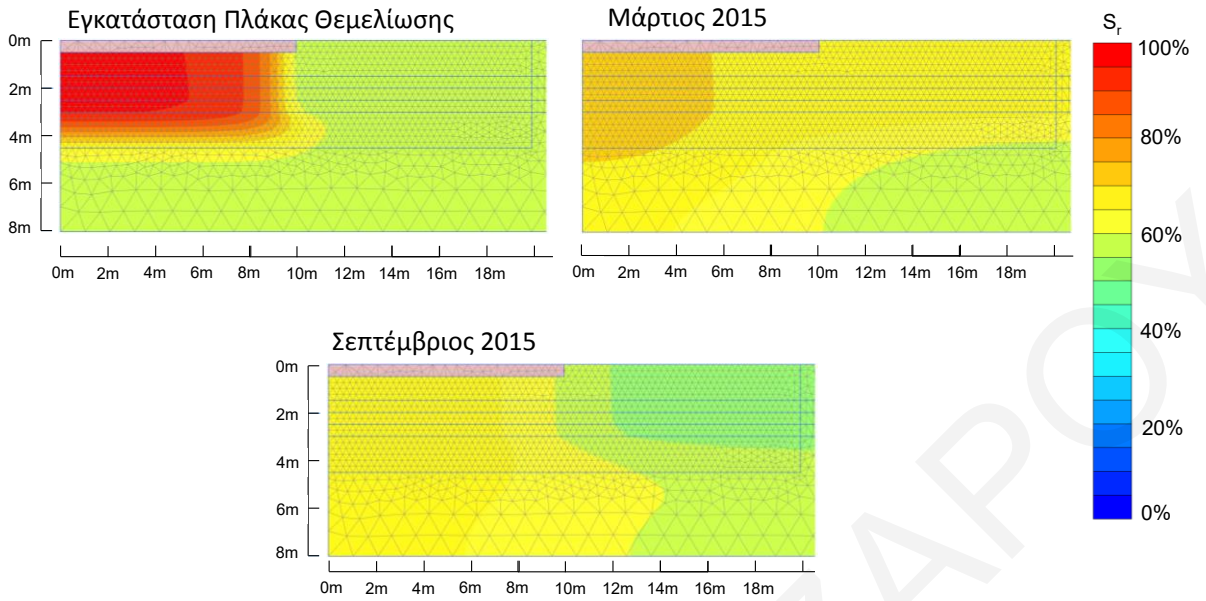
Σχήμα Δ.8: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 4.



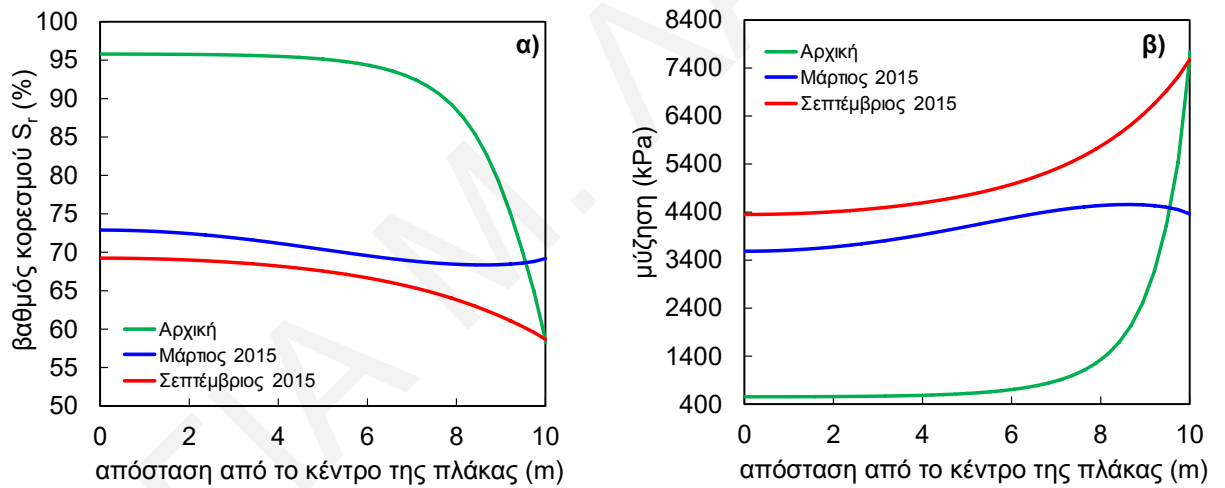
Σχήμα Δ.9: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 5.



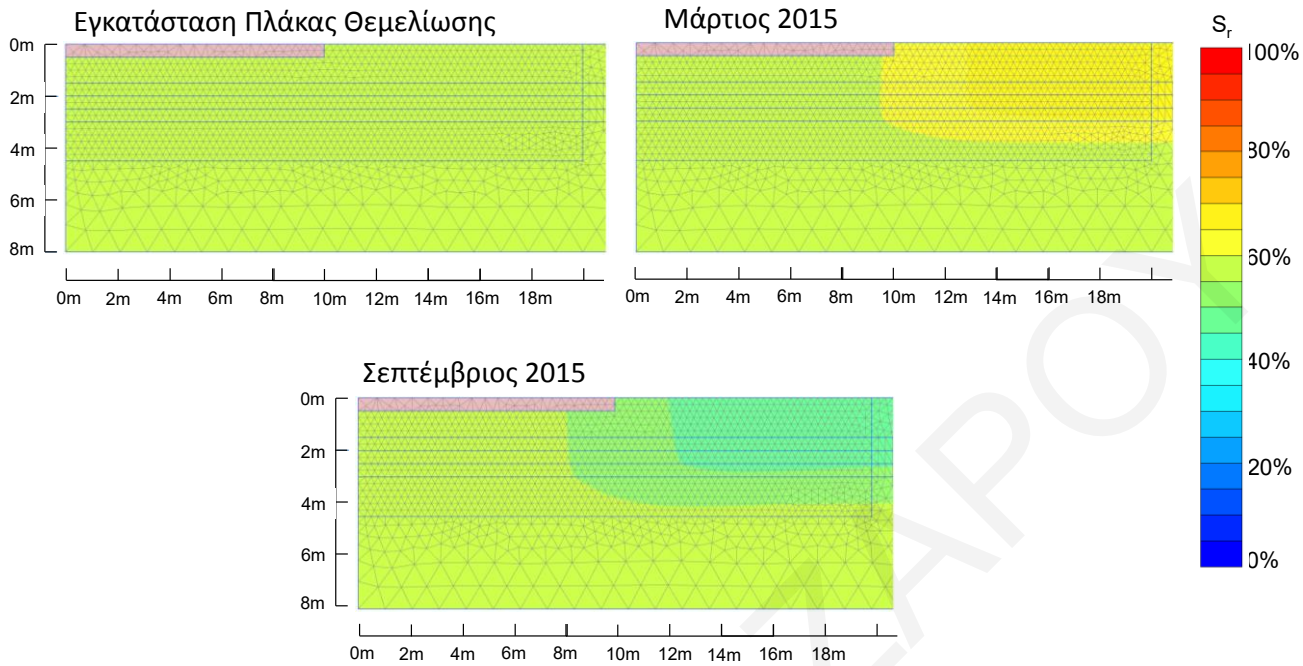
Σχήμα Δ.10: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 5.



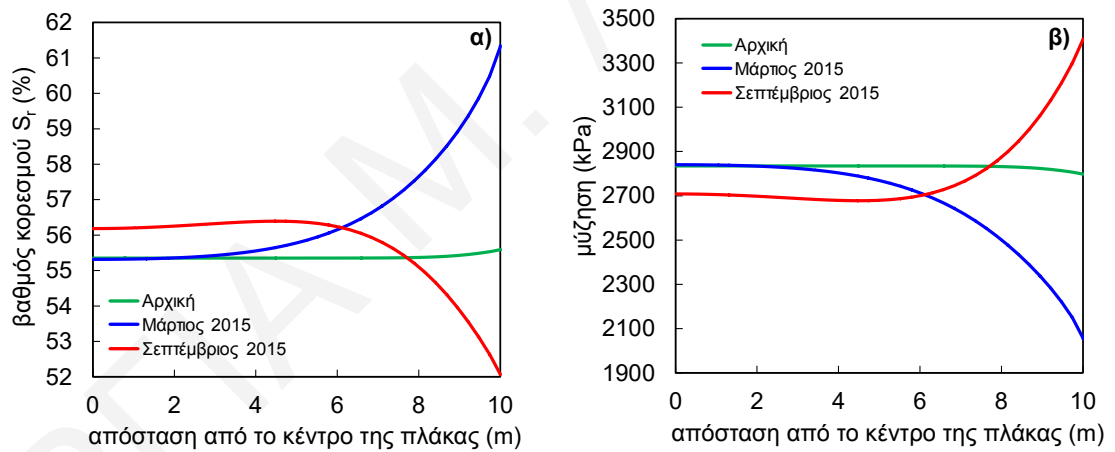
Σχήμα Δ.11: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 6.



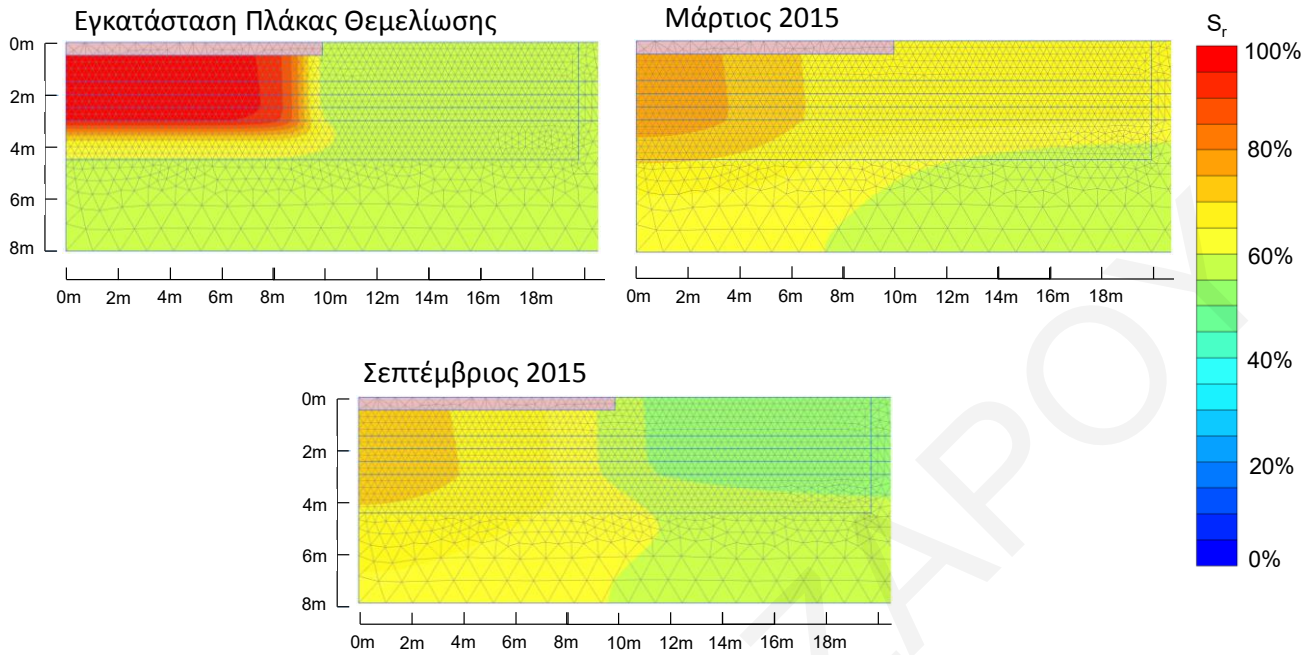
Σχήμα Δ.12: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 6.



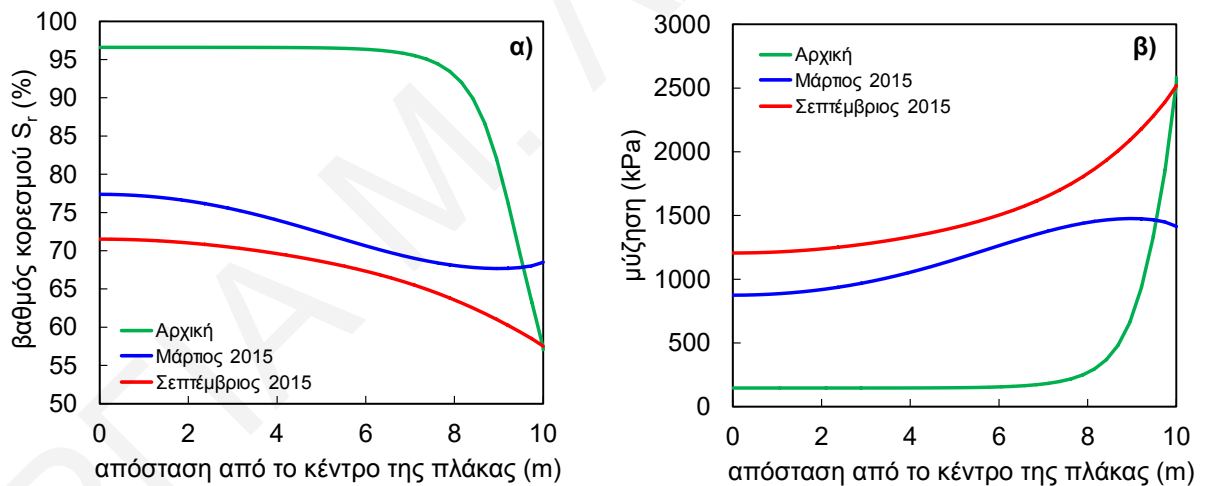
Σχήμα Δ.13: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 7.



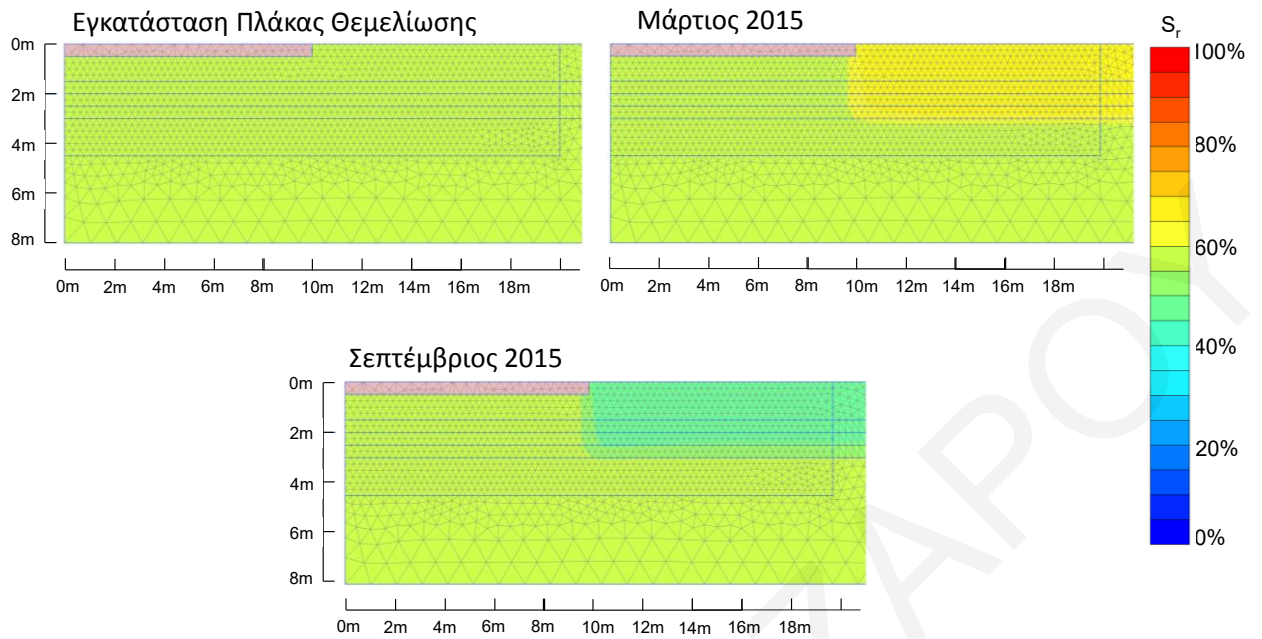
Σχήμα Δ.14: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 7.



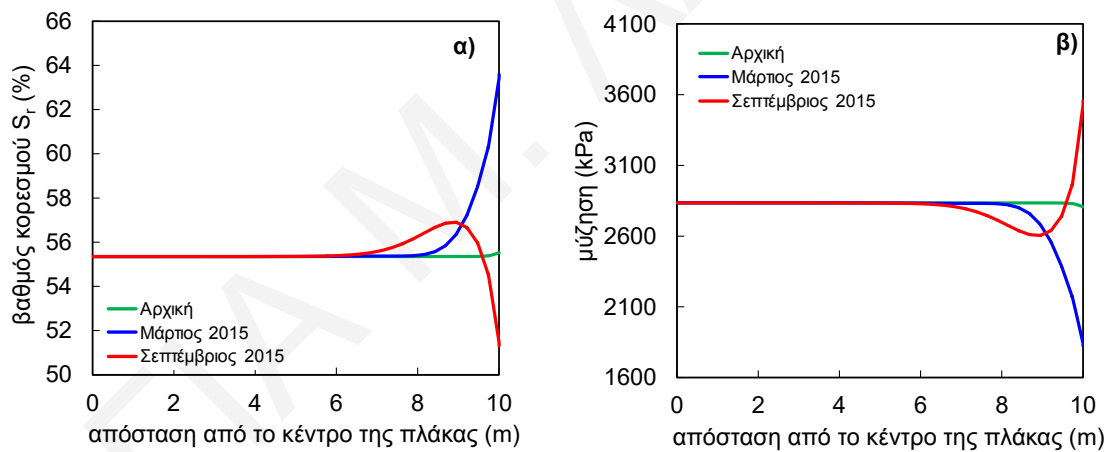
Σχήμα Δ.15: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 8.



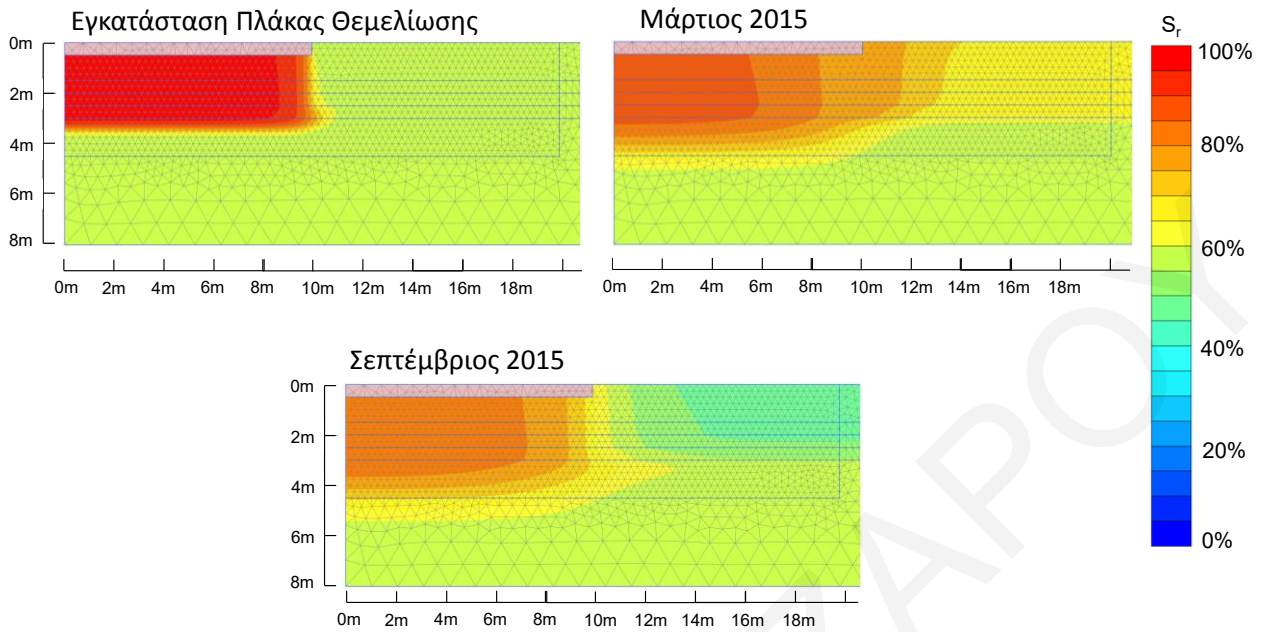
Σχήμα Δ.16: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 8.



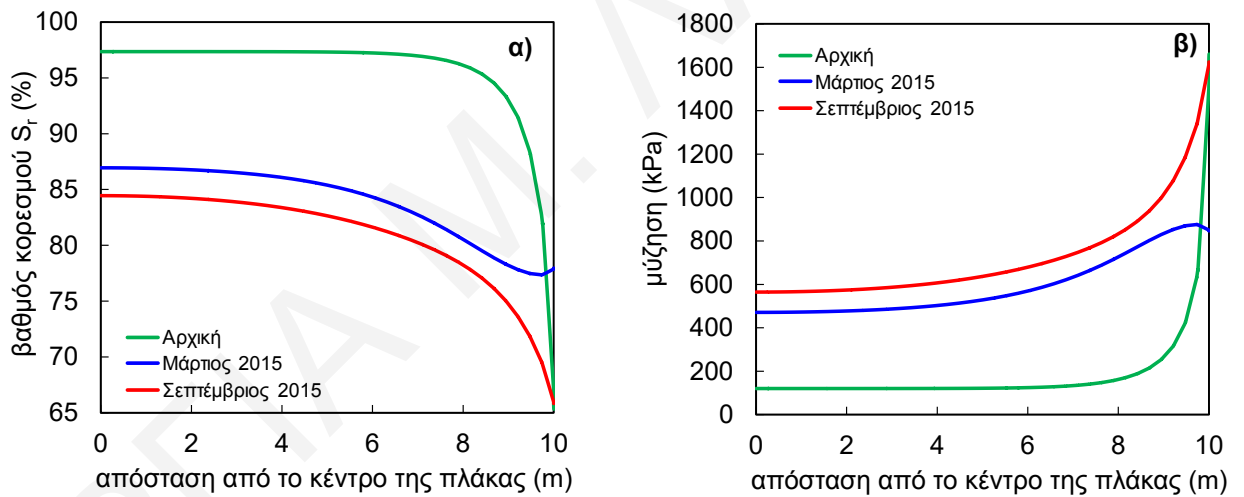
Σχήμα Δ.17: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 9.



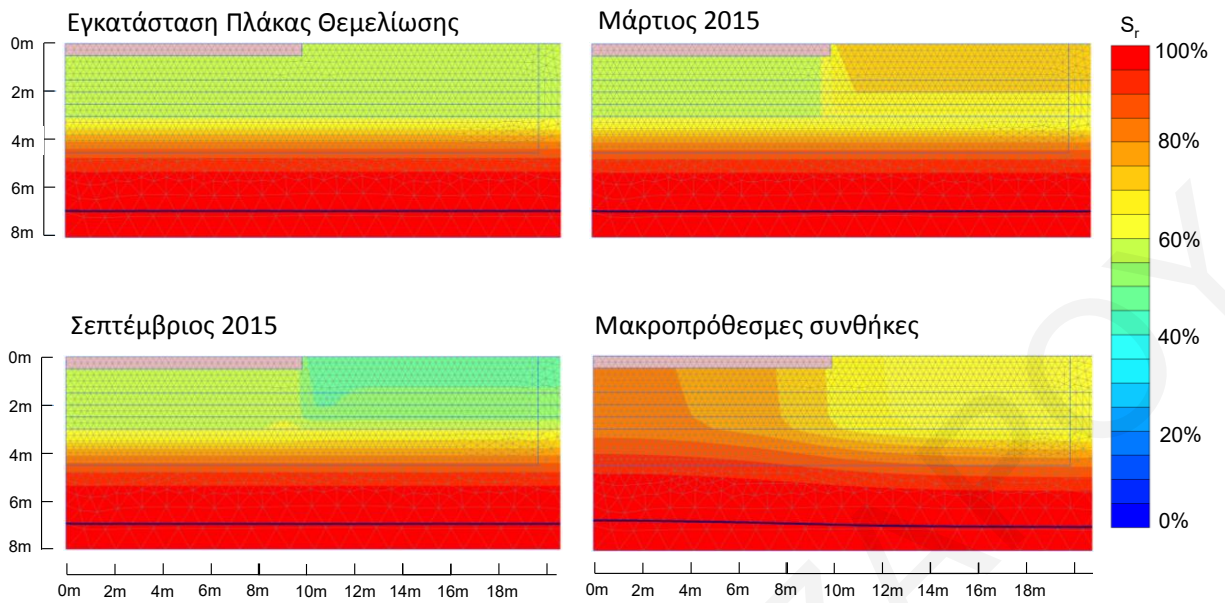
Σχήμα Δ.18: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 9.



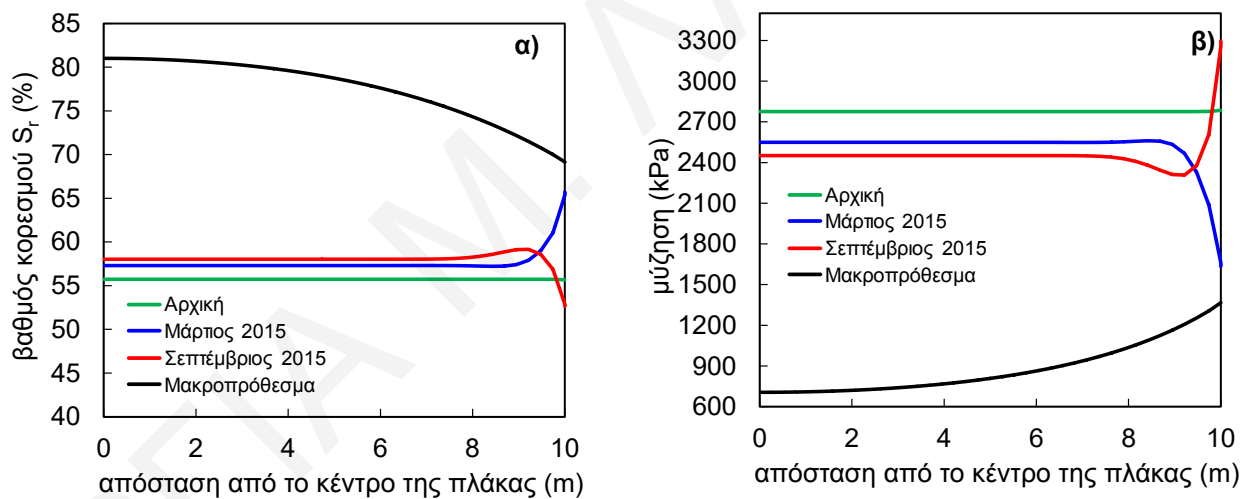
Σχήμα Δ.19: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 10.



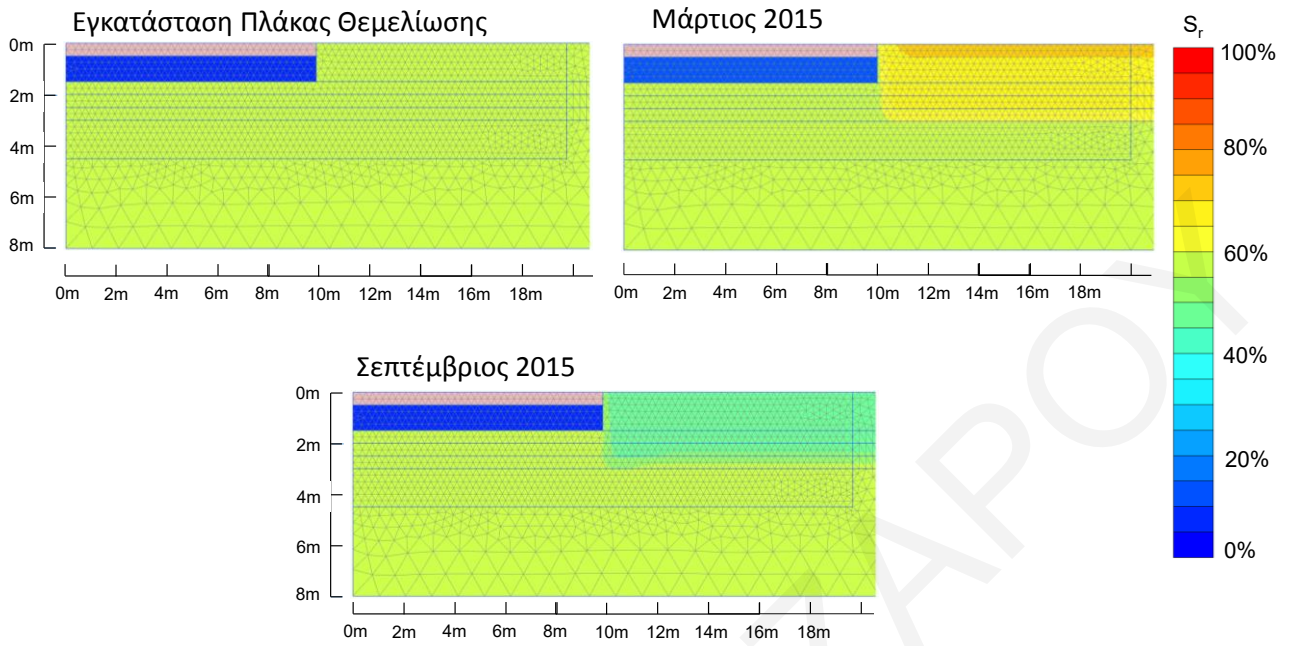
Σχήμα Δ.20: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 10.



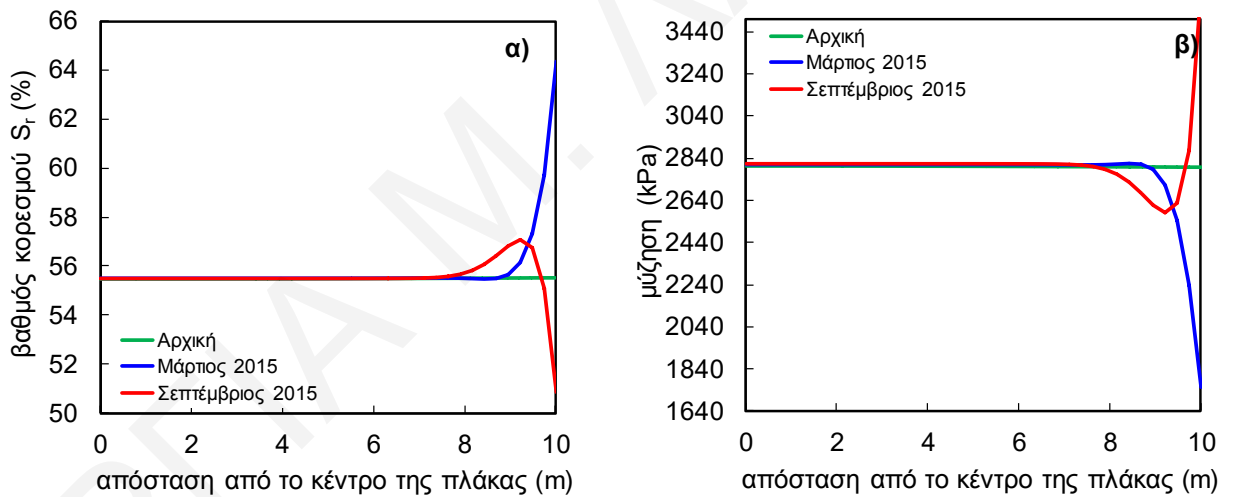
Σχήμα Δ.21: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 11.



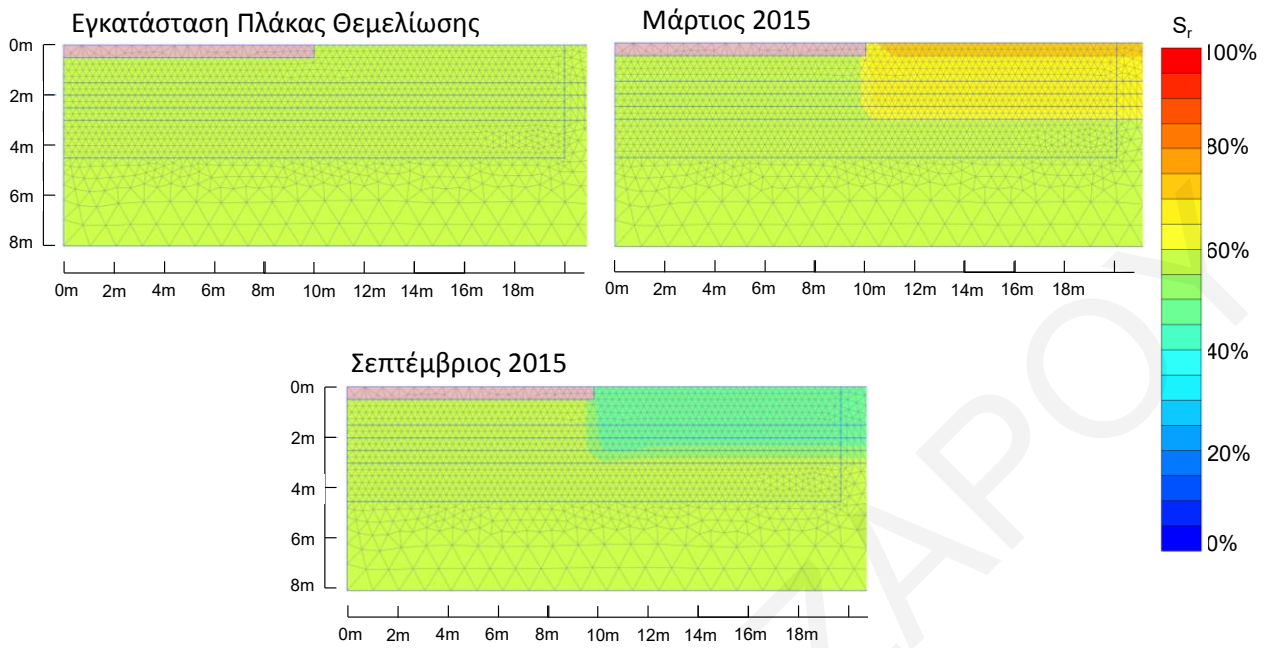
Σχήμα Δ.22: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 11.



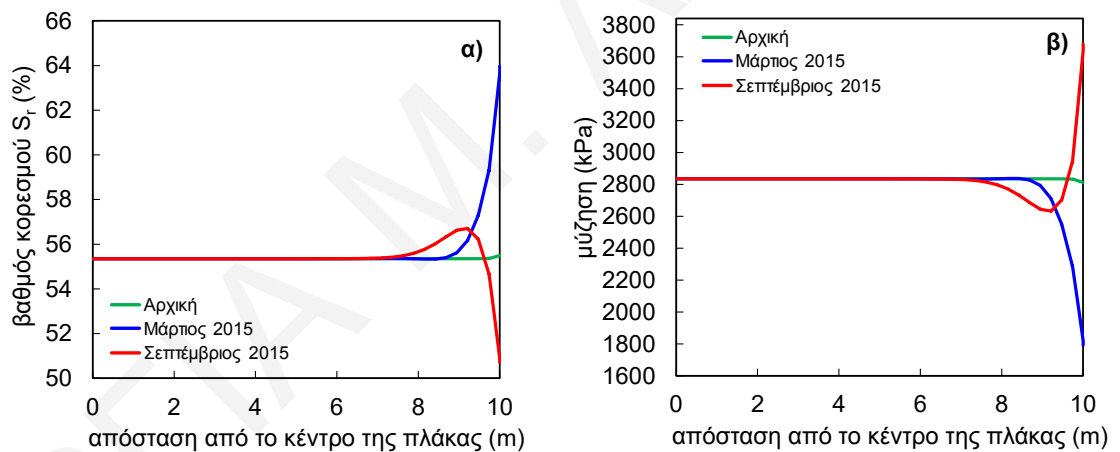
Σχήμα Δ.23: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 12.



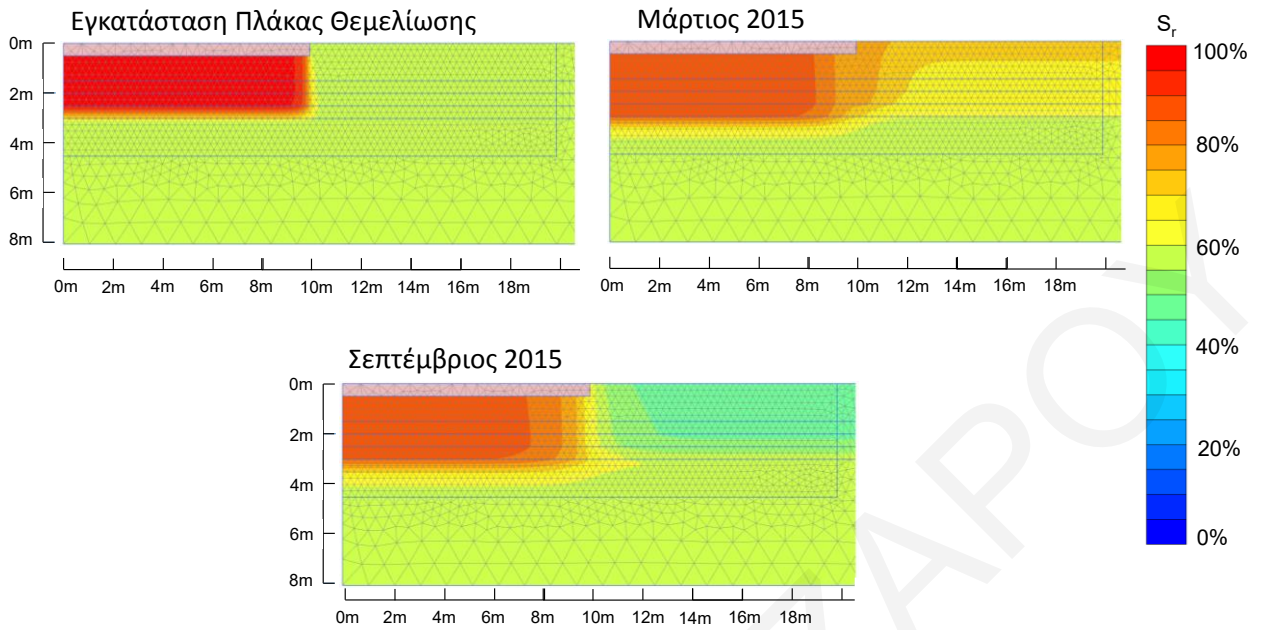
Σχήμα Δ.24: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 12.



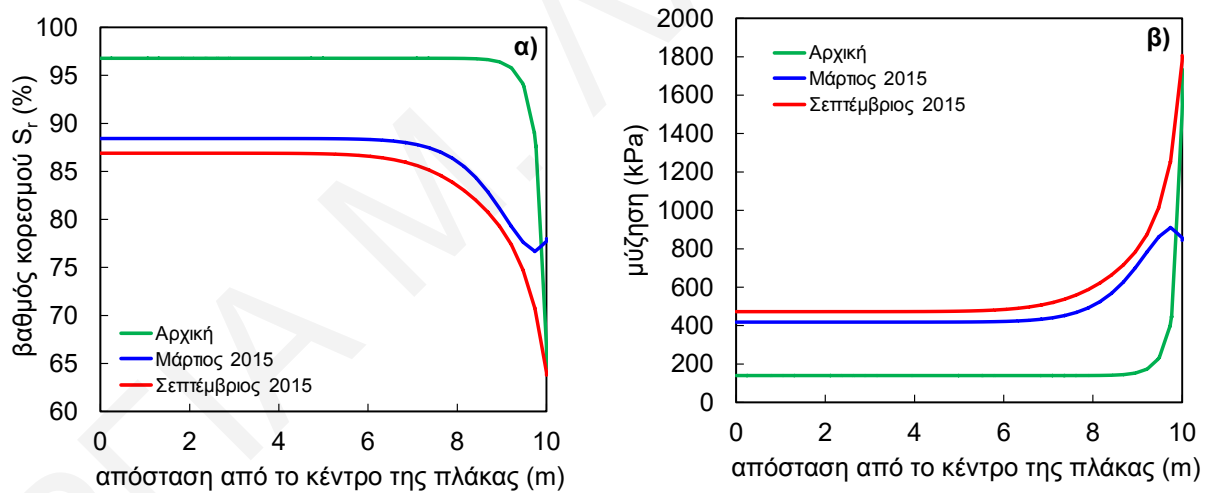
Σχήμα Δ.25: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 13.



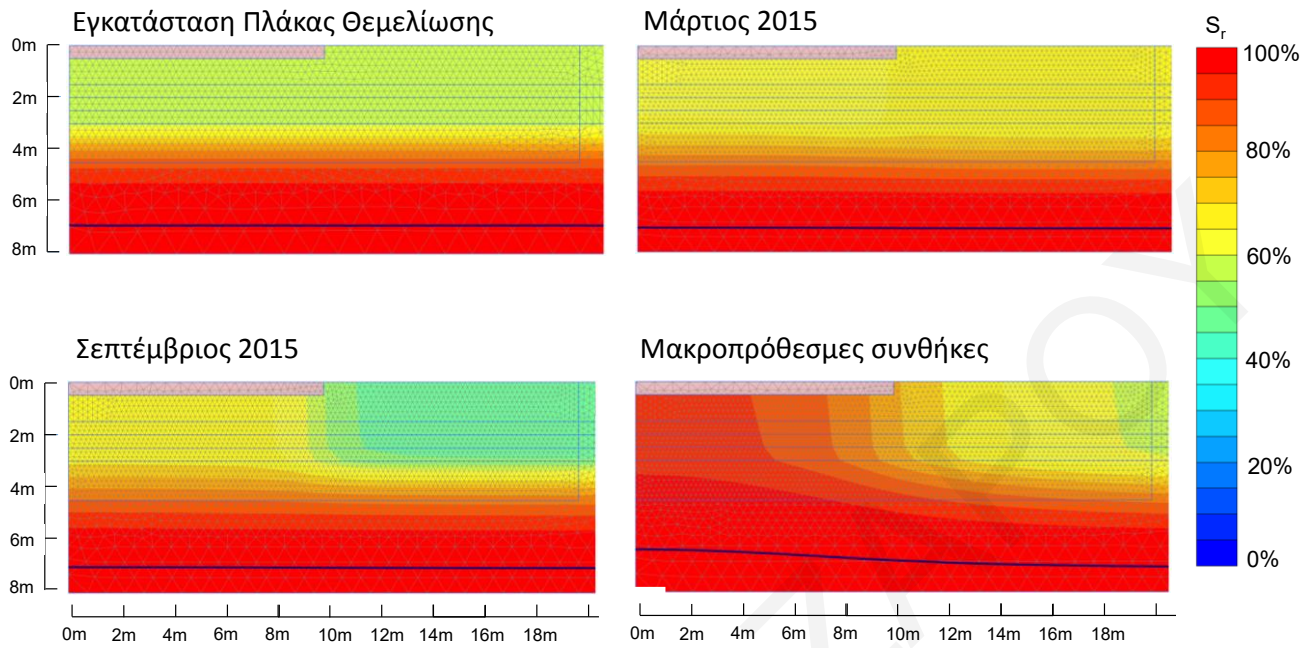
Σχήμα Δ.26: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 13.



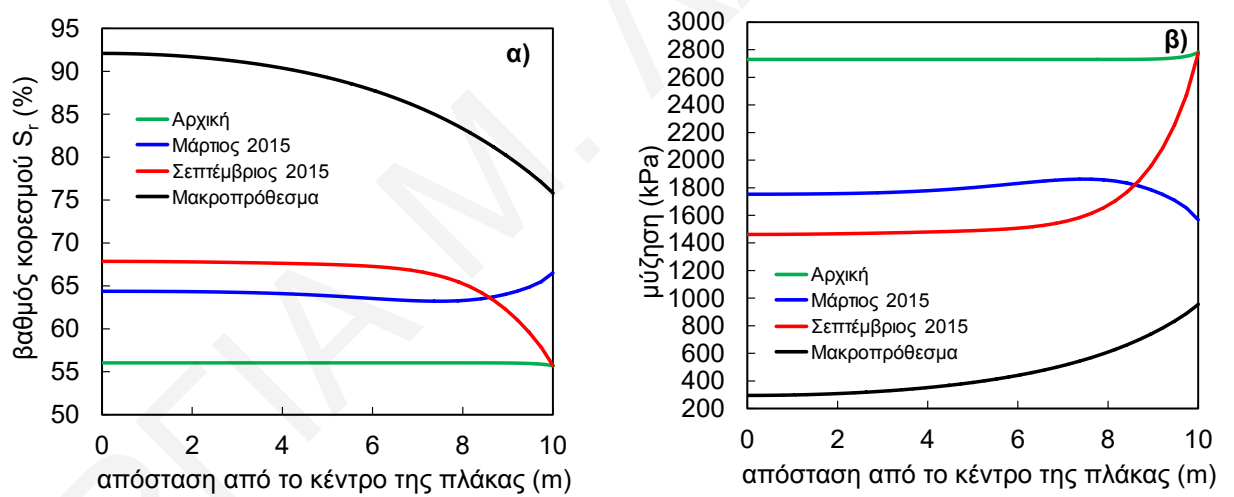
Σχήμα Δ.27: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 14.



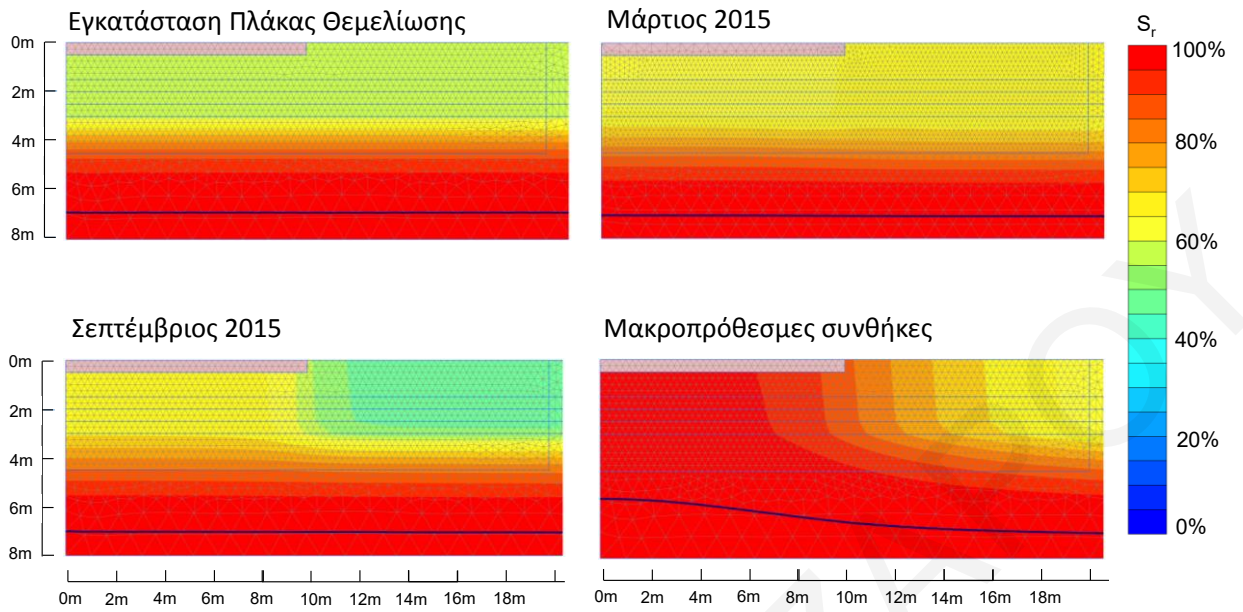
Σχήμα Δ.28: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 14.



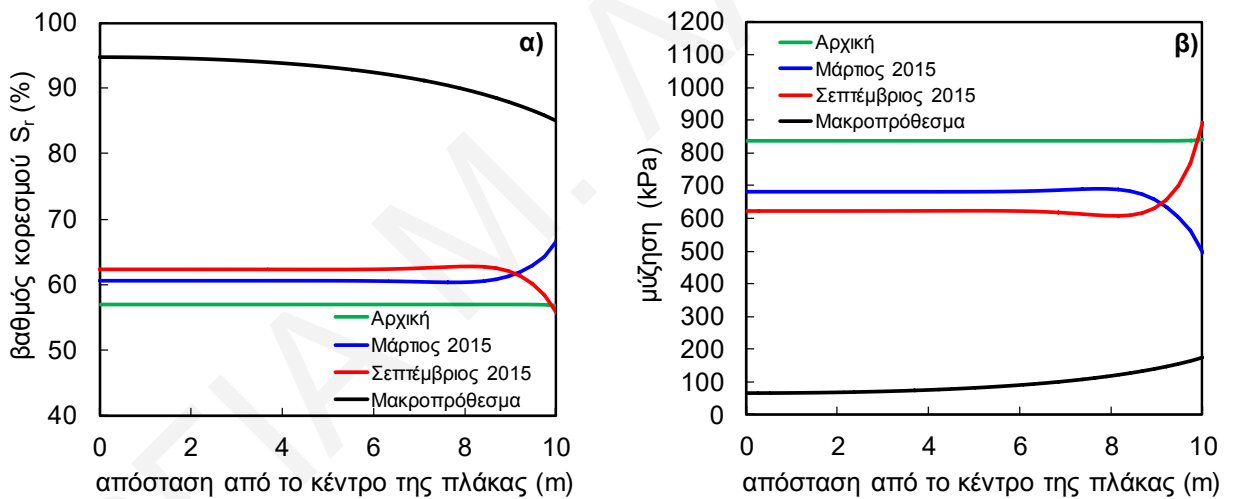
Σχήμα Δ.29: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 15.



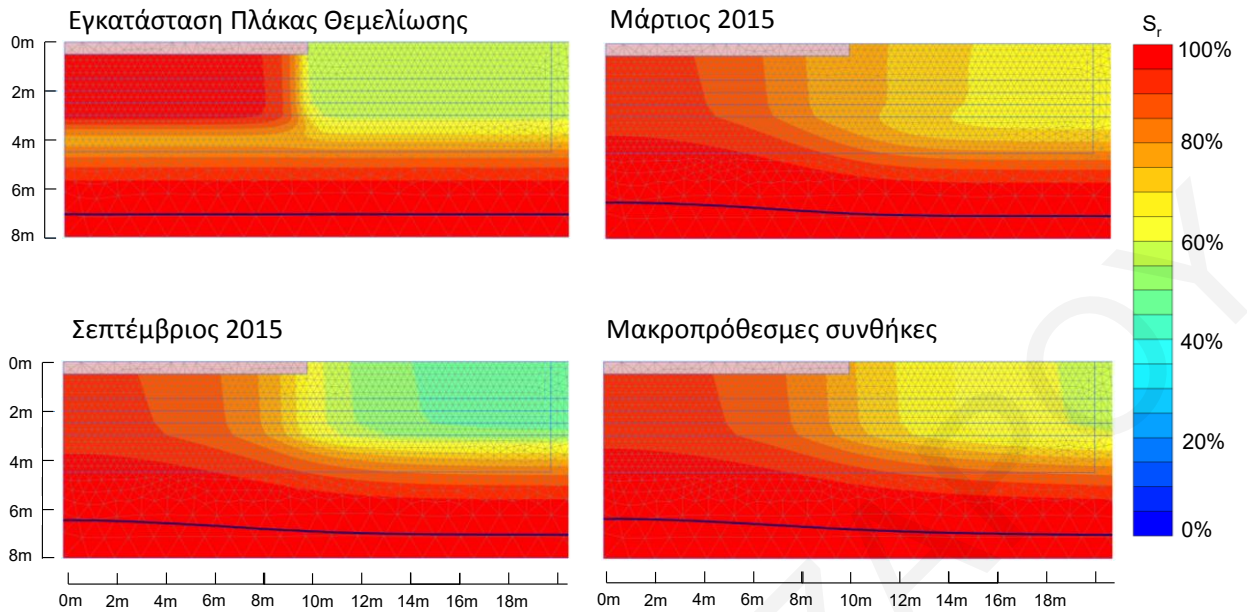
Σχήμα Δ.30: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 15.



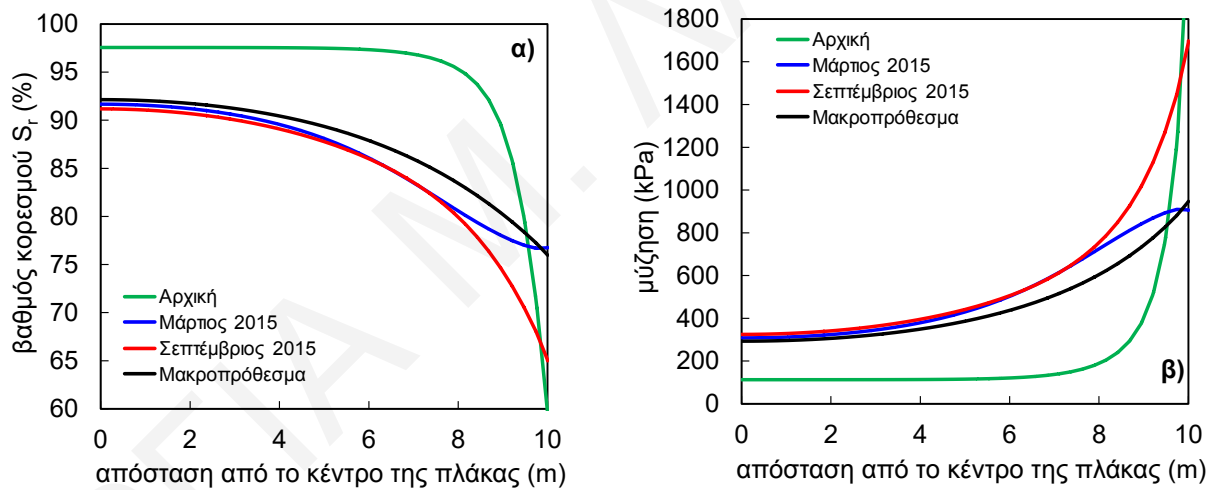
Σχήμα Δ.31: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 16.



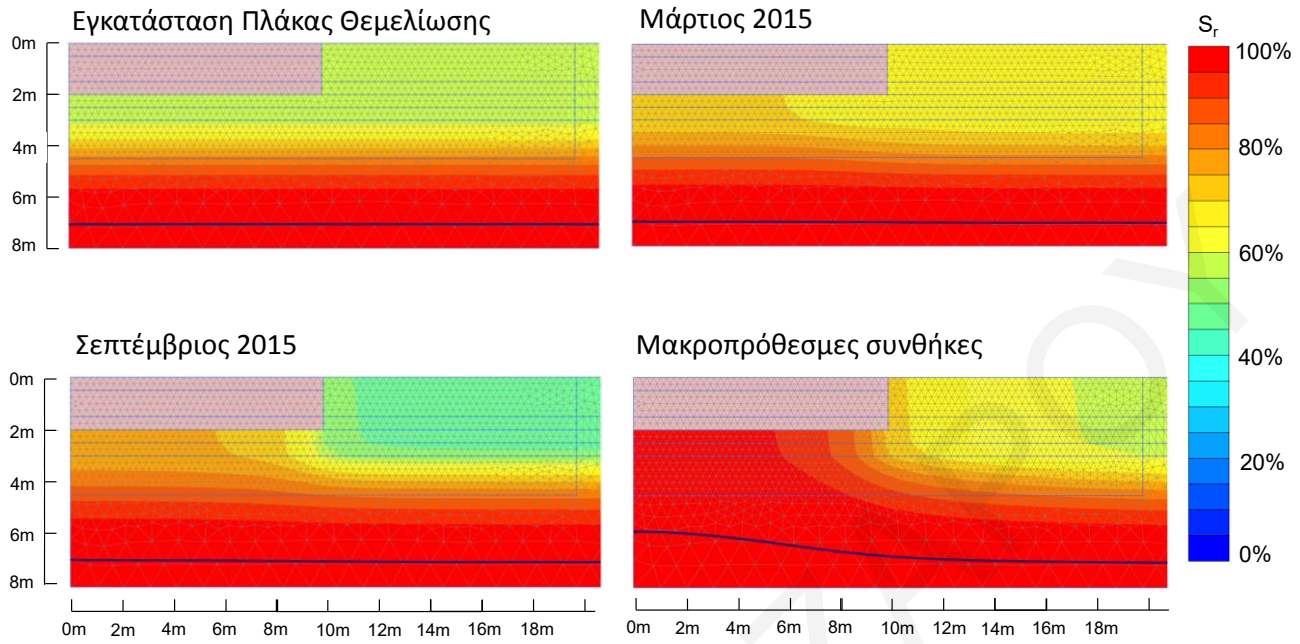
Σχήμα Δ.32: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 16.



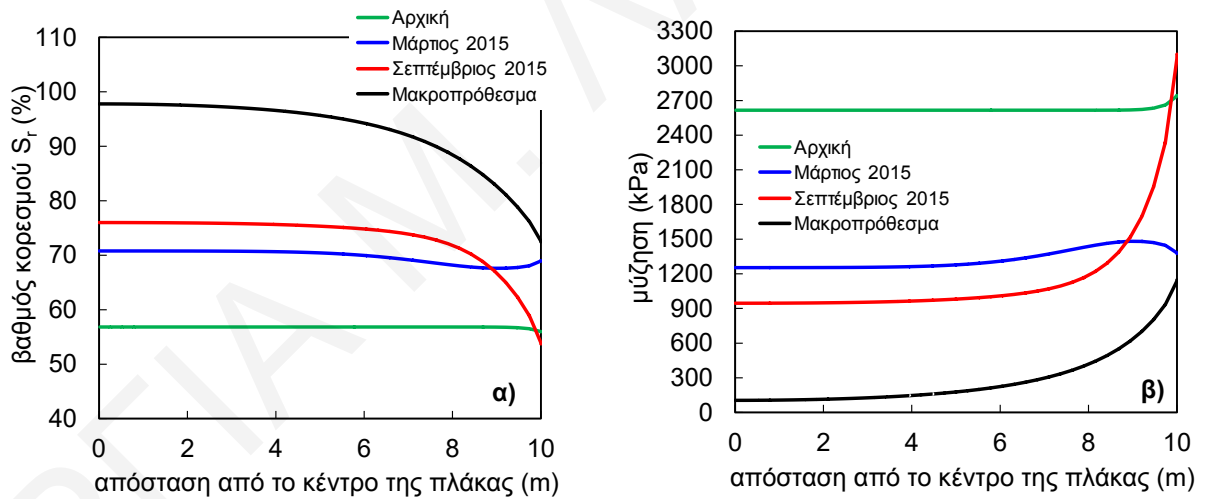
Σχήμα Δ.33: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 17.



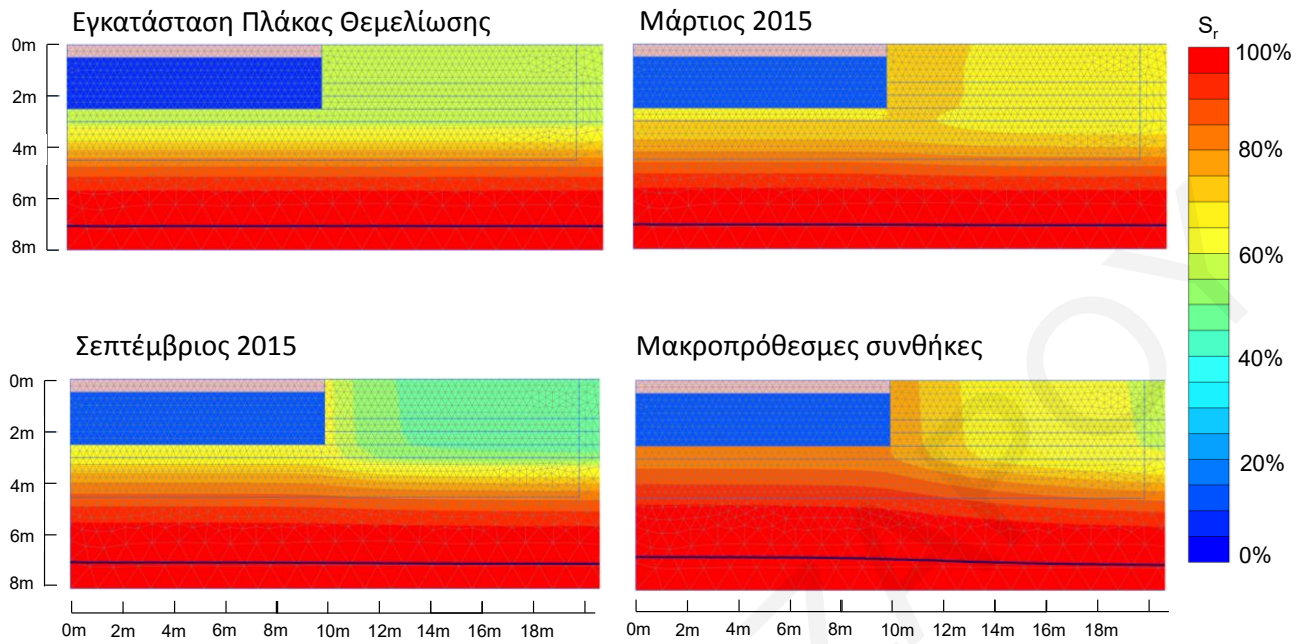
Σχήμα Δ.34: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 17.



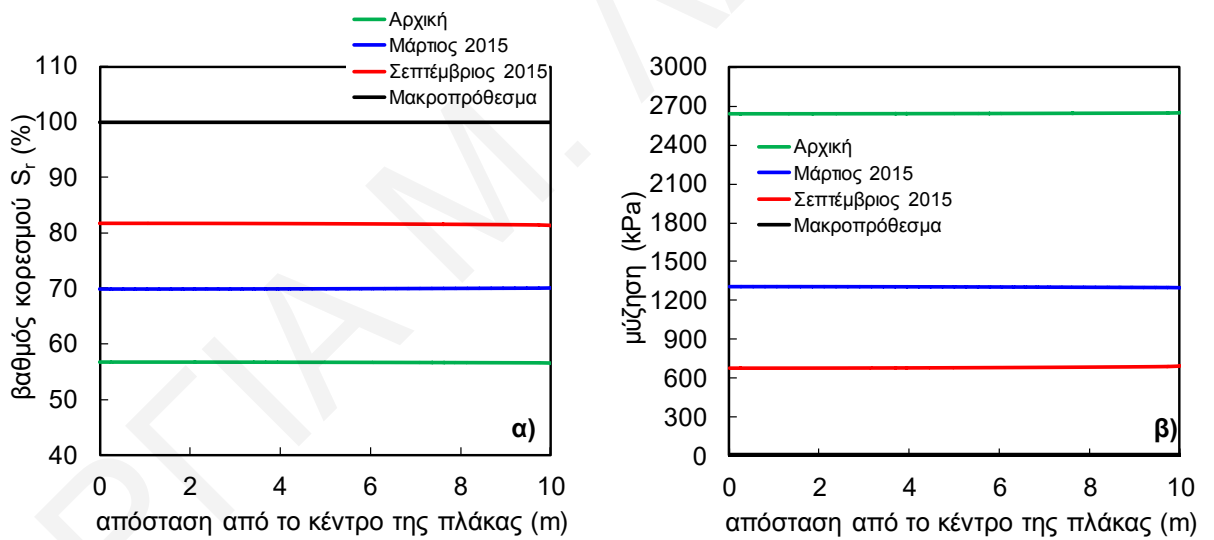
Σχήμα Δ.35: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 18.



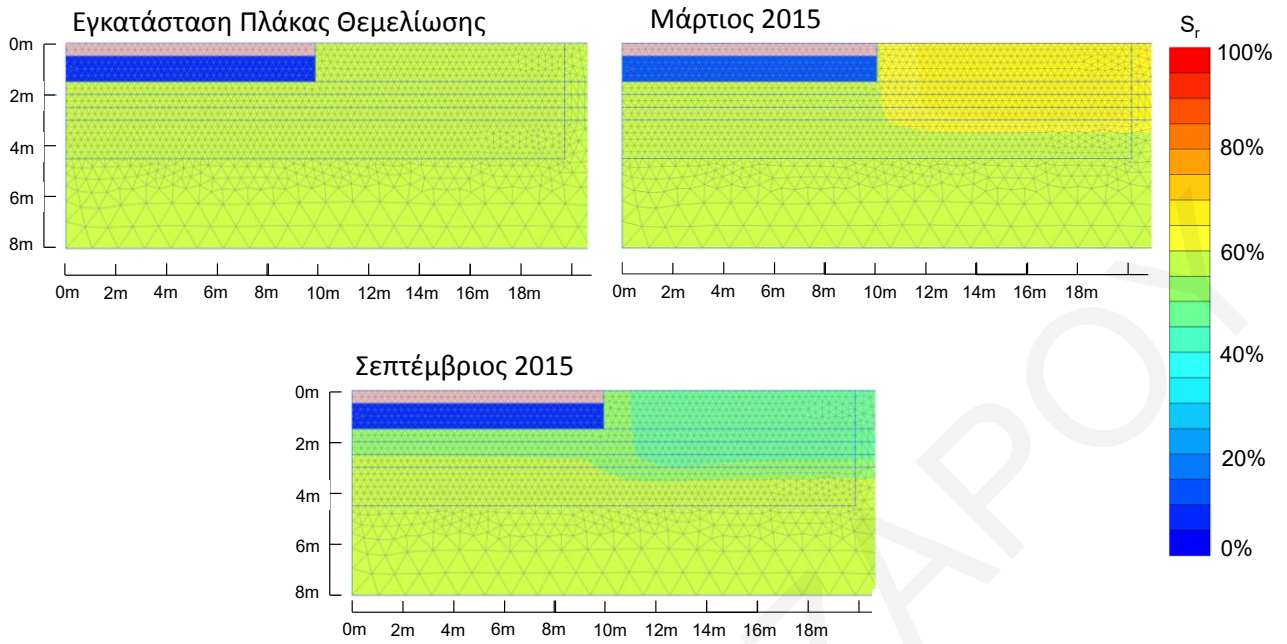
Σχήμα Δ.36: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 18.



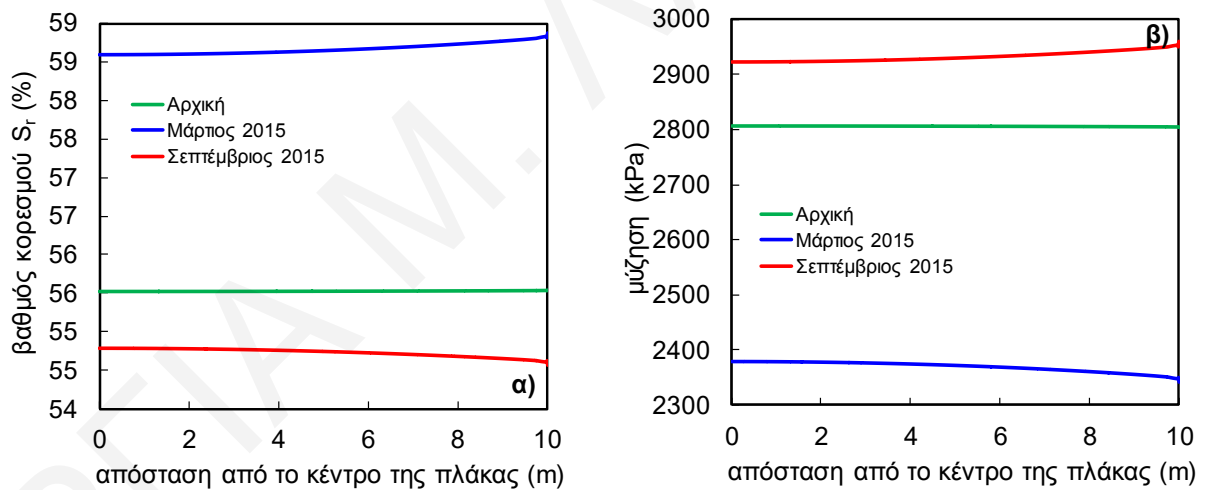
Σχήμα Δ.37: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 19.



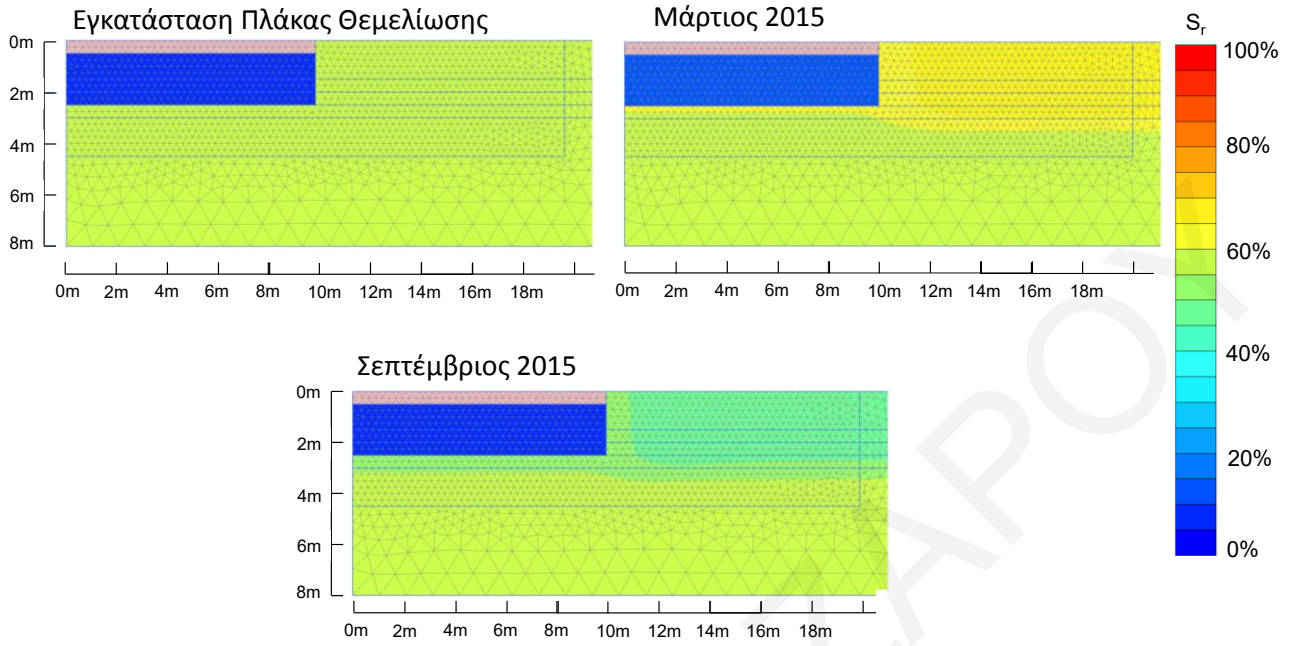
Σχήμα Δ.38: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 19.



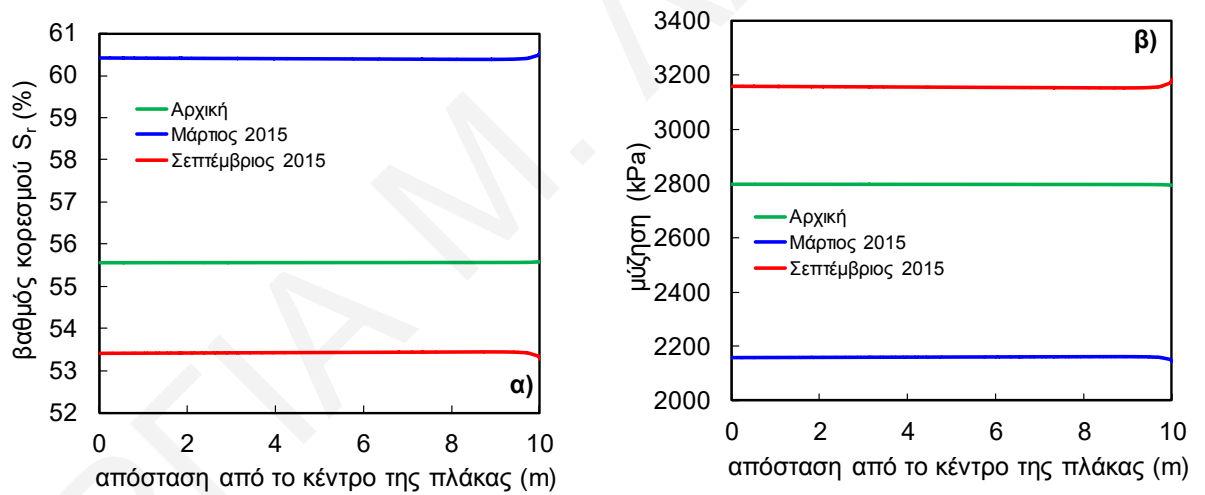
Σχήμα Δ.39: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 20.



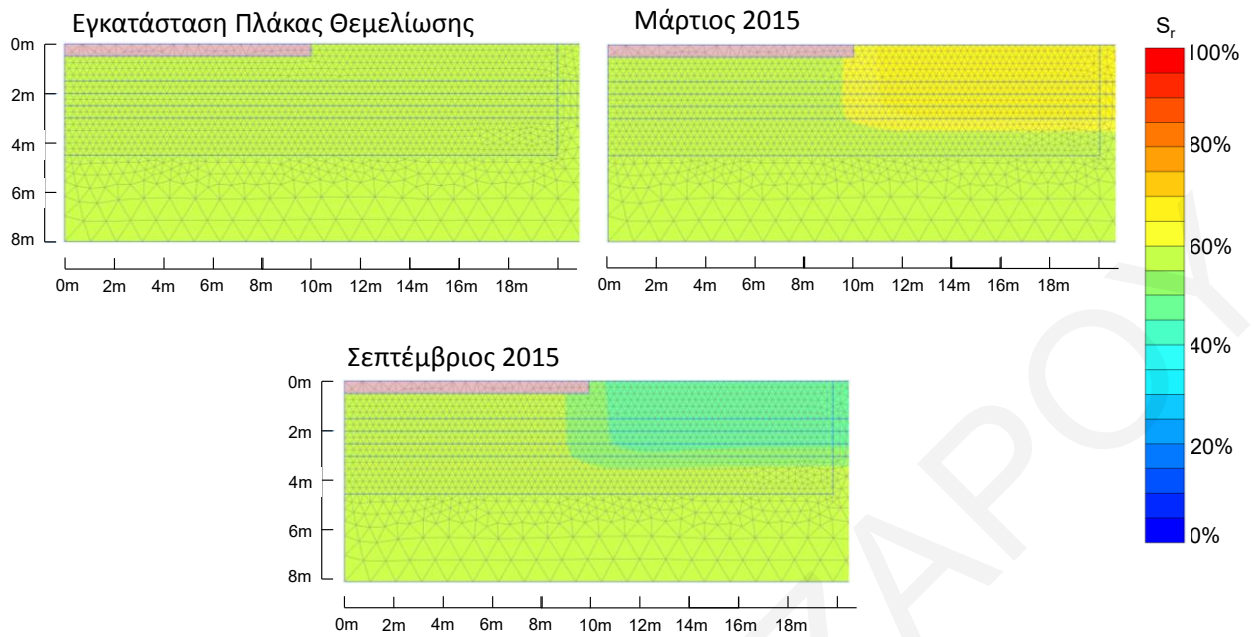
Σχήμα Δ.40: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 20.



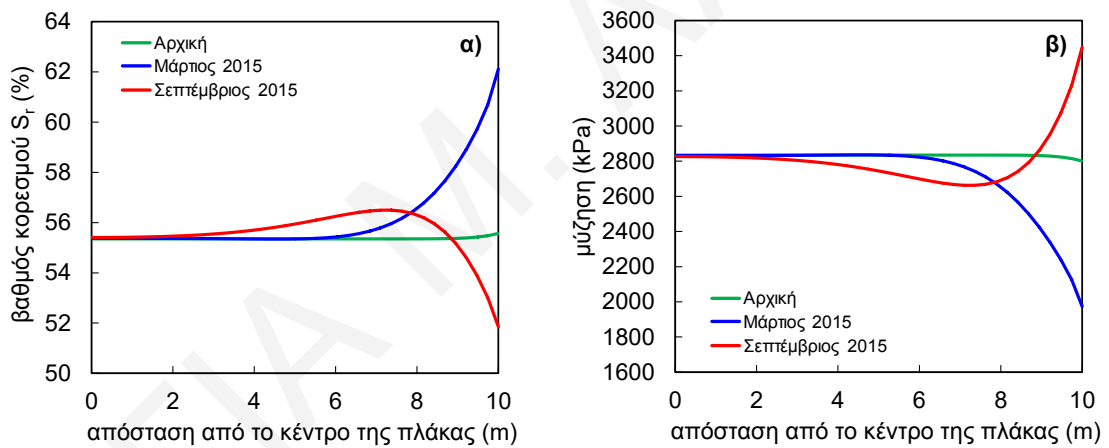
Σχήμα Δ.41: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 21.



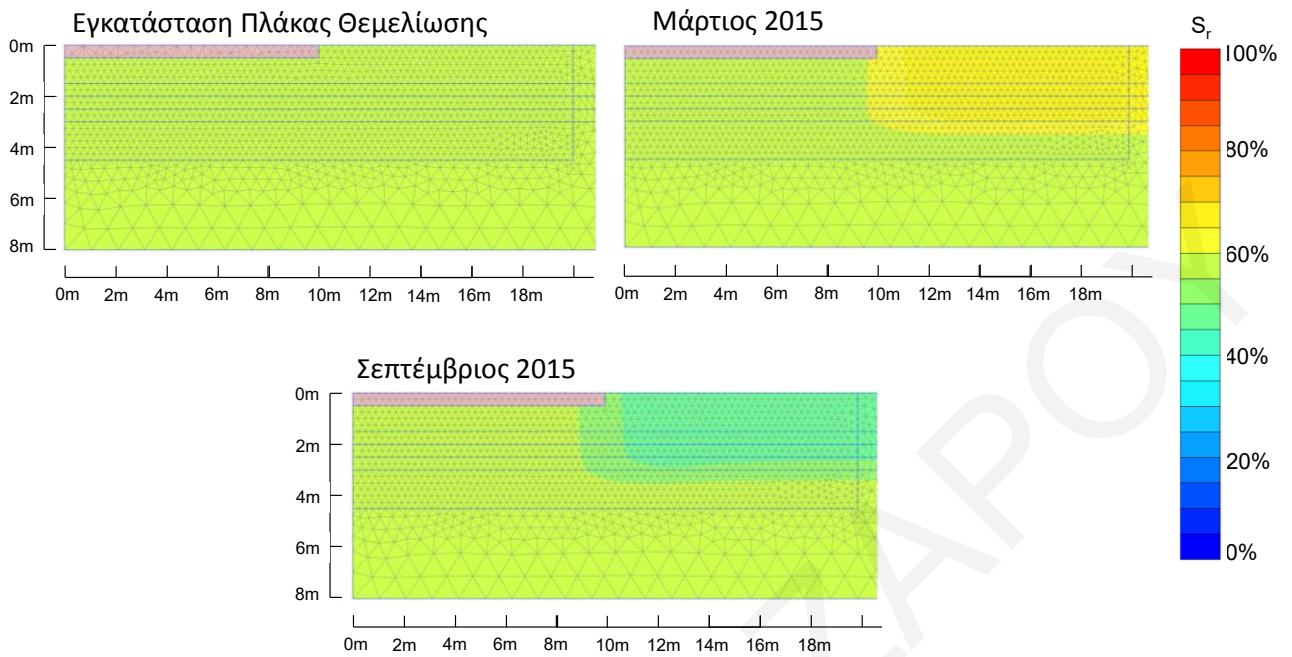
Σχήμα Δ.42: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 21.



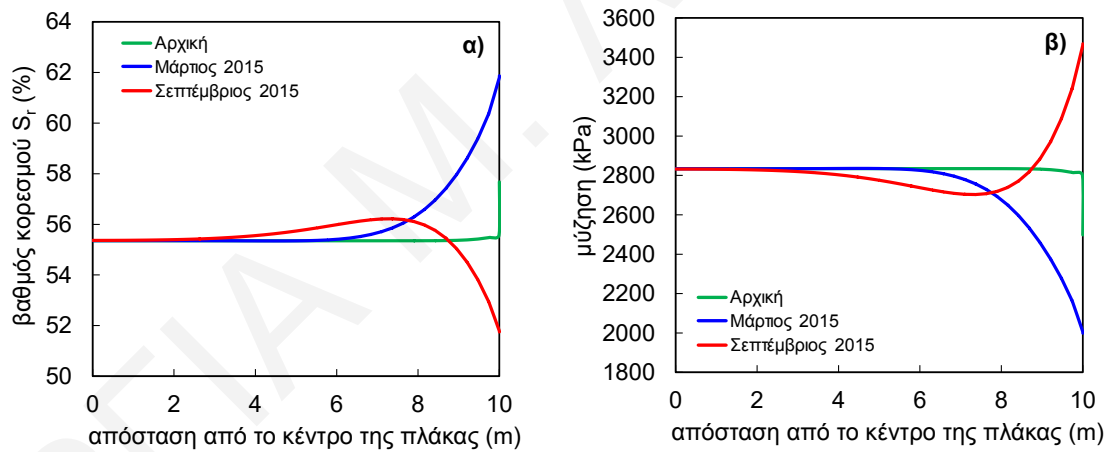
Σχήμα Δ.43: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 22.



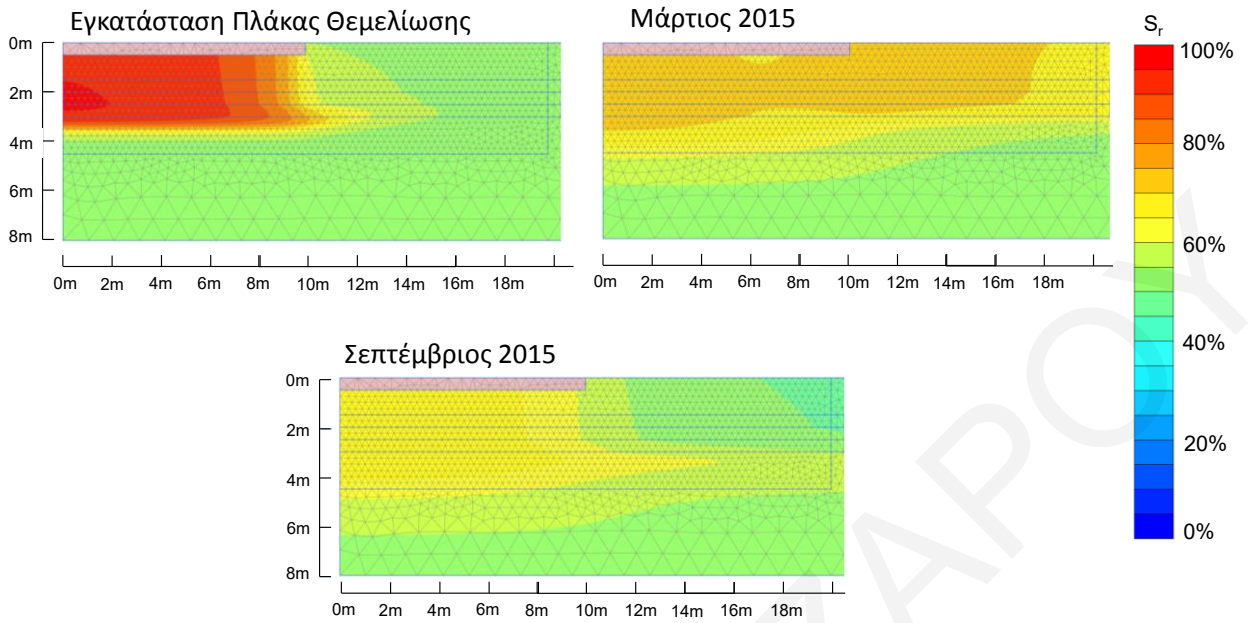
Σχήμα Δ.44: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 22.



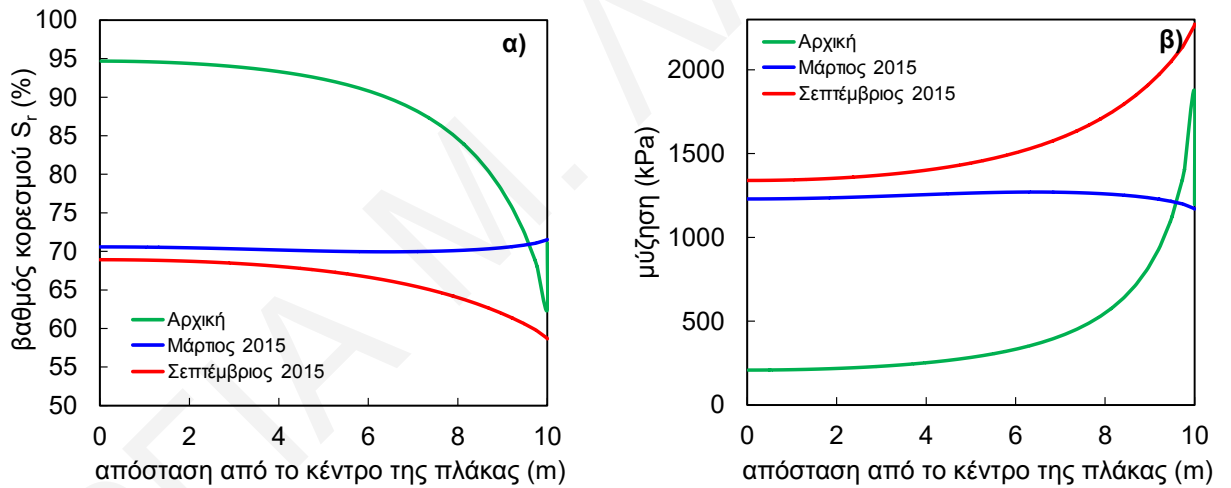
Σχήμα Δ.45: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 23.



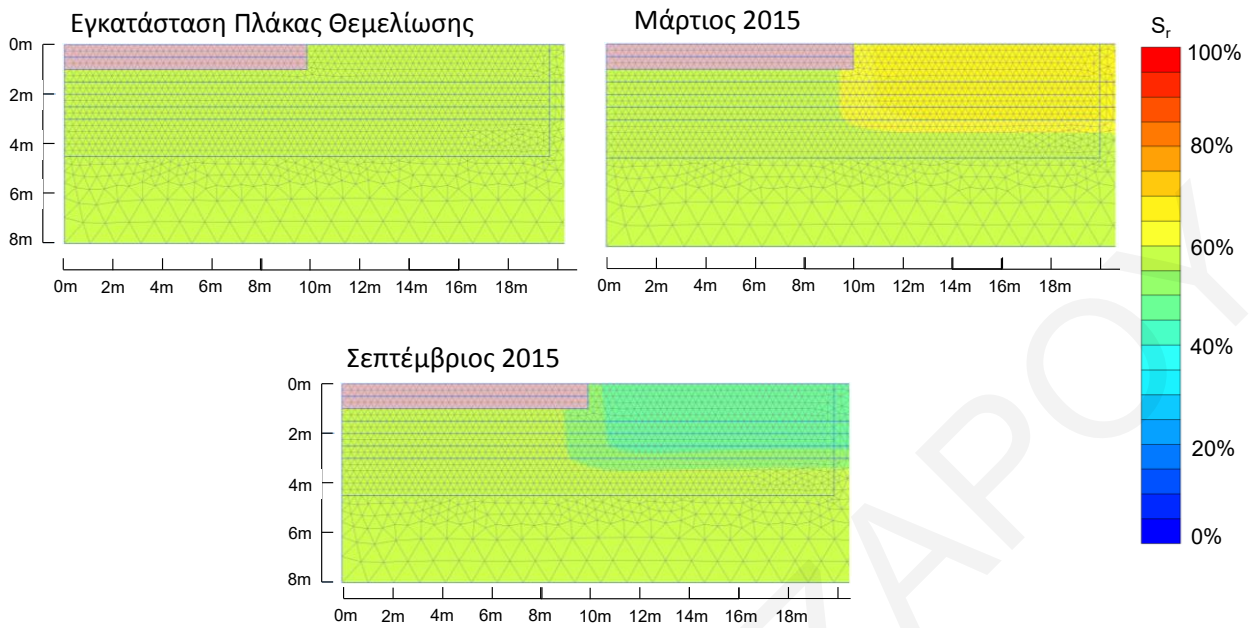
Σχήμα Δ.46: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 23.



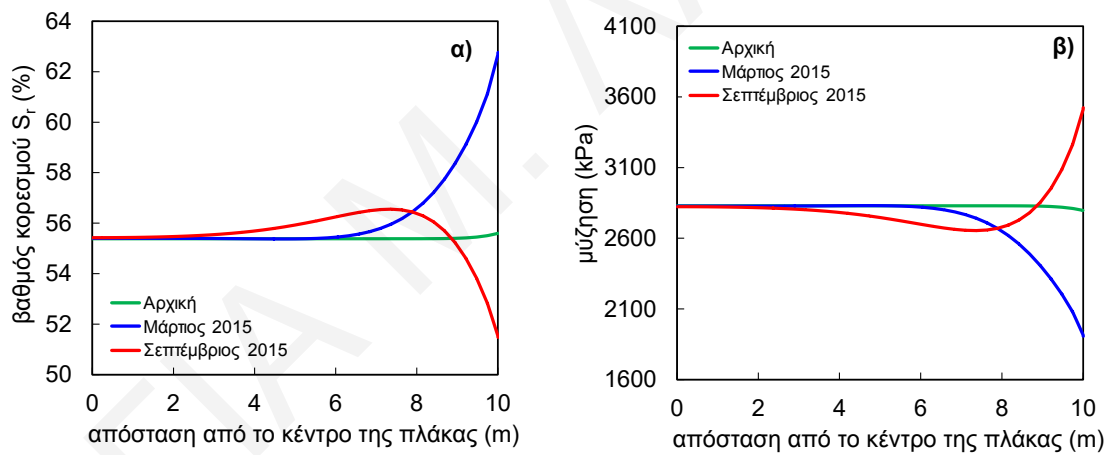
Σχήμα Δ.47: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 24.



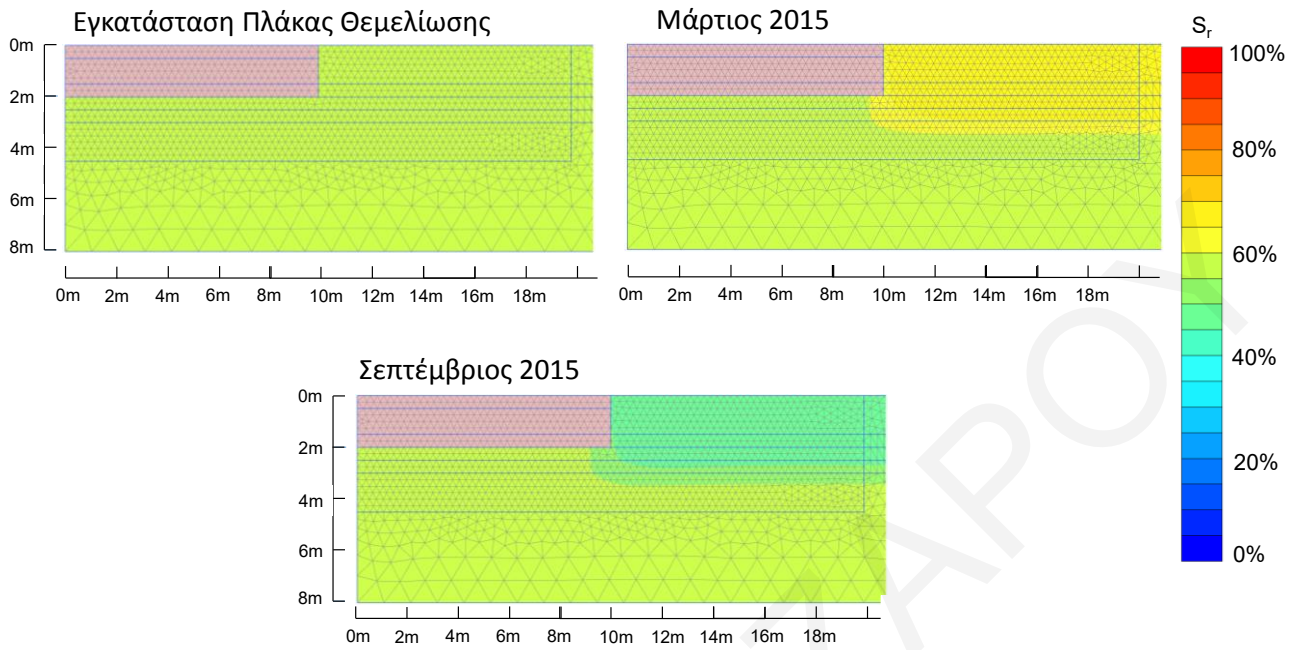
Σχήμα Δ.48: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 24.



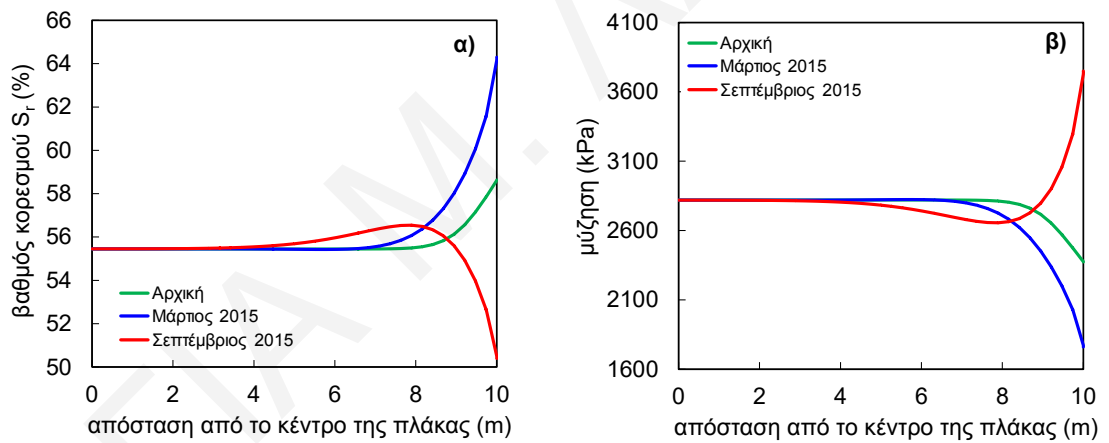
Σχήμα Δ.49: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 25.



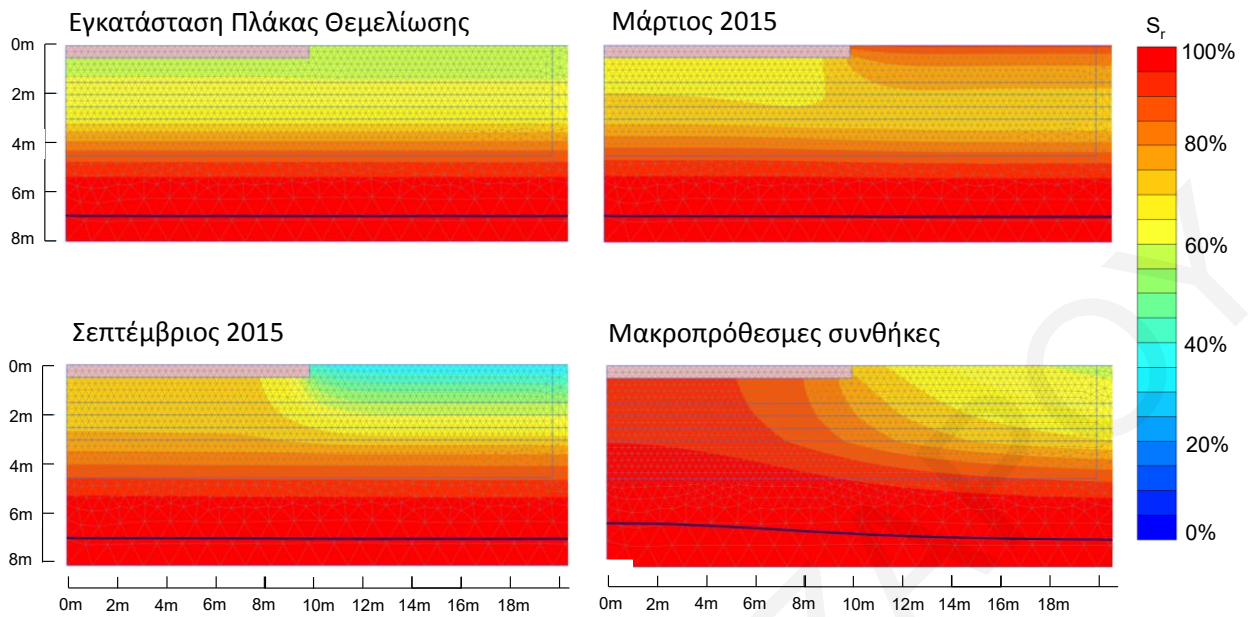
Σχήμα Δ.50: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 25.



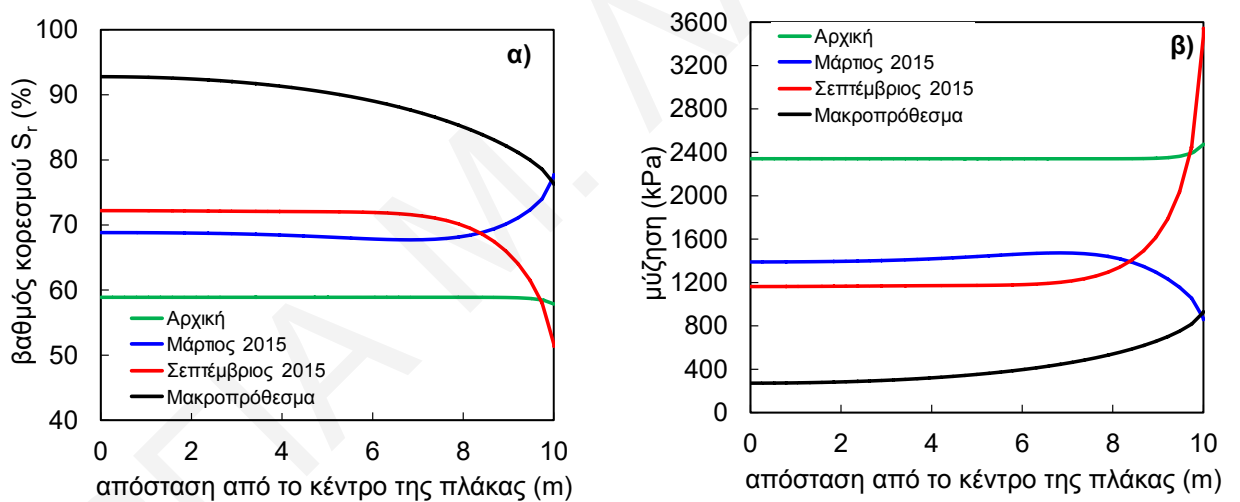
Σχήμα Δ.51: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 26.



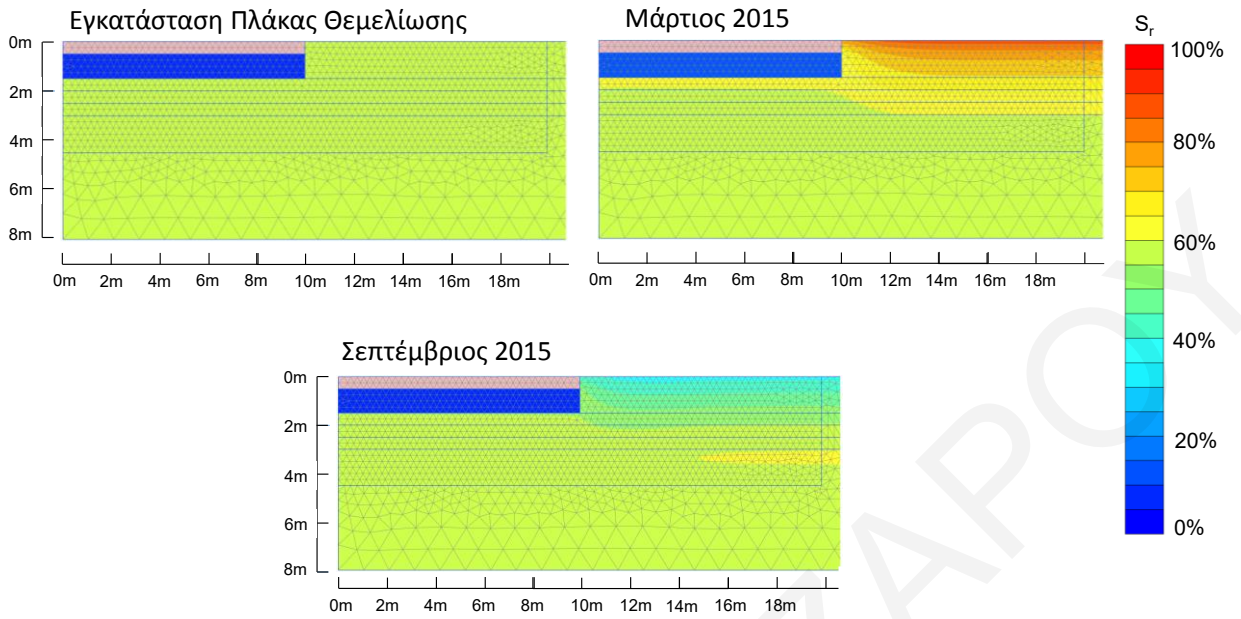
Σχήμα Δ.52: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 26.



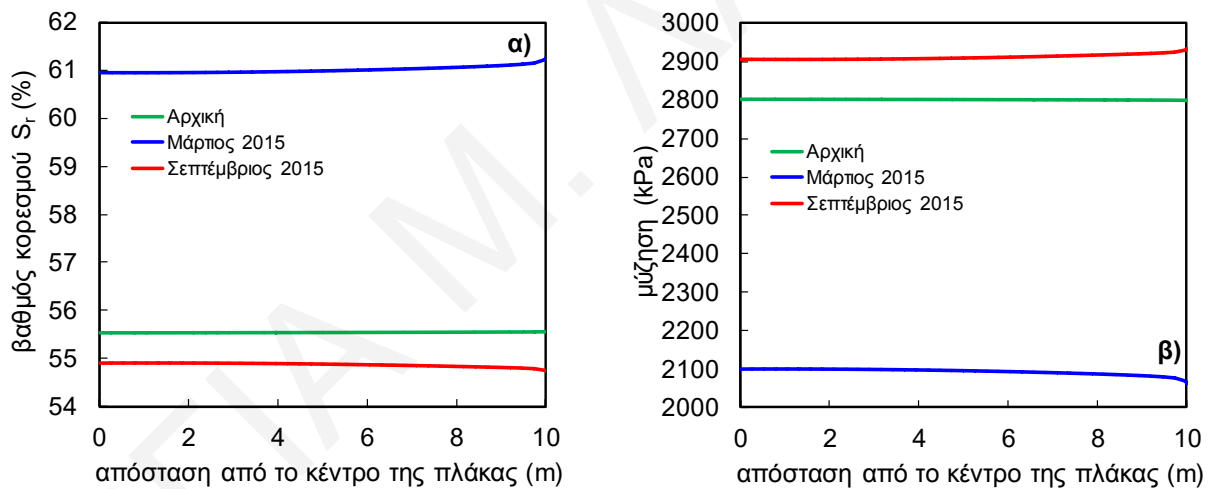
Σχήμα Δ.53: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 27.



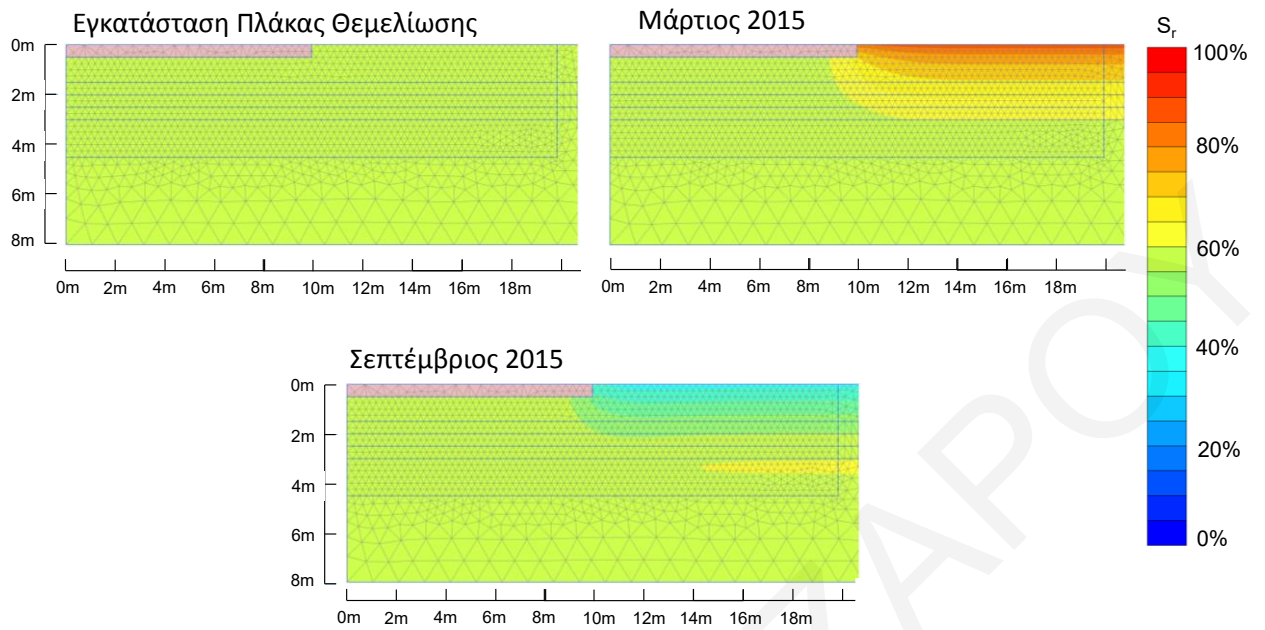
Σχήμα Δ.54: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 27.



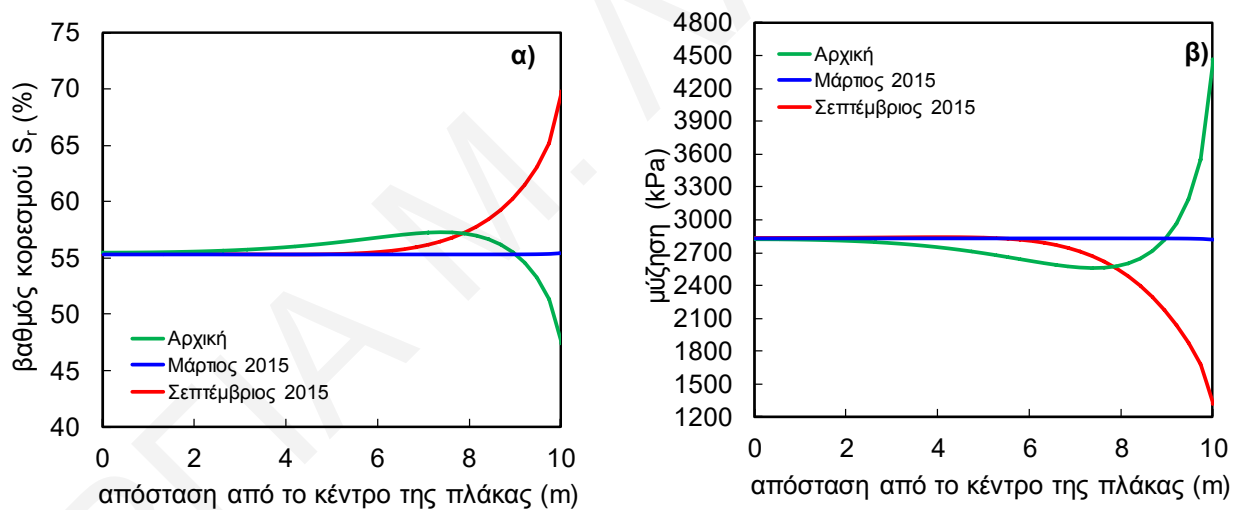
Σχήμα Δ.55: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 28.



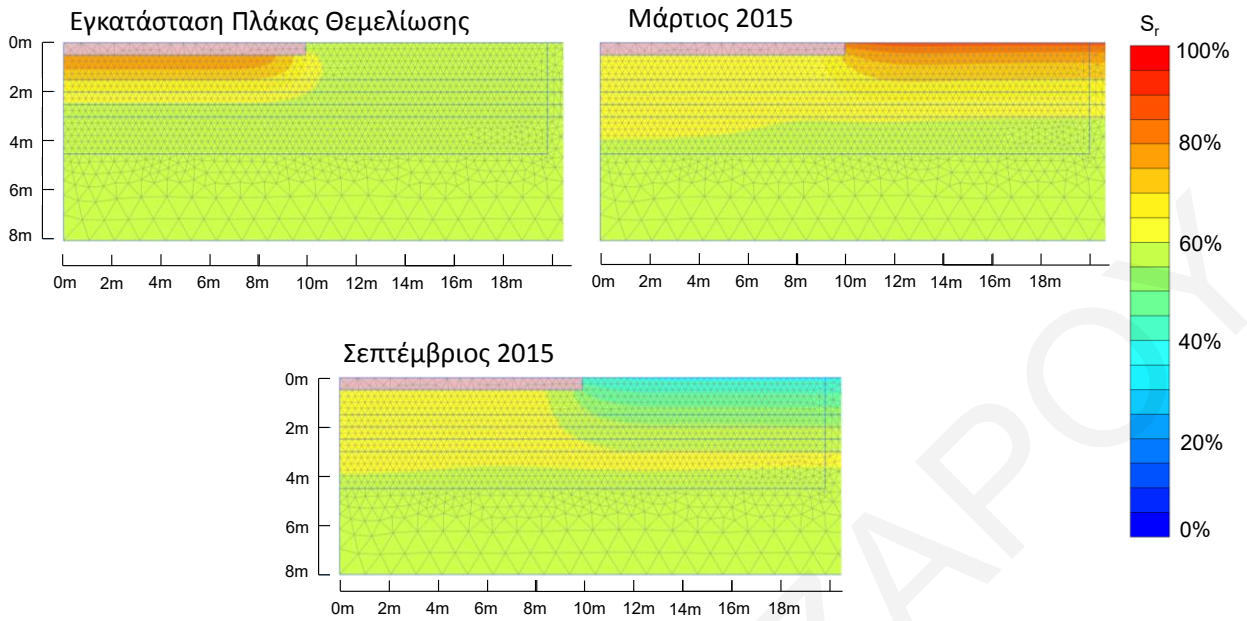
Σχήμα Δ.56: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 28.



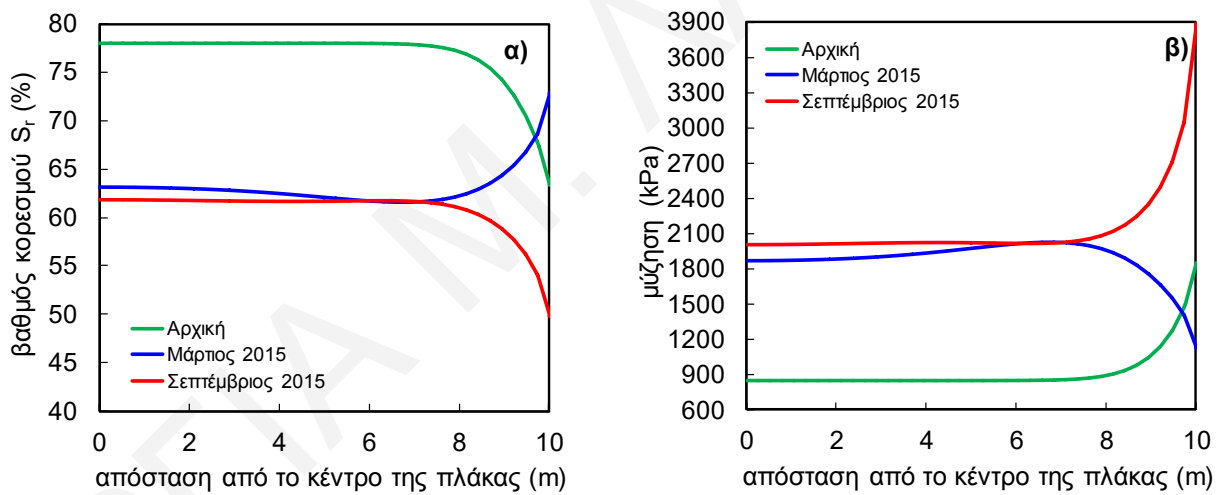
Σχήμα Δ.57: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 29.



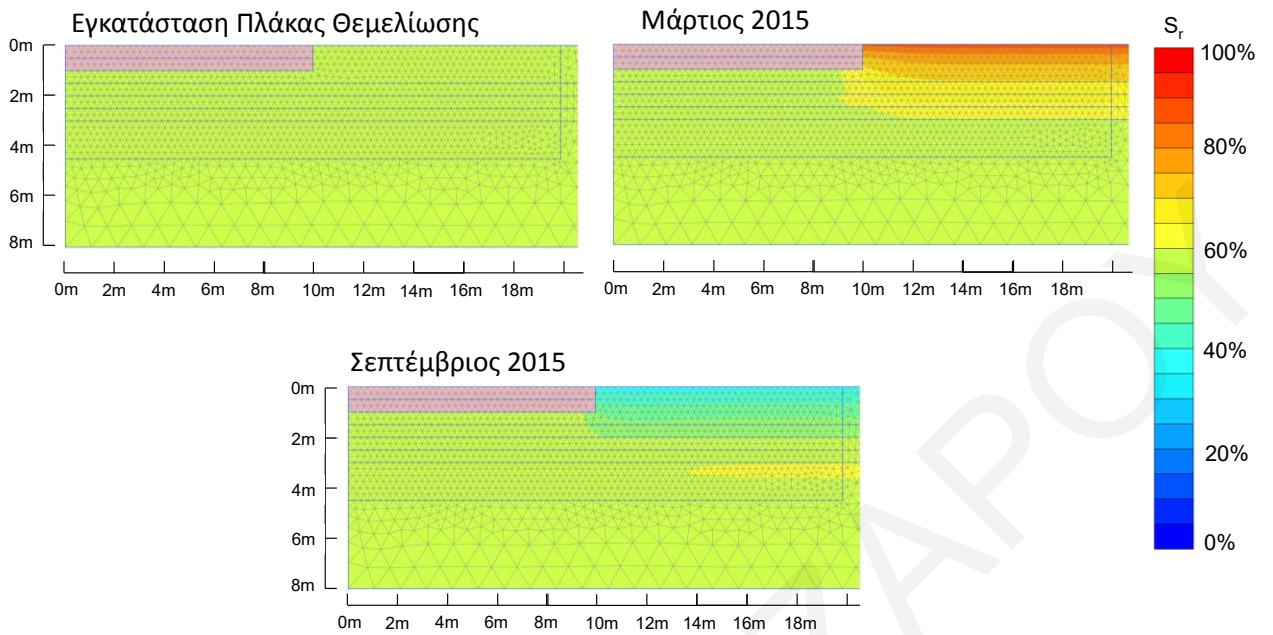
Σχήμα Δ.58: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 29.



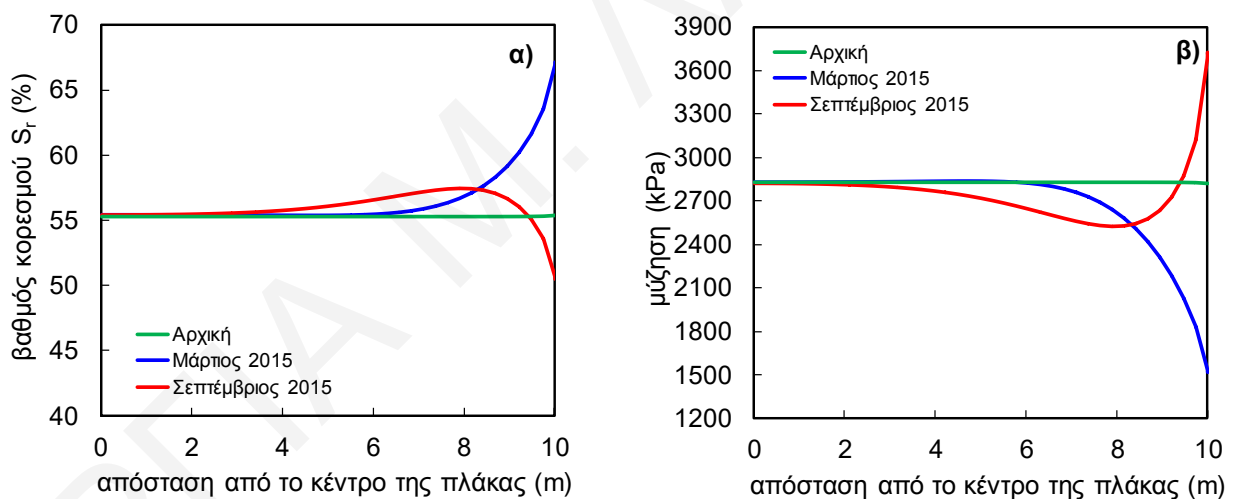
Σχήμα Δ.59: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 30.



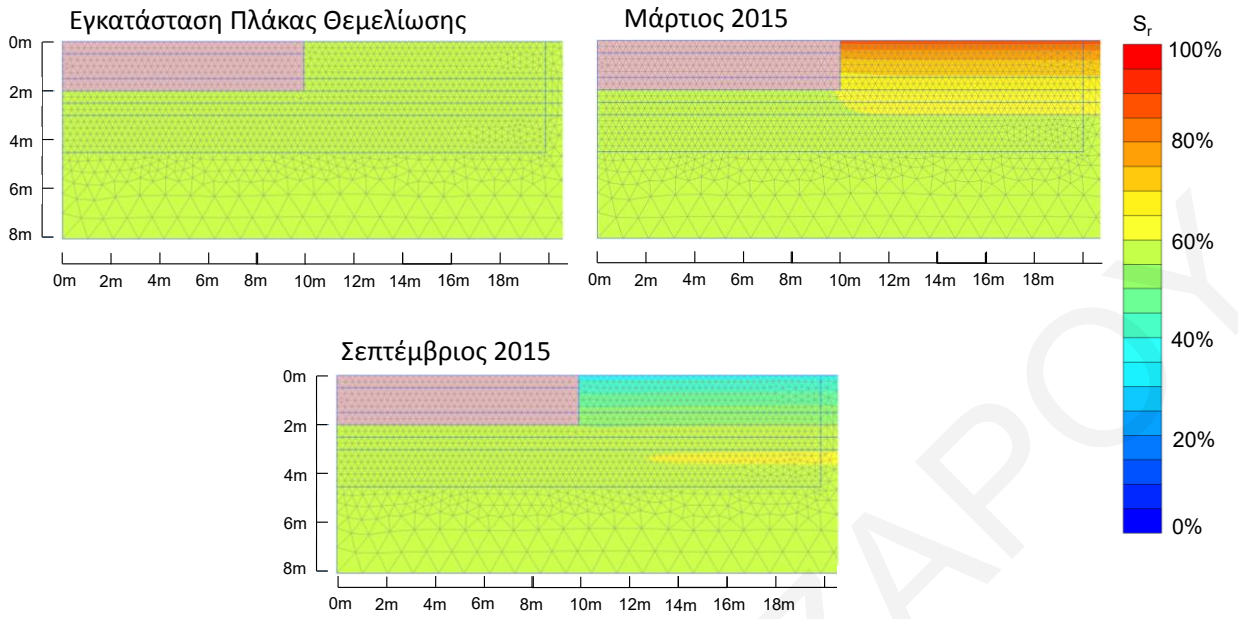
Σχήμα Δ.60: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 30.



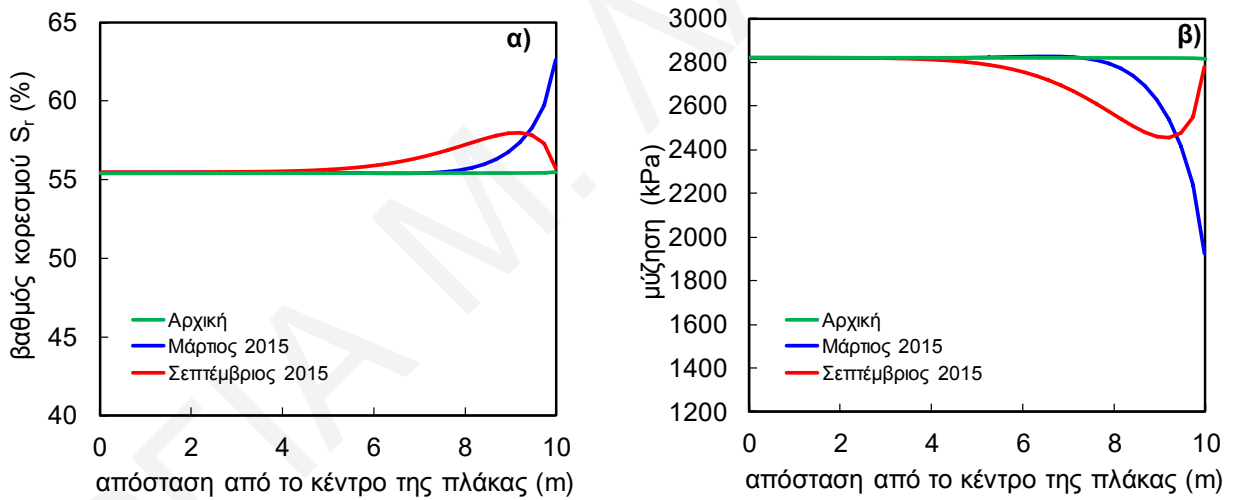
Σχήμα Δ.61: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 31.



Σχήμα Δ.62: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 31.



Σχήμα Δ.63: Χωρική κατανομή βαθμού κορεσμού επιλεγμένων φάσεων της ανάλυσης 32.



Σχήμα Δ.64: Κατανομή α) του βαθμού κορεσμού και β) της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας επαφής εδάφους-πλάκας θεμελίωσης για επιλεγμένες φάσεις της ανάλυσης 32.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΔΙΟΓΚΩΣΙΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΠΛΑΚΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ**

Πίνακας Ε1: Κατάλογος συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-γενικής κοιτόστρωσης.

A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμοχάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
1	0.016	-5	A	0.5			√			12	Μάιος		√
2	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
3	0.016	-5	A	0.5			√			24	Μάιος		√
4	0.016	-5	A	0.5			√			60	Μάιος		√
5	0.016	-5	A	0.5			√			120	Μάιος		√
6	0.016	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
7	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
8	0.016	-5	A	0.5			√			24	Μάιος	√	
9	0.016	-5	A	0.5			√			60	Μάιος	√	
10	0.016	-5	A	0.5			√			120	Μάιος	√	
11	0.016	-5	A	0.5			√			12	Σεπτέμβριος	√	
12	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Σεπτέμβριος	√	
13	0.016	-5	A	0.5			√			24	Σεπτέμβριος	√	
14	0.016	-5	A	0.5			√			60	Σεπτέμβριος	√	
15	0.016	-5	A	0.5			√			120	Σεπτέμβριος	√	
16	0.016	-5	A	0.5			√			12	Φεβρουάριος	√	
17	0.016	-5	A	0.5			√		√	12	Φεβρουάριος	√	
18	0.016	-5	A	0.5			√			24	Φεβρουάριος	√	
19	0.016	-5	A	0.5			√			60	Φεβρουάριος	√	
20	0.016	-5	A	0.5			√			120	Φεβρουάριος	√	
21	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Μάιος	√	
22	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Μάιος	√	
23	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Μάιος	√	
24	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Σεπτέμβριος	√	
25	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Σεπτέμβριος	√	

Πίνακας Ε1 (συνέχεια): Κατάλογος συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-γενικής κοιτόστρωσης

A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερατότητας	Πάχος πλάκας (m)	Αμμοχάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατάσταση	2014/15	2018/19
26	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Σεπτέμβριος	√	
27	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Φεβρουάριος	√	
28	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Φεβρουάριος	√	
29	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Φεβρουάριος	√	
30	0.05	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
31	0.05	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
32	0.005	-5	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
33	0.005	-5	A	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
34	0.016	-7	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
35	0.016	-2	A	0.5			√			12	Μάιος	√	
36	0.016	-5	B	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
37	0.016	-5	B	0.5			√			12	Μάιος	√	
38	0.016	-5	A	0.5				√	√	12	Μάιος	√	
39	0.016	-5	A	0.5		√	√		√	12	Μάιος	√	
40	0.016	-5	A	0.5	1.0		√			12	Μάιος	√	
41	0.016	-5	A	0.5				√		12	Μάιος	√	
42	0.016	-5	A	0.5		√	√			12	Μάιος	√	
43	0.016	-5	A	1.0			√			12	Μάιος	√	
44	0.016	-5	Γ	0.5			√		√	12	Μάιος	√	
45	0.016	-5	Γ	0.5	1.0		√			12	Μάιος	√	
46	0.016	-5	Γ	0.5			√			12	Μάιος	√	
47	0.016	-5	A	0.5			√		√	24	Μάιος		√
48	0.016	-5	A	0.5			√		√	60	Μάιος		√
49	0.016	-5	A	0.5			√		√	120	Μάιος		√
50	0.016	-5	A	0.5			√			12	Μάιος		√

Πίνακας Ε1 (συνέχεια): Κατάλογος συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-γενικής κοιτόστρωσης.

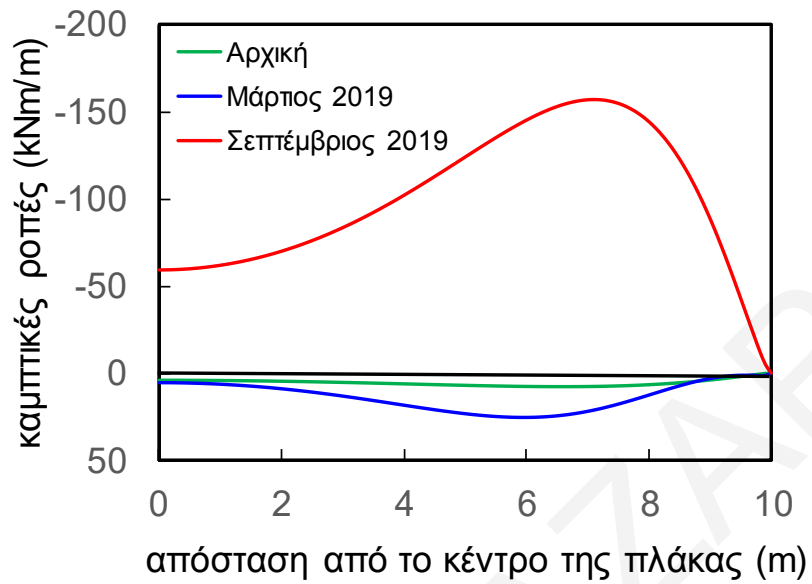
A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερα-	Πάχος πλάκας	Αμμο-χάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατά-σταση	2014/15	2018/19
51	0.016	-	A	0.5			√		√	12	Σεπτέμβριος		√
52	0.016	-	A	0.5			√			24	Σεπτέμβριος		√
53	0.016	-	A	0.5			√			60	Σεπτέμβριος		√
54	0.016	-	A	0.5			√			120	Σεπτέμβριος		√
55	0.016	-	A	0.5			√		√	24	Σεπτέμβριος		√
56	0.016	-	A	0.5			√		√	60	Σεπτέμβριος		√
57	0.016	-	A	0.5			√		√	120	Σεπτέμβριος		√
58	0.016	-	A	0.5			√			12	Φεβρουάριος		√
59	0.016	-	A	0.5			√		√	12	Φεβρουάριος		√
60	0.016	-	A	0.5			√			24	Φεβρουάριος		√
61	0.016	-	A	0.5			√			60	Φεβρουάριος		√
62	0.016	-	A	0.5			√			120	Φεβρουάριος		√
63	0.016	-	A	0.5			√		√	24	Φεβρουάριος		√
64	0.016	-	A	0.5			√		√	60	Φεβρουάριος		√
65	0.016	-	A	0.5			√		√	120	Φεβρουάριος		√
66	0.005	-	A	0.5			√			12	Μάιος		√
67	0,05	-	A	0.5			√			12	Μάιος		√
68	0.016	-	A	0.5			√			12	Μάιος		√
69	0.016	-	A	0.5			√			12	Μάιος		√
70	0.016	-	B	0.5			√			12	Μάιος		√
71	0.016	-	Γ	0.5			√			12	Μάιος		√
72	0.005	-	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
73	0.05	-	A	0.5			√		√	12	Μάιος		√
74	0.016	-	B	0.5			√		√	12	Μάιος		√
75	0.016	-	Γ	0.5			√		√	12	Μάιος		√

Πίνακας Ε1 (συνέχεια): Κατάλογος συζευγμένων αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-γενικής κοιτόστρωσης.

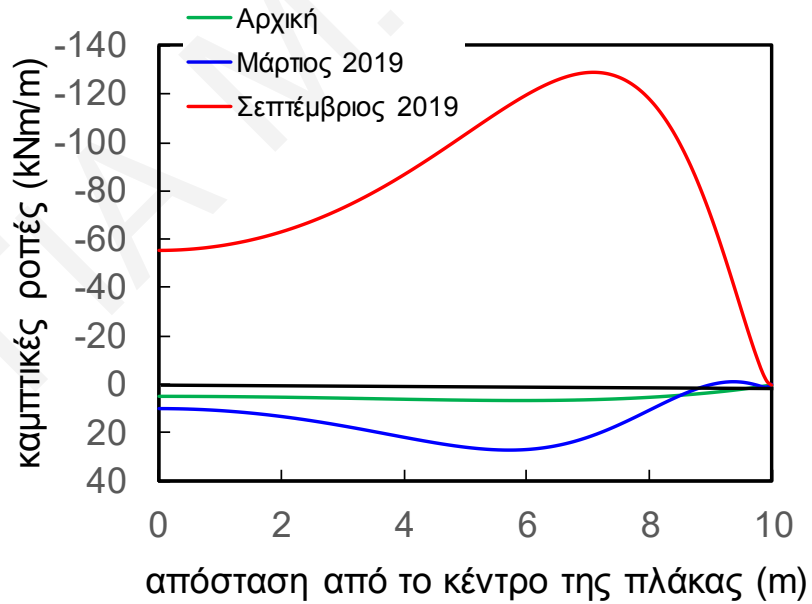
A/A	g _a	g _i	Προφίλ Διαπερα-	Πάχος πλάκας	Αμμο-χάλικο	Προ-διαβροχή	Αξονο-συμμετρική	Επίπεδη Παραμόρφωση	Υ.Ο	Φόρτιση (kN/m)	Εγκατά-σταση	2014/15	2018/19
76	0.016	-	A	0.5				√	√	12*	Μάιος	√	
77	0.016	-	A	0.5				√	√	120*	Μάιος	√	
78	0.016	-	A	0.5				√		12*	Μάιος	√	
79	0.016	-	A	0.5				√		120*	Μάιος	√	
80	0.016	-	A	0.5				√	√	12**	Μάιος	√	
81	0.016	-	A	0.5				√	√	120**	Μάιος	√	
82	0.016	-	A	0.5				√		12**	Μάιος	√	
83	0.016	-	A	0.5				√		120**	Μάιος	√	
84	0.016	-	A	0.5				√		12**	Σεπτέμβριος	√	
85	0.016	-	A	1.0			√			12**	Σεπτέμβριος		√
86	0.016	-	A	0.5	1.0		√			12**	Σεπτέμβριος		√
87	0.016	-	A	0.5	1.0			√		12	Μάιος	√	
88	0.016	-	A	0.5	1.0			√		12**	Μάιος	√	
89	0.016	-	A	0.5	1.0			√	√	12**	Μάιος	√	

*3 σημειακά φορτία

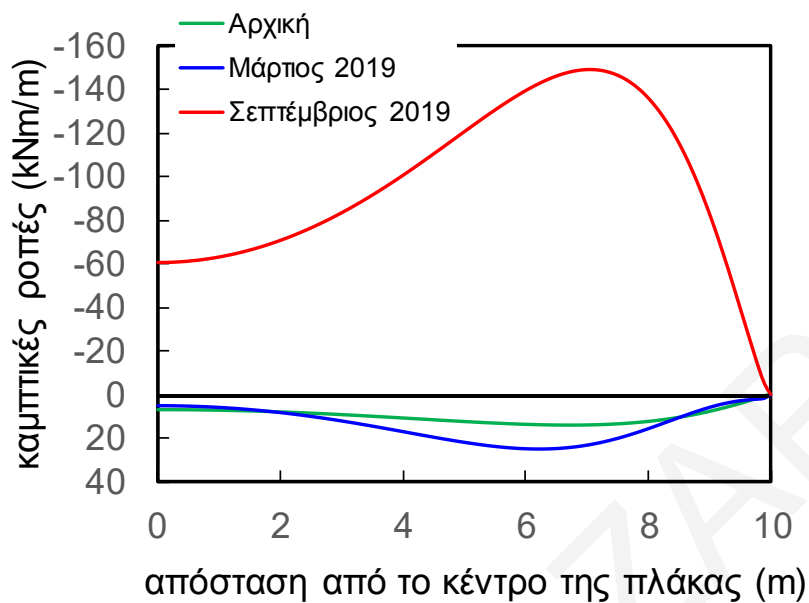
**5 σημειακά φορτία



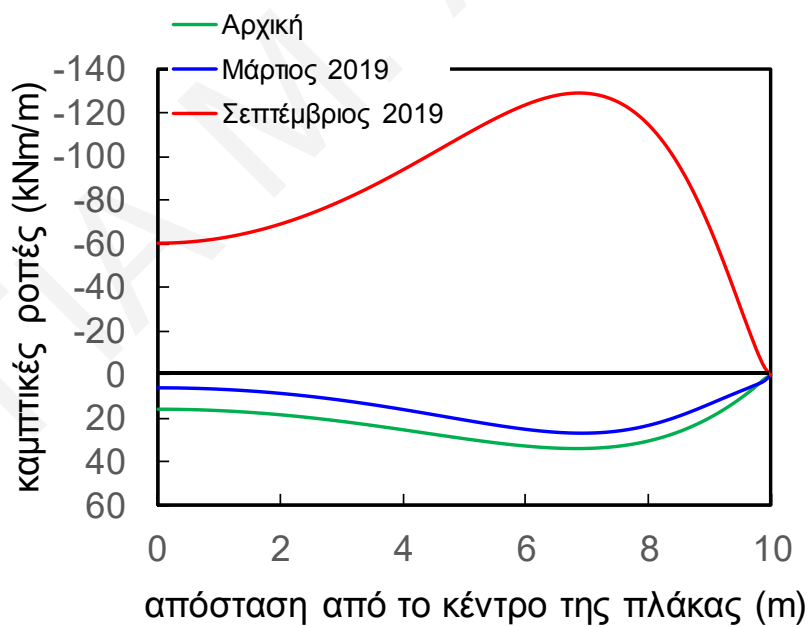
Σχήμα Ε.1: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 1.



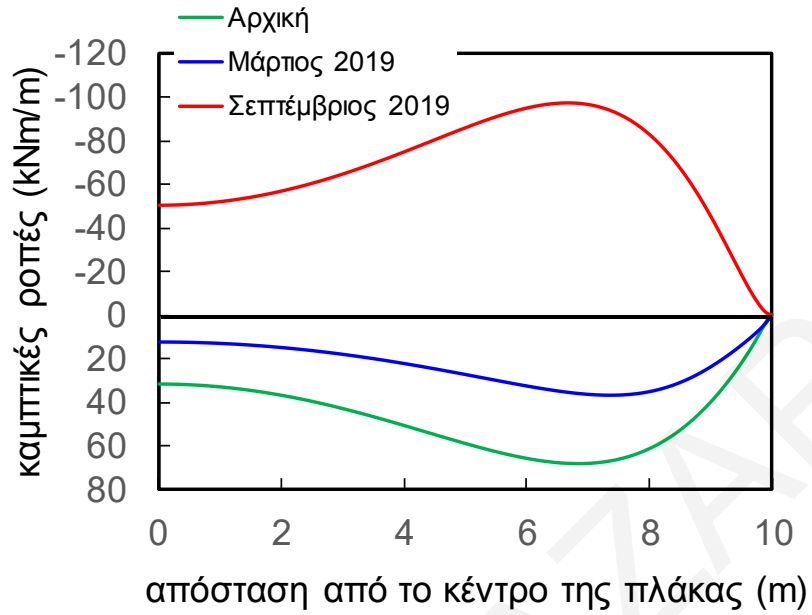
Σχήμα Ε.2: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 2.



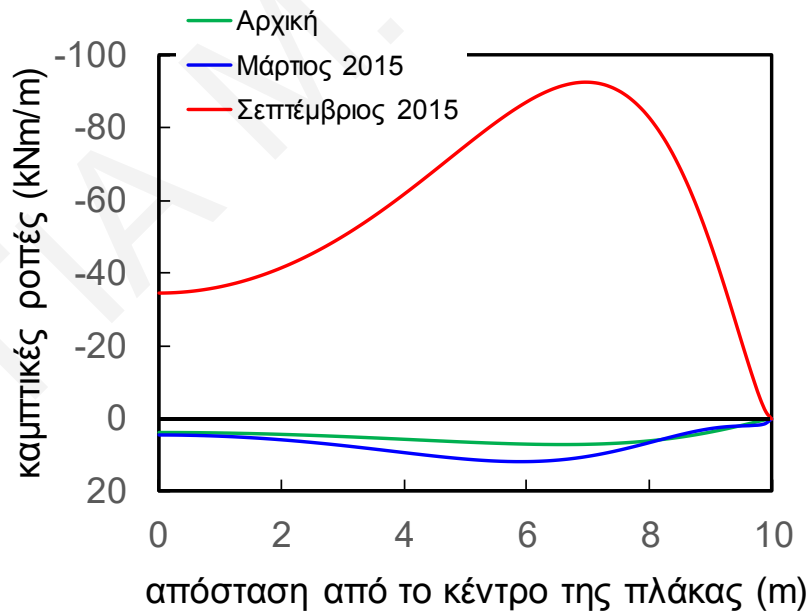
Σχήμα Ε.3: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 3.



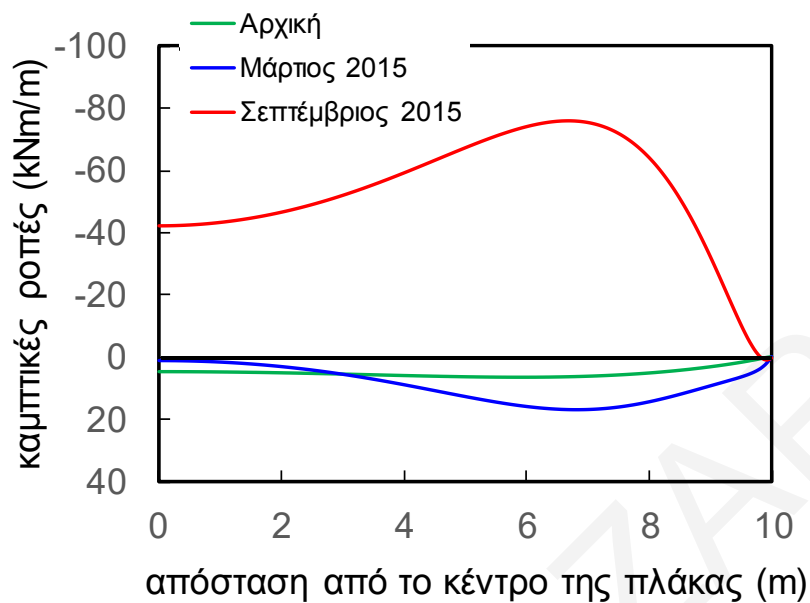
Σχήμα Ε.4: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 4.



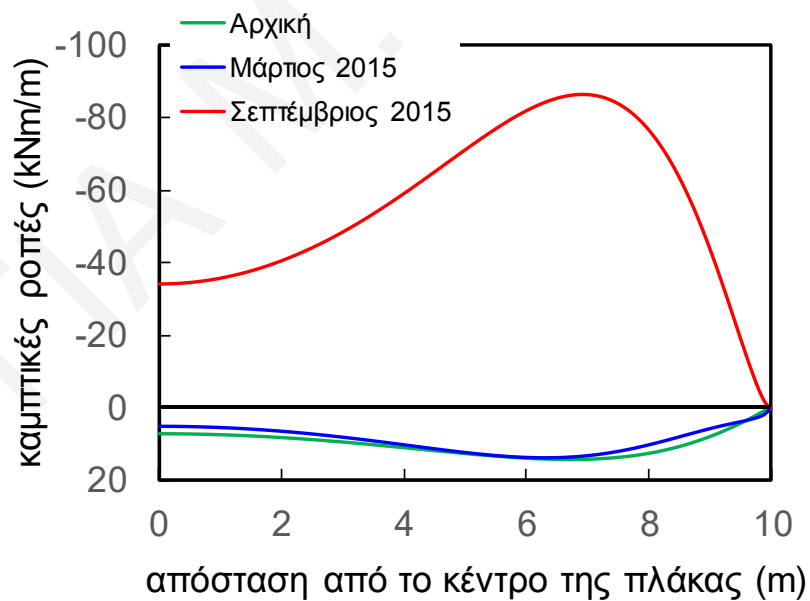
Σχήμα Ε.5: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 5.



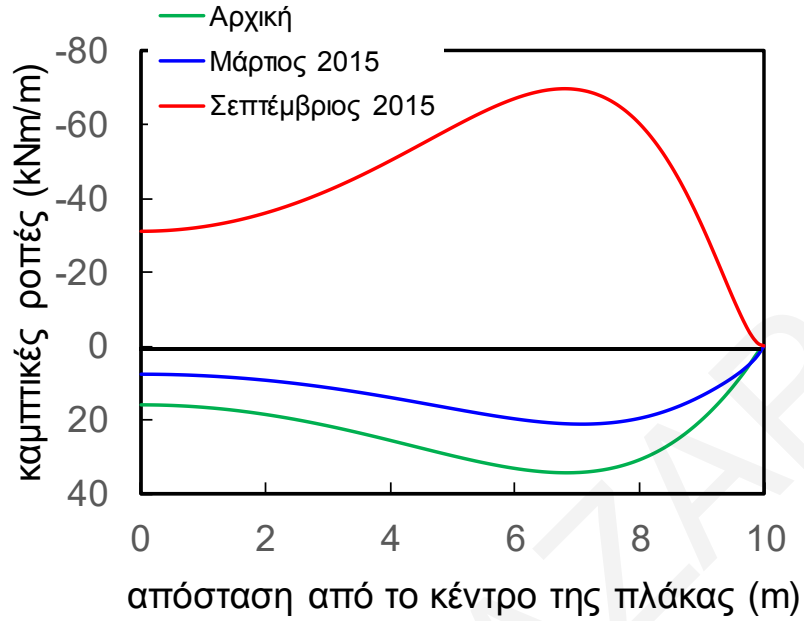
Σχήμα Ε.6: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 6.



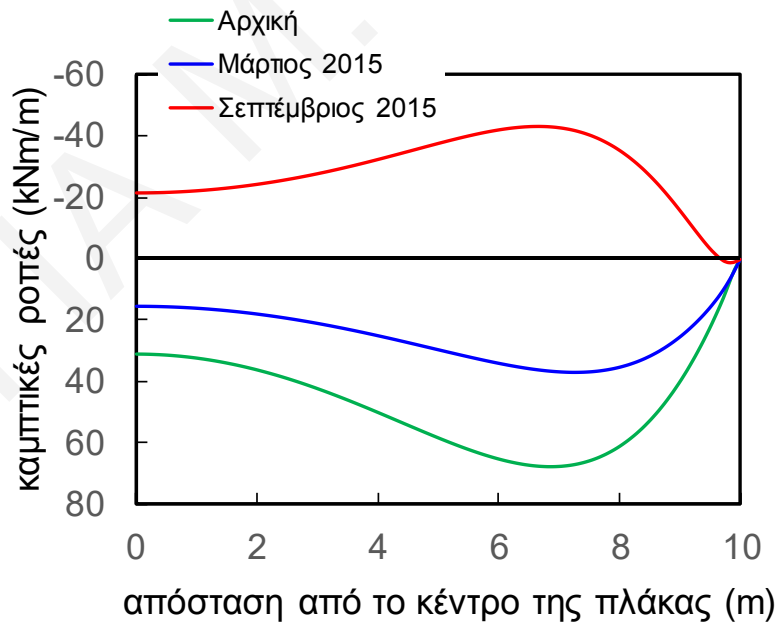
Σχήμα Ε.7: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 7.



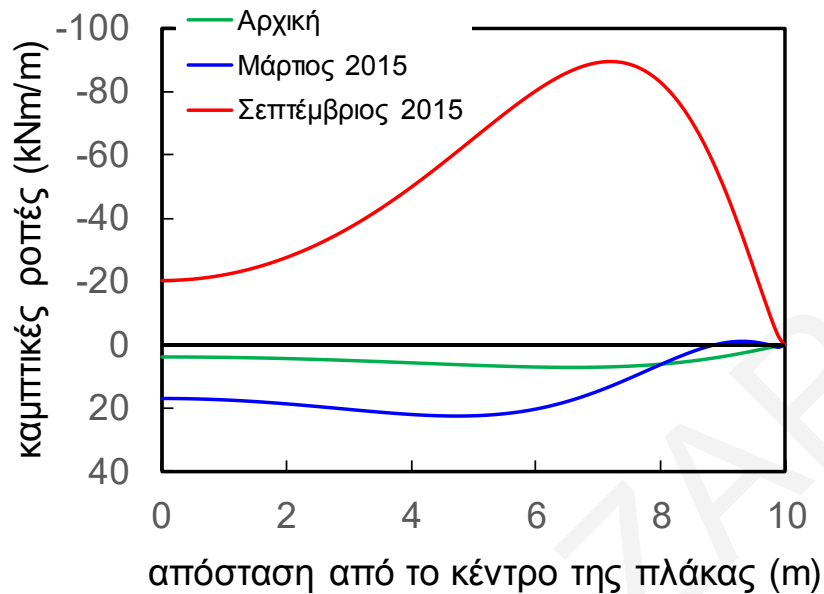
Σχήμα Ε.8: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 8.



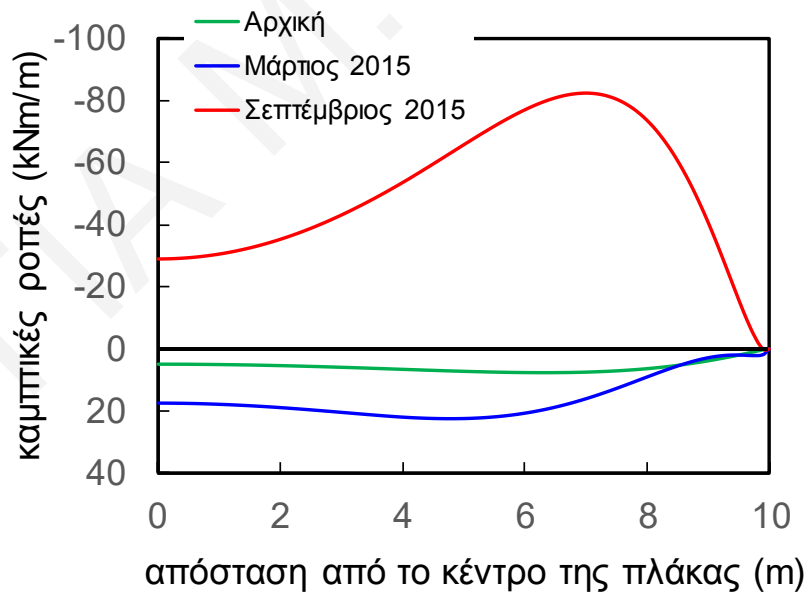
Σχήμα Ε.9: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 9.



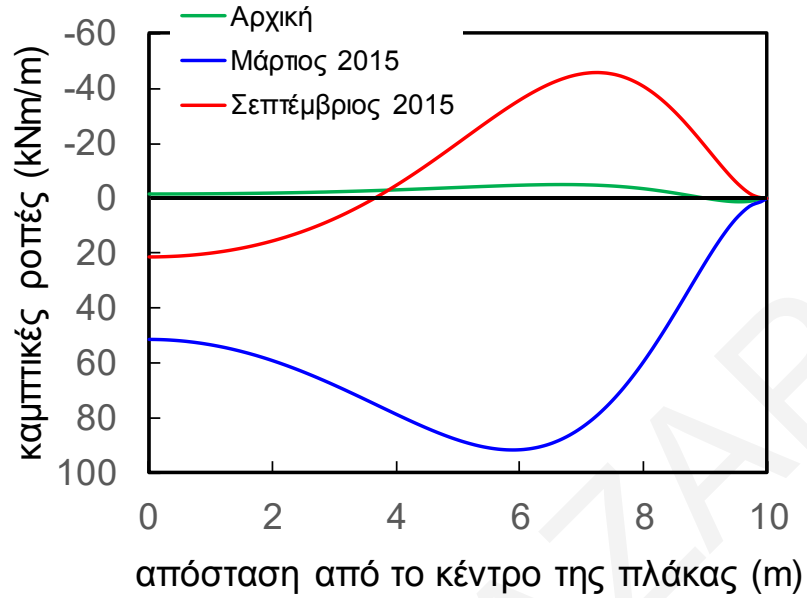
Σχήμα Ε.10: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 10.



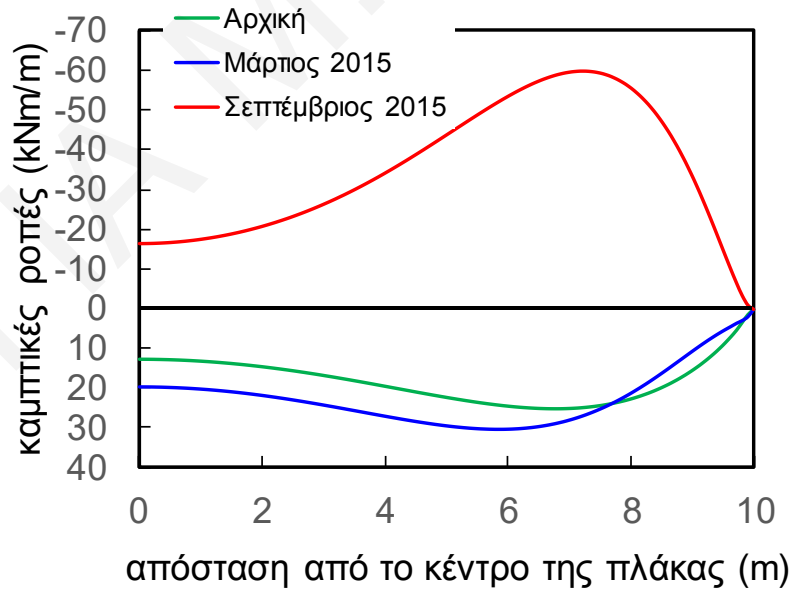
Σχήμα Ε.11: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 11.



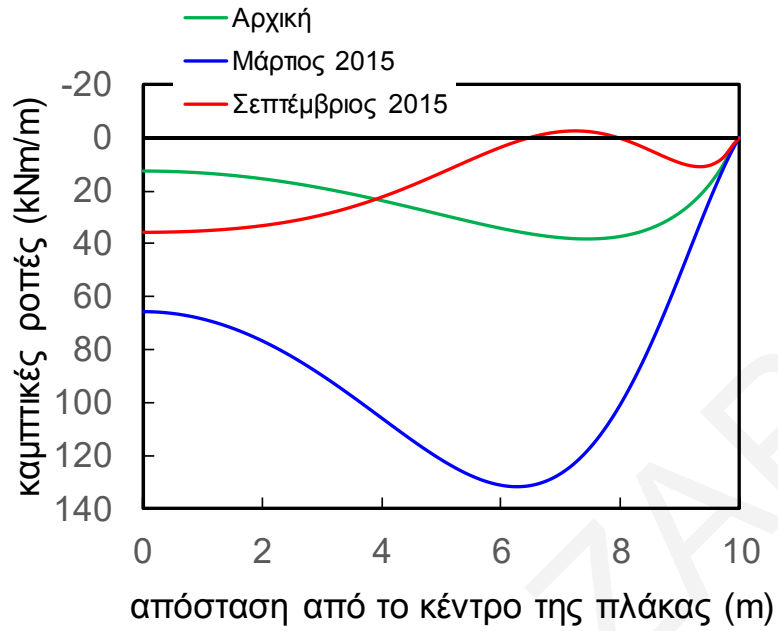
Σχήμα Ε.12: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 12.



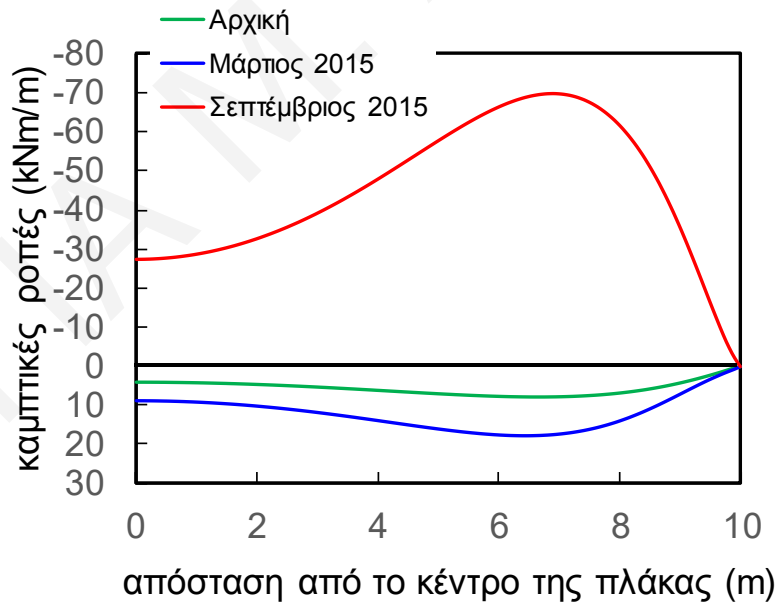
Σχήμα Ε.13: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 13.



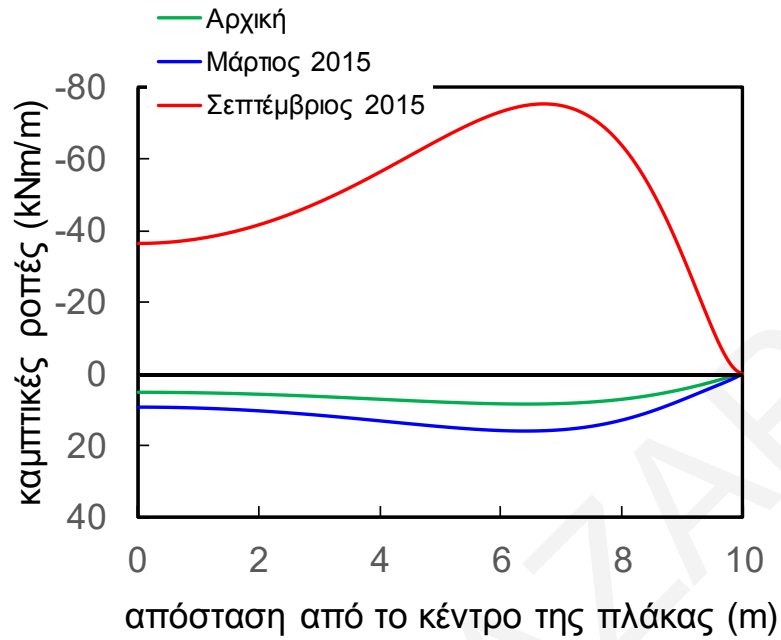
Σχήμα Ε.14: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 14.



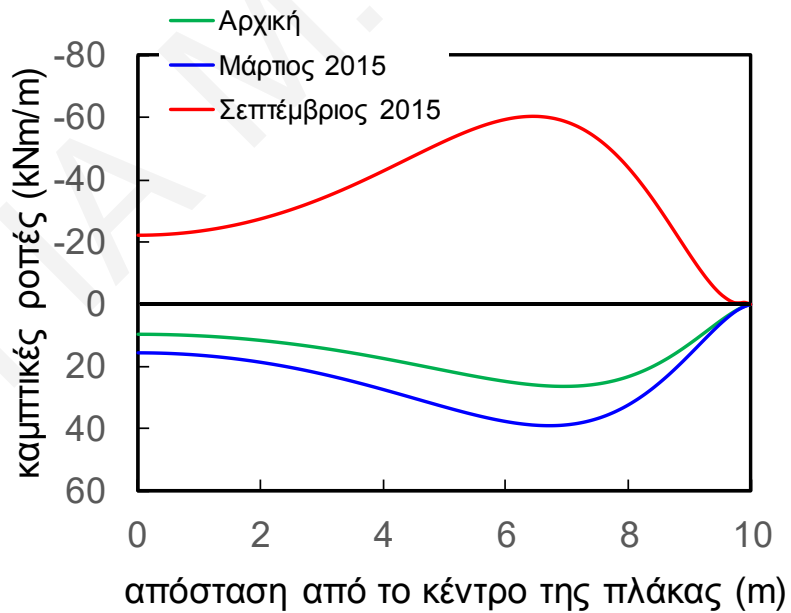
Σχήμα Ε.15: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 15.



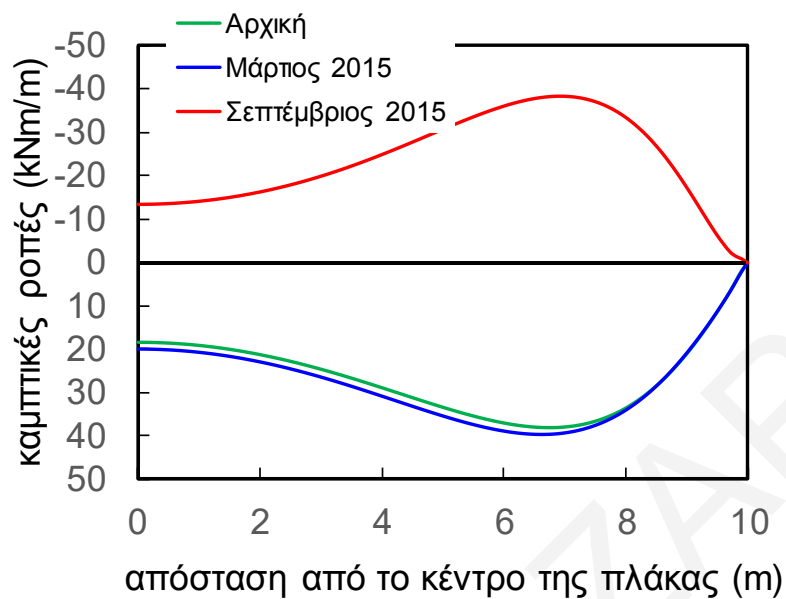
Σχήμα Ε.16: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 16.



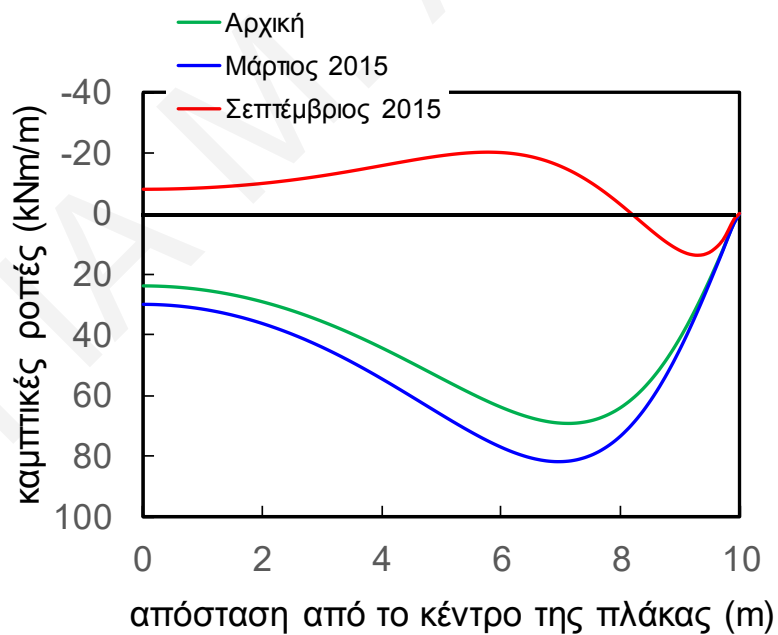
Σχήμα Ε.17: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 17.



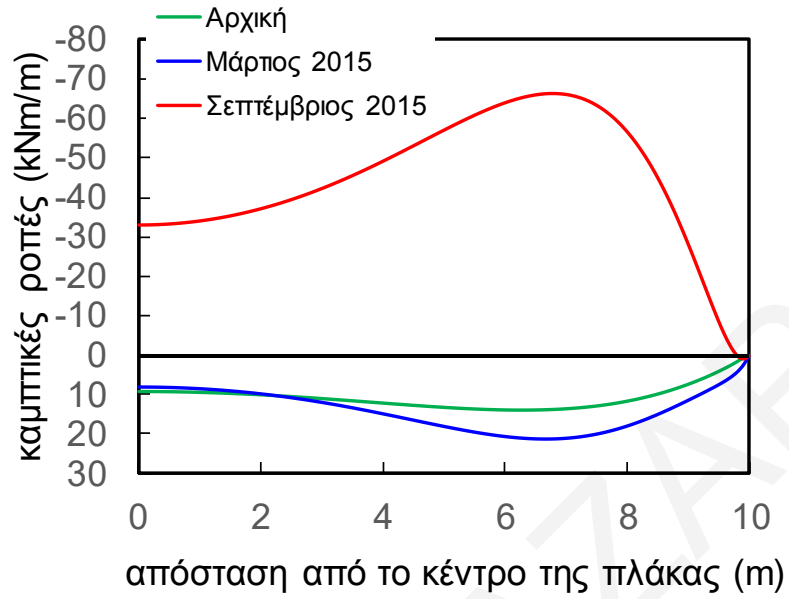
Σχήμα Ε.18: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 18.



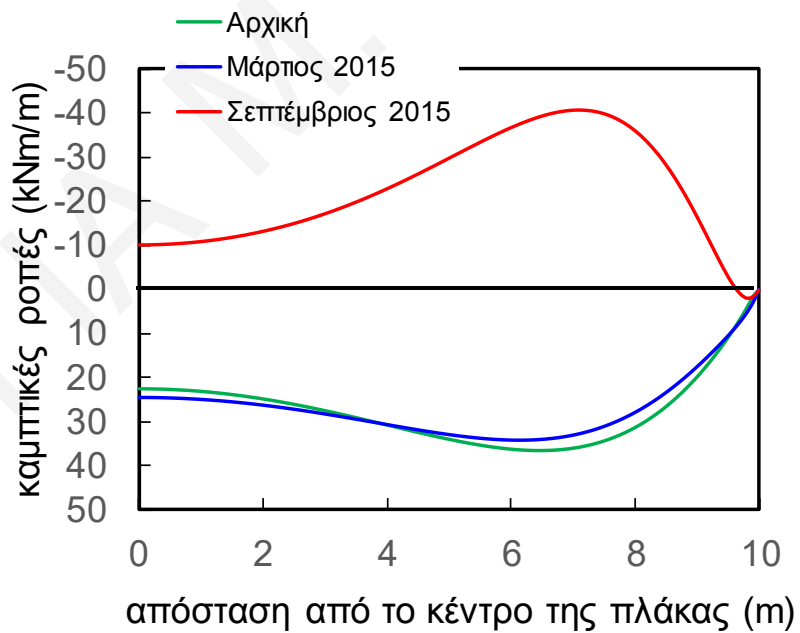
Σχήμα Ε.19: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 19.



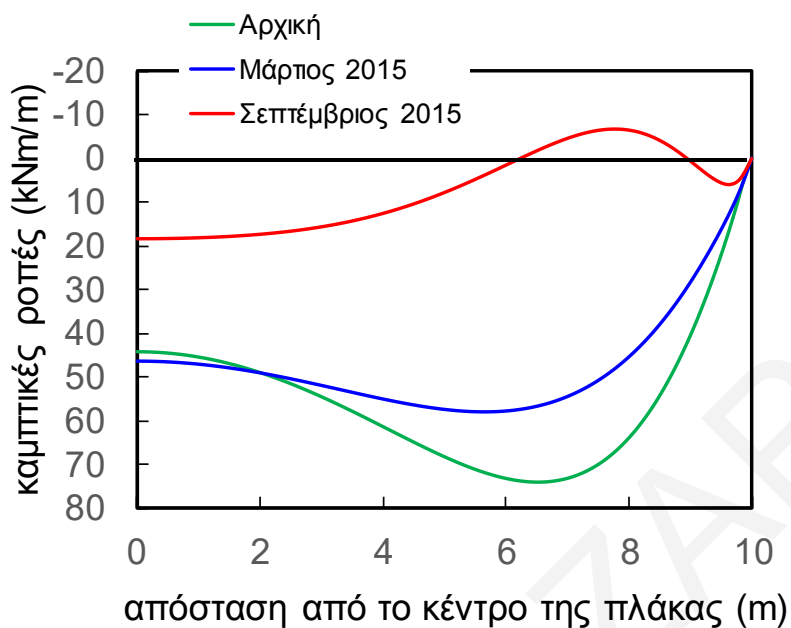
Σχήμα Ε.20: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 20



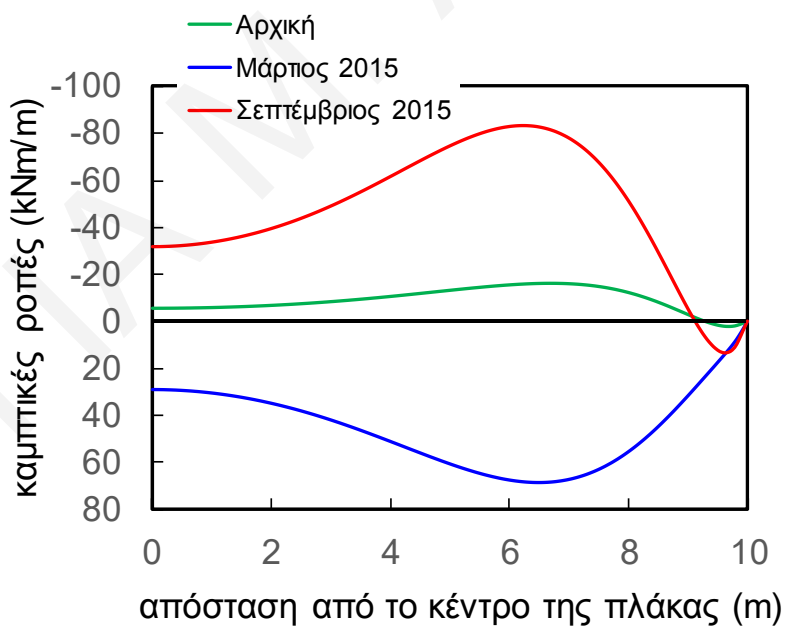
Σχήμα Ε.21: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 21.



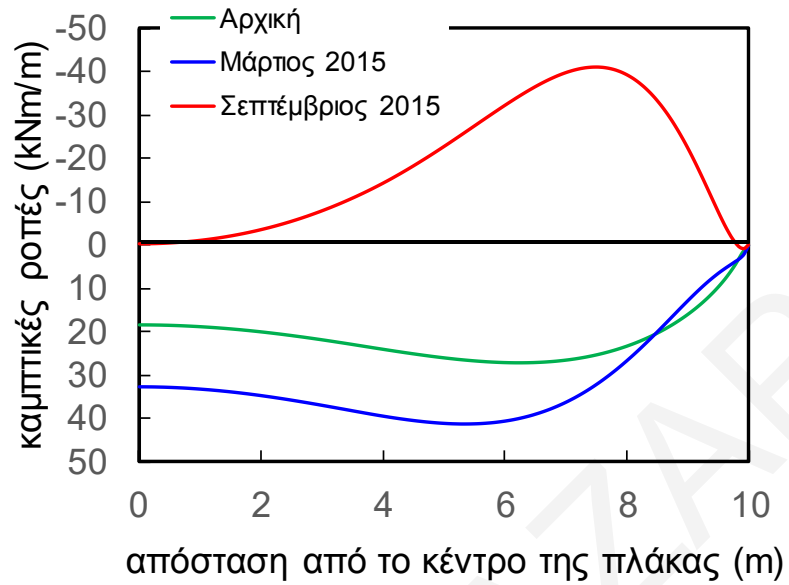
Σχήμα Ε.22: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 22.



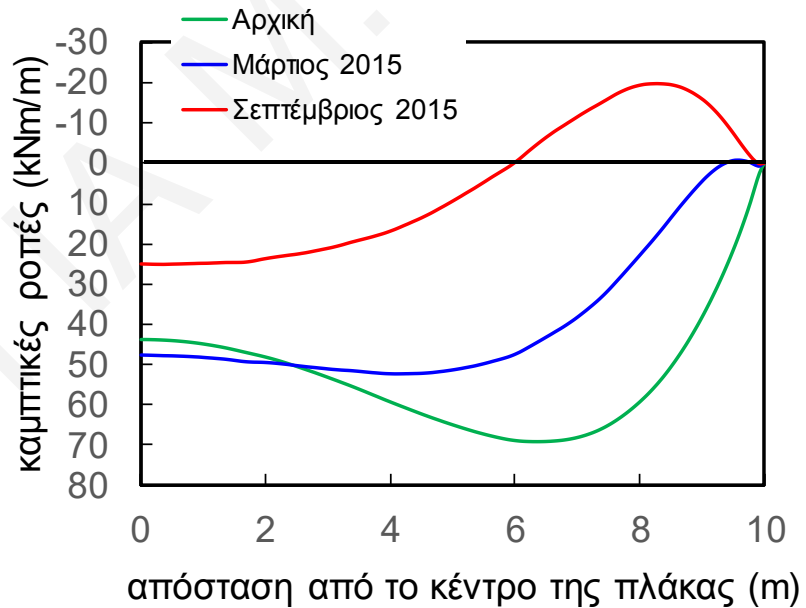
Σχήμα Ε.23: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 23.



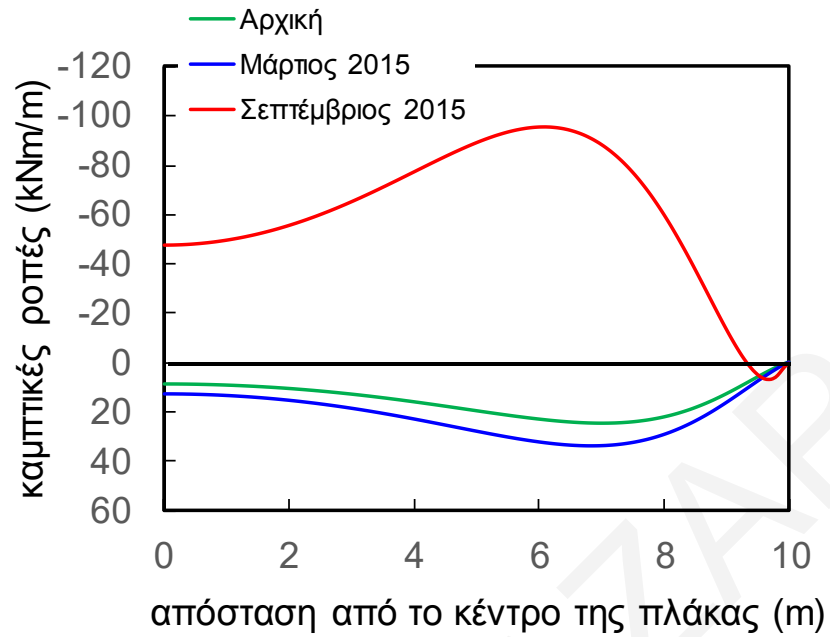
Σχήμα Ε.24: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 24.



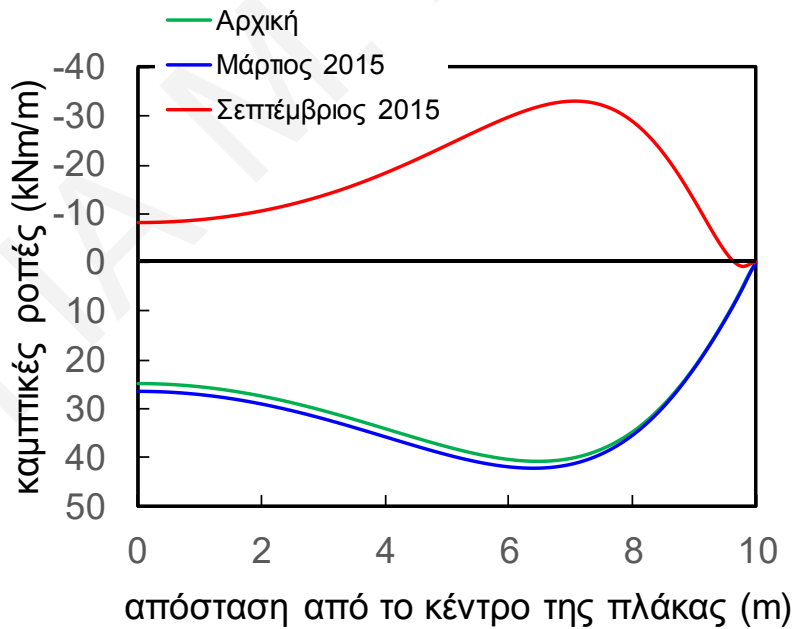
Σχήμα Ε.25: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 25.



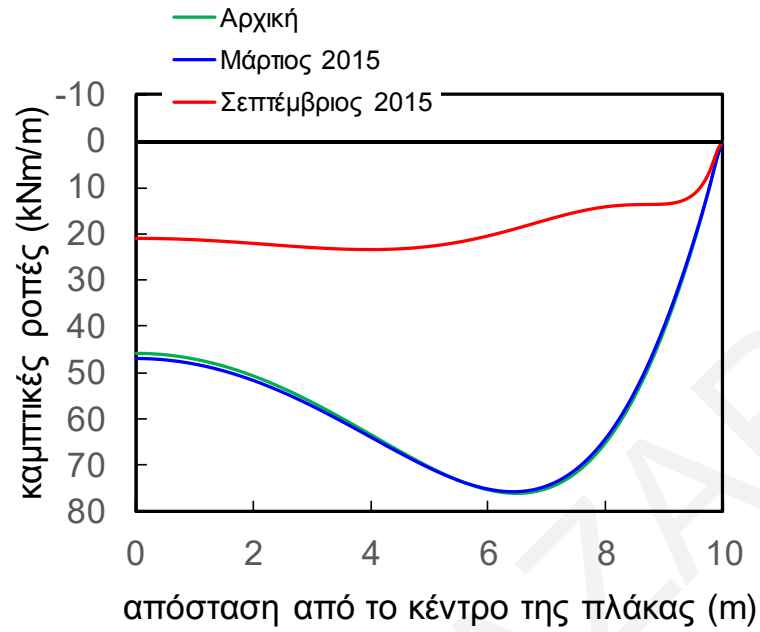
Σχήμα Ε.26: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 26.



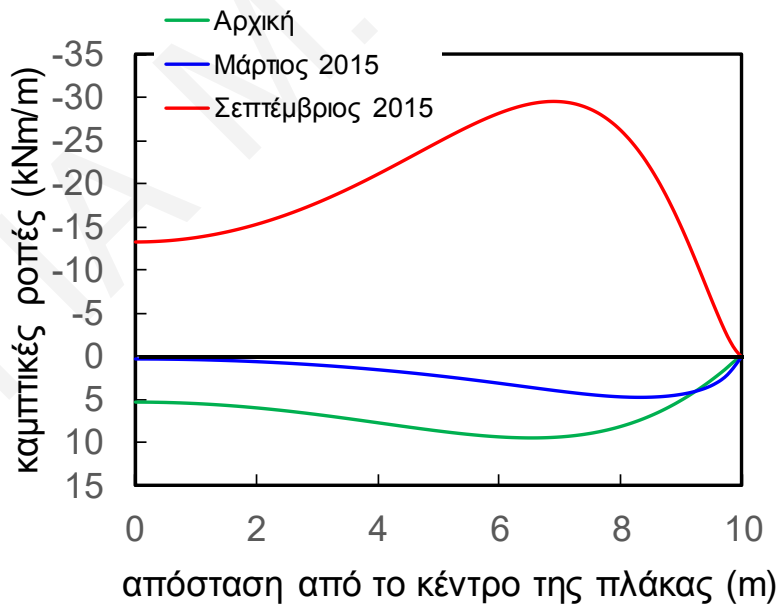
Σχήμα Ε.27: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 27.



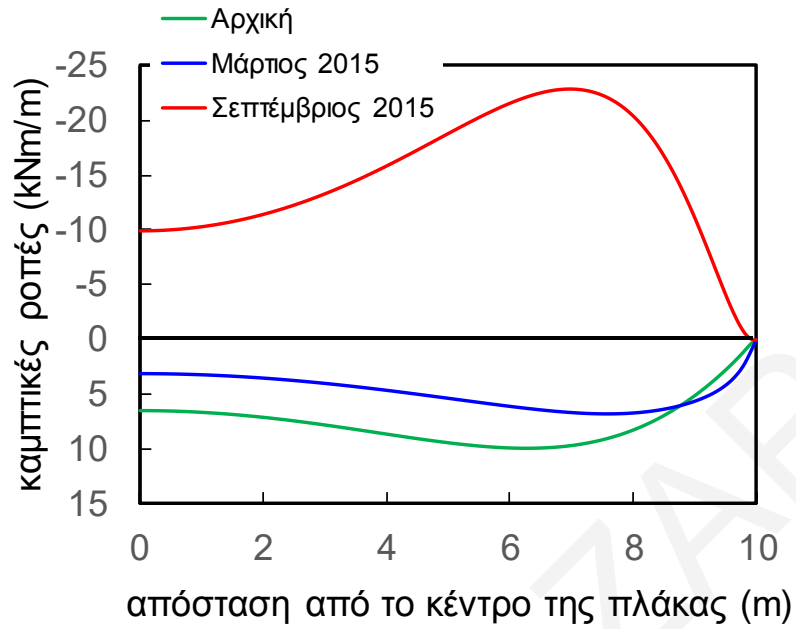
Σχήμα Ε.28: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 28.



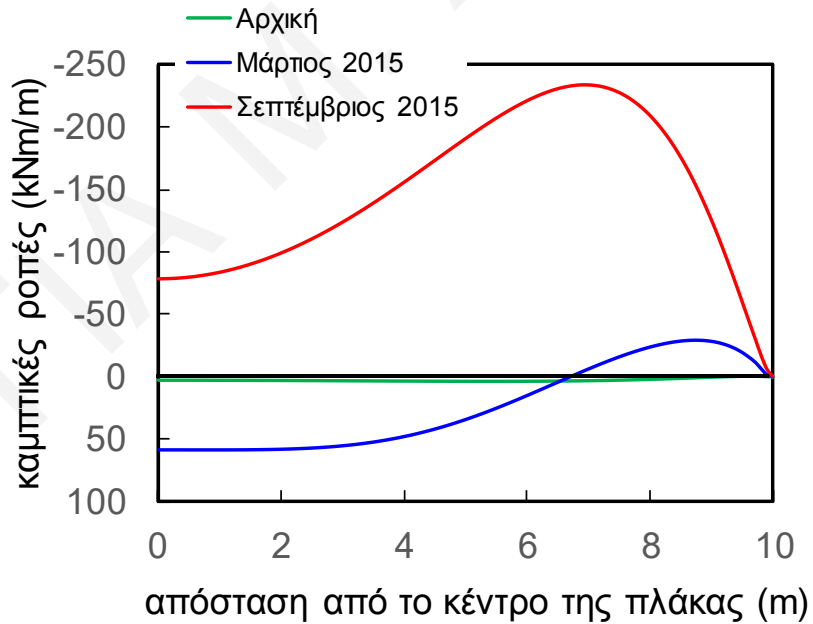
Σχήμα Ε.29: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 29.



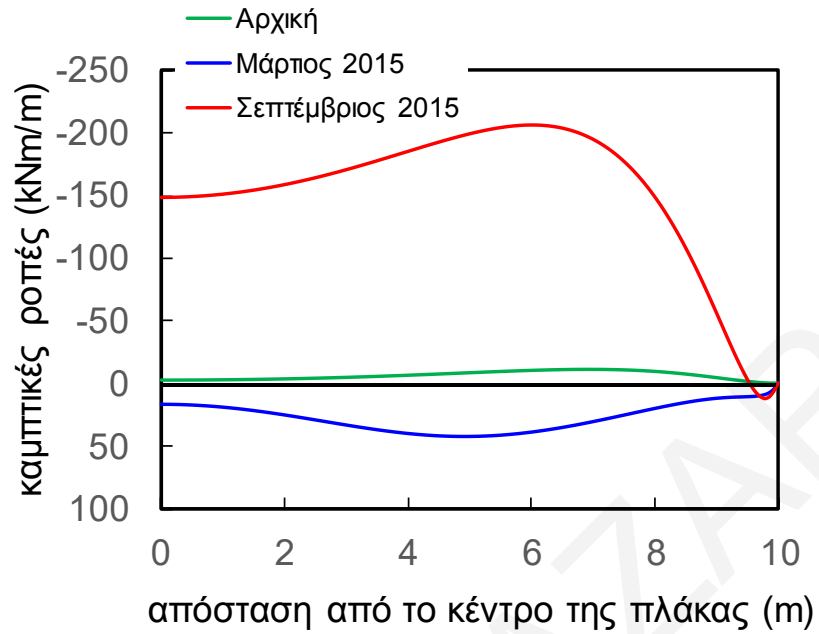
Σχήμα Ε.30: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 30.



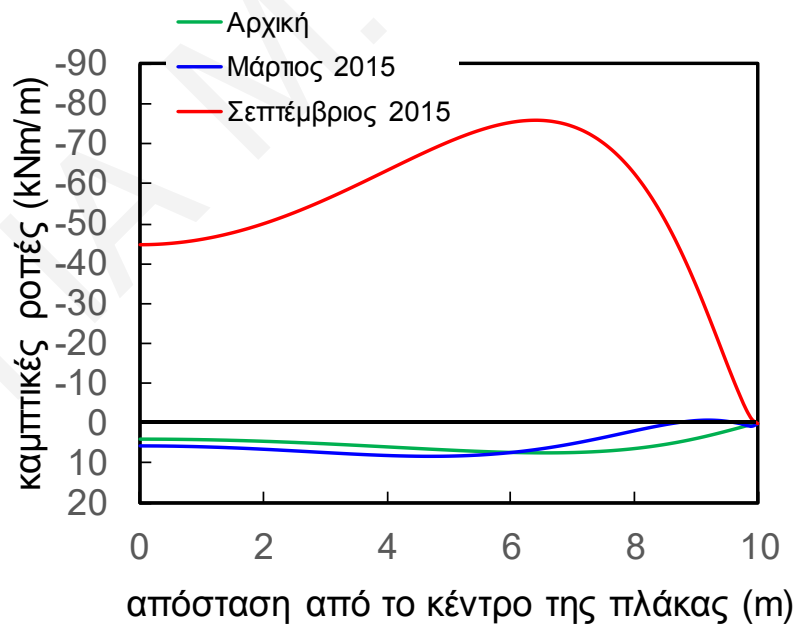
Σχήμα Ε.31: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 31.



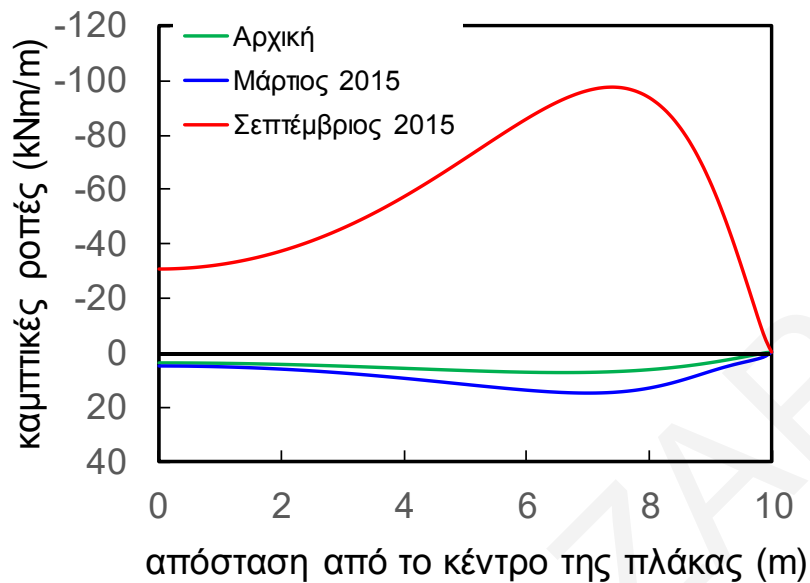
Σχήμα Ε.32: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 32.



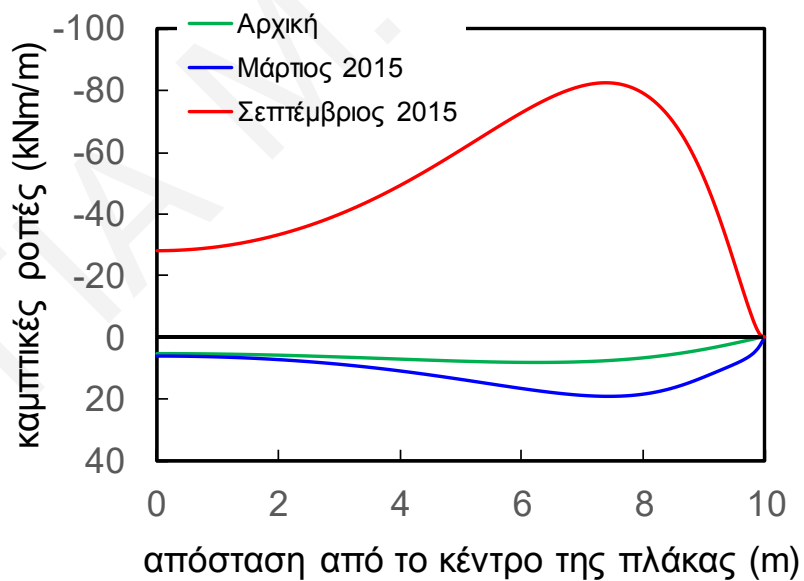
Σχήμα Ε.33: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 33.



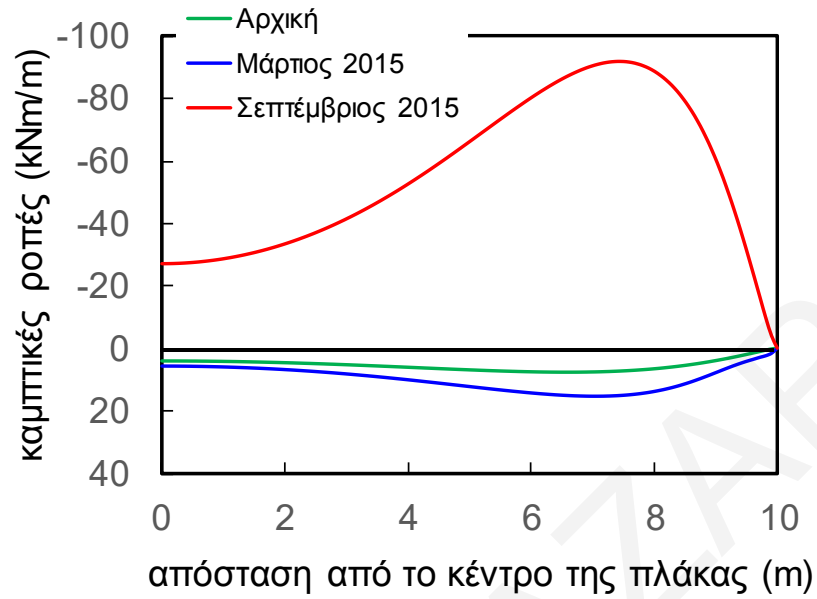
Σχήμα Ε.34: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 34.



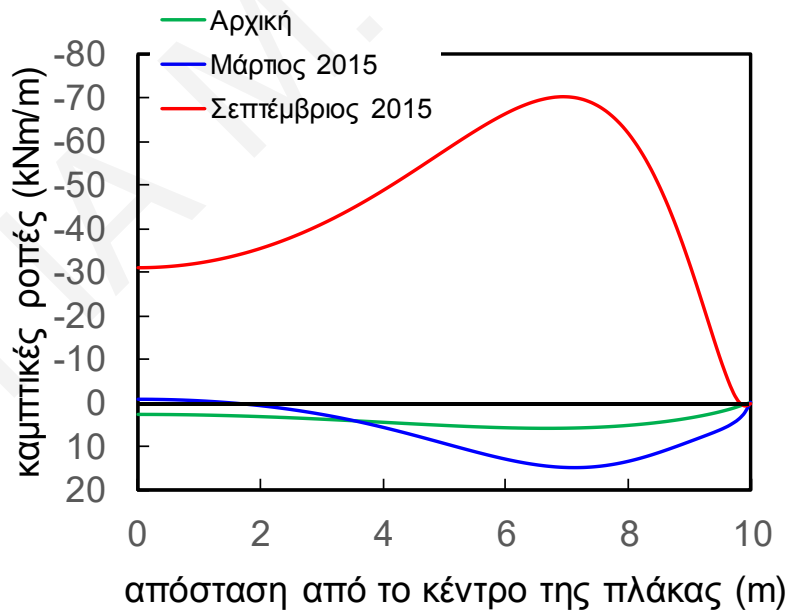
Σχήμα Ε.35: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 35.



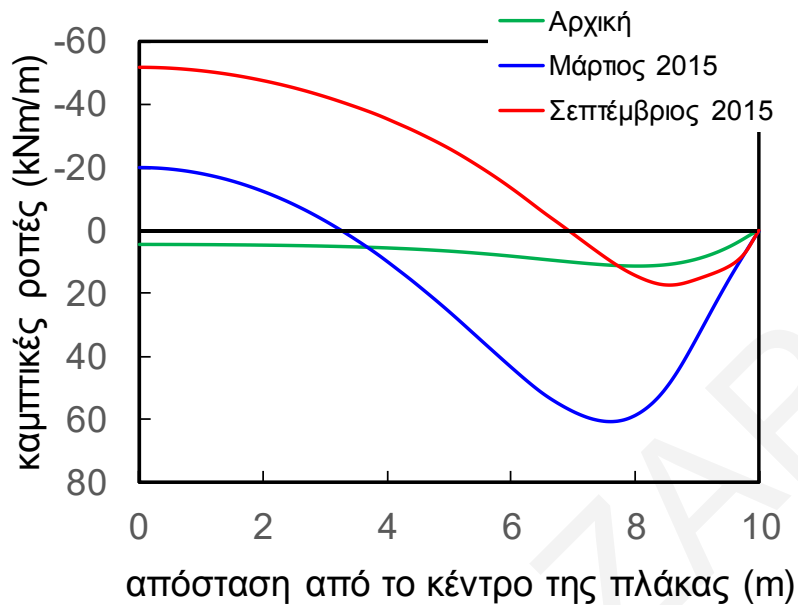
Σχήμα Ε.36: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 36.



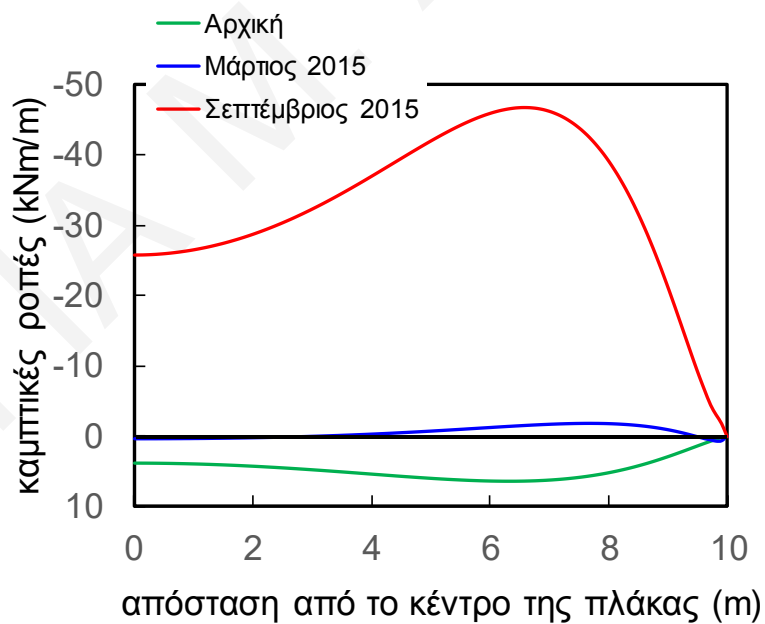
Σχήμα Ε.37: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 37.



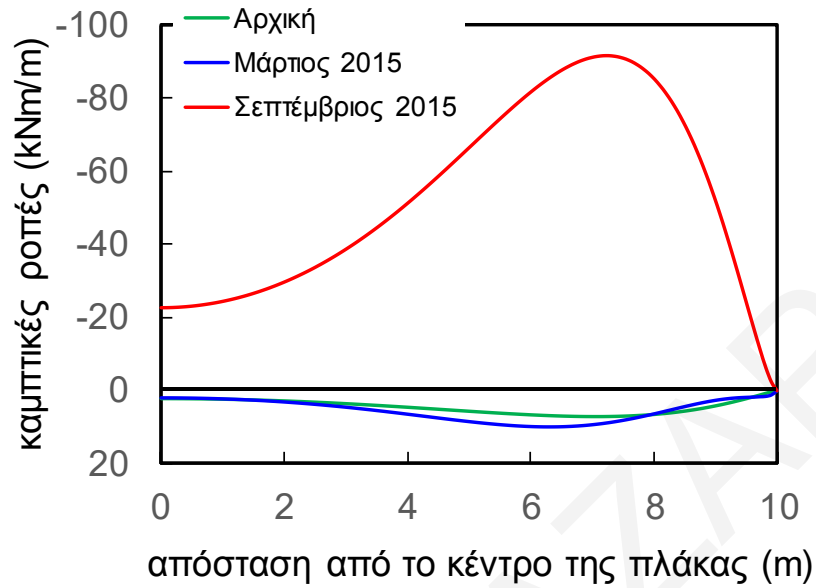
Σχήμα Ε.38: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 38.



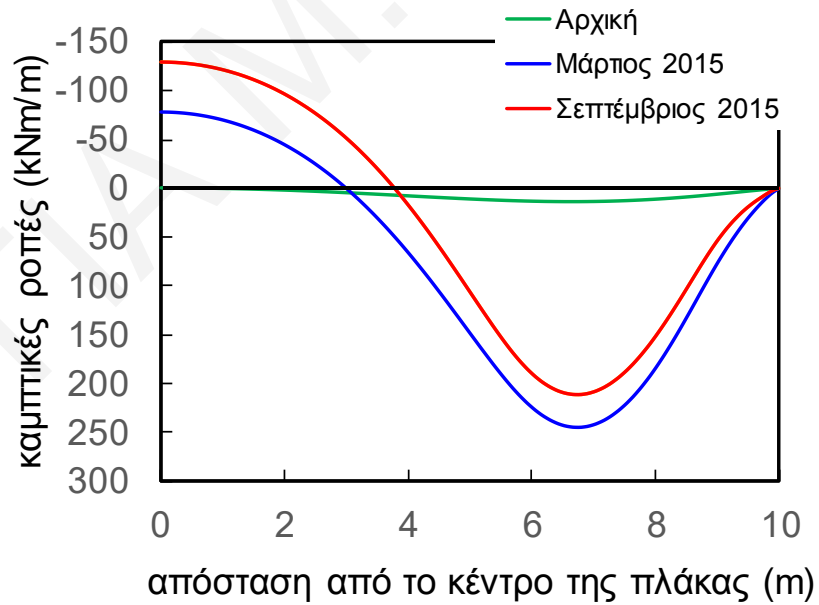
Σχήμα Ε.39: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 39.



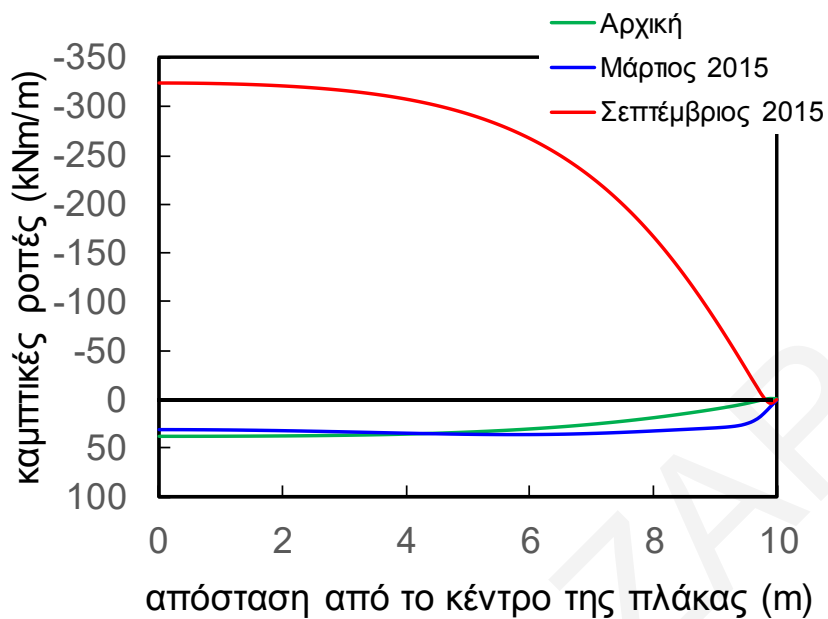
Σχήμα Ε.40: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 40.



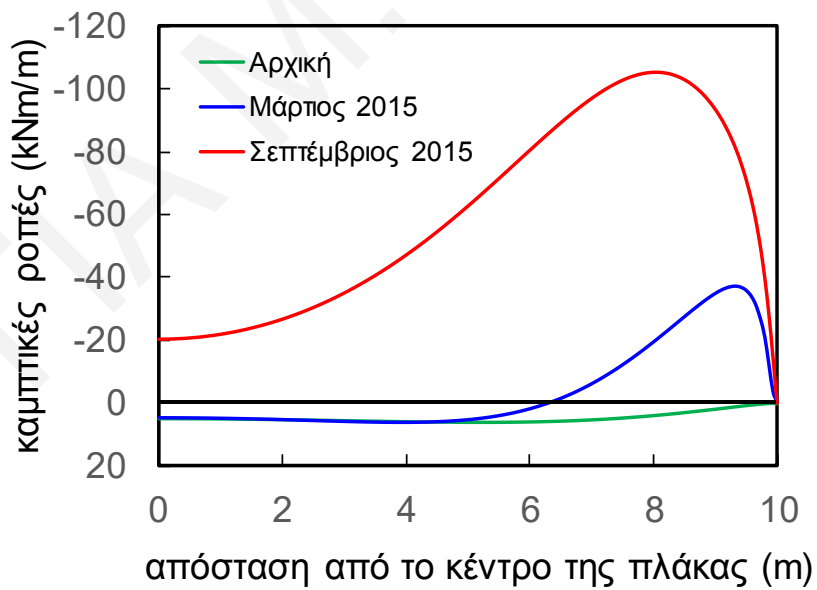
Σχήμα Ε.41: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 41.



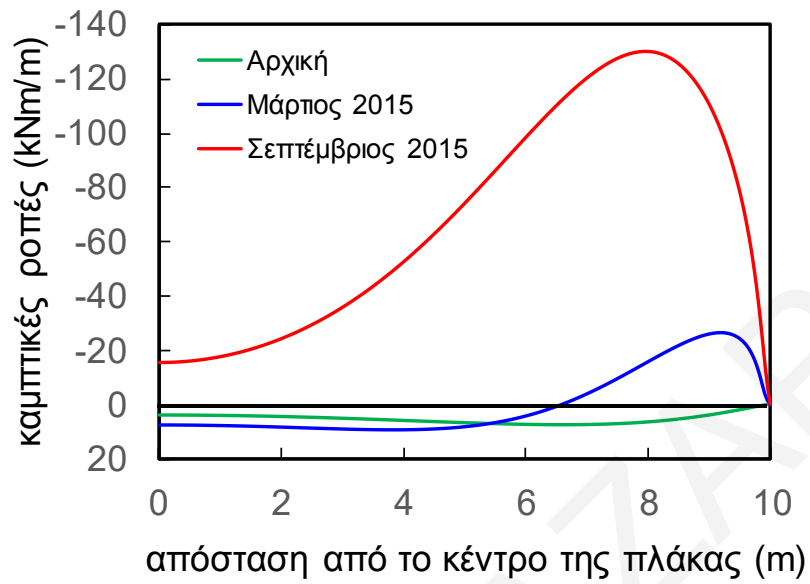
Σχήμα Ε.42: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 42.



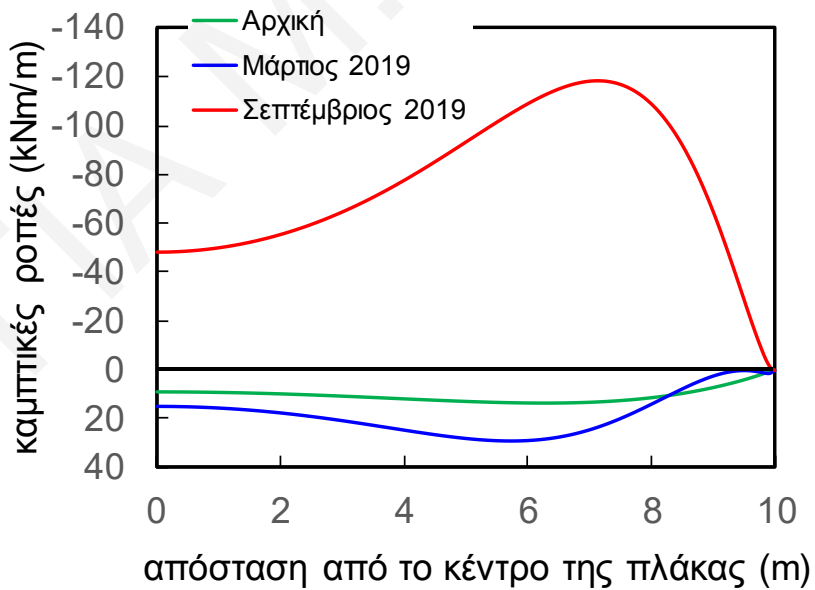
Σχήμα Ε.43: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 43.



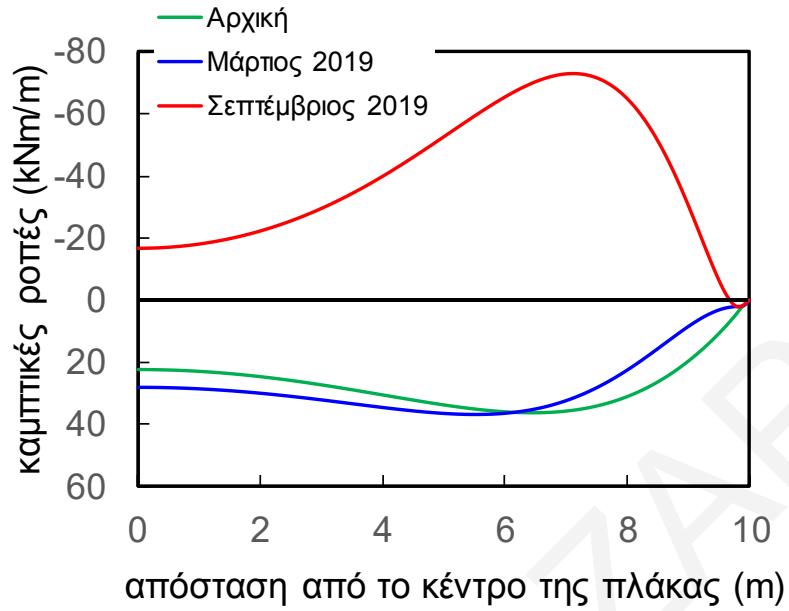
Σχήμα Ε.44: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 44.



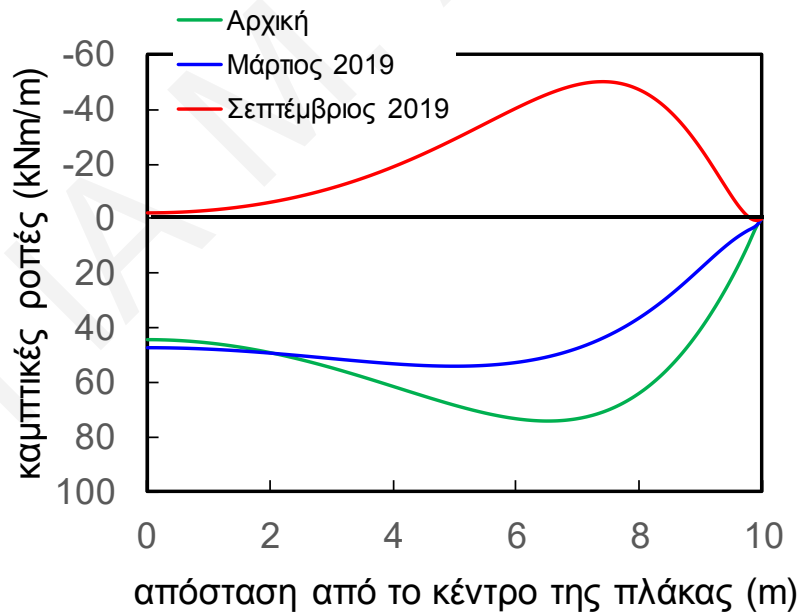
Σχήμα Ε.46: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 46.



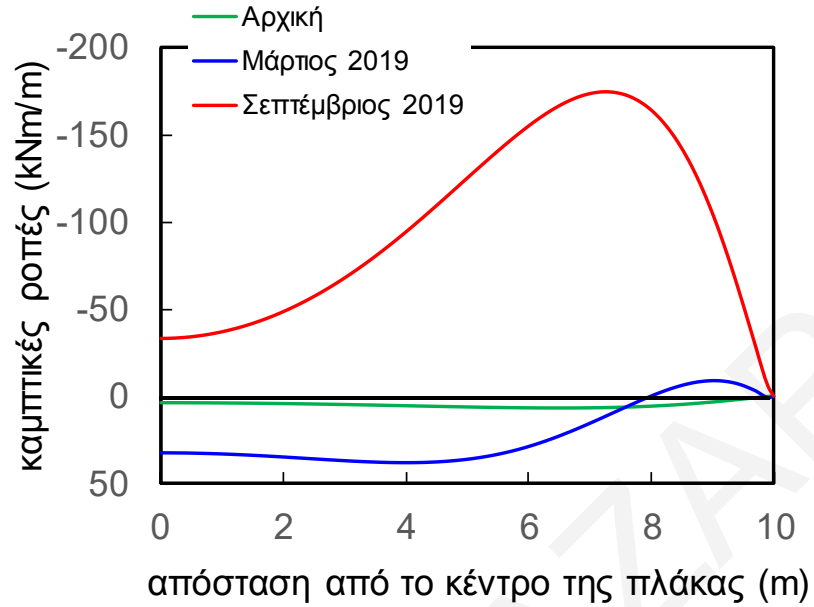
Σχήμα Ε.47: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 47.



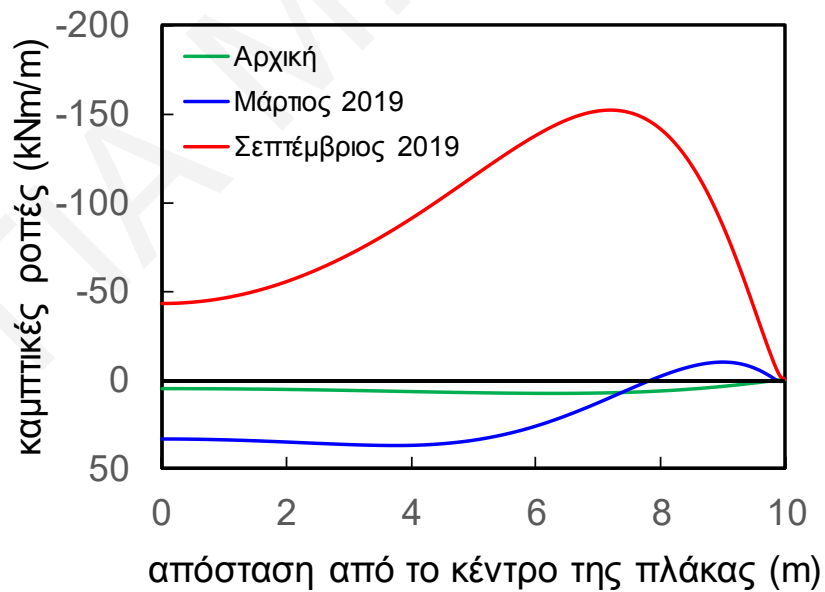
Σχήμα Ε.48: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 48



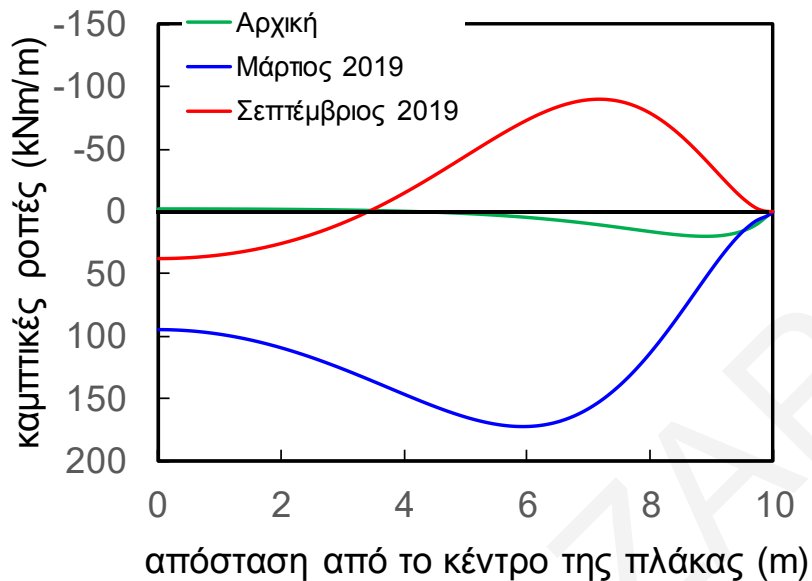
Σχήμα Ε.49: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 49.



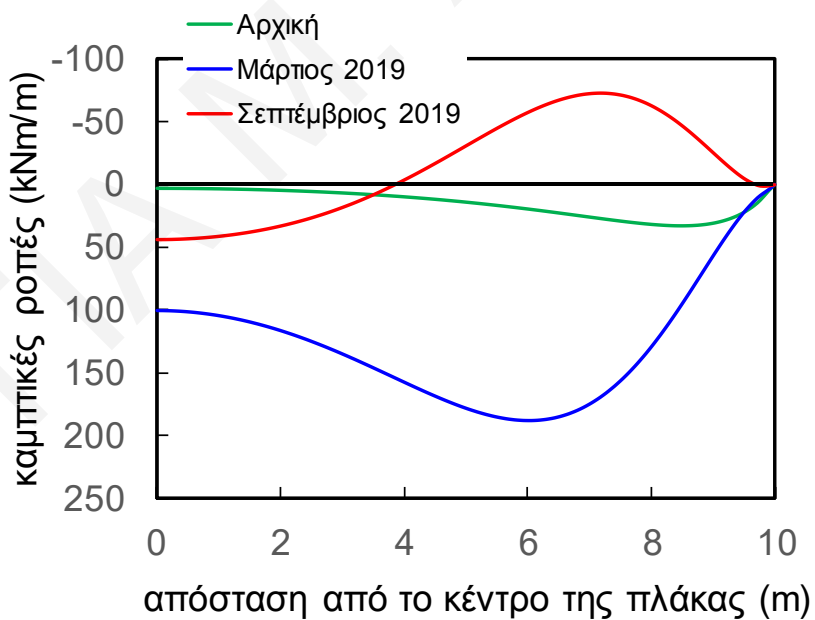
Σχήμα Ε.50: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 50.



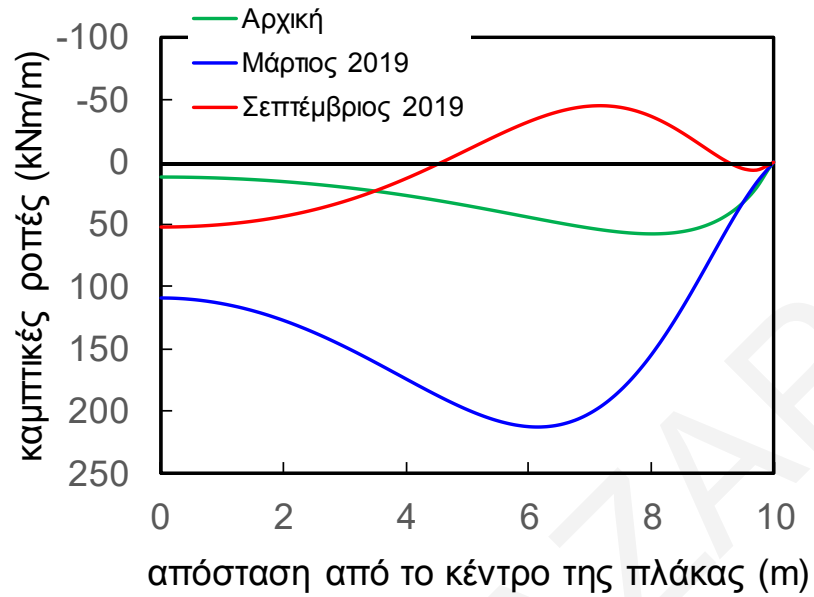
Σχήμα Ε.51: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 51.



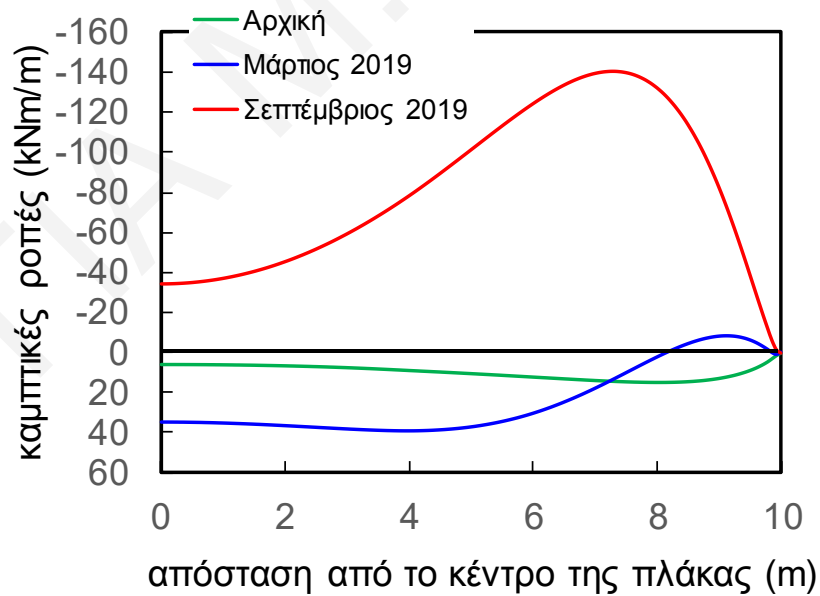
Σχήμα Ε.52: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 52.



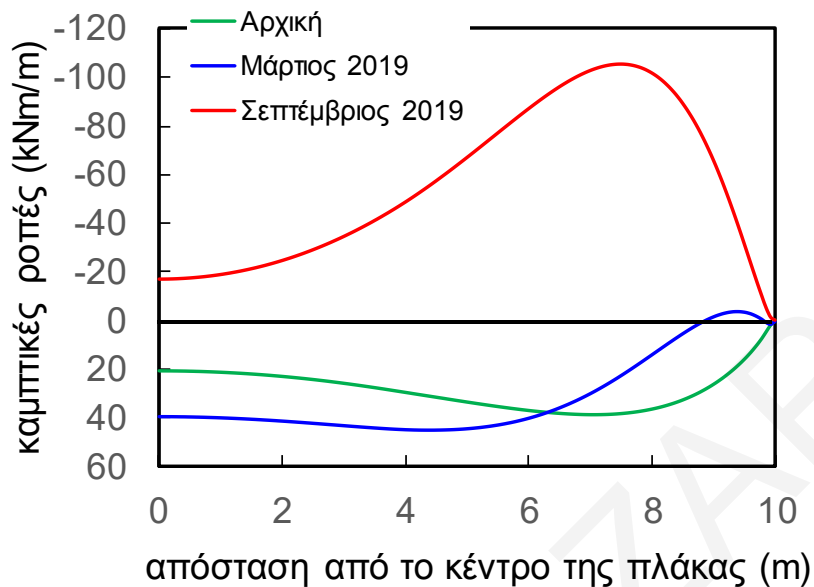
Σχήμα Ε.53: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 53.



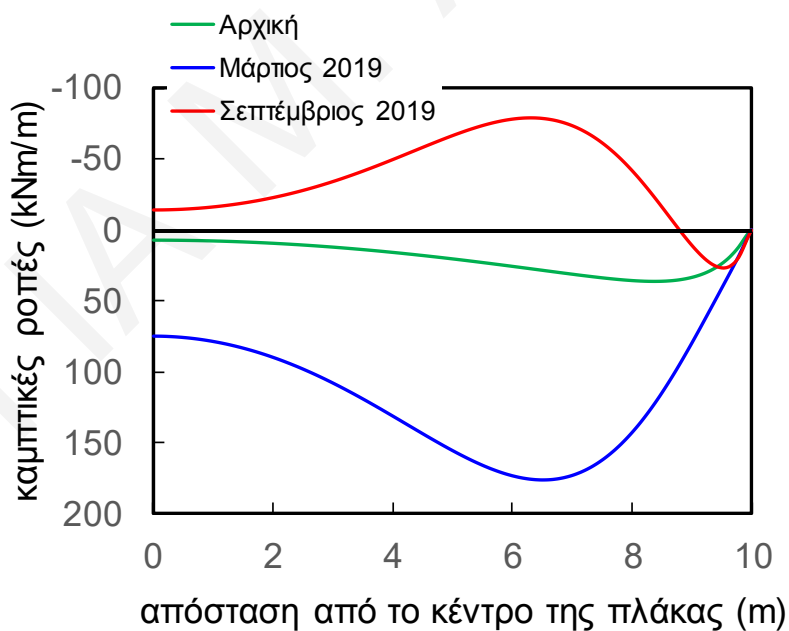
Σχήμα Ε.54: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 54.



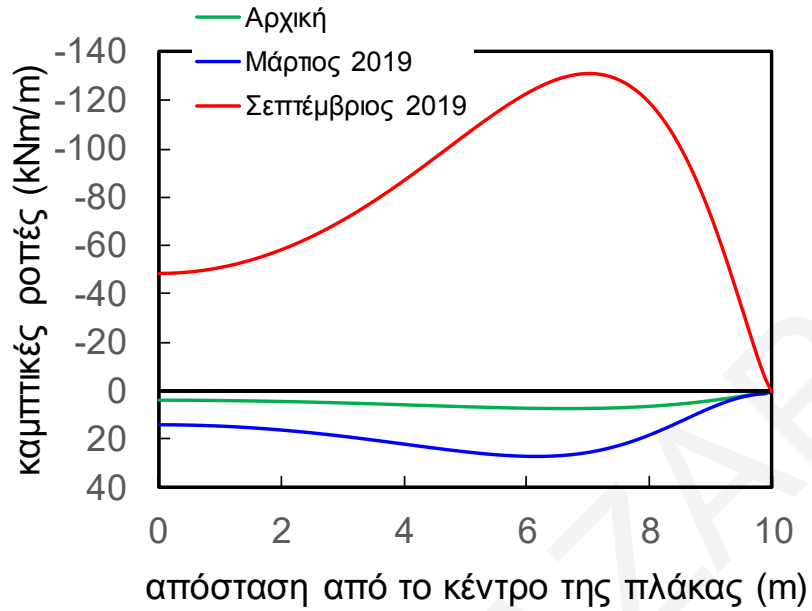
Σχήμα Ε.55: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 55.



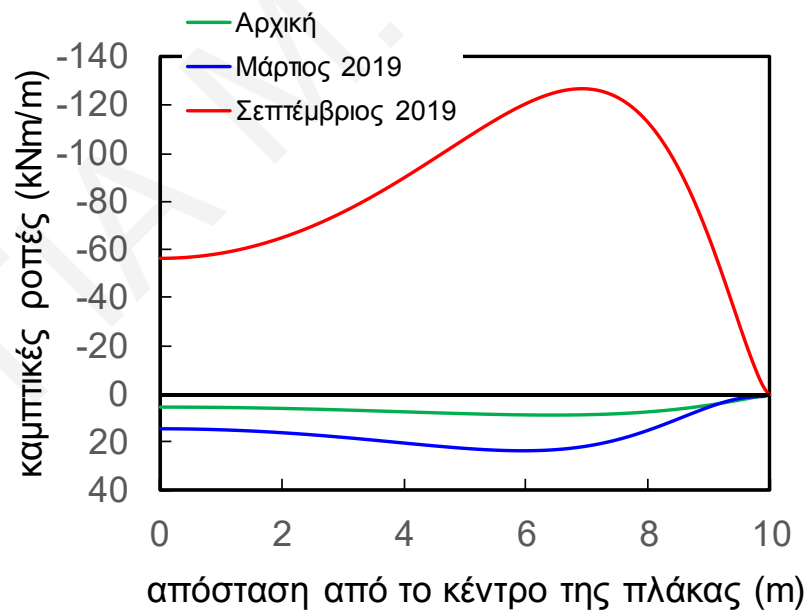
Σχήμα Ε.56: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 56.



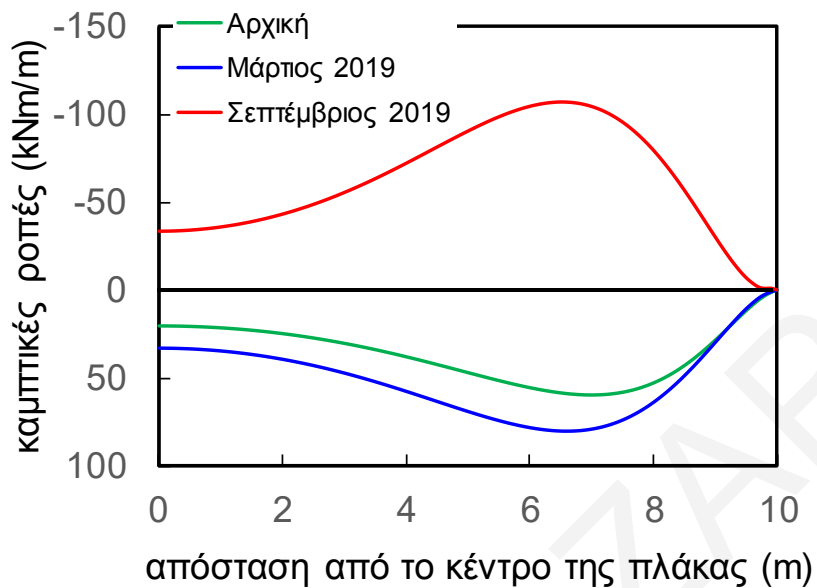
Σχήμα Ε.57: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 57.



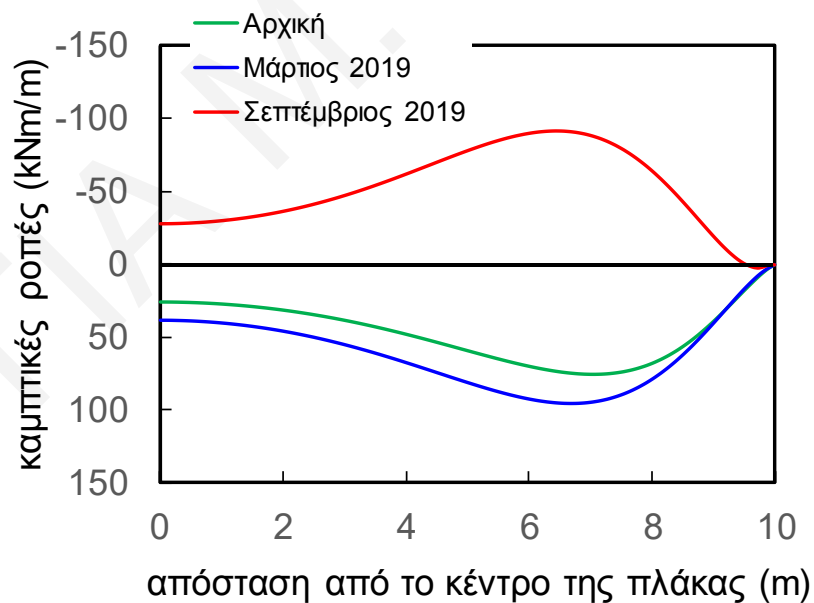
Σχήμα Ε.58: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 58.



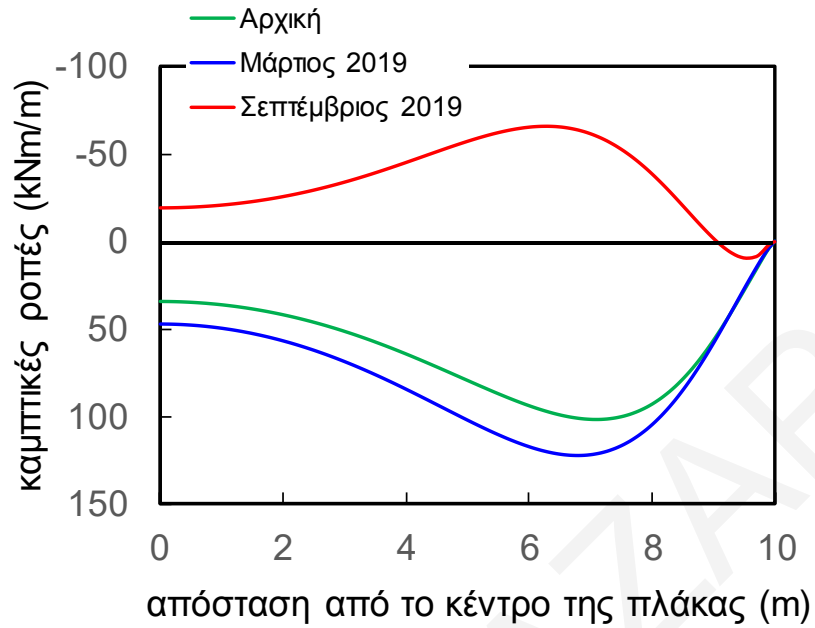
Σχήμα Ε.59: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 59.



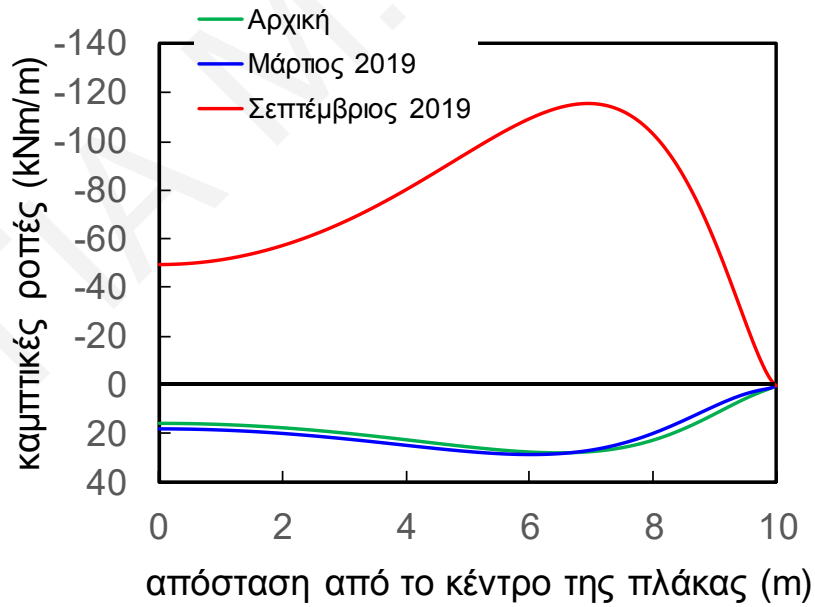
Σχήμα Ε.60: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 60.



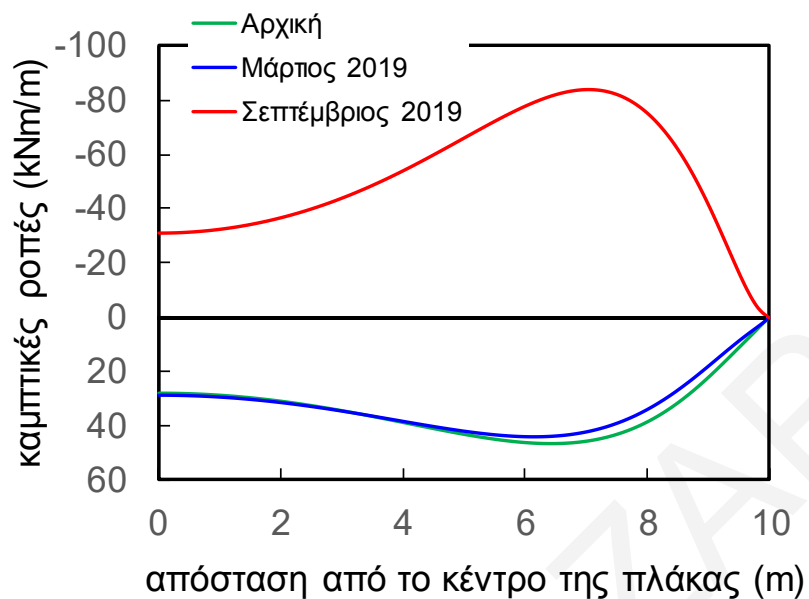
Σχήμα Ε.61: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 61.



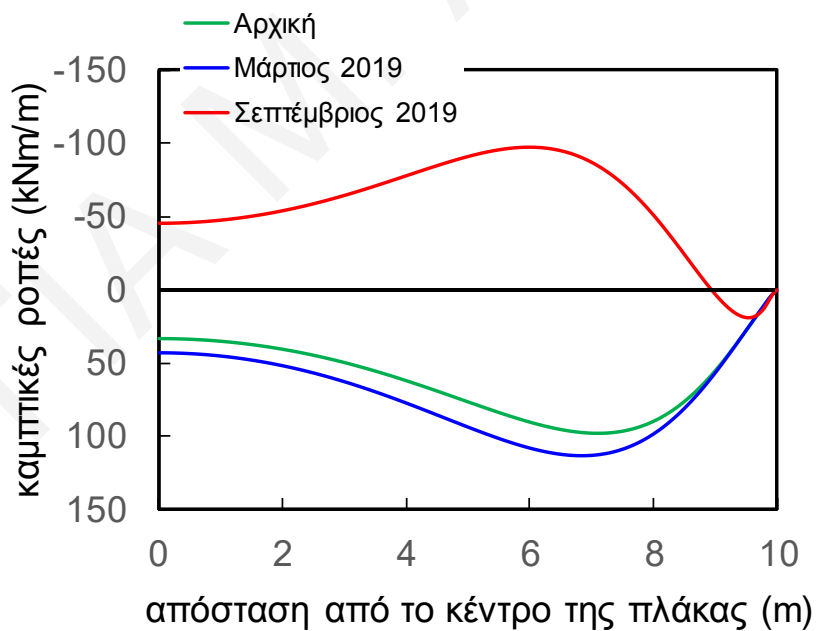
Σχήμα Ε.62: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 62.



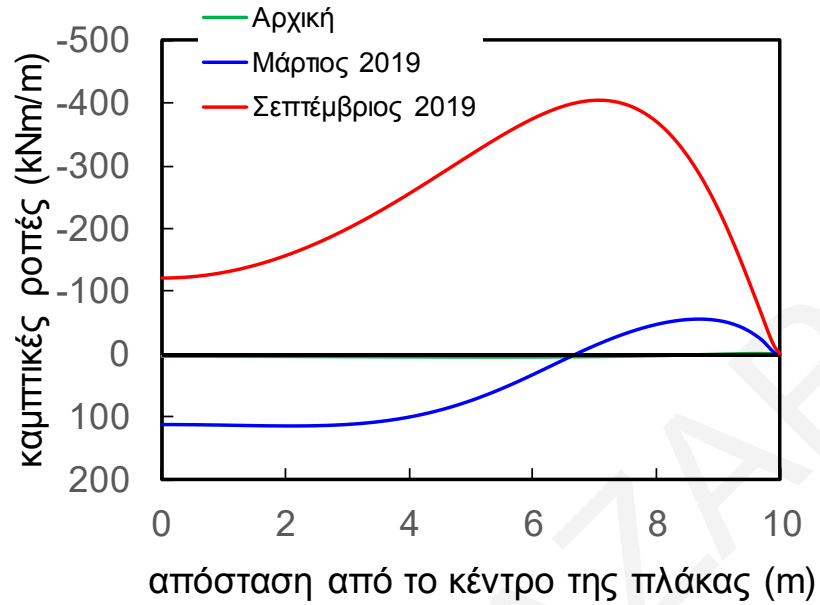
Σχήμα Ε.63: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 63.



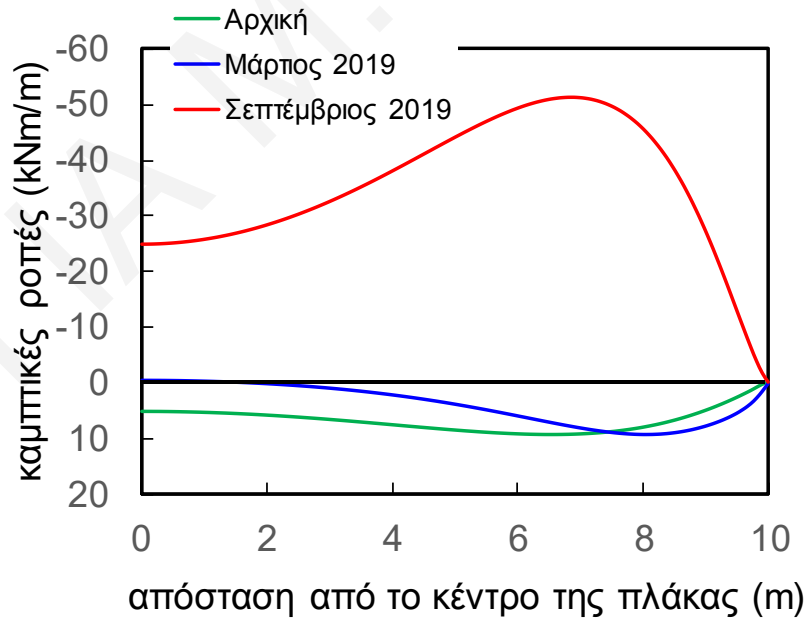
Σχήμα Ε.64: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 64.



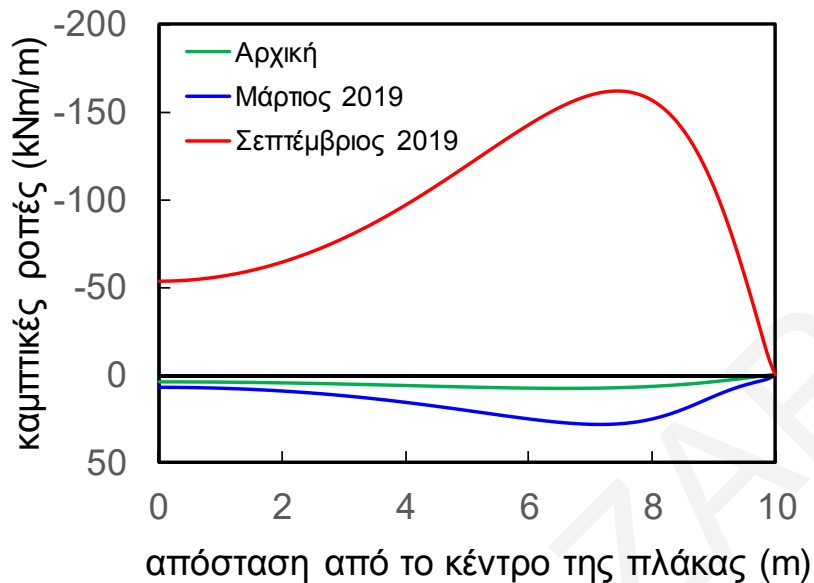
Σχήμα Ε.65: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 65.



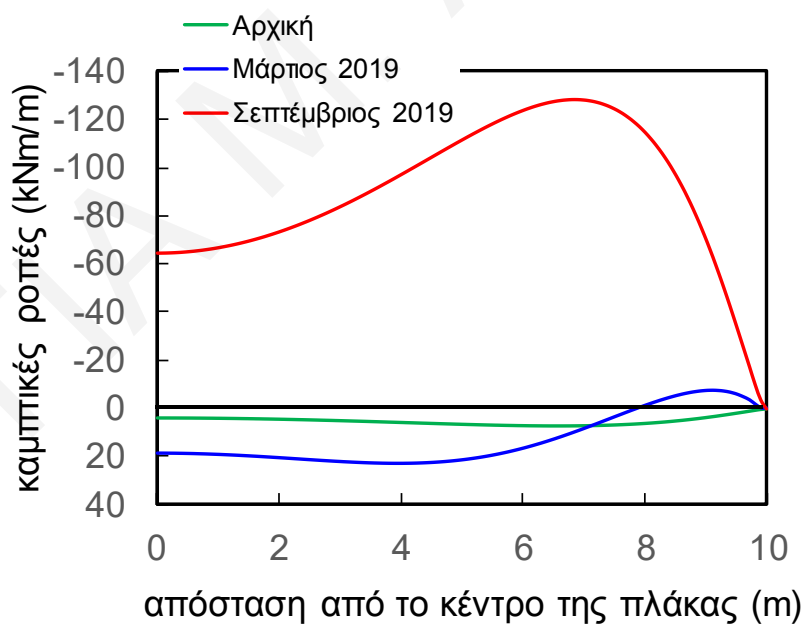
Σχήμα Ε.66: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 66.



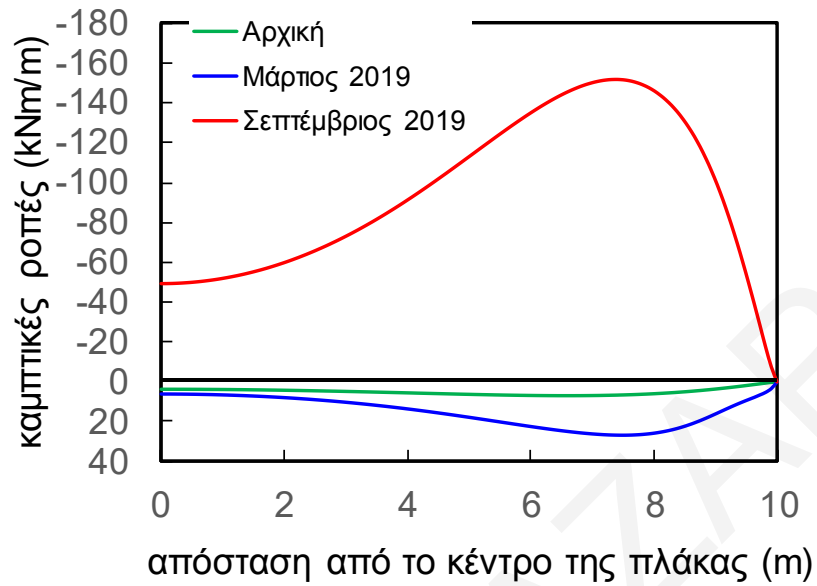
Σχήμα Ε.67: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 67.



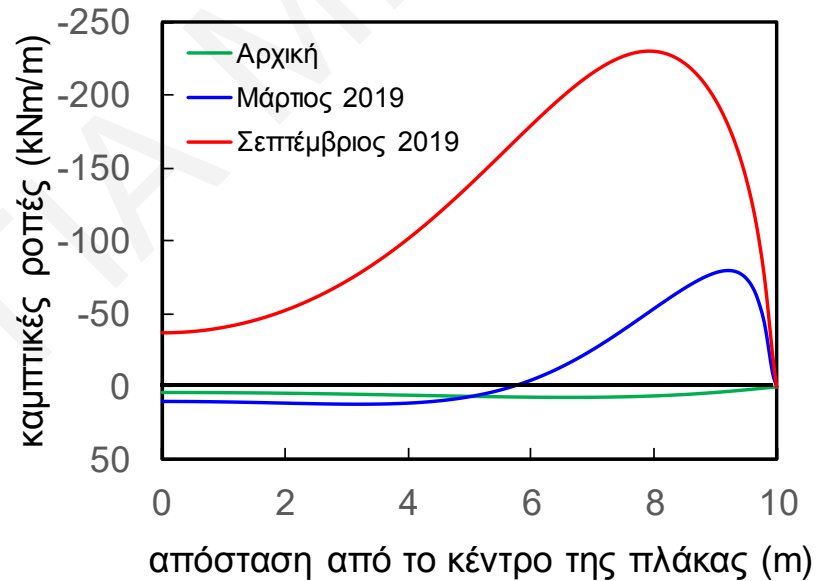
Σχήμα Ε.68: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 68.



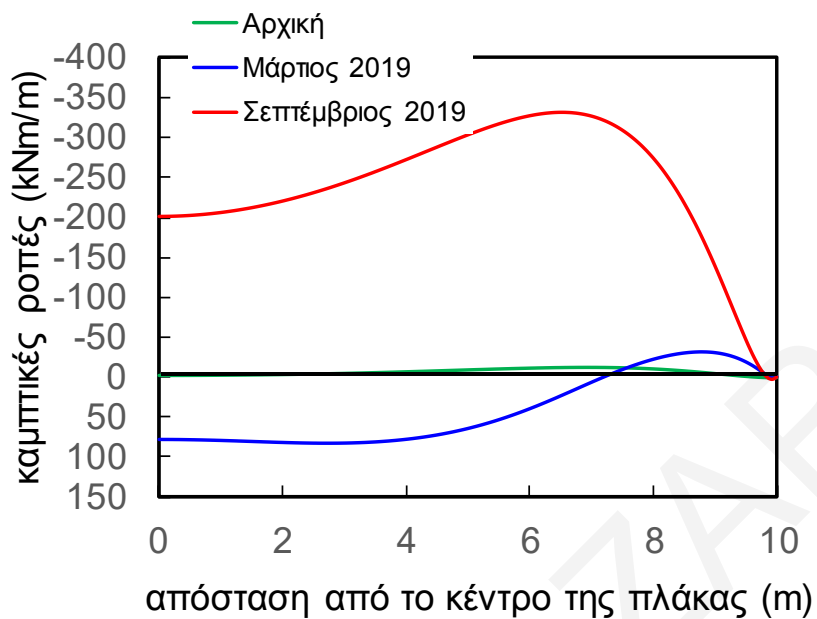
Σχήμα Ε.69: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 69.



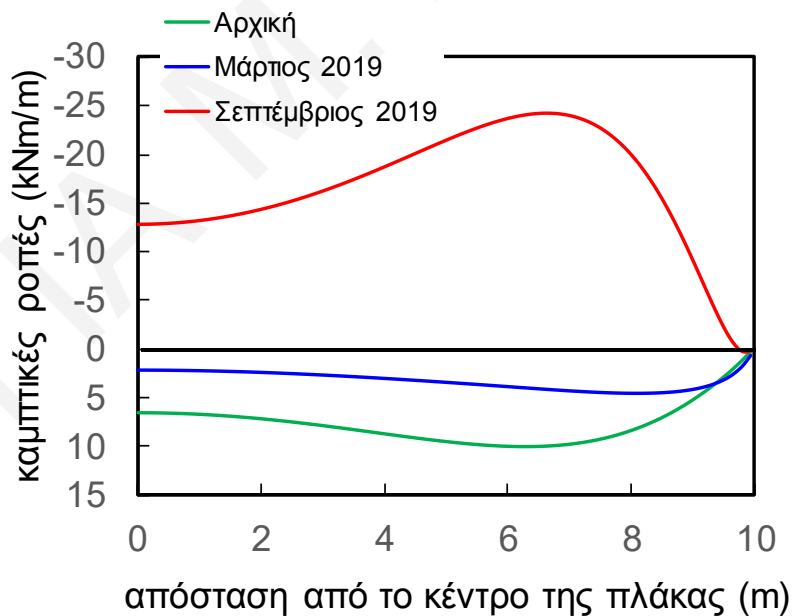
Σχήμα Ε.70: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 70.



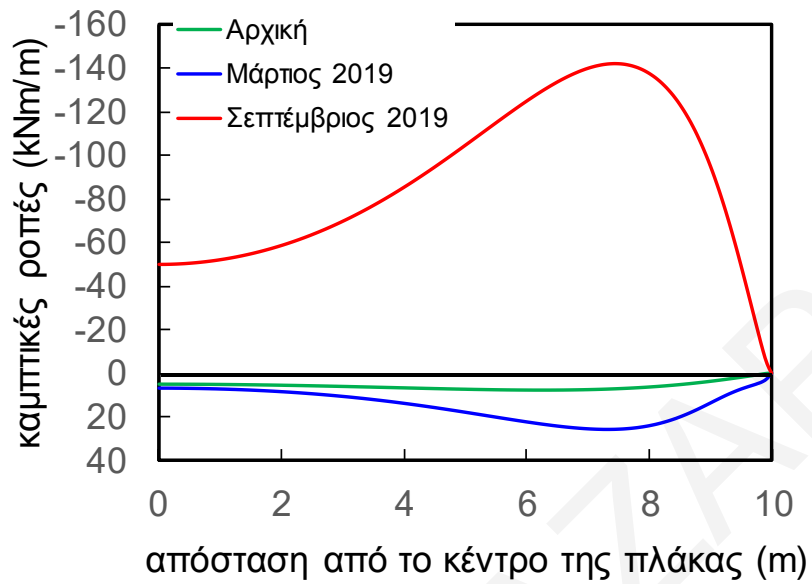
Σχήμα Ε.71: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 71.



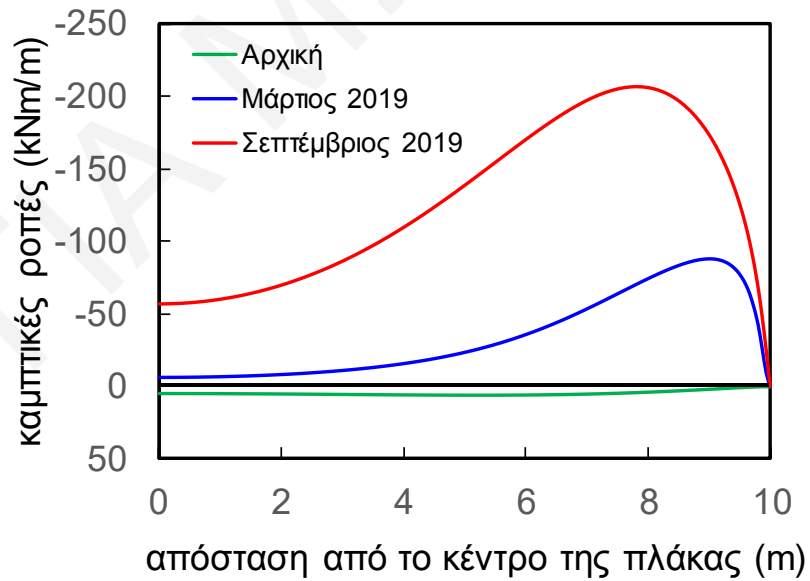
Σχήμα Ε.72: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 72.



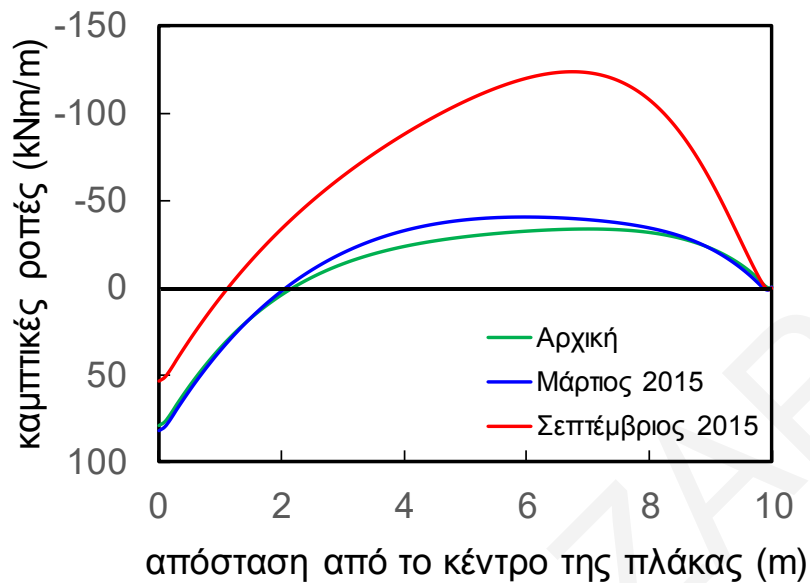
Σχήμα Ε.73: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 73.



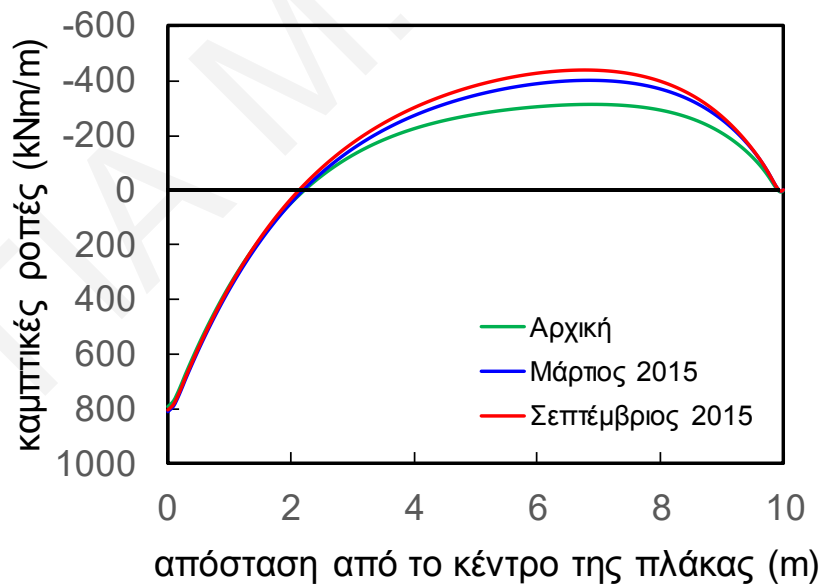
Σχήμα Ε.74: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 74.



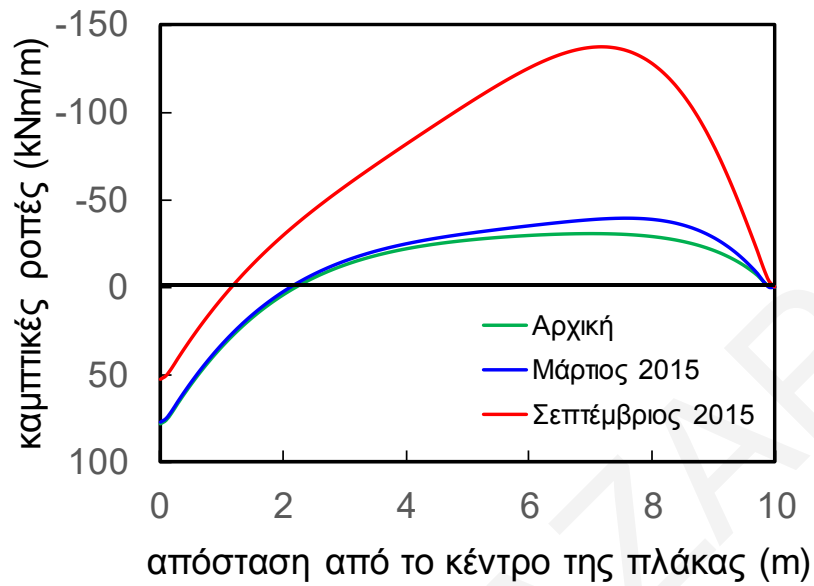
Σχήμα Ε.75: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 75.



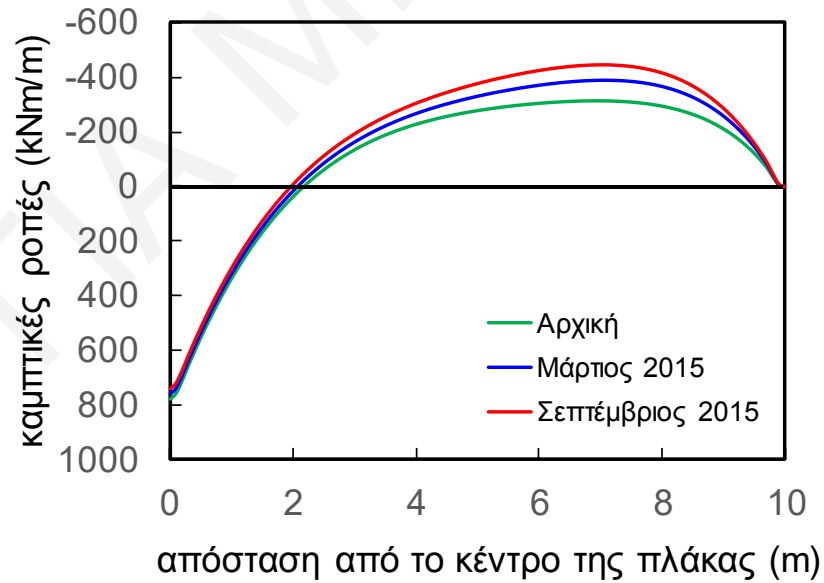
Σχήμα Ε.76: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 76.



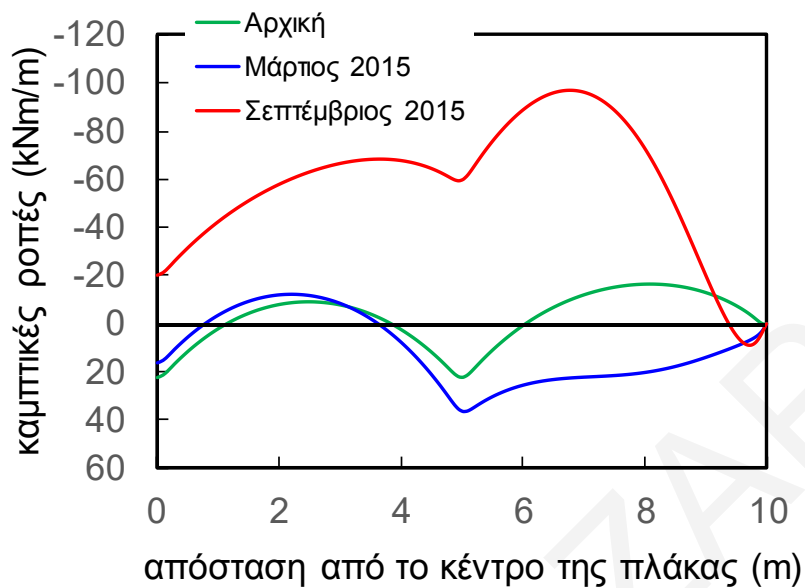
Σχήμα Ε.77: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 77.



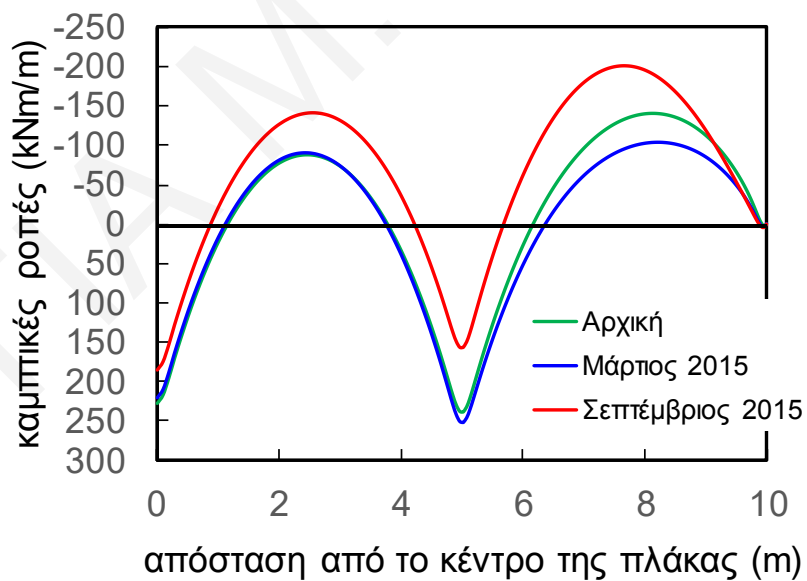
Σχήμα Ε.78: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 78.



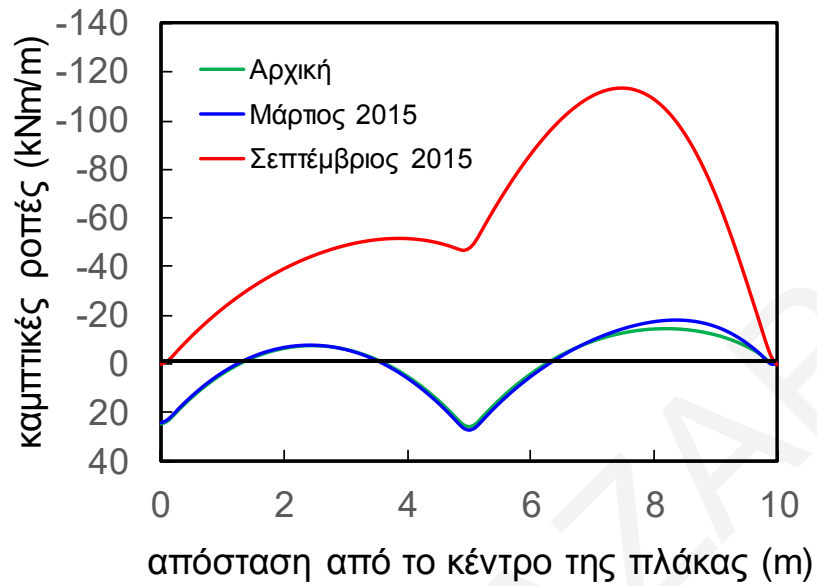
Σχήμα Ε.79: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 79.



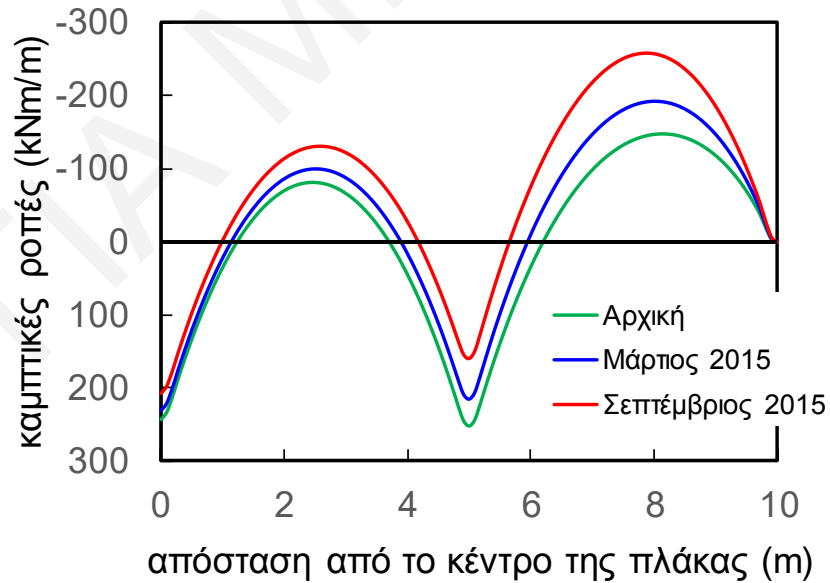
Σχήμα Ε.80: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 80.



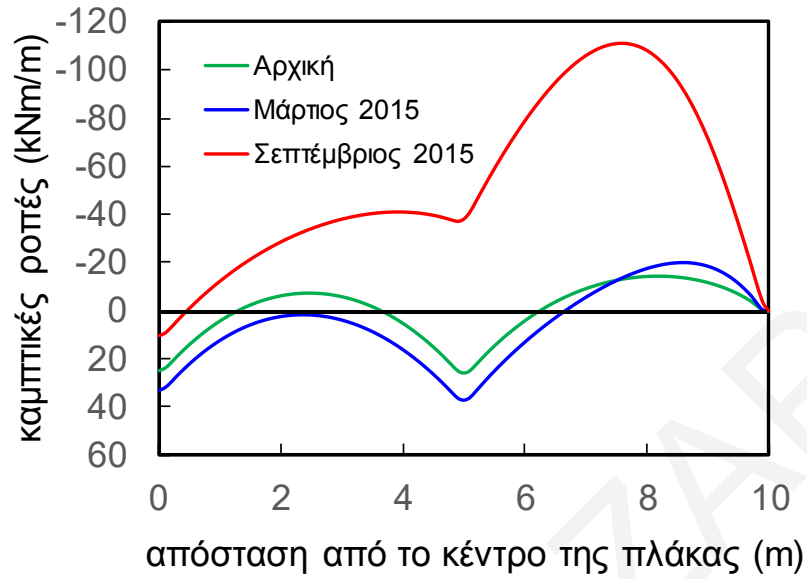
Σχήμα Ε.81: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 81.



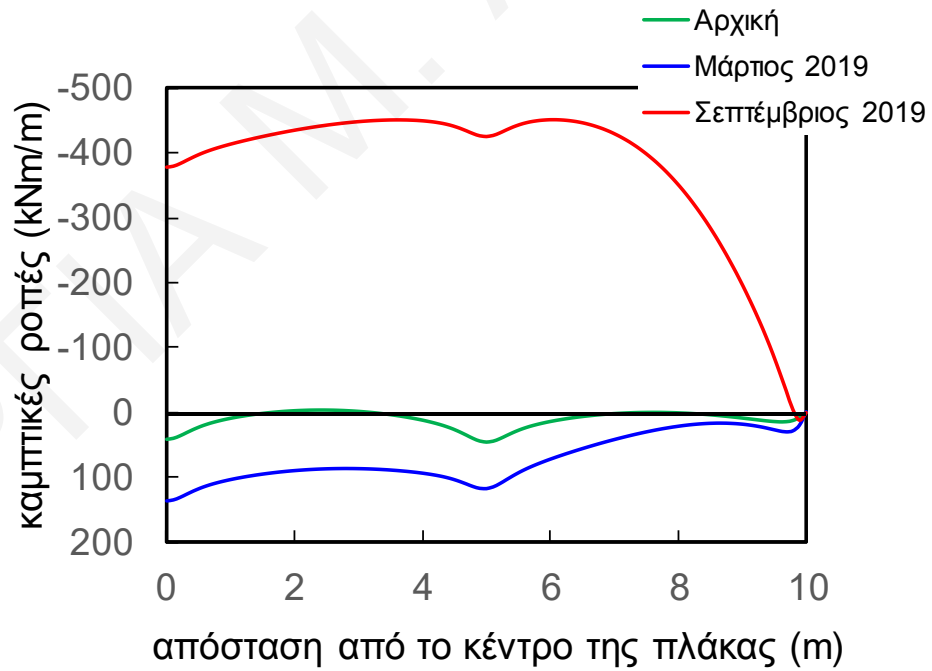
Σχήμα Ε.82: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 82.



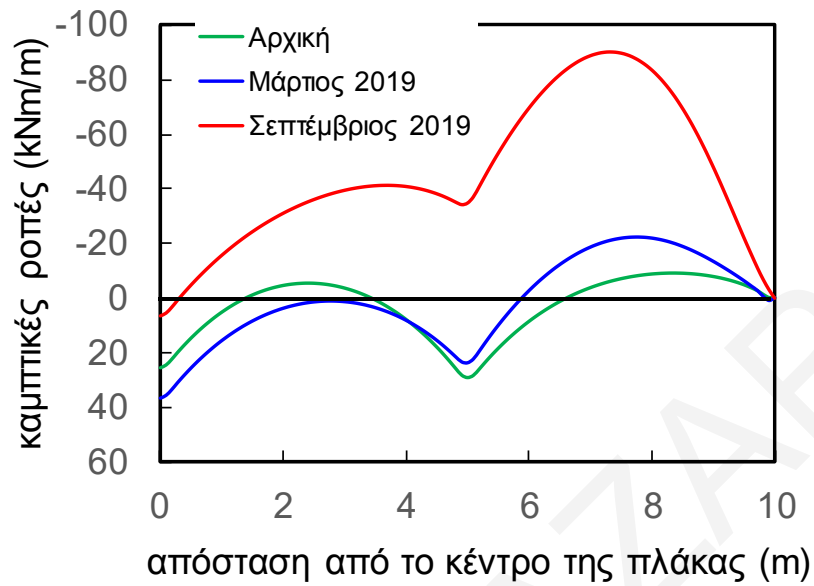
Σχήμα Ε.83: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 83.



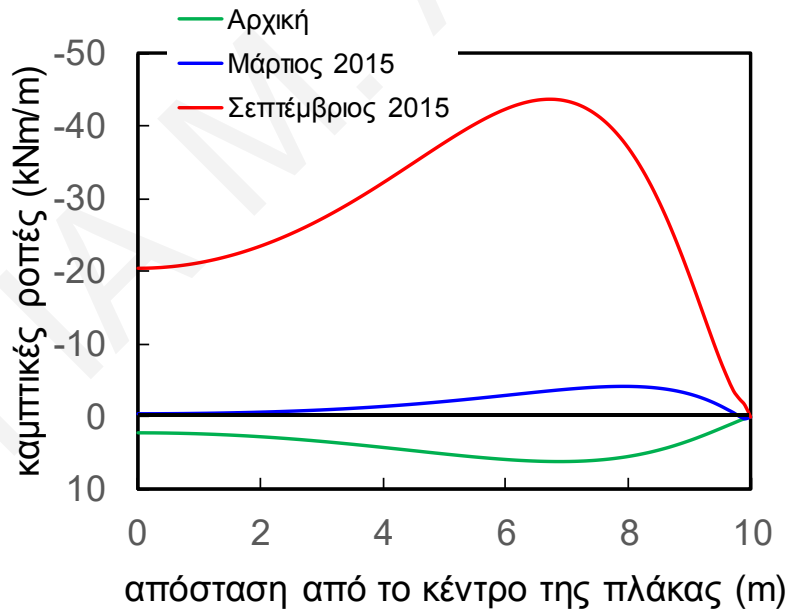
Σχήμα Ε.84: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 84.



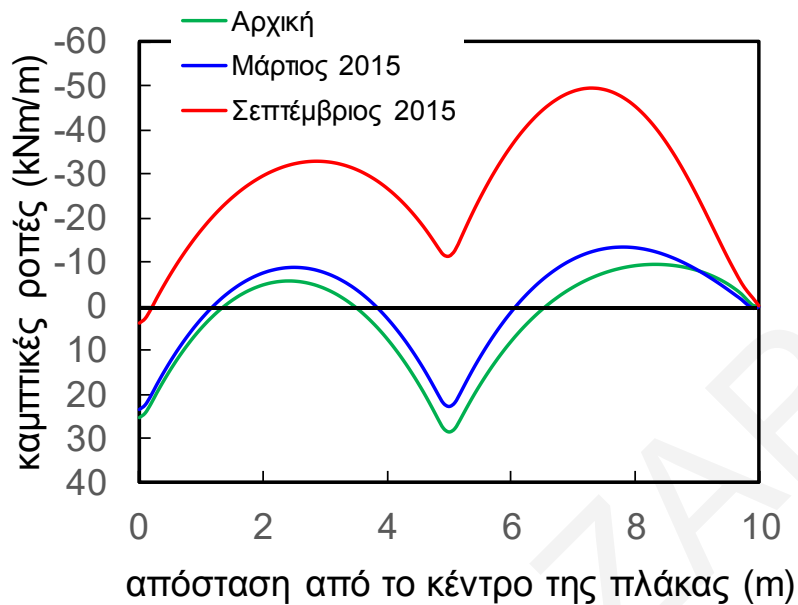
Σχήμα Ε.85: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 85.



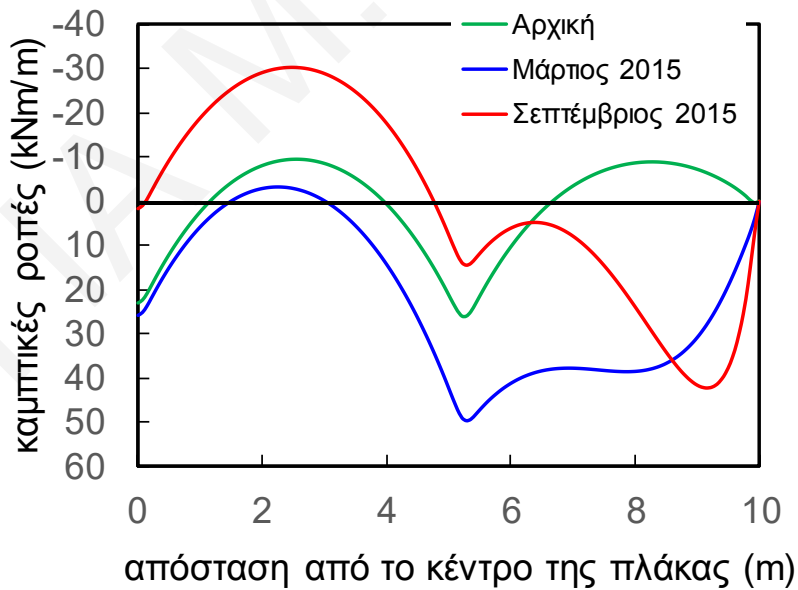
Σχήμα Ε.86: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 86.



Σχήμα Ε.87: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 87.



Σχήμα Ε.88: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 88.



Σχήμα Ε.89: Αποτελέσματα καμπτικών ροπών ανάλυσης 89.