



**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ  
ΥΠΕΡΑΝΤΛΗΣΕΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΒΑΓΙΟΝΙΑΣ-ΑΣΗΜΙΟΥ  
(ΔΥΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΛΕΚΑΝΗ ΜΕΣΣΑΡΑΣ)**

**ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ Ι. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**[ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ] ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ | ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2020**

Αφιερώνεται,

στην οικογένειά μου

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν την διπλωματική εργασία εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί σε καμία περίπτωση ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις των καθηγητών της εξεταστικής επιτροπής ή και του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία, η οποία είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την απόκτηση του Διπλώματος του Μηχανικού, αποτελεί για τον φοιτητή που την εκπονεί αλλά και για τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάζεται για την ολοκλήρωσή της, μία εμπειρία η οποία απαιτεί προσπάθεια, επιμονή και υπομονή σε κάθε πτυχή της. Ολοκληρώνοντας λοιπόν την εργασία αυτή, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με βοήθησαν για την ολοκλήρωσή της.

Στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Εμμανουήλ Στειακάκη, Διευθυντή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης - επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, για το ενδιαφέρον και το μεράκι του στη μετάδοση γνώσεων. Η συνεργασία μαζί του με βοήθησε στην προσέγγιση αναλυτικών και σύνθετων συλλογισμών, η παρουσία του ήταν αδιάλειπτη και αποτέλεσε για εμένα μία εξαιρετική πηγή γνώσης αλλά και χρήσιμων προβληματισμών που συχνά προέκυπταν μέσα από τις συζητήσεις μας. Αλλά περισσότερο από όλα για την υπομονή στην εξ' αποστάσεως επικοινωνία.

Θερμές ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στον Επιστημονικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Διονύσιο Βαβαδάκη για την συνεχή υποστήριξή του και την πολύπλευρη βοήθειά του στην επίλυση προβλημάτων που παρουσιάζονταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επιπλέον ιδιαίτερα ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Καθηγητή και Κοσμήτορα της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς και τον κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Μελέτης & Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων & Μηχανικής Πετρωμάτων για την αποδοχή της συμμετοχής τους στην εξεταστική επιτροπή καθώς επίσης για τη σημαντική συμβολή τους στην ολοκλήρωση της εργασίας παρά το φόρτο εργασίας τους.

Στον διδάκτορα γεωλόγο κ. Μπουλουκάκη Ηρακλή για την πολύτιμη βοήθεια του στην κατανόηση των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής.

Ολοκληρώνοντας θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία με στηρίζει σε κάθε μου βήμα, τη σύντροφό μου, αλλά και τους κοντινούς μου ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο να γίνω πολυεπίπεδα καλύτερος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την μεγαλύτερη και σημαντικότερη αγροτική περιοχή της Κρήτης. Η εντατική άρδευση των αγροτικών εκτάσεων και η έλλειψη ευαισθησίας όσον αφορά την διαχείριση του περιβάλλοντος, οδήγησε στην ανόρυξη μεγάλου αριθμού υδρογεωτρήσεων, την εντατική άντληση του υπόγειου νερού και την μεγάλη πτώση της πιεζομετρικής στάθμης.

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των εδαφικών υποχωρήσεων λόγω της υπεράντλησης στην περιοχή Βαγιονιάς-Ασημίου.

Αναλύθηκε ο μηχανισμός εκδήλωσης του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων και έγινε προσομοίωση της κινητικής συμπεριφοράς των σχηματισμών στην περιοχή έρευνας με την βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Εκτιμήθηκαν οι αναμενόμενες υποχωρήσεις του εδάφους σε σχέση με την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκτιμήσεις υποχωρήσεων που έχουν προκύψει από άλλες ερευνητικές εργασίες.

## **ABSTRACT**

Messara valley is the largest and most productive agricultural region on the island of Crete. The farmland irrigation needs, and the lack of environmental awareness led to groundwater extensive exploitation and substantial drawdown of piezometric surface.

This thesis aims to evaluate ground subsidence resulting from groundwater over-exploitation in the area of Vagionia - Asimi.

Land subsidence mechanism was analyzed, and the kinematic behavior of the formations was simulated by finite element software. The expected land deformations were evaluated in relation to the aquifer exploitation and the results were compared with land subsidence estimated by other investigation methods.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 12 -
1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	- 13 -
1.1. Υδρολογικός κύκλος .....	- 13 -
1.2. Υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών .....	- 14 -
1.3. Το υπόγειο νερό .....	- 15 -
1.4. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού .....	- 15 -
1.5. Είδη υπόγειου νερού – υπόγειων υδροφορέων .....	- 16 -
1.6. Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.....	- 18 -
1.7. Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων.....	- 22 -
2. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΥΠΕΡΑΝΤΛΗΣΗΣ .....	- 23 -
2.1. Ανάλυση των μηχανισμών και εκτίμηση των υποχωρήσεων .....	- 23 -
2.2. Παραδείγματα .....	- 25 -
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	- 28 -
3.1. Γεωλογική δομή της Κρήτης .....	- 28 -
3.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της Κρήτης .....	- 31 -
3.3. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος .....	- 33 -
3.4. Σεισμικότητα της Περιοχής.....	- 35 -
4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ .....	- 39 -
4.1.Υδρογεωλογία Μεσσαράς .....	- 39 -
4.2.Υδρογεωλογία περιοχών μελέτης .....	- 45 -
4.3. Τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα της λεκάνης της Βαγιονιάς και του Ασημίου ..	- 47 -
5. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	- 51 -

5.1. Γενικά .....	- 51 -
5.2. Εδαφικές υποχωρήσεις από δορυφορικές μετρήσεις .....	- 51 -
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΥΠΕΡΑΝΤΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ .....	- 57 -
6.1. Περιγραφή του προγράμματος Plaxis V8 .....	- 57 -
6.2. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σχηματισμών της περιοχής μελέτης .....	- 61 -
6.3. Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης .....	- 62 -
6.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	- 63 -
7. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ BOUWER .....	- 69 -
7.1. Γενικά .....	- 69 -
7.2. Υπολογισμοί .....	- 75 -
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	- 87 -
9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	- 89 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	- 125 -
ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ .....	- 129 -



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Υδρολογικός κύκλος (πηγή <a href="http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/">http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/</a> ).....	- 13 -
Εικόνα 2 Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγματώση (πηγή <a href="http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/">http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/</a> ) .....	- 15 -
Εικόνα 3 Ζώνες υπόγειου νερού (πηγή <a href="http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/">http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/</a> ).....	- 15 -
Εικόνα 4 Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με την εδαφική κατάταξη (πηγή <a href="http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/">http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/</a> ).....	- 17 -
Εικόνα 5 Εκδήλωση επιφανειακών ρωγματώσεων λόγω του φαινομένου της υπεράντλησης στην Αριζόνα Η.Π.Α. (πηγή ALSG, Δεκέμβριος 2007).....	- 24 -
Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης με τα αλληπάλλληλα τεκτονικά καλύμματα (πηγή Βασιλάκης, 2006).....	- 31 -
Εικόνα 7 (α) Γενικευμένος γεωλογικός χάρτης της Ν. Κρήτης και (β) η θέση της σε σχέση με το Ελληνικό τόξο και τις κυριότερες τεκτονο-στρωματογραφικές δομές του (πηγή Βασιλάκης, 2006).....	- 32 -
Εικόνα 8 Γεωγραφικός – γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (πηγή Κρίνης, 2009).....	- 33 -
Εικόνα 9 Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής λεκάνης Μεσσαράς(πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 34 -
Εικόνα 10 Γεωλογική τομή Βασιλική – Βαγιονιά – Γκαγκάλες (B-N). (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 35 -
Εικόνα 11 Αναθεωρημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας (2003).....	- 37 -
Εικόνα 12 Υδρολογικές λεκάνες Γεροπόταμου – Αναποδάρη (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 40 -
Εικόνα 13 Υδρολιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 41 -
Εικόνα 14 Υδρογεωλογικές ενότητες περιοχής μελέτης. (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 44 -
Εικόνα 15 Υδρογεωλογική τομή λεκάνης της Μεσσαράς (Α-Δ) (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 45 -
Εικόνα 16 Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς. (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 46 -
Εικόνα 17 Υδρογεωλογική τομή 7 Βασιλική-Βαγιονιά- Γκαγκάλες (B-N) (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	- 48 -
Εικόνα 18 Ισοπιεζομετρικός χάρτης της λεκάνης Μεσσαράς το 1996 (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	-50-
Εικόνα 19 Ισοπιεζομετρικός χάρτης της λεκάνης Μεσσαράς το 2001 (πηγή Κριτωτάκης, 2009).....	-50
Εικόνα 20 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 14/1/2007 έως 19/1/2009. (πηγή Paradaki, 2014).....	-53-
Εικόνα 21 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 1/9/2007 έως 22/10/2009.(πηγή Paradaki, 2014).....	-53-
Εικόνα 22 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 17/1/2008 έως 22/1/2010. .(πηγή Paradaki, 2014).....	-54-

Εικόνα 23 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 19/7/2008 έως 22/10/2009. (πηγή Papadaki, 2014).....	-54-
Εικόνα 24 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του ελαστικού – τέλεια πλαστικού μοντέλου κατά Mohr- Coulomb.....	-58-
Εικόνα 25 Κύκλοι του Mohr.....	-59-
Εικόνα 26 Γεωτεχνική τομή στην οποία βασίστηκαν οι αναλύσεις περιοχή Βαγιονιά νοτίως του Γεροποτάμου.....	-63-
Εικόνα 27 Εδαφική υποχώρηση συναρτήσει της ταπείνωσης του υδροφορέα για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας στους Νεογενείς σχηματισμούς και σταθερό μέτρο ελαστικότητας στους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.....	-64-
Εικόνα 28 Εδαφική υποχώρηση συναρτήσει της ταπείνωσης του υδροφορέα για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας στους Νεογενείς σχηματισμούς και σταθερό μέτρο ελαστικότητας στους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.....	-66-
Εικόνα 29 Ενδεικτική κατακόρυφη μετατόπιση στην περιοχή μελέτης.....	-68-
Εικόνα 30 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση σε έναν ελεύθερο υδροφορέα (πηγή Bouwer, 1977).....	-71-
Εικόνα 31 Διάγραμμα απεικόνισης υποθετικής σχέσης μεταξύ λόγου κενών και ενδοκοκκώδους πίεσης για μέσης διαβάθμισης υλικό (πάνω πλευρά) και συσχέτιση μεταξύ ελαστικότητας και ενδοκοκκώδους πίεσης στην κάτω πλευρά (πηγή Bouwer, 1977).....	-72-
Εικόνα 32 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση.....	-79-
Εικόνα 33 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 8m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση.....	-80-
Εικόνα 34 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 12m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση.....	-81-
Εικόνα 35 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 16m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση.....	-82-
Εικόνα 36 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση.....	-83-

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους (πηγή <a href="http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/">http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/</a> ).....	- 14 -
Πίνακας 2 Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (πηγή Καλλέργης, 1999).....	- 20 -
Πίνακας 3 Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη.....	- 34 -
Πίνακας 4 Συντελεστές κατείσδυσης και ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνουν οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης (πηγή Περλέρος, 2004).....	- 43 -
Πίνακας 5 Ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνουν οι υδρογεωλογικές ενότητες στην περιοχή μελέτης (πηγή Κρίνης, 2009).....	- 44 -
Πίνακας 6 Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοίωσης.....	- 61 -
Πίνακας 7 Προσομοίωση με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της πτώσης στάθμης 1/2.....	- 64 -
Πίνακας 8 Προσομοίωση με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της πτώσης στάθμης 2/2.....	- 65 -
Πίνακας 9 Εδαφική υποσώρευση συναρτήσει της πτώσης στάθμης του και του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών.....	- 67 -
Πίνακας 10 Τιμές μέτρου ελαστικότητας E και Cu για μη συμπυκνωμένα υλικά (πηγή Bouwer, 1978).....	- 75 -
Πίνακας 11 Ενδοκοκκώδης πίεση σύμφωνα με την αντίστοιχη πτώση στάθμης.....	- 76 -
Πίνακας 12 Υπολογισμός εδαφικών υποχωρήσεων.....	- 78 -
Πίνακας 13 Σύγκριση εδαφικής υποχώρησης βάσει πεπερασμένων στοιχείων και εξίσωσης Bouwer.....	- 85 -

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εκτίμηση των εδαφικών υποχωρήσεων λόγω υπεραντλήσεων στην περιοχή Βαγιονιάς - Ασημίου (Μεσσαρά, Ηρακλείου).

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά σε όρους και γενικές έννοιες που αφορούν το θέμα της μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες που προκαλούν την εδαφική υποχώρηση, γίνεται ανάλυση των μηχανισμών και δίδονται σχετικά παραδείγματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι γεωλογικές και οι γεωτεκτονικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης καθώς και η σεισμικότητα της περιοχής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και γίνεται εκτίμηση της διαμορφούμενης πιεζομετρίας συναρτήσει των αντλήσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται προγενέστερες εκτιμήσεις εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης που έχουν εκτιμηθεί από άλλες μελέτες.

Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται προσομοίωση των εδαφικών υποχωρήσεων αναπτύσσοντας μοντέλο προσομοίωσης με το λογισμικό Plaxis V8 και εκτιμώνται οι αναμενόμενες εδαφικές υποχωρήσεις στην περιοχή.

Στο έβδομο κεφάλαιο εκτιμώνται οι εδαφικές υποχωρήσεις σύμφωνα με την προσέγγιση κατά Bouwer.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις από τη μελέτη του θέματος για την επικείμενη εξέλιξη του φαινομένου.

# 1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ

## 1.1. Υδρολογικός κύκλος

Το νερό, ένα από τα δομικά συστατικά της Γης, βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος και στο υπέδαφος του πλανήτη και απαντάται με μορφή στερεή, υγρή και αέρια (Σούλιος, <sup>2</sup>1986). Ο “υδρολογικός κύκλος” αφορά την κυκλοφορία του νερού μεταξύ της υδρόσφαιρας, της ατμόσφαιρας, της ξηράς και της θάλασσας, το οποίο εμφανίζεται σε κάθε μια από τις μορφές του: υγρό, αέριο – υδρατμοί, στερεό - χιόνι, χαλάζι – και επηρεάζεται σχεδόν κατ’ αποκλειστικότητα από την ενέργεια του Ήλιου (Βουδούρης, 2006).



Εικόνα 1 Υδρολογικός κύκλος (πηγή <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e>)

Η κατείσδυση μια από τις διεργασίες του κύκλου ευθύνεται για την ανανέωση των υπόγειων υδροφορέων. Αναλυτικότερα το έδαφος στην επιφάνεια διαπερνάται από μέρος των κατακρημνισμάτων τα οποία καταλήγουν στους υπόγειους υδροφορείς και αυξάνουν τα αποθέματα των υπόγειων υδάτων. Η ικανότητα κατείσδυσης καθορίζεται από την υγρασία του εδάφους, την λιθολογία, την κλίση και τον εδαφικό τύπο αλλά και την βλάστηση, την ένταση και την κατανομή των κατακρημνίσεων.

## 1.2. Υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών

### Γενικά

Το έδαφος και τμήμα του υπεδάφους διαπερνάται από το νερό κατείσδυσης το οποίο προστίθεται στο υπόγειο νερό, ενώ αποθηκεύεται και κατανέμεται σύμφωνα με ορισμένους βασικούς κανόνες (Σούλιος, 1986).

Τα μέρη ενός πετρώματος ή εδάφους τα οποία δεν καταλαμβάνονται από στερεά ορυκτή ύλη και τα οποία δύνανται να καλυφθούν από νερό ορίζονται ως πορώδες και συμπεριφέρονται ως αποθήκες - αγωγοί (Καλλέργης, 1999).

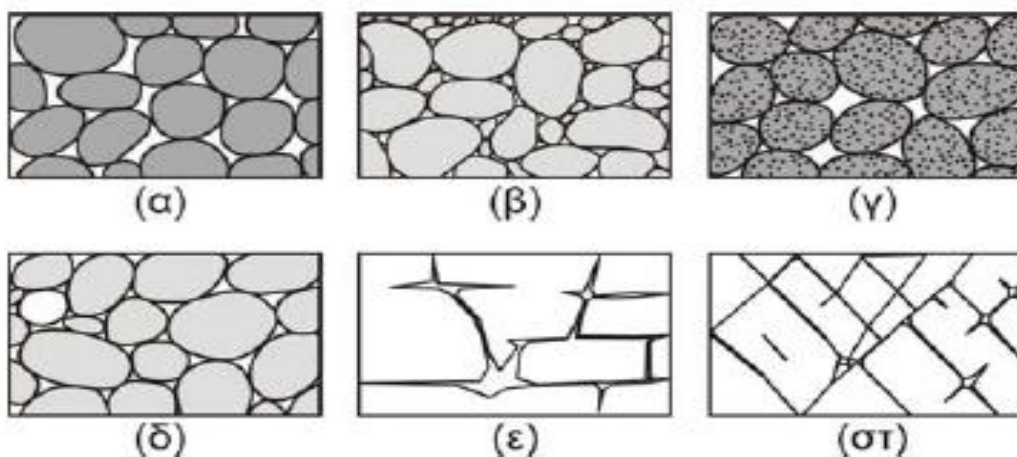
Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους από 0-60%.

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλυόλιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Πίνακας 1 Ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους (πηγή <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>)

Αναφερόμενοι στο ενεργό πορώδες εννοούμε το ποσοστό των επικοινωνούντων διάκενων που διατίθενται για τη ροή του ρευστού και εκφράζεται με τον λόγο του όγκου που καταλαμβάνουν οι πόροι αυτοί προς το συνολικό όγκο του πετρώματος ή εδάφους (Καλλέργης, 1999).

Το πορώδες μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε πρωτογενές, οφειλόμενο στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά το σχηματισμό του πετρώματος και σε δευτερογενές, οφειλόμενο στα διάκενα που δημιουργήθηκαν εξαιτίας τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. (Εικόνα 2, πηγή Βουδούρης, 2006).



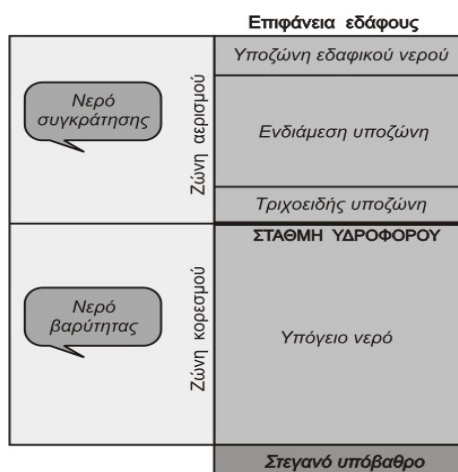
Εικόνα 2 Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (πηγή <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>)

### 1.3. Το υπόγειο νερό

Το νερό διεισδύει στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε άμεσα από τις βροχοπτώσεις, ή από τα ποτάμια, τις λίμνες, δηλαδή τα σώματα του επιφανειακού νερού. Η κίνησή του είναι αργή, εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, με την φυσική εκφόρτιση, με την ανθρώπινη παρέμβαση και με τη διαπνοή των φυτών.

### 1.4. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Σε δυο ζώνες διακρίνεται η ύπαρξη του υπόγειου νερού στο υπέδαφος, την ζώνη αερισμού και την ζώνη κορεσμού (Εικόνα 3):



Εικόνα 3 Ζώνες υπόγειου νερού (πηγή <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>)



### **A) Ζώνη αερισμού (Zone of aeration)**

Η ζώνη αερισμού αποτελείται από διάκενα, τα οποία καταλαμβάνονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα, υπάρχει δηλαδή διφασική ροή και διακρίνεται σε υποζώνη εδαφικού νερού, σε ενδιάμεση υποζώνη και σε τριχοειδή υποζώνη.

### **B) Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)**

Στη ζώνη κορεσμού όλα τα διάκενα καταλαμβάνονται από υπόγειο νερό υπό υδροστατική πίεση - μονοφασική ροή. Η ζώνη αυτή αποτελεί ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα και το επάνω μέρος της είναι η ελεύθερη επιφάνεια.

### **Ακόρεστη ζώνη**

Η ακόρεστη ζώνη (vadose ή unsaturated) ή μερικώς κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και επιφάνειας του εδάφους. Στους πλήρως κορεσμένους πόρους, ο περιεχόμενος όγκος νερού ισούται με το πορώδες ( $n$ ) (Βουδούρης, 2006).

Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό ( $\theta$ ), που ορίζεται ως:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

όπου,  $V_w$  ο όγκος του νερού, και

$V_T$  ο όγκος του μέσου.

Κατά συνέπεια στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ  $0 \leq \theta \leq n$ , και η κύρια συνιστώσα της ροής είναι κατακόρυφη (Βουδούρης, 2006).

### **1.5. Είδη υπόγειου νερού – υπόγειων υδροφορέων**

Το προερχόμενο από κατείσδυση υπόγειο νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται σε δύο τύπους το βαρυτικό και το νερό κατακράτησης (Βουδούρης, 2006):

- **Βαρυτικό νερό:** Υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συμμετέχει στην υπόγεια κυκλοφορία. Λήψεις του νερού πραγματοποιούνται άμεσα ή έμμεσα. Η ειδική απόδοση  $S_y$  (specific yield) ενός γεωλογικού σχηματισμού ονομάζεται ο λόγος του βαρυτικού νερού ( $V_w$ ) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού ( $V$ ):



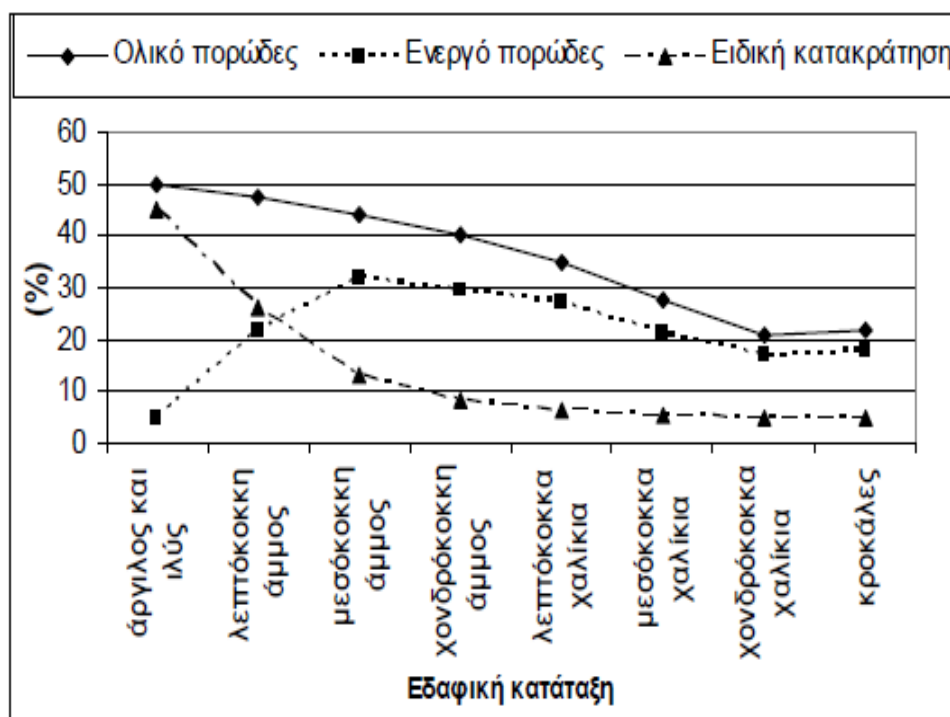
$$S_y = \frac{V_w}{V}$$

Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες.

- **Νερό κατακράτησης:** Το νερό κατακράτησης δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας με συνέπεια να μην συμμετέχει στην υπόγεια κυκλοφορία. Ειδική κατακράτηση  $S_r$  (specific retention) ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του νερού κατακράτησης ( $V_r$ ) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού ( $V$ ):

$$S_r = \frac{V_r}{V}$$

Η εικόνα 4 είναι ενδεικτική της μεταβολής του ολικού και ενεργού πορώδους, καθώς και της ειδικής κατακράτησης ανάλογα με την εδαφική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών.



Εικόνα 4 Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με την εδαφική κατάταξη (πηγή <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>)

**Υδροφορείς** ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι περιέχουν ικανοποιητική ποσότητα κορεσμένου με νερό υλικό και οι οποίες μπορούν να τροφοδοτήσουν τις

γεωτρήσεις ή τις πηγές με σημαντικές ποσότητες νερού. Επιπλέον έχουν αυξημένη την ικανότητα να αποθηκεύουν και να μεταβιβάζουν το νερό (Βουδούρης, 2006).

**A) Ελεύθεροι υδροφορείς:** Είναι οι υδροφορείς που έχουν ως δάπεδο ένα στεγανό πέτρωμα, ως οροφή μία ελεύθερη υδροστατική επιφάνεια, ενώ η πίεση του νερού που γεμίζει το πορώδες της στερεάς φάσης είναι ίση με την ατμοσφαιρική (Καλλέργης, 1999). Οι μεταβολές της στάθμης του νερού είναι αντίστοιχες με τις μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφόρο (Βουδούρης, 2006).

#### **B) Υπό πίεση υδροφορείς ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί**

Είναι οι υδροφορείς όπου το νερό εγκλωβίζεται ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία είναι μία εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφόρο, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός) (Βουδούρης, 2006).

#### **Γ) Ημιαρτεσιανοί (υπό μερική πίεση) υδροφορείς**

Είναι οι υπόγειοι υδροφορείς ανάλογοι με τους υπό πίεση, στους οποίους όμως το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλαδή μικρή υδροπερατότητα. Διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες υδροφορέων από πετρογραφική άποψη: οι καρστικοί, οι οποίοι δημιουργούνται στα ανθρακικά πετρώματα και οι πορώδεις, οι οποίοι δημιουργούνται σε κοκκώδεις σχηματισμούς (Βουδούρης, 2006).

### **1.6. Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων**

Όπως αναφέρεται από τον Βουδούρη (2006), τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφορέων είναι: το υδραυλικό φορτίο, η διαπερατότητα - υδροπερατότητα, η μεταβιβαστικότητα και η αποθηκευτικότητα.

**A) Το υδραυλικό φορτίο.** Τα υπόγεια νερά κινούνται υπό την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία ανά μονάδα όγκου ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή συμβολίζεται με το γράμμα  $H$  και ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης  $P/\gamma$  και του φορτίου ύψους, είτε υψομετρικού, είτε θέσης, της απόστασης δηλαδή από το επίπεδο αναφοράς  $z$  (Βουδούρης, 2006).

Το φορτίο (H) αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μία γεώτρηση που έχει ανορυχθεί σε έναν ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό εάν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τέτοιο τρόπο η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς (Βουδούρης, 2006).

Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου ή ισοδυναμικές γραμμές μπορούν να απεικονιστούν με τη βοήθεια χαρτών και οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές γραμμές. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται **υδραυλική κλίση** και δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{dH}{dl}$$

#### **B) Διαπερατότητα - Υδροπερατότητα (Permeability - Hydraulic conductivity)**

Η διαπερατότητα (Ks) είναι μία σταθερά που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, δηλαδή το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων, με διαστάσεις  $L^2$ .

Η υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (k) χρησιμοποιείται στην Υδρογεωλογία λόγω της ρευστότητας του νερού. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου εγκάρσια στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας (Πίνακας 2) και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy (Βουδούρης, 2006).

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Ιλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Αργίλος	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 2 Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (πηγή Καλλέργης, 1999) <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>

Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως (Βουδούρης, 2006):

Πολύ υδροπερατοί  $k \geq 10^{-1}$  m/s, υδροπερατοί  $10^{-6} \leq k \leq 10^{-1}$  m/s, λίγο υδροπερατοί  $10^{-9} \leq k \leq 10^{-6}$  m/s, πρακτικά στεγανοί  $k \leq 10 \cdot 10^{-9}$  m/s. Η διαπερατότητα ( $K_s$ ) συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα ( $k$ ) με τη σχέση (Βουδούρης, 2006):

$$K_s = \frac{k \cdot \mu}{\gamma}$$

όπου:  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες ( $N \cdot s/m^2$  ή  $P = dyn \cdot s/cm^2$ ), και

$\gamma$  το ειδικό βάρος του ρευστού ( $N/m^3$ ).

Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου ( $k_{unsat}$ ) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή ( $k$ ) δίδεται από τη σχέση (Καλλέργης, 1999):

$$k_{unsat} = k \cdot \left[ \frac{S_s - S_o}{1 - S_o} \right]$$

όπου,  $S_s$  ο βαθμός κορεσμού και  $S_o$  ο υπολειμματικός κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις.

### Γ) Μεταβιβαστικότητα (Transmissivity)

Η μεταβιβαστικότητα εκφράζει τον όγκο νερού που περνά από μία μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους (Βουδούρης, 2006).

Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος ( $D$ ):

$$T = K \cdot D$$

### **Δ) Αποθηκευτικότητα (Storativity)**

Ο συντελεστής εναποθήκευσης (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Έτσι η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση (Βουδούρης, 2006):

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h}$$

Όπου  $\Delta V$  είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας  $A$ , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης ή και αύξησης του φορτίου  $\Delta h$  (Βουδούρης, 2006).

Από τον ανωτέρω ορισμό προκύπτει ότι ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης ( $\Delta h/\Delta t$ ) σε έναν υδροφορέα επιφάνειας  $A$  με συντελεστή αποθηκευτικότητας  $S$ , για άντληση με παροχή  $Q$ , χωρίς να συμβαίνει εμπλουτισμός, δίδεται από τη σχέση (Βουδούρης, 2006):

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{Q}{S \cdot A}$$

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ως καθαρός αριθμός στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται στη διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα, συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του υπογείου νερού που εμπεριέχεται σε αυτόν (Βουδούρης, 2006).

Ως εκ τούτου για να πάρουμε αξιόλογες ποσότητες από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας  $S$  στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει (Βουδούρης, 2006):

$$S = \gamma \cdot D \cdot (a + \beta \cdot S_Y)$$

όπου  $\gamma$  το μοναδιαίο βάρος του νερού,  $D$  το πάχος του υδροφορέα,

$S_Y$  το ενεργό πορώδες,  $a$  ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα, και  $\beta$  ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού.

### **1.7. Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων**

Ο φυσικός εμπλουτισμός προκύπτει από το νερό των κατακρημνισμάτων που φθάνει στα υδροφόρα στρώματα και τα τροφοδοτεί, άμεσα με την κατείσδυση και έμμεσα με την διήθηση από τις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου σε μία λεκάνη ή περιοχή, υπό φυσικές συνθήκες, χωρίς δηλαδή την ανθρώπινη παρέμβαση (Σούλιος, 2004).

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων προκύπτει από διάφορες διαδικασίες, τεχνικές, εγκαταστάσεις και διατάξεις, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα του νερού. Ουσιαστικά είναι η εισαγωγή πρόσθετων ποσοτήτων νερού στα υδροφόρα στρώματα και μπορεί να προέρχεται από το επιφανειακό νερό ή από παρακείμενο υδροφόρο στρώμα, το οποίο έχει περίσσεια (Σούλιος, 2004).

## 2. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΥΠΕΡΑΝΤΛΗΣΗΣ

### 2.1. Ανάλυση των μηχανισμών και εκτίμηση των υποχωρήσεων

Σε περιπτώσεις υπεραντλήσεων με σημαντική πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας σε μεγάλη έκταση υδροφορέα παρατηρούνται φαινόμενα υποχώρησης του εδάφους. Για να εκτιμηθούν οι εδαφικές υποχωρήσεις πρέπει να αναλυθούν οι μηχανισμοί οι οποίοι τις προκαλούν.

Η καθίζηση (land subsidence) συνδέεται με την αναδιάταξη των κόκκων, τη μείωση του λόγου κενών και την απομάκρυνση του νερού των πόρων στην περιοχή της φόρτισης.

Στην τεχνική γεωλογία, αντί του όρου καθίζηση λόγω υπεράντλησης, χρησιμοποιείται ο όρος εδαφική υποχώρηση ενώ ο όρος καθίζηση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις με φόρτιση. Οι υποχωρήσεις αυτές έχουν τα αίτια τους στη μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, στην αύξηση των ενεργών τάσεων καθώς και στη συμπίεση του υδροφορέα, λόγω του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων (Sun et al., 1999, με πηγή Βουδούρης, 2014).

Αυτή η κινητικότητα υπό κανονικές συνθήκες είναι αρκετά μικρής κλίμακας, αλλά μπορεί να γίνει και αρκετά μεγάλη σε περιοχές όπου τα υλικά του υπόβαθρου είναι λεπτόκοκκα και συμπιεστά, όπως επίσης και σε περιοχές που η πίεση του νερού των πόρων μειώνεται απότομα.

Πιο αναλυτικά, τα ποσοστά εδαφικής υποχώρησης έχουν εύρος από 1 - 50 cm ανά 10 μέτρα υποβάθμισης του υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με το πάχος του στρώματος και τη συμπιεστότητα των σχηματισμών.

Ανομοιόμορφες υποχωρήσεις οι οποίες οφείλονται σε διαφορές στο μέγεθος υποχώρησης των νερών ή ακόμη και στην ύπαρξη στρωμάτων διαφορετικής συμπιεστότητας μπορούν να δημιουργήσουν ρωγματώσεις στην επιφάνεια.

Η βασική αιτία της εδαφικής υποχώρησης και της μετακίνησης της εδαφικής επιφάνειας είναι η αύξηση της ενεργού τάσης των υπεδαφικών υλικών (Bouwer, 1977).



Εικόνα 5 Εκδήλωση επιφανειακών ρωγματώσεων λόγω του φαινομένου της υπεράντλησης στην Αριζόνα Η.Π.Α. (πηγή ALSG, Δεκέμβριος 2007).

Η ταπείνωση  $\Delta D$  ενός υδροφορέα πάχους  $D$ , λόγω μεταβολής της υδροστατικής πίεσης  $\Delta P$  από υπεράντληση δίδεται από τη σχέση (Domenico - Schwartz, 1990, με πηγή Βουδούρης, 2014):

$$\Delta D = \Delta P \cdot \left( \frac{S}{\gamma} - \beta \cdot D \cdot S_y \right)$$

[m]

όπου,  $S$  ο συντελεστής εναποθήκευσης του υδροφορέα,  $\gamma$  το μοναδιαίο βάρος του νερού ( $9.8 \text{ kN/m}^3$ ),  $\beta$  ο συντελεστής συμπίεστος του νερού ( $4.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ),  $D$  το πάχος του υδροφορέα (m), και  $S_y$  το ενεργό πορώδες (%).

Ο ρυθμός καθίζησης στους υπό πίεση υδροφόρους δίδεται από τη σχέση (Domenico - Schwartz, 1990, με πηγή Βουδούρης, 2014):

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{Q \cdot D \cdot \gamma}{E_s \cdot S \cdot A}$$

όπου,  $Q$  η συνολική παροχή των αντλήσεων από τον υδροφορέα ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $D$  το πάχος του υδροφορέα (m),  $\gamma$  το μοναδιαίο βάρος του νερού ( $\text{kN/m}^3$ ),  $E$  το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης του υδροφορέα ( $\text{kN/m}^2$ ),  $S$  ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, και  $A$  η επιφάνεια του υδροφορέα ( $\text{m}^2$ ).



Ωστόσο η καθίζηση δεν προκύπτει αυτόματα, αλλά δημιουργείται σταδιακά και απαιτείται χρόνος κάποιων μηνών. Η γεωλογική δομή, η μηχανική συμπεριφορά των υδροστρωματογραφικών ενοτήτων και ο όγκος του αντλούμενου νερού καθορίζει την εμφάνιση και το μέγεθος των εδαφικών υποχωρήσεων (Zhang et al, 2008, με πηγή Βουδούρης, 2014).

Γεωλογικοί σχηματισμοί με ελαστικότητα και ομοιογένεια παρουσιάζουν σχετικά μικρή αναδιάταξη κόκκων, μετά την απομάκρυνση του νερού των πόρων, κατά τη φάση υποβιβασμού του υδροφόρου. Ως αποτέλεσμα παρατηρούνται μικρά φαινόμενα επιφανειακών ρωγματώσεων κατά τη φάση της υποχώρησης του νερού. Αντίθετα, ανομοιογενείς γεωλογικοί σχηματισμοί, χωρίς ελαστικότητα και μεγάλη (> 15 m) πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού παρουσιάζουν σημαντική αναδιάταξη των κόκκων τους με αποτέλεσμα στην επιφάνεια του εδάφους να εμφανίζονται ρωγματώσεις, οι οποίες προκαλούν ζημιές σε κατοικίες, δρόμους και άλλες υποδομές. Οι επιφανειακές ρωγματώσεις είναι το αποτέλεσμα της δράσης εφελκυστικών τάσεων που ασκούνται στο έδαφος (ALGS, 2007, με πηγή Βουδούρης, 2014).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διακύμανση του εδαφικού νερού μπορεί να διευρύνει το φαινόμενο με την πάροδο του χρόνου. Ιδίως η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού αποδυναμώνεται όσο αυτό γίνεται περισσότερο κορεσμένο. Όταν η στάθμη του νερού μειωθεί οι τάσεις αναδιανέμονται. Εάν το πάχος του στρώματος της επιφάνειας δεν είναι μεγάλο και η αντοχή δεν είναι ικανή, ώστε να σχηματιστεί θόλος (δολίνη), τότε το έδαφος πάνω από αυτό θα αστοχήσει. (Waltham, 2005).

## **2.2. Παραδείγματα**

### **Παράδειγμα 1 : Θεσσαλικός κάμπος**

Στην Θεσσαλία τα τελευταία 20 χρόνια, σε διάφορες περιοχές της, οι εδαφικές ρωγματώσεις σε συνδυασμό με την εδαφική υποχώρηση έχουν προκαλέσει ζημιές σε κατασκευές και έργα υποδομών όπως σε δρόμους, σε ράγες τρένων, σε αεροδρόμια καθώς και σε εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών.

Η Θεσσαλία είναι μία τεκτονικά ενεργή περιοχή και ευπαθής σε ισχυρούς σεισμούς, ωστόσο οι ορατές εδαφικές ρωγματώσεις αν και έχουν μεγάλο εύρος και γεωγραφική έκταση δεν παραπέμπουν σε επικείμενη σεισμική δραστηριότητα και σαφώς δεν προκύπτουν εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας.

Η παράλληλη διάταξη των σχισμών σε συνδυασμό με τα τεταρτογενή ρήγματα τα οποία και καθορίζουν τη δομική εξέλιξη της Θεσσαλικής λεκάνης δεν μπορούν να θεωρηθούν επακόλουθο του τεκτονικού ερπυσμού ή ως προειδοποιητικά φαινόμενα ενός μεγαλύτερου σεισμικού γεγονότος, βάσει των επιστημονικών θεωρήσεων (Βουδούρης, 2014).

Σύμφωνα με λεπτομερείς μελέτες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως και των κινηματικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχισμών προκύπτει ως επακόλουθο ότι η εδαφική διατμητική αστοχία προκύπτει από τα χαλαρά εδάφη τα οποία ακολουθούν τη σημαντική μείωση του εδαφικού νερού λόγω της υπεράντλησης, αποτελώντας δηλαδή μία γεωτεχνική και όχι μία τεκτονική διεργασία.

Με βάση τις εκτιμήσεις σε θεωρητικό επίπεδο καθώς και τις μοντελοποιήσεις, προβλέπονται εδαφικές σχισμές κατά μήκος των ανώμαλων υπεδαφικών δομών (Βουδούρης, 2014).

Η εδαφική υποχώρηση και η ρωγμάτωση αναμένεται να έχουν συνέχεια και να επηρεάσουν κτίσματα, κατασκευές και άλλα έργα κοινής ωφέλειας. Ωστόσο είναι δύσκολο θέμα ο έλεγχος τέτοιων φαινομένων, δεδομένης της υπερβολικής άντλησης νερού στον Θεσσαλικό κάμπο (Βουδούρης, 2014).

## **Παράδειγμα 2: Καλοχώρι Θεσσαλονίκης**

Η περιοχή του Καλοχωρίου Θεσσαλονίκης ήταν μία από τις πρώτες περιοχές στην οποία διαπιστώθηκε και εξετάστηκε το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων λόγω της υπεράντλησης των υδάτων. Το Καλοχώρι βρίσκεται στη δυτική πλευρά της Θεσσαλονίκης και είναι ένα κύριο βιομηχανικό κέντρο.

Η ραγδαία ανάπτυξη της περιοχής τα τελευταία 45 χρόνια οδήγησε σε μία υπέρμετρη αύξηση της ζήτησης του νερού από τα ήδη υπάρχοντα πηγάδια. Για να καλυφθούν οι ανάγκες αυτές αυξήθηκε σημαντικά η άντληση υδάτων από τον ήδη επιβαρυνόμενο φορέα, με αποτέλεσμα να προκληθεί εδαφική υποχώρηση η οποία σε ορισμένες περιοχές έφτασε τα 3 - 4 m (Βουδούρης, 2014).

Μία ταπείνωση της τάξεως των 10 m της πιεζομετρικής στάθμης των υπογείων υδροφορέων θα είχε ως επακόλουθο κατακόρυφη παραμόρφωση της τάξεως των 0.46 - 0.76 m.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα γίνεται σαφές ότι η υπερβολική παραμόρφωση η οποία προέκυψε οφείλεται στην υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. Προτείνεται για την αποφυγή περεταίρω υποχωρήσεων και παραμορφώσεων η μείωση και ο έλεγχος της ποσότητας του νερού που αντλείται. Αν και η ταπείνωση στην περιοχή του Καλοχωρίου έχει μελετηθεί εκτενώς, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο συσχετισμός της εδαφικής παραμόρφωσης με τη δυναμική και σεισμική επιβάρυνση της περιοχής (Βουδούρης, 2014).

### **3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ**

#### **3.1. Γεωλογική δομή της Κρήτης**

Η γεωλογική δομή της Κρήτης συνδέεται με τη γεωλογική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο ΒΔ – ΝΑ. Ωστόσο είναι πολύπλοκη και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με αυτήν. Αυτό οφείλεται στη γεωτεκτονική θέση που κατέχει σε σχέση με τις δύο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες, την Αφρικανική και την Ευρασιατική. Χαρακτηριστικό στοιχείο της δομής της είναι τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα των διαφόρων ζωνών (Εικόνα 6).

Η Κρήτη δομείται από ένα αυτόχθονο ή σχετικά αυτόχθονο σύστημα από πλακώδεις ασβεστόλιθους, ασβεστόλιθους, δολομίτες, σχιστόλιθους (Αδριατικοϊόνιος ή Ιόνιος Ζώνη), από ένα αλλόχθονο σύστημα, τεκτονικών καλυμμάτων που βρίσκεται πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς (Κριτσωτάκης, 2009).

Το αυτόχθονο σύστημα περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη σειρά πλακωδών ασβεστολίθων της ενότητας Κρήτης - Μάνης ηλικίας Μέσου Ιουρασικού – Ηωκαίνου. Ανακρυσταλλωμένοι ασβεστολίθους και μάρμαρα τεφρού χρώματος με ενστρώσεις πυριτολίθων μεταμορφωμένων σε συνθήκες υψηλής πίεσης – χαμηλής θερμοκρασίας. Υπέρκειται επωθημένο αλλόχθονο σύστημα αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων επωθημένων το ένα πάνω στο άλλο με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο :

Τεκτονικό κάλυμμα φυλλιτών – χαλαζιτών. Περιλαμβάνει φυλλίτες, χαλαζίτες, σερικιτικούς – μαρμαρυγιακούς – ανθρακικούς σχιστολίθους και χαλαζιακούς μεταψαμμίτες. Κατά σειρά ηλικίας Περμίου – Ανωτέρου Τριαδικού έχοντας υποστεί πολύ χαμηλού έως χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση σε συνθήκες υψηλής πίεσης – χαμηλής θερμοκρασίας. Ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως (Κρίνης, 2009).

Οι σχηματισμοί που εμπεριέχονται βαθαίνοντας κατά σειρά είναι, τεφρόμαυροι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι ημικρυσταλλικοί δολομίτες και μεσοστρωματώδεις τεφρόλευκοι έως τεφρόμαυροι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Ανωτέρου Ιουρασικού. Ασβεστόλιθοι μαύροι με ρουδιστές ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού. Ασβεστόλιθοι τεφρόμαυροι με πλούσια νηριτική πανίδα Παλαιοκαινικής – ΜεσοΗωκαινικής ηλικίας. Φλύσχης ψαμμιτοπηλινικός, ψαμμιτοίλυολιθικός, με εναλλαγές καστανών αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών ηλικίας Ανωτέρου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου (Κρίνης, 2009).

Οι σχηματισμοί της Ζώνης της Πίνδου που περιλαμβάνει από τους υποκείμενους προς τους υπερκείμενους είναι οι εξής, κλαστική σειρά με εναλλαγές μαργών – ψαμμιτών και ασβεστιτικές ενστρώσεις ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού. Ασβεστόλιθοι ροδόχροοι με ιάσπιδες, ραδιολαρίτες, ψαμμίτες και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι (πρώτος φλύσχης) ηλικίας Ανωτέρου Τριαδικού – Κατωτέρου Ιουρασικού. Πλακώδεις ασβεστόλιθοι λεπτοστρωματώδεις και λατυποπαγείς ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού – Κατωτέρου Ηωκαίνου. Φλύσχης ψαμμιτοπηλινικός, ψαμμιτοίλυολιθικός, με ενστρώσεις ασβεστολιθικών τουρβιδιτών και ολισθόλιθους πάσης φύσεως Μεσο-ΑνωΗωκαινικής ηλικίας. Κάλυμμα Εσωτερικών Ελληνίδων. Αποτελεί ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με ποικιλία λιθολογικών φάσεων (Κρίνης, 2009).

Τα διάφορα καλύμματα τα οποία είναι επωθημένα το ένα επάνω στο άλλο από το υπερκείμενο προς το υποκείμενο απαρτίζονται από, οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσες ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού. Καλυμμα Αστερούσιων με μεταίλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοτιτικούς γνευσίους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού (Κρίνης, 2009).

Το κάλυμμα Βάτου αποτελούμενο από εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και ψαμμίτες ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού. Κάλυμμα Άρβης με βασάλτες σε «pillow λάβες» ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού και στρωματογραφικά ολοκληρώνεται με την παρουσία νεογενών, πλειοπλειστοκαινικών και τεταρτογενών ιζημάτων. Τα νεογενή και πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα καταλαμβάνουν σχεδόν τη μισή έκταση της Μεσσαράς. Πρόκειται για σχηματισμούς διαφόρων φάσεων οι οποίοι είναι κατά σειρά από τον ανώτερο προς τον κατώτερο οι εξής :

Ποτάμια και λιμναία ερυθρά κροκαλοπαγή, ερυθρές και κίτρινες άμμοι, ιλυόλιθοι και ερυθρές, κίτρινες και τεφρές άργιλοι και λιμναίοι μαργαϊκοί ασβεστολίθοι Πλειοπλειστοκαινικής ηλικίας (σχηματισμός Αγίας Γαλήνης).

Θαλάσσιες αποθέσεις κυρίως λευκών μαργών συχνά ψαμμιτικών, με μικρές εμφανίσεις καστανωπών φυλλωδών μαργών, λευκών μαργαϊκών ασβεστολίθων, καστανών άμμων, κροκαλοπαγών και κλαστικών ασβεστολίθων ηλικίας Κάτω Πλειοκαίνου (σχηματισμός Φοινικιάς).

Εναλλαγές ομογενών μαργών, φυλλωδών μαργών και υφαλογενών, κλαστικών, λατυποπαγών ασβεστολίθων στις οποίες παρεμβάλλονται στρώματα γύψου ηλικίας Μεσσηνίου (σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας).

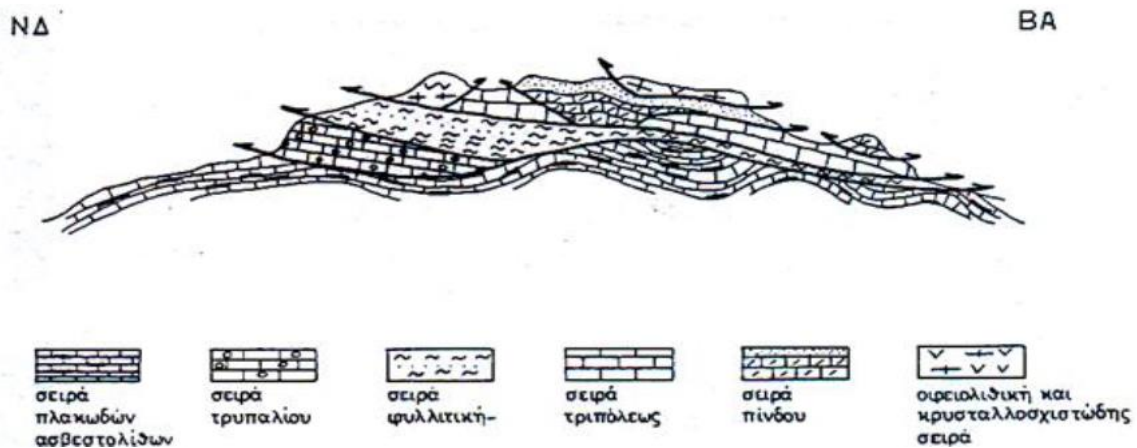
Ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμους, ιλυολίθους, τεφροκύανες μάργες, ιλυώδεις αργίλους, λιγνίτες και λιμναίους κλαστικούς υφαλογενείς ασβεστολίθους ηλικίας Τορτονίου (σχηματισμός Αμπελούζου).

Λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή καλά συγκολλημένα που αποτελούνται από ασβεστολιθικές κροκάλες και λατύπες προνεογενούς προέλευσης ηλικίας Μέσου – Ανώτερου Μειοκαίνου (σχηματισμός Ηλία).

Καλά στρωμένες σκούρες τεφρές ή πρασινοκύανες θαλάσσιες άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι με παρεμβολές καστανών ψαμμιτών ηλικίας Ανώτερου Σερραβάλλιου (σχηματισμός Σχοινιά).

Καλά στρωμένες, ποταμολιμναίες σκούρες τεφρές ή πρασινωπές άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι με κατά θέσεις ή και ενστρώσεις ασβεστολίθων και καλά διαβαθμισμένων καστανών ψαμμιτών ηλικίας Μέσου Μειοκαίνου (σχηματισμός Βιάννου).

Η στρωματογραφική σειρά ολοκληρώνεται με τα τεταρτογενή ιζήματα που είναι τοποθετημένα πάνω σε όλους τους σχηματισμούς τόσο του αλπικού υποβάθρου όσο και των νεογενών αποθέσεων και αποτελείται από ερυθρά κροκαλοπαγή, άμμους και αργίλους ποταμολιμναίας προέλευσης, αλλουβιακές ποτάμιες αποθέσεις ασύνδετων κροκαλοπαγών, χαλίκων και άμμων, θαλάσσιες και ποτάμιες αναβαθμίδες, λατυποπαγή κλιτύων, κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα. (Κρίνης, 2009).



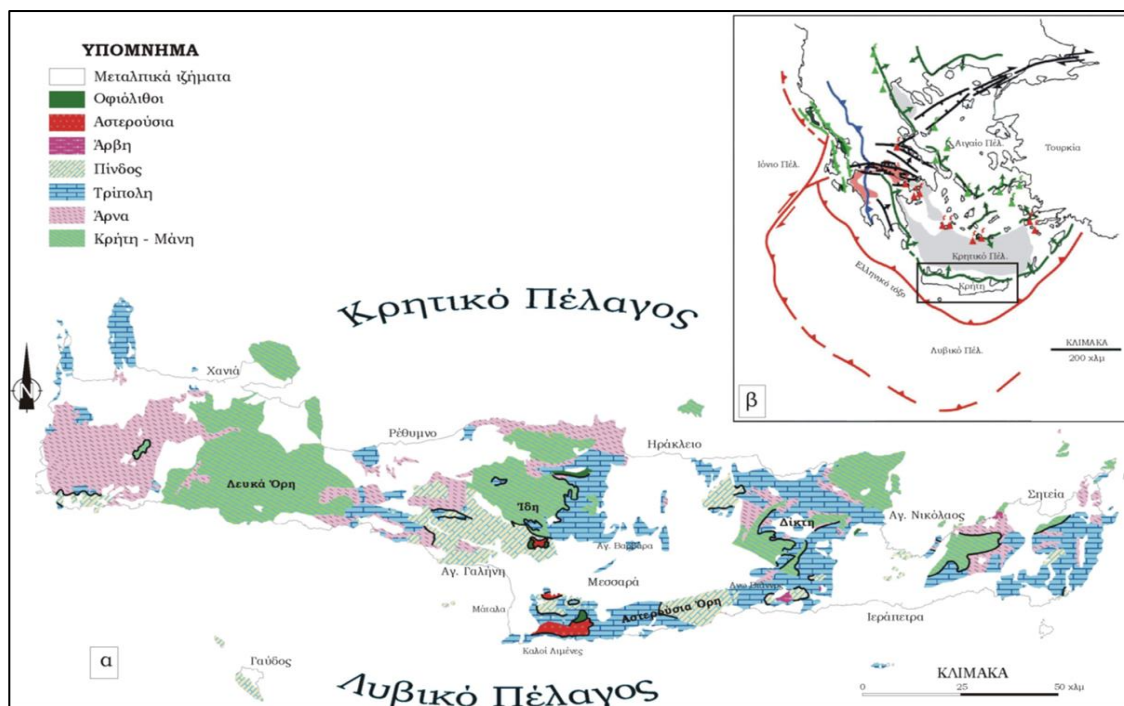
Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης με τα αλληπάλλληλα τεκτονικά καλύμματα (πηγή Βασιλάκης, 2006)

### 3.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη της Κρήτης

Γεωτεκτονικά η Κρήτη βρίσκεται στο κέντρο του Ελληνικού Τόξου αλλά και συνάμα στο νότιο κλάδο του Αλπικού Ορογενούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποτελεί τη γεωτεκτονική μετάβαση από τις Ελληνίδες στις Ταυρίδες Οροσειρές. Τα τεκτονικά γεγονότα που έλαβαν χώρα στην Κρήτη διακρίνονται στα γεγονότα του αλπικού κύκλου και στα γεγονότα του μετα-αλπικού κύκλου (Εικόνα 7).

Η γενική τεκτονική εξέλιξη της Κρήτης και του νοτίου Αιγαίου θεωρείται αποτέλεσμα της τελικής αλπικής, συμπιεστικής τεκτονικής και του μεταγενέστερου νεοτεκτονικού εφελκυσμού (Φυτρολάκης, 1980, Angelier et al., 1982, Bonneau, 1984, Hall et al, 1984).

Όμως το μοντέλο εξέλιξης της Κρήτης όσον αφορά στην τεκτονική εξέλιξη τροποποίησαν πρόσφατες μελέτες από το Μειόκαινο και μετά θεωρώντας ότι η έκταση (εφελκυσμός) του φλοιού οδήγησε στην τεκτονική ανύψωση των πετρωμάτων υψηλών πιέσεων (Kiliass et al., 1993, Fassoulas et al. 1994). Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται η γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης.



Εικόνα 7 (α) Γενικευμένος γεωλογικός χάρτης της Ν. Κρήτης και (β) η θέση της σε σχέση με το Ελληνικό τόξο και τις κυριότερες τεκτονο-στρωματογραφικές δομές του (πηγή Βασιλάκης, 2006)

Μελέτες τεκτονικού ενδιαφέροντος παρουσίασαν ενδείξεις ότι από το μέσο Μειόκαινο έως και σήμερα η Κρητική τεκτονική εξέλιξη ήταν απόρροια εφελκυστικών περιόδων διαδοχικού χαρακτήρα που δημιούργησαν τρεις γενεές ρηγμάτων.

Η πρώτη γενιά απαρτίζεται από ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ λόγω ενός εφελκυστικού πεδίου τάσεων βορά-νότου το οποίο και δημιούργησε τις πρώτες λεκάνες της Κρήτης στη διεύθυνση Α-Δ (Μέσο άνω Μειόκαινο - αρχές Μεσσηνίου).

Η δεύτερη γενιά ρηγμάτων (τέλος Μεσσηνίου – μέσο Πλειόκαινο) απαρτίζεται από ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν, λόγω διαφοροποίησης του πεδίου των τάσεων, τα οποία προκάλεσαν σημαντική ανύψωση κάποιων περιοχών και ταυτόχρονα την δημιουργία των λεκανών του Ηρακλείου, της Ιεράπετρας και του Καστελίου Χανίων.

Η τρίτη γενιά ρηγμάτων (τέλος Πλειοκαίνου) απαρτίζεται από ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, η οποία προκλήθηκε μετά τη σταθεροποίηση των τάσεων στην Κρήτη και δημιούργησε το σημερινό ενεργό γεωδυναμικό καθεστώς. Εξαιτίας των ρηγμάτων αυτών δημιουργήθηκαν μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και βυθίσματα (λεκάνες αύλακες) διαφόρων υψομέτρων στα οποία απετέθησαν τα μετέπειτα ιζήματα του νεογενούς των διαφόρων φάσεων και ταυτόχρονα συνεχίστηκε με μεγάλους ρυθμούς η τεκτονική ανύψωση ορισμένων περιοχών (Κριτσωτάκης, 2009)



### 3.3. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος

Η λεκάνη της Μεσσαράς (Εικόνα 8) εκτείνεται, κατά διεύθυνση Α-Δ, σε μία περιοχή περίπου 1005 km<sup>2</sup>. Αποτελεί τη μεγαλύτερη και την πιο σημαντική πεδιάδα της Κρήτης. Μόλις το 1,1% της λεκάνης είναι αστική περιοχή. Η καλλιεργήσιμη γη καταλαμβάνει περίπου το 65% της λεκάνης (650 km<sup>2</sup>).

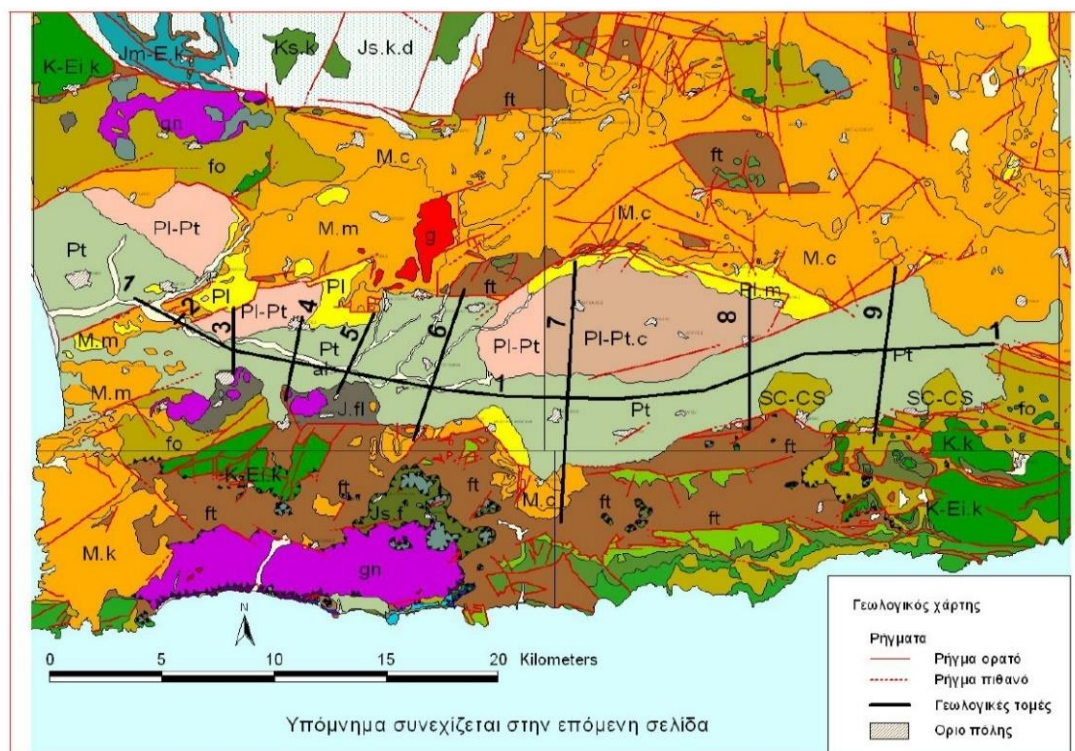
Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης συνολικά είναι 445m και η μέση κλίση 24%. Στο ανάγλυφο παρατηρούνται διακυμάνσεις ως εξής: στο πεδινό τμήμα της λεκάνης (κεντρικό, δυτικό και νοτιοανατολικό) υπάρχουν ήπιες έως μηδενικές κλίσεις, στα πιο ορεινά τμήματα οι κλίσεις είναι έντονες, όπως το βορειοδυτικό (όρος Ίδη) και νότιο τμήμα (Αστερούσια όρη), και στο ανατολικό τμήμα οι κλίσεις είναι πολύ έντονες (όρος Δίκη)



Εικόνα 8 Γεωγραφικός – γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (πηγή Κρίνης, 2009)

Στην περιοχή μπορούν να διακριθούν δύο επιμέρους τεκτονικές ενότητες. Η πρώτη περιλαμβάνει τεταρτογενείς και νεογενείς σχηματισμούς της λεκάνης της Μεσσαράς και στη δεύτερη απαντώνται προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών της Δίκης, του Ψηλορείτη, και των Αστερουσίων ορέων, οι οποίες καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης.

Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελείται από ένα αυτόχθονο και ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων όπως αναφέρθηκε νωρίτερα και (σχηματισμοί του αλπικού υποβάθρου) αποτυπώνεται στην Εικόνα 9. Η στρωματογραφική στήλη ολοκληρώνεται από τα νεογενή, πλειο - πλειστοκαινικά και τεταρτογενή ιζήματα (Μουντράκης, 1985, Περγλέρος, 2004).

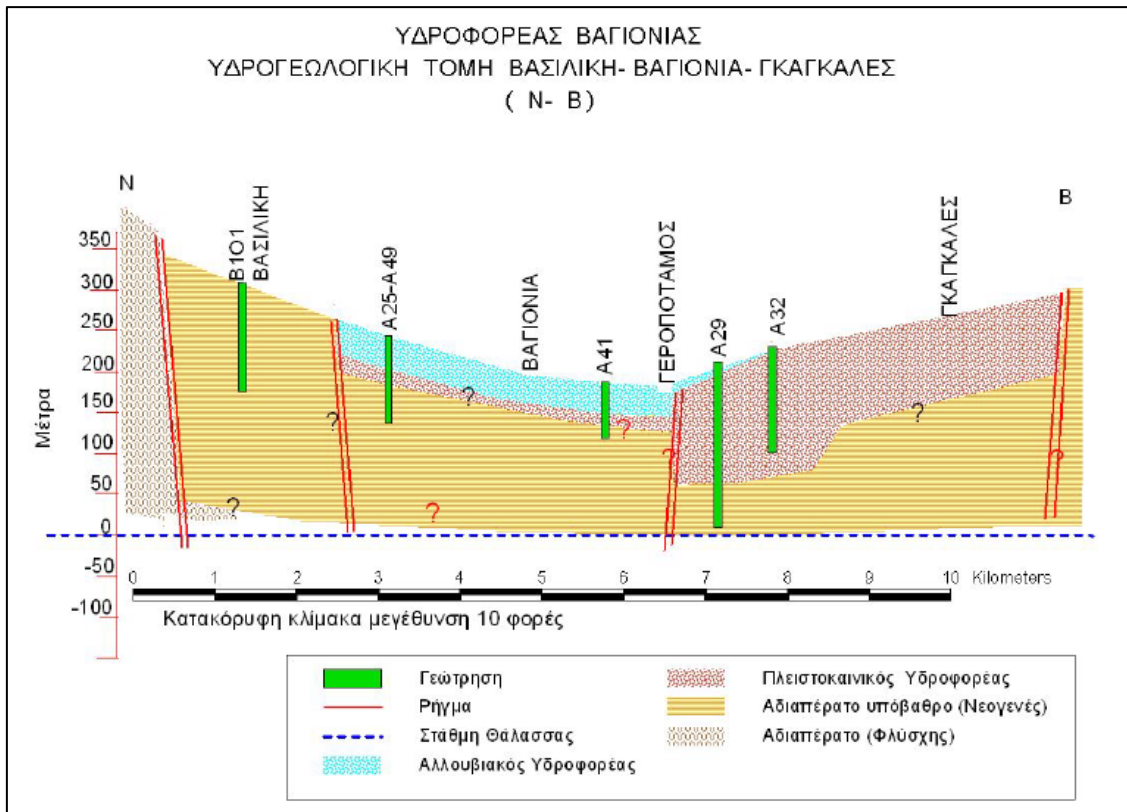


Εικόνα 9 Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής λεκάνης Μεσσαράς(πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη	
cd	Παράκτιες αποθέσεις.
al	Αλλουβιακές αποθέσεις.
SC-CS	Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.
Pt	Πleistόκαινο ασδιαίρετο (κροκαλολατυποπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι)
PI-Pt	Κυρίως μάργες, αλλά και άμμοι, κροκαλοπαγή κλπ.
PI-Pt.c	Σχηματισμός Αγ. Γαλήνης. Κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι.
PI	Πλειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστόλιθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M	Μειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστόλιθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M.br	Λατυποκροκαλοπαγή Τοπλιών (Μειόκαινο)
o	ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ Οφιόλιθοι. Σερπεντινίτες, περιδοτίτες, διαβάσεις, διορίτες και αμφιβολίτες.
gn	ΚΑΛΥΜΜΑ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ Γενεύσιοι αμφιβολίτες και χαλαζίτες με ενδιστρώσεις μαρμάρων.
fo	ΚΕΙ.Κ Φλύσσης.
ft	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ Φλύσσης.
E.k, P-E.k, Ks-E.k, Ks.k, Js-K.k.d, Js.k, T-E.k.d, T-Js.k, T.d	Ασβεστόλιθοι (k) και δολομίτες (d).
T.sch	Ασβεστικοί μαρμαρινικοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους.
Ph	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΩΝ – ΧΑΛΑΖΙΤΩΝ Φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι.
Ts-Jl.mr.d	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΟΜΑΛΟΥ – ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ Ανθρακικά Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες.
E.fl	ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ – ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ Ασβεστικοί σχιστόλιθοι με λεπτές ενδιστρώσεις ψαμμίτων και κρυσταλλικών ασβεστόλιθων.
Jm-E.k	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Plattenkalk), ανακρυσταλλωμένοι, κατά θέσεις μάρμαρα.
J.sch	Σχιστόλιθοι, ανθρακικοί, χαλαζακοί, αργιλικοί.
Ts-Jl.k.d	Ασβεστόλιθοι και δολομίτες με λεπτές φυλλικές διαστρώσεις και οριζόντες συνεκτικών λατυποπαγών.
g	Γύψος.
Γεωλογικές Τομές	
No 1 : Φαιστός Βαγιονιά Χάρακας (Α-Δ)	No 6 : Πλώρα – Γόρτυς (BBA-NNΔ)
No 2 : Φαιστός (BBA-NNΔ)	No 7 : Βαγιονιά – Γκαγκάλες (B-N)
No 3 : Πετροκεφάλι- Καλυβιανή (B-N)	No 8 : Στέρνες – Ασήμι (B-N)
No 4 : Πόμπια – Μοίρες (BBA-NNΔ)	No 9 : Πύργος – Πλακώτισσα (B-N)
No 5 : Πέρι – Καστέλι (BBA-NNΔ)	

Πίνακας 3 Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας εκτείνεται μεταξύ των χωριών Βαγιονιά – Ασήμι – Γκαγκάλες. Στην Εικόνα 10 δίδεται η γεωλογική τομή Βασιλική – Βαγιονιά – Γκαγκάλες, της λεκάνης της Βαγιονιάς, με κατεύθυνση (B-N).



Εικόνα 10 Γεωλογική τομή Βασιλική – Βαγιονιά – Γκαγκάλες (B-N). (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

Τα δεδομένα των λιθολογικών τομών των γεωτρήσεων στην περιοχή δείχνουν ότι η λεκάνη της Βαγιονιάς, κατά τη διεύθυνση B-N, δομείται από διάφορα ρηξιτεμάχια τα οποία παρουσιάζουν μία βαθμιαία βύθιση προς το βόρειο τμήμα της λεκάνης. Νότια βρίσκεται ο σχηματισμός του Φλύσχη, ενώ βόρεια οι νεογενείς σχηματισμοί (Πλειόκαινο) που αποτελούν τα όρια της λεκάνης. Επίσης το πάχος των αλλουβιακών είναι μικρό, της τάξης των 55m και οριοθετείται στο ρηξιτέμαχος νότια του Γεροποτάμου. Το πάχος των πλειστοκαινικών σχηματισμών στο ρηξιτέμαχος νότια του Γεροποτάμου είναι πολύ μικρό (10 – 20 m) ενώ στο βόρειο ρηξιτέμαχος, όπου εμφανίζονται επιφανειακά, το πάχος τους είναι συγκριτικά μεγάλο της τάξης των 100 – 170 m.

### 3.4. Σεισμικότητα της Περιοχής

Οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών είναι η βασική αιτία του έντονου τεκτονικού τεμαχισμού με τα τεράστια ρήγματα και της σεισμικότητας που παρατηρούνται στο νησί της Κρήτης καθώς και στη γύρω θαλάσσια περιοχή. Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική στην Κρήτη γίνεται με διεύθυνση BA., κλίση 35° και μέση ταχύτητα σύγκλισης 3,5 cm/έτος.

Παραθέτοντας μερικά βασικά ιστορικά στοιχεία κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ του 2020 π.Χ. έως το 280 μ.Χ. περίπου, η Δυτική Κρήτη υπέστη 10 καταβυθίσεις το μέγεθος των οποίων ήταν μέχρι 0,25 m. Από το 430 μ.Χ. περίπου, ξεκίνησε η ανοδική κίνηση της Δυτικής Κρήτης η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Παράλληλα με αυτές τις κινήσεις, ολόκληρο το υπόβαθρο της Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής ωθείται από το εσωτερικό του Τόξου - περιοχή Αιγαίου - προς τα έξω, από ΒΑ προς ΝΔ (Περιφέρεια Κρήτης, Π.Ε.Σ.Δ.Α.Κ, 2006).

Είναι θεμιτό να αποσαφηνιστεί ότι η Κρήτη, στη διάρκεια των τεκτονικών της κινήσεων, δεν παρουσιάζει συμπεριφορά ως συμπαγής, άκαμπτη και ενιαία, αλλά ως σύστημα τεκτονικών τμημάτων που απαρτίζονται από μεγάλα ρήγματα και κάθε τμήμα αποκτά διαφορετικά μεγέθη κίνησης. Επιπροσθέτως σημαντικό τμήμα της σεισμικής δραστηριότητας που παρατηρείται στην Κρήτη, είναι οφειλόμενο στις επιφανειακές τεκτονικές κινήσεις. Βάσει του νέου χάρτη ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, ΕΑΚ-2000 (Εικόνα 11), όπως αυτός τροποποιήθηκε με την Υ.Α. Δ17α/115/9/ΦΝ275/2003, το νησί κατατάσσεται στην κατηγορία II Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας - μέση σεισμική επικινδυνότητα.





Εικόνα 11 Αναθεωρημένος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας (2003)

Η αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση για την κατηγορία II δίνεται από τη σχέση (Περιφέρεια Κρήτης, Πε.Σ.Δ.Α.Κ, 2006):

$$A = a \cdot g$$

όπου,  $g$  επιτάχυνση βαρύτητας, και  $a = 0.24$  για τη ζώνη II σεισμικής επικινδυνότητας.

Τα σεισμικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα καταγεγραμμένα τεκτονικά γνωρίσματα και η σεισμική δραστηριότητα υποδεικνύει περίπλοκη τεκτονική. Δεν είναι απίθανο να σχετίζεται με εφελκυστικές αλλά και συμπιεστικές δυνάμεις στην ευρύτερη περιοχή οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την σύγκλιση της Αφρικανικής και της Ευρωπαϊκής πλάκας. (Περιφέρεια Κρήτης, Πε.Σ.Δ.Α.Κ, 2006).

Η σεισμική δραστηριότητα συνήθως συναντάται κατά μήκος του ανατολικού τμήματος της λεκάνης του Ηρακλείου και στην κοιλάδα της Μεσσαράς στο νότιο τμήμα, όπως μας δείχνει το επίκεντρο διανομής στις παράκτιες περιοχές.

Συγκρίνοντας τα επίκεντρα των θέσεων με τα κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά γίνεται εμφανές ότι τα φαινόμενα σχετίζονται με μικροσεισμική δραστηριότητα ειδικά στην

κοιλάδα της Μεσσαράς. Η κοιλάδα της Μεσσαράς είναι μία από τις περιοχές στις οποίες η σεισμική δραστηριότητα γίνεται εμφανής στις Νεογενείς λεκάνες.

Οι τεκτονικές τάφροι είναι τα πιο ενεργά κομμάτια στην κοιλάδα της Μεσσαράς, ειδικότερα κατά την διάρκεια του Ανώτερου Πλειόκαινου, Πλειστόκαινου και Ολόκαινου. Τα μεγέθη της σεισμικής δραστηριότητας υπερβαίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις τα 6.0M και σε συνδυασμό με τα ρηγματικά υπολείμματα τα οποία κόπτουν στις Τεταρτογενείς αποθέσεις κάνουν «ορατή» την τεκτονική δραστηριότητα.

Τοπογραφικά το τεκτονικό βύθισμα εκφράζει μία ταπείνωση μεταξύ του Ορεινού όγκου του Ψηλορείτη στο βόρειο με μέγιστο υψόμετρο 2.456 m και των Αστερουσίων Ορέων στον νότο με υψόμετρο 600 m στη Δύση και 1200 m στην Ανατολή απαρτίζοντας το νοτιότερο τμήμα της Ευρωπαϊκής Οροσειράς. (Περιφέρεια Κρήτης, Πε.Σ.Δ.Α.Κ, 2006).

## **4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ**

Η περιοχή της πεδιάδας της Μεσσαράς εντοπίζεται στο Νότιο και κεντρικό τμήμα της Κρήτης. Έχει ξηρό και θερμό κλίμα και κατά τους θερινούς μήνες οι ανάγκες άρδευσης είναι ιδιαίτερα αυξημένες λόγω του προσανατολισμού της οικονομίας της περιοχής στον αγροτικό τομέα και οι αρδεύσεις πραγματοποιούνται από το υπόγειο υδατικό δυναμικό της λεκάνης της Μεσσαράς, σχεδόν εξ'ολοκλήρου από ιδιωτικές υδρογεωτρήσεις (Κριτσωτάκης, 2009).

### **4.1.Υδρογεωλογία Μεσσαράς**

Η Μεσσαρά αποτελείται από δύο υδρολογικές λεκάνες: αυτήν του Γεροποτάμου, με έξοδο το στένεμα της Φαιστού και τμήμα του Αναποδάρη με έξοδο τη περιοχή Χάρακας (Εικόνα 12). Συνολικά η έκταση ανέρχεται σε 611,05 Km<sup>2</sup> συμπεριλαμβανομένων δύο υπολεκανών αυτή του Λιθαίου – Γεροπόταμου και αυτή της Πλακιώτισας – Αναποδάρη (Κριτσωτάκης, 2009).

Τα νερά στη λεκάνη Μεσσαράς έχουν υποστεί σοβαρές ποσοτικές και ποιοτικές επιπτώσεις, κυρίως όμως ποσοτικές λόγω της υπερεκμετάλλευσης, έναντι των ποιοτικών της ρύπανσης. Το γεγονός αυτό επιτάσσει, βάσει του θεσμικού πλαισίου για τα ύδατα (Οδηγία 2000/60ΕΚ), να εφαρμοστούν άμεσα μέτρα ώστε να αντιστραφούν οι επιπτώσεις αυτές τόσο οι ποσοτικές όσο βέβαια και οι ποιοτικές.

Γενικά μόνο το 10 – 12% των βροχοπτώσεων δηλαδή  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$  ετησίως για το Γεροπόταμο και  $35 \times 10^6 \text{ m}^3$  ετησίως για τον Αναποδάρη υπολογίζεται ως μικτή απορροή των δύο λεκανών. Θα πρέπει να αναβαθμιστούν ακόμα και να αποκατασταθούν τα υπόγεια ύδατα, ώστε να διασφαλιστεί το υπερετήσιο ισοζύγιο εισροών – εκροών εφόσον βέβαια ληφθεί υπόψιν η κατάσταση των ρυθμιστικών αποθεμάτων και επιπρόσθετα η προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων οφειλόμενη σε ανθρώπινη δραστηριότητα.

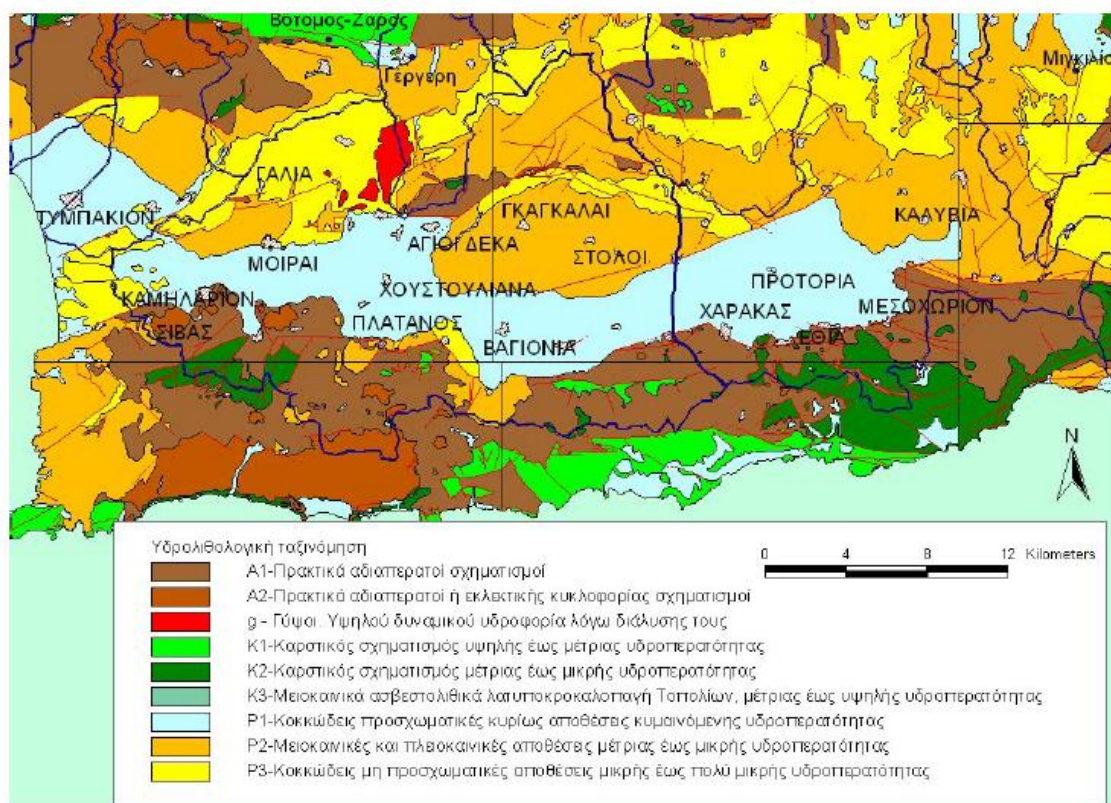
Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται οι υδρολογικές λεκάνες της περιοχής με τους αντίστοιχους ποταμούς (Κριτσωτάκης, 2009).



Εικόνα 12 Υδρολογικές λεκάνες Γεροπόταμου – Αναποδάρη (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι συναντώνται στη λεκάνη της Μεσσαράς ταξινομήθηκαν με βάση την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά (Εικόνα 13) και διαχωρίστηκαν στις παρακάτω κατηγορίες (Περλέρης, 2004):





Εικόνα 13 Υδρολιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

## Α. Καρστικοί Σχηματισμοί

**Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας - K1 (Εικόνα 13).** Έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, ανθρακικά Τρυπαλίου και Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες Ιονίου ζώνης και θα πρέπει να αναφερθεί ότι γίνεται ανάπτυξη υπόγειων υδροφοριών με υψηλό δυναμικό.

**Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας - K2 (Εικόνα 13).** Ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, κρυσταλλικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι Ηωκαινικής - Ιουρασικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και ανθρακικές εμφανίσεις των καλυμμάτων των εσωτερικών ζωνών. Σε αυτούς τους σχηματισμούς αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες οι οποίες έχουν μέσο έως μικρό δυναμικό και με αφορμή τον έντονο τεκτονισμό τους όταν παρουσιάζουν σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

**Μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας - K3** (Εικόνα 13). Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί παρουσιάζουν πρωτογενές αλλά και δευτερογενές πορώδες και σε αυτούς αναπτύσσονται σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών μέσω μειοκαινικών ασβεστολιθικών λατοποκροκαλοπαγών. (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

## **B. Κοκκώδεις Σχηματισμοί**

**Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις με κυμαινόμενη υδροπερατότητα - P1** (Εικόνα 13). Αλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιες, θαλάσσιες αναβαθμίδες, κροκαλοπαγή που έχουν ποτάμια προέλευση, πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Η υποβάθμιση, κατά θέσεις, προκύπτει ως επακόλουθο της υφαλμύρινσης σε υδροφορίες που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα.

**Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις με μέτρια έως μικρή υδροπερατότητα - P2** (Εικόνα 13). Κροκαλοπαγή και οι μαργαικοί ασβεστόλιθοι Νεογενών που αφορούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

**Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα - P3** (Εικόνα 13). Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν έντονη υδροφορία η οποία όμως είναι υποβαθμισμένη εξαιτίας των θεικών ιόντων. (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

## **Γ. Αδιαπέρατοι Σχηματισμοί**

**Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας - A1** (Εικόνα 13). Σχηματισμοί του φλύσχη, ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα διαφόρων ζωνών όπως και το σύστημα φυλλιτών – χαλαζιτών. Αναπτύσσονται κατά θέσεις τοπικά υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού εντός των στρωμάτων του φλύσχη είτε στις επιφάνειες σχιστότητας είτε στις ενστρώσεις ή πάγκους ψαμμιτών.

**Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας** (Εικόνα 13). Πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων. Εμφανίζονται τοπικά επιμέρους υδροφορίες κατά θέσεις τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της σύνθεσης των πετρωμάτων π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών, μαρμάρων (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

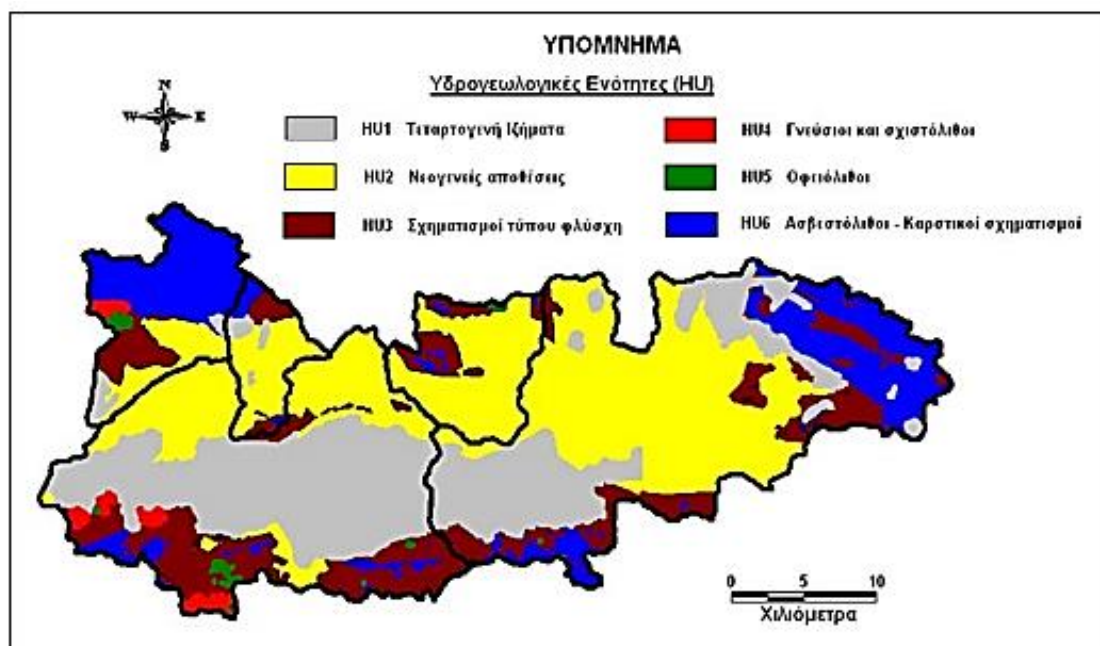
**Δ. Γύψοι (Εικόνα 13).** Εμφανίζεται υψηλού δυναμικού υπόγεια υδροφορία εξαιτίας της διάλυσής τους «ψευδοκάρστ» η οποία όμως επειδή περιέχει θειικά ιόντα είναι έντονα υποβαθμισμένη.

Οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης, το ποσοστό της έκτασης που καλύπτουν καθώς και οι συντελεστές κατείσδυσης καταγράφονται στον Πίνακα 4 (Περλέρους, 2004).

ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΕΚΤΑΣΗ (%)	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
<b>ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ</b>		
Καρστικοί σχηματισμοί υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1)	7,96	50% - 55%
Καρστικοί σχηματισμοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Κ2)	6,99	40% - 45%
Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (Κ3)	0,01	55%
<b>ΚΟΚΚΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ</b>		
Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1)	25,24	20%
Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2)	1,65	25%
Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3)	34,12	10%
<b>ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ</b>		
Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1)	16,86	5%
Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α2)	1,22	5% - 8%
Γύψοι	5,95	50% - 55%

Πίνακας 4 Συντελεστές κατείσδυσης και ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνουν οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης (πηγή Περλέρους, 2004).

Οι παραπάνω κατηγορίες χρησιμοποιήθηκαν ώστε να πραγματοποιηθεί ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών σε έξι υδρογεωλογικές ενότητες (Κριτσωτάκης 2009), ανάλογα με τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους στην οποία αντιστοιχεί η καθεμία, και δίνονται στην Εικόνα 14 καθώς και οι γεωλογικοί σχηματισμοί που τις αποτελούν.



Εικόνα 14 Υδρογεωλογικές ενότητες περιοχής μελέτης. (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

Στον πίνακα 5 αναγράφεται το ποσοστό της επιφάνειας, το οποίο καταλαμβάνει η κάθε μία από τις έξι υδρογεωλογικές ενότητες στην κάθε λεκάνη / υπολεκάνη απορροής στην περιοχή μελέτης (Κρίνης, 2009).

Λεκάνη	Τεταρτογενή Ιζήματα	Νεογενείς Αποθέσεις	Σχηματισμοί του Φλύσχη	Γνεύσιμοι - Σχιστόλιθοι	Οφειόλιθοι	Καρστικά - Ασβεστόλιθοι
Κουτσουλίδη	4	22	14	2	1	57
Γεροποτάμου	40	34	20	2	1	3
Ληθαίου	5	69	17	0	0	9
Αναποδιάρη	18	52	14	0	0	16
Πλακιώτισσας	0	79	18	0	1	2

Πίνακας 5 Ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνουν οι υδρογεωλογικές ενότητες στην περιοχή μελέτης (πηγή Κρίνης, 2009).

**ΛΕΚΑΝΗ ΜΕΣΑΡΑΣ**  
**ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ**  
**(ΔΥΣΗ - ΑΝΑΤΟΛΗ)**

Δ

Α

400  
300  
200  
100  
0  
-100  
-200

Μέτρα  
300  
200  
100  
0  
-100  
-200

Λεκάνη Τυμπακίου  
Γύβωμα Φαίστου  
Λεκάνη Μοιρών  
Λεκάνη Μοιρών  
Λεκάνη Βαγιονιάς  
Λεκάνη Ασημίου  
Λεκάνη Χάρκα  
Λεκάνη Σκινιάς

0 5 10 15 20 25 30 Kilometers

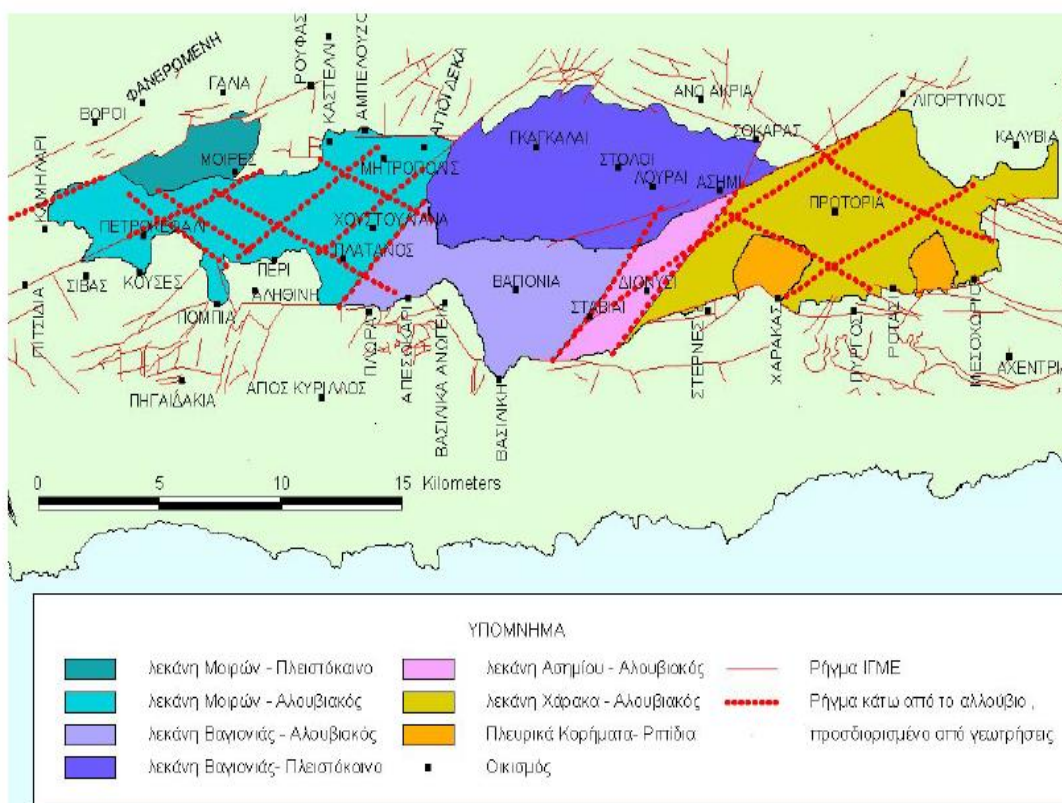
Γεώτρηση  
Στάθμη Θάλασσας  
Ρήγμα  
Αλλουβιακός υδροφόρας (1)  
Πλειστοκαινικός υδροφόρας  
Αδιαπέρατο υπόβαθρο (νεογενές- Φλύσχης)

Κατακόρυφη κλίμακα μεγέθυνση 10 φορές

#### 4.2.Υδρογεωλογία περιοχών μελέτης

Επιπρόσθετα συναντώνται ρηξιτεμάχη με διεύθυνση B-N, τα οποία έχουν διαφορετικές υδρογεωλογικές ιδιότητες, κυρίως αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν του κύριου ρέματος του Γεροπόταμου.





Εικόνα 16 Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς. (πηγή Κριτσωτάκης, 2009)

Με βάση το διαφορετικό πάχος του πλειστόκαινικού σχηματισμού, το βόρειο τμήμα του οποίου είναι πολύ μεγάλο και σχεδόν απουσιάζει το αλλουβιακό κάλυμμα, σε σχέση με το ρηξιτέμαχος του νότιου τμήματος που το πλειστόκαινο είναι μικρού πάχους και καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις πάχους 20-50 m, συμβαίνει και εδώ διάκριση κατά τη κατεύθυνση Β-Ν.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις συντίθενται από χάλικες και από χάλικες – ιλύς – άργιλο και έχουν «υψηλή» και «μέτρια» υδροπερατότητα αντίστοιχα. Δεν αποτελούν σημαντικό υδροφορέα λόγω του μικρού τους πάχους και σήμερα ο υδροφορέας αυτός έχει υπεραντληθεί. Πριν από την υπεράντλησή του το νερό της βροχής που κατείσδυε, ανάβλυζε στα σημεία που το πάχος του ήταν μικρό.

Οι πηγές αυτές τροφοδοτούσαν τον Γεροπόταμο ο οποίος είχε συνεχή και μόνιμη ροή και υπολογίστηκαν μερικά εκατομμύρια  $m^3$  ανά έτος από τον FAO ως απορροή. Ο υδροφορέας χαρακτηρίστηκε ως «φτωχός» από τον FAO και ως εκ τούτου δεν πραγματοποιήθηκε μελέτη σε βάθος όπως στον υδροφορέα των Μοιρών και του Χάρακα.

Εξαιτίας των αυξανόμενων αρδευτικών αναγκών καθώς και της εξέλιξης των γεωτρήσεων, αυξήθηκε σημαντικά ο αριθμός γεωτρήσεων. Υπήρξε εκμετάλλευση πρώτα του αλλουβιακού υδροφορέα και κατόπιν του υδροφορέα των πλειστοκαινικών σχηματισμών (βόρειο τμήμα) και του υδροφορέα των τριτογενών νεογενών σχηματισμών κροκαλοπαγείς, ψαμμιτικές και γυψούχες ενδιαστρώσεις που βρίσκονται σε αργίλους και μάργες. Η μέση παροχή των πλειστοκαινικών και των τριτογενών υδροφορέων είναι μικρή, της τάξης των 5-20 m<sup>3</sup>/h και η ειδική παροχή των της τάξης 0,6-1 m<sup>3</sup>/h. (Κριτσωτάκης, 2009).

#### **4.3. Τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα της λεκάνης της Βαγιονιάς και του Ασημίου**

Το δυτικό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, απαρτίζεται από την λεκάνη της Βαγιονιάς και του Ασημίου, έχει σχήμα παραλληλόγραμμο και η έκτασή του είναι από ανατολή προς δύση με μέσο μήκος 12 km και πλάτος 9 km. Η λεκάνη της Βαγιονιάς εκτείνεται σε 86 km<sup>2</sup> από τα οποία τα 54 km<sup>2</sup> είναι πλειστοκαινικοί σχηματισμοί και 32 km<sup>2</sup> είναι αλλουβιακές αποθέσεις.

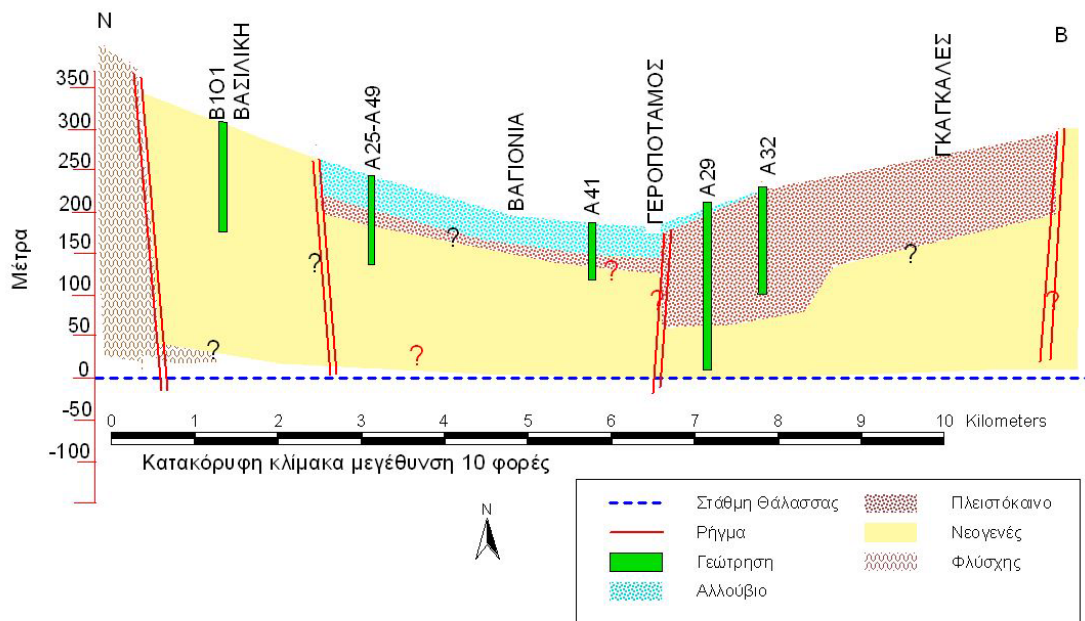
Η έκταση της λεκάνης του Ασημίου ανέρχεται σε 12 km<sup>2</sup> και αποτελείται επιφανειακά από αλλουβιακές αποθέσεις. Τα υδρογεωλογικά όρια της λεκάνης εκτείνονται περίπου όσο και τα όρια της πεδινής ζώνης. Η οριοθέτηση γίνεται κατά τη διεύθυνση Α-Δ από τα εκατέρωθεν βυθισμένα ρηξιτεμάχη της λεκάνης των Μοιρών και του Χάρακα (Κριτσωτάκης, 2009).

Η λεκανη του Ασημίου διακρίνεται εξαιτίας του σχετικά βυθισμένου ρηξιτεμάχους στο ανατολικό της τμήμα. Εξετάζοντας υδρογεωλογικά την περιοχή, μπορούμε να διαχωρίσουμε σε τρία τμήματα την λεκάνη: το τμήμα του Ασημίου, το νότιο τμήμα της Βαγιονιάς, το οποίο και χαρακτηρίζεται από επιφανειακή εξάπλωση αλλουβιακών αποθέσεων και το βόρειο τμήμα που ορίζεται από πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.

Οι υδροφορείς που δημιουργούνται στις λεκάνες αυτές χαρακτηρίζονται ως υδροφορείς που έχουν μικρή δυναμικότητα. Στην λεκάνη της Βαγιονιάς ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει έκταση περίπου 32 km<sup>2</sup> και καλύπτει την περιοχή νότια του Γεροποτάμου με αποθέσεις μικρού πάχους της τάξης των 40 m. (Κριτσωτάκης, 2009).

Στην Εικόνα δίνεται υδρογεωλογική τομή 7 Βασιλική – Βαγιονιά - Γκαγκάλες (B-N).

ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ ΒΑΓΙΟΝΙΑΣ  
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ- ΒΑΓΙΟΝΙΑ- ΓΚΑΓΚΑΛΕΣ  
( N- B )



Εικόνα 17 Υδρογεωλογική τομή 7 Βασιλική-Βαγιονιά- Γκαγκάλες (B-N) (πηγή Κριτσωτάκης, 2009).

Η λεκάνη της Βαγιονιάς, με διεύθυνση B-N, απαρτίζεται από διάφορα ρηξιτεμάχια που εμφανίζουν μια βαθμιαία βύθιση προς το βορινό μέρος της λεκάνης. Νότια απαντά ο σχηματισμός του Φλύσχη ενώ στο βορρά απαντώνται οι νεογενείς σχηματισμοί (Πλειόκαινο) οι οποίοι οριοθετούν τη λεκάνη.

Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί εξαπλώνονται με πάχος 30 m - 50 m και οριοθετούνται στο ρηξιτέμαχος νότια του Γεροποτάμου. Οι πλειστοκαινικοί σχηματισμοί έχουν μικρό πάχος 10 m - 20 m στο νότιο τμήμα του Γεροποτάμου, ενώ στο βόρειο το πάχος τους είναι συγκριτικά μεγάλο της τάξης των 100 m - 170 m.

Στα νότια της λεκάνης και βαθαίνοντας από τις αλλουβιακές αποθέσεις υπάρχουν τα πλειστοκαινικά στρώματα με μικρό πάχος της τάξης των 15 m. Ενώ ο συνολικός όγκος αποθήκευσης των πλειστοκαινικών σχηματισμών είναι υψηλός η αξιοποίησή τους είναι μικρή λόγω της μικρής υδροπερατότητάς τους (Κριτσωτάκης, 2009).

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Βαγιονιάς βρίσκονται κάτω από τους πλειστοκαινικούς σχηματισμούς σε κυμαινόμενο βάθος. Θεωρούνται ως μη υδροφόρος σχηματισμός λόγω της μαργαϊκής και αργλικής σύστασής τους και αποτελούν το στεγανό υπόβαθρο της λεκάνης. Όμως επειδή οι αρδευτικές ανάγκες είναι αυξημένες εξαιτίας και



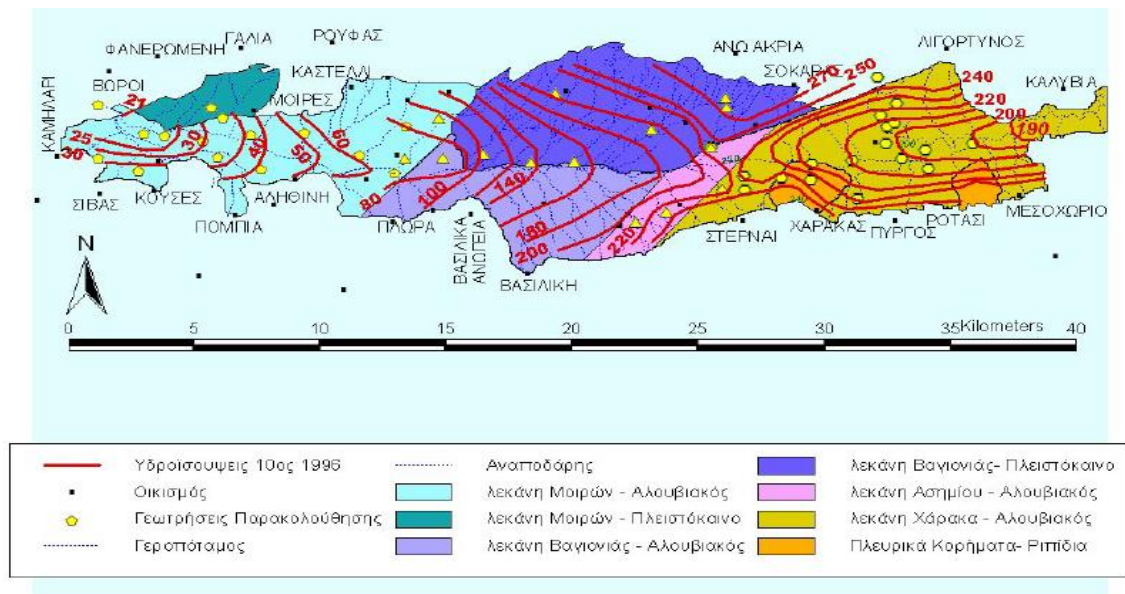
του κλιματος της περιοχής , έχουν ανορυχθεί γεωτρήσεις στους νεογενείς σχηματισμούς με αποτέλεσμα ενδιαστρώσεις μικρού πάχους που συνίστανται από κροκάλες, ψαμμίτες και γύψους. Τοπικά λόγω των προαναφερθέντων συνθηκών διατρήονται σχηματισμοί που έχουν πολύ υψηλή αλατότητα και το νερό τους είναι ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση (Κριτσωτάκης, 2009).

Στη λεκάνη της Βαγιονιάς συναντώνται οι εξής υδροφόροι σχηματισμοί: ο προσχωματικός (αλλουβιακός) του οποίου η υδροστατική στάθμη βρίσκεται δεκάδες μέτρα από την επιφάνεια και είναι ελεύθερος ή μερικώς υπό πίεση, ο πλειστοκαινικός και ο νεογενής οι οποίοι είναι υπό πίεση και η υδροστατική τους στάθμη βρίσκεται αρκετές δεκάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

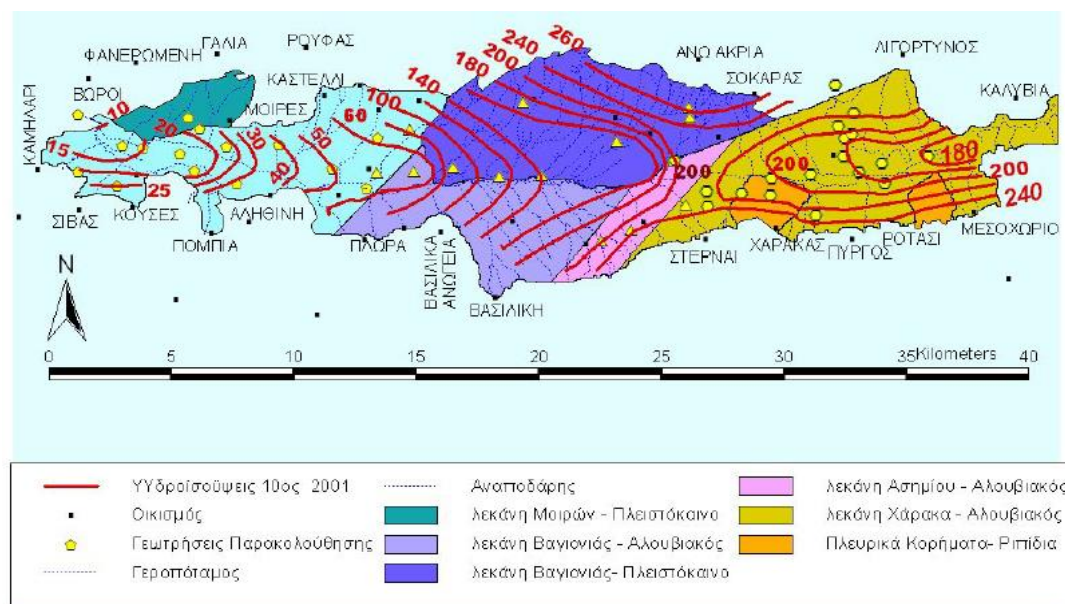
Μετά το 1990 άρχισαν οι συνεχείς αντλήσεις στην περιοχή της λεκάνης Βαγιονιάς με αποτέλεσμα τη συνεχόμενη ταπείνωση του υδροφόρου. Η πτώση στάθμης, που προήλθε από την υπεράντληση, μετά το 1990, εξαρτάται από τον τύπο του υδροφορέα, τα γεωμετρικά (πάχος, έκταση) και από τα υδραυλικά (T, S) χαρακτηριστικά του. Ωστόσο η έλλειψη δεδομένων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου πριν από την εκτεταμένη εκμετάλλευση δεν επιτρέπει να προσδιοριστεί η συνολική πτώση στάθμης στη περιοχή (Κριτσωτάκης, 2009).

Η έκταση του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Ασημίου είναι περίπου 12 km<sup>2</sup> και οι αποθέσεις έχουν πάχος 30 m. Τα πλειστοκαινικά στρώματα που βρίσκονται στη λεκάνη του Ασημίου κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις είναι μεγάλα σε πάχος περίπου 100m (Κριτσωτάκης, 2009).

Στις Εικόνα 18 και Εικόνα 19 εκτιμάται η διαμόρφωση της πιεζομετρίας κατά τα έτη 1996 και 2001.



Εικόνα 18 Ισοπιεζομετρικός χάρτης της λεκάνης Μεσσαράς το 1996 (πηγή Κριτσωτάκης, 2009).



Εικόνα 19 Ισοπιεζομετρικός χάρτης της λεκάνης Μεσσαράς το 2001 (πηγή Κριτσωτάκης, 2009).

Η υπερεκμετάλλευση είχε ως συνέπεια την πτώση στάθμης η οποία έλαβε χώρα από το 1990 και μετά. Οι μεγαλύτερες καταγεγραμμένες πτώσεις στάθμης της περιοχής σημειώθηκαν κατά το 2000 και το 2001 τον μήνα Οκτώβριο 2000 και οι τάξεις μεγέθους είναι ανά περιοχή και υδροφορέα οι ακόλουθες. Στις Γκαγκάλες καταγραφήκε 45 m μέτρα πτώση στάθμης στον Πλειστοκαινικό υδροφορέα και στο Ασήμι 30 m πτώση στάθμης στον Αλλουβιακό – Πλειστοκαινικό υδροφορέα της περιοχής (Κριτσωτάκης, 2009).

## **5. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

### **5.1. Γενικά**

Το 1970 ο Οργανισμός (FAO) διατύπωσε την εκτίμηση ότι το επίπεδο του υπόγειου νερού στη κοιλάδα της Μεσσαράς βρέθηκε πέντε μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, επιπλέον μέγιστος ρυθμός άντλησης θα πρέπει να είναι  $5 \text{ Mm}^3/\text{έτος}$ . Εως το 1984, είχαν εγκατασταθεί στην ευρύτερη περιοχή γεωτρήσεις με τις οποίες μετατράπηκαν οι ξηρές καλλιέργειες των αμπελώνων και των ελαιώνων σε αρδευτικές με συνέπεια την δραστική αύξηση στον ρυθμό άντλησης υπόγειου νερού η οποία και είχε ως αποτέλεσμα την δραματική πτώση της στάθμης του (Παπαδάκη, 2014).

Εντονότερες αντλήσεις πραγματοποιήθηκαν την δεκαετία του 1990 εξαιτίας των μεγάλων ξηρασιών της εποχής για αρδευτικούς αλλά και για υδρευτικούς λόγους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, την δεκαετία του 2000, η στάθμη του νερού να διαμορφωθεί στα 45 m κάτω από την επιφάνεια. Ο ρυθμός άντλησης γινόταν όλο και πιο έντονος με τιμή τα  $75 \text{ Mm}^3/\text{έτος}$  το υδρολογικό έτος 1999-2000 (Παπαδάκη, 2014).

Από το 2005 και έπειτα η απορροή του ποταμού Γεροπόταμου, του κυριότερου αποστραγγιστικού δικτύου της περιοχής, έλαβε σχεδόν μηδενικές τιμές. Ας ληφθεί ωστόσο υπόψιν το γεγονός ότι το 1990 οι διαχειριστικές αρχές του Ηρακλείου εξέδωσαν 500 άδειες για άντληση, το 2004 καταγραφήκαν 845 γεωτρήσεις και το 2007 ο αριθμός αυτός ανήλθε στις 1400. Συγχρόνως ο πληθυσμός και η ανάγκη για νερό αυξανόταν δραματικά (Παπαδάκη, 2014).

Οι παροχές των σε λειτουργία γεωτρήσεων στη λεκάνη της Βαγιονιάς - Ασημίου κυμαίνονται από  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  μέχρι  $55 \text{ m}^3/\text{h}$ , με βάση την απογραφή του 2002. Στην απογραφή αυτή συμπεριελήφθησαν συνολικά 314 γεωτρήσεις.

### **5.2. Εδαφικές υποχωρήσεις από δορυφορικές μετρήσεις**

Για την παρακολούθηση της εδαφικής υποχώρησης πραγματοποιήθηκαν από την κ Παπαδάκη (2014) επανειλημμένες τοπογραφικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας τα ιστορικά στοιχεία και GPS (global positioning system). Ωστόσο η έκταση της περιοχής δεν καθιστά εύκολη μία τέτοια διεργασία για τη μέτρηση του φαινομένου, ιδίως από τέτοιες

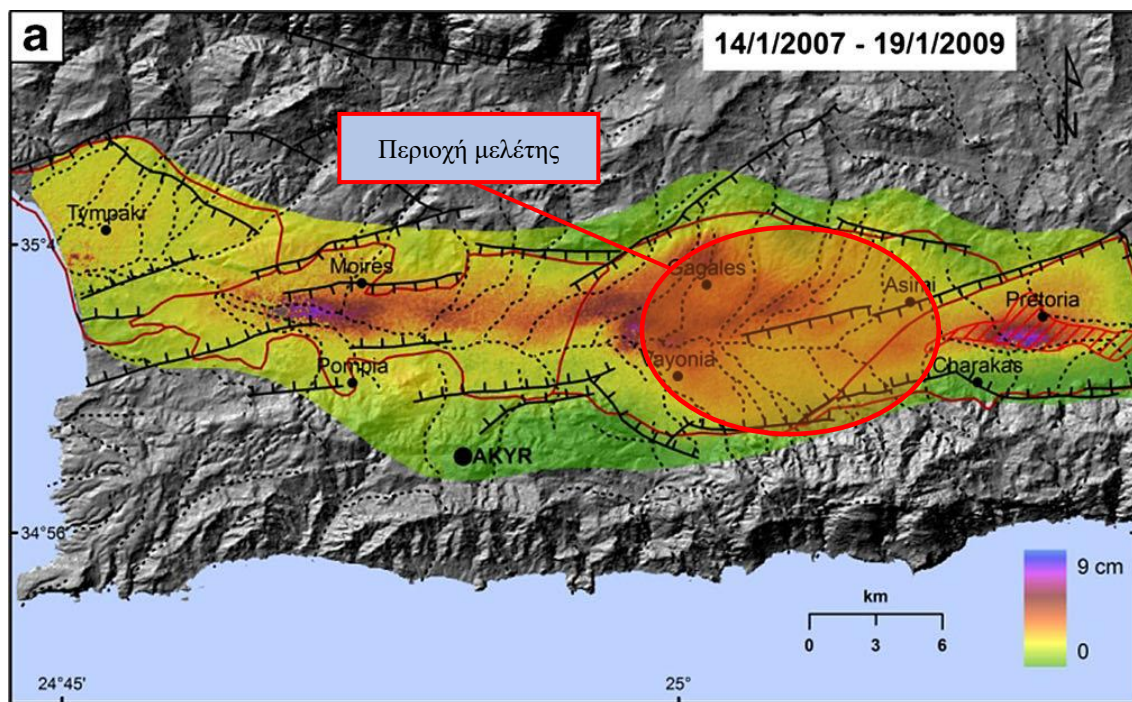
συμβατικές μεθόδους, ενώ είναι δύσκολη διαδικασία η συγκέντρωση ιστορικών γεωδαιτικών στοιχείων.

Η μέθοδος DinSAR (differential synthetic aperture radar interferometry) είναι μία αρκετά ισχυρή μέθοδος απομακρυσμένης αποτύπωσης η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή και χρησιμοποιεί ως μέτρο τις εικόνες αποτύπωσης του ραντάρ για την απόσταση μεταξύ των δορυφόρων και του εδάφους. Για παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται εικόνες διαφορετικών ημερομηνιών για την απόδοση αλλά και την ανάλυση των παραγόμενων συμβολογραφημάτων. Η μέθοδος έχει ακρίβεια από μερικά εκατοστά έως μερικά χιλιοστά και συνήθως εξαρτάται από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται από το εκάστοτε ραντάρ.

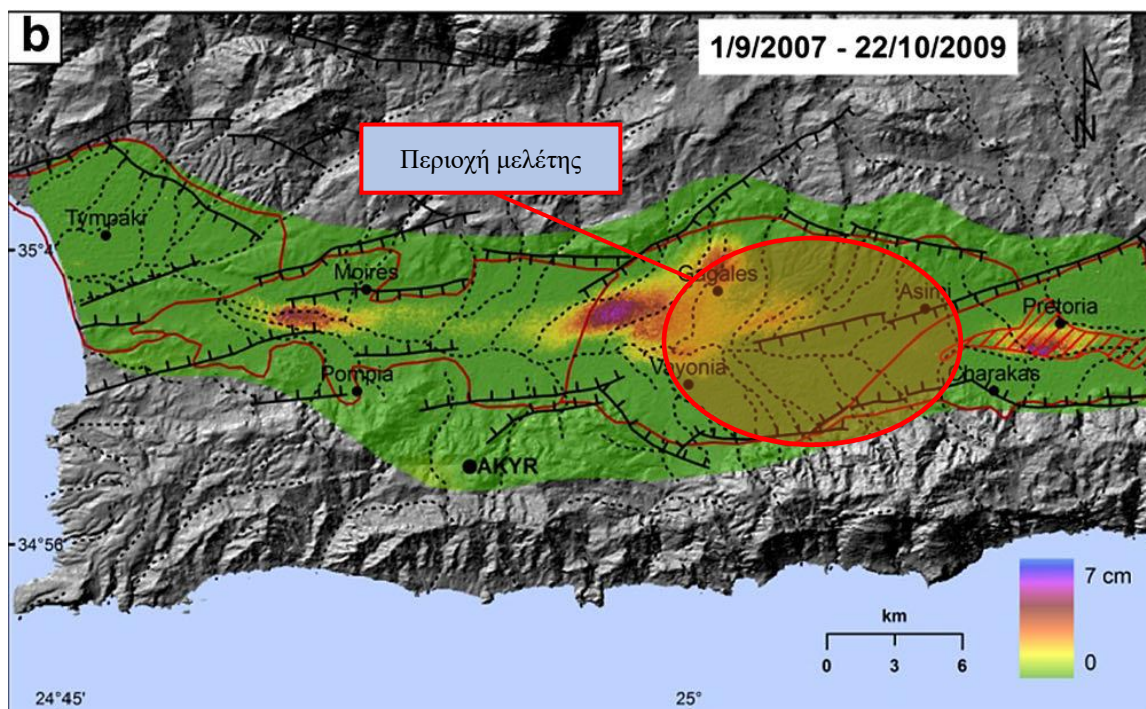
Έρευνες τα τελευταία χρόνια, έχουν δείξει πως η μέθοδος DInSAR είναι ένα πραγματικά χρήσιμο και ικανό εργαλείο στη χαρτογράφηση των εδαφικών υποχωρήσεων. Επιπρόσθετα, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση όπου ο Tomas et al (2014) μελέτησε εκτενώς στην Ισπανία την εδαφική υποχώρηση από υπεράντληση με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου.

Η κ. Παπαδάκη χρησιμοποίησε για την παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή την συγκεκριμένη μεθοδο δορυφορικών μετρήσεων Radar DInSAR (differential synthetic aperture radar interferometry) τα αποτελέσματα των εικόνων της οποίας παρατίθενται ακολούθως.



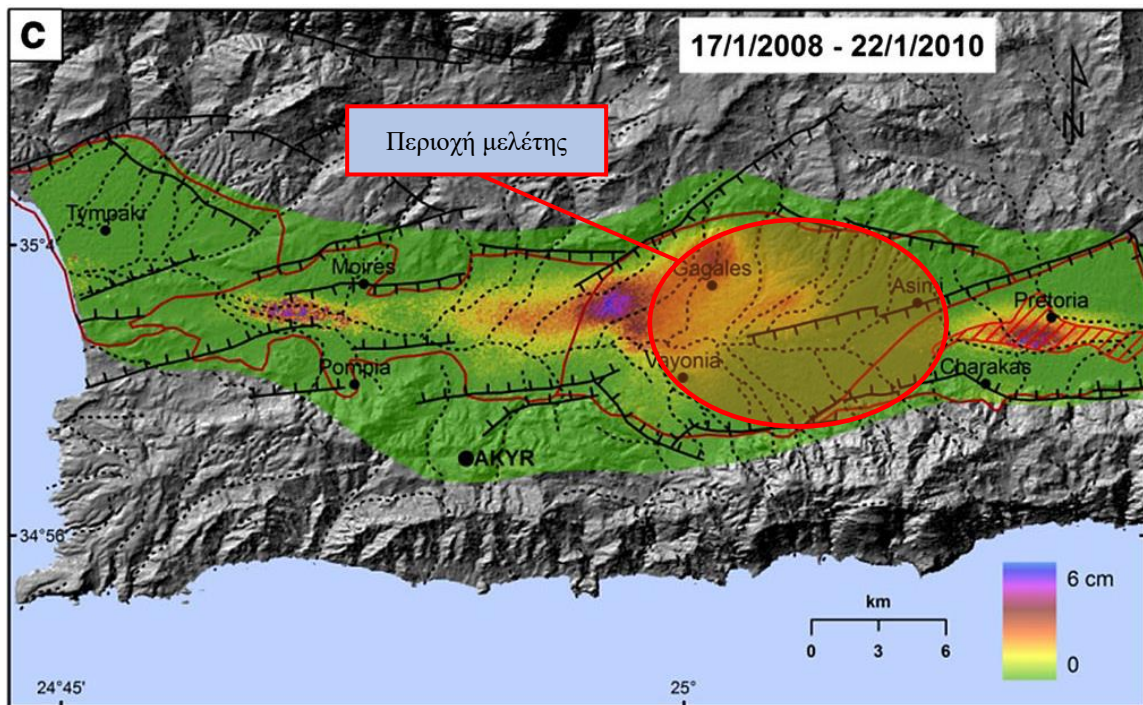


Εικόνα 20 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 14/1/2007 έως 19/1/2009 (πηγή Papadaki, 2014)

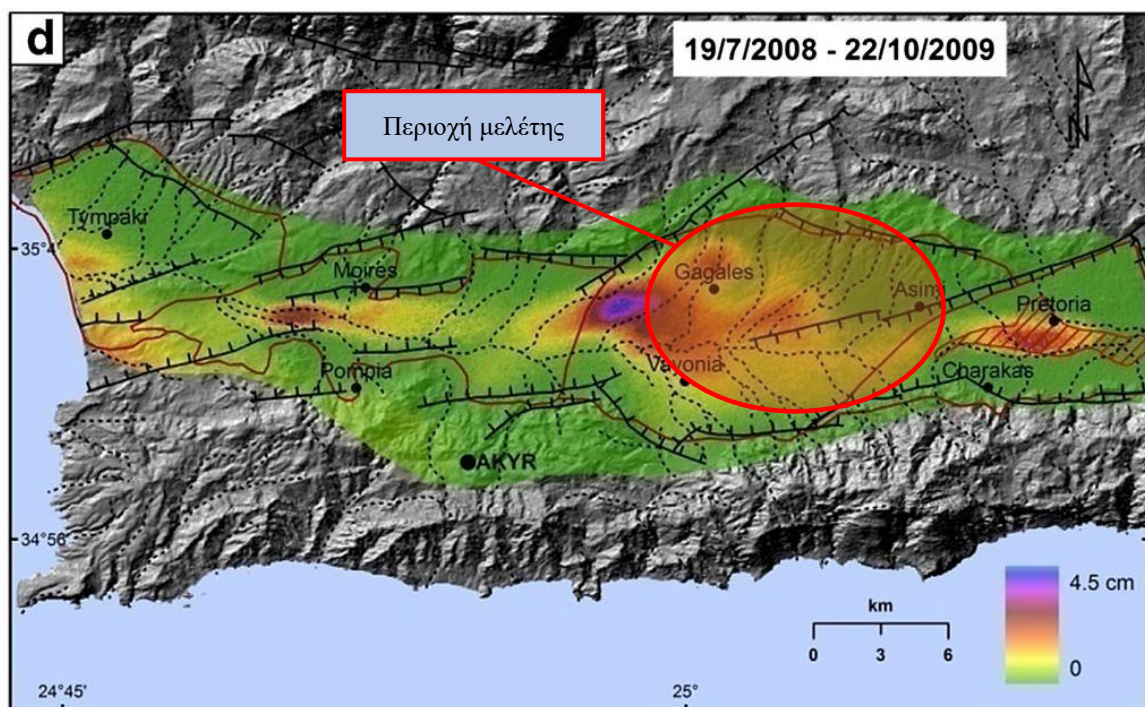


Εικόνα 21 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 1/9/2007 έως 22/10/2009 (πηγή Papadaki, 2014)





Εικόνα 22 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 17/1/2008 έως 22/1/2010 (πηγή Papadaki, 2014)



Εικόνα 23 Δορυφορικό γράφημα για την περίοδο από 19/7/2008 έως 22/10/2009 (πηγή Papadaki, 2014)

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε με γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS). Η χαρτογράφηση της κοιλάδας της Μεσσαράς με τη Μέθοδο DinSAR ήταν μία διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη λόγω των πυκνών καλλιεργειών και της άρδευσης αλλά και λόγω της δυσκολίας στην σύζευξη του μήκους κύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Παπαδάκη, 2014).

Συνολικά παρήχθησαν τέσσερα ξεχωριστά συμβολογραφήματα τα οποία και απεικονίζουν μια συστηματική εδαφική κίνηση απόκλισης από το ραντάρ για την περίοδο 2007-2010 δηλαδή 3-4 cm/year.

Οι περιοχές στις οποίες έχουν παρατηρηθεί τα εντονότερα φαινόμενα εδαφικής παραμόρφωσης είναι: οι Μοίρες στα δυτικά της λεκάνης, οι Γκαγκάλες – το Ασήμι στα κεντρικά, ο Χάρακας - τα Πραιτώρια στα ανατολικά και σε λιγότερο βαθμό το Τυμπάκι στα δυτικά της λεκάνης.

Γίνεται εμφανές, μετά τη μελέτη των αποτελεσμάτων, ότι το λιγότερο παραμορφωμένο τμήμα της κοιλάδας είναι το τμήμα της ευρύτερης περιοχής του Τυμπακίου. Σημειώνεται ότι μετά το έτος 2000 λόγω της έλλειψης υδατικών πόρων, οι γεωτρήσεις στη περιοχή του αλλουβιακού υδροφορέα ανορύχθησαν σε μεγαλύτερα βάθη, εκμεταλλευόμενες στρώσεις κροκάλων και ψαμμιτών μικρού υδατικού δυναμικού εντός των νεογενών σχηματισμών. Κατά περιόδους οι στρώσεις αυτές περιείχαν νερό με υψηλή αλατότητα (Κριτσωτάκης, 2009).

Η περιοχή με τα μεγαλύτερα ποσοστά παραμόρφωσης είναι το τμήμα Χάρακας-Πραιτώρια με την καθίζηση να φτάνει τα 9 cm στο συμβολογράφημα 2007-2009. Επίσης η περιοχή των Μοιρών έχει αρκετά υψηλό ποσοστό παραμόρφωσης με καθίζηση 7-8 cm.

Στην περίπτωση του τμήματος Γκαγκάλες – Ασήμι, η οποία αποτελεί και την περιοχή του ενδιαφέροντος, η μεγαλύτερη καθίζηση παρουσιάστηκε 3.5 km νοτιοανατολικά και 1 km βόρεια από τον οικισμό Γκαγκάλες 7-9cm (Παπαδάκη, 2014).

Γεωλογικές δομές ειδικότερα στο τμήμα Γκαγκάλες - Βαγιονιά δίνουν στοιχεία για την αξιόλογη τεκτονική δραστηριότητα στη διάρκεια από τα τέλη του Πλειστόκαινου έως πρόσφατα.

Σε μία τέτοια περιοχή με τόσο έντονη τεκτονική, οριζόντιες αλλά κατά κύριο λόγο κατακόρυφες κινήσεις είναι αναμενόμενες ειδικότερα κατά τη διάρκεια των τεκτονικών φαινομένων. Σημειώνεται ότι για την περίοδο 2007-2010 τα σεισμικά γεγονότα αριθμούσαν 26 με δυναμικότητα 2.6 – 3.4 M και εστιακό βάθος μικρότερο των 40 km.

Σεισμικά γεγονότα με δυναμική μεγαλύτερη των 3.5 M πυροδοτούν εδαφικές παραμορφώσεις μικρότερες του 1-3 mm αν τα εστιακά βάθη είναι 1-3 km. (Παπαδάκη, 2014).

Η σεισμική δραστηριότητα στην Κοιλάδα της Μεσσαράς δεν μπορεί να δικαιολογήσει την υπέρμετρη ανιχνeuόμενη εδαφική παραμόρφωση με τη μέθοδο DinSAR και εκτός αυτού η εδαφική παραμόρφωση δεν σχετίζεται με την κατακόρυφη αλλά με την οριζόντια κίνηση των ενεργών ρηγμάτων.

Όσον αφορά τις πιεζομετρικές επιφάνειες, προσωρινές αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των πιεζομετρικών επιφανειών και των αποτελεσμάτων DinSAR ήταν διαθέσιμες μόνο για το διετές συμβολογράφημα 2007-09. Όπως αναφέρει η κ.Παπαδάκη (2014), δεν παρέχονταν οι μετρήσεις για το ύψος του υπόγειου νερού σε τακτά χρονικά διαστήματα, με συνέπεια να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί η εξέλιξη της ανιχνεύσιμης υποχώρησης από το DinSAR σε σχέση με την προέλευση του υπόγειου νερού.

Οι ετήσιες αναφορές της περιοχής της Κρήτης και της χρονοσειράς της στάθμης του υπόγειου νερού έδειξαν ότι υπήρχε μία γενική σχέση μεταξύ της τμηματικής εδαφικής παραμόρφωσης και της άντλησης του νερού. Προέκυψε επίσης ότι στις περιοχές με εκτενή εδαφική παραμόρφωση η στάθμη του υπόγειου νερού είχε δραματική πτώση.



## **6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΥΠΕΡΑΝΤΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ**

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε και τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης ως αποτέλεσμα της ταπείνωσης της στάθμης του υδροφόρου. Γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που επιλέγονται για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση καθώς επίσης και τα στάδια που ακολουθήθηκαν. Παρουσιάζονται τα μοντέλα προσομοίωσης που επιλύθηκαν στην περιοχή και παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές τις αναλύσεις.

### **6.1. Περιγραφή του προγράμματος Plaxis V8**

Το Plaxis V8 είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, πραγματοποιώντας αναλύσεις παραμορφώσεων και τάσεων συνεχούς μέσου, σε δυο διαστάσεις.

Το πρόγραμμα αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα που αφορούν την:

1. Εισαγωγή δεδομένων (input)
2. Εκτέλεση υπολογισμών (calculations)
3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων (output)
4. Παραγωγή διαγραμμάτων (curves)

Στο πρόγραμμα Plaxis V8 υπάρχουν πολλά εργαλεία ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία ενός μεγάλου αριθμού από πολύπλοκες γεωτεχνικές κατασκευές.

#### **Εισαγωγή δεδομένων (input)**

Το υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων περιέχει διάφορα εργαλεία και εντολές προκειμένου να δημιουργηθεί το επιθυμητό μοντέλο προσομοίωσης.

Για να εισάγουμε τις επιμέρους γεωμετρικές παραμέτρους χρησιμοποιούμε την γραμμή εντολών (toolbar).

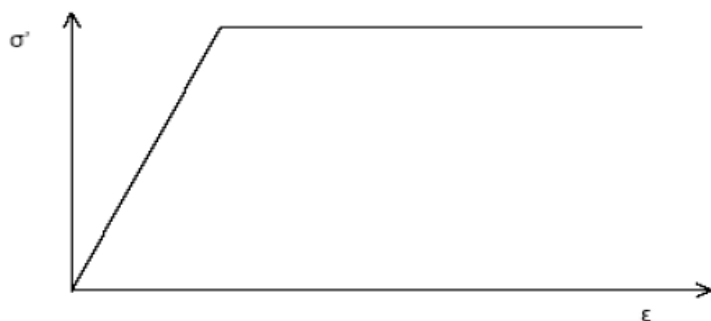
Για να θέσουμε το πρόβλημα χρησιμοποιούμε το παράθυρο εντολών "Γενικές ρυθμίσεις" - General Settings, το οποίο μας δίδει δυο επιλογές. Από την πρώτη επιλογή δημιουργούμε το σχέδιο - Project, δηλαδή δίδουμε τον τίτλο του σχεδίου, το βασικό τύπο προσομοιώματος - το μοντέλο της παραμόρφωσης, τον τύπο των πεπερασμένων

στοιχείων. Από την δεύτερη επιλογή, με την οποία επιλέγουμε τις διαστάσεις - Dimensions, ορίζουμε τις διαστάσεις της τομής και τις μονάδες μέτρησης. Δημιουργώντας τη γεωμετρία ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι απαραίτητο να καθορίσουμε τα όρια των εδαφικών στρώσεων χρησιμοποιώντας την εντολή geometry line καθώς και να ορίσουμε τις συνοριακές συνθήκες.

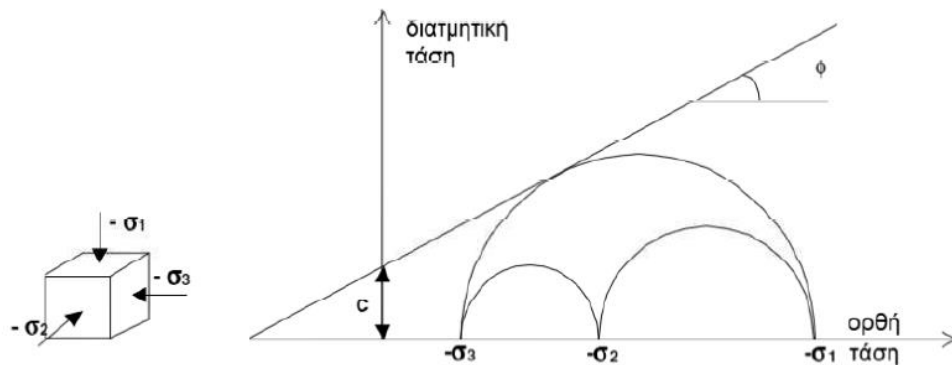
### **Μοντέλο Mohr-Coulomb – καταστατικός νόμος προγράμματος Plaxis**

Για να περιγράψουμε την συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο του ελαστικού - τέλεια πλαστικού εδάφους κατά Mohr - Coulomb. Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται από τα πλέον εύχρηστα και για να το εφαρμόσουμε χρησιμοποιούμε πέντε βασικές μηχανικές παραμέτρους δηλαδή: το μέτρο ελαστικότητας  $E$  (Young's modulus), τον λόγο Poisson  $\nu$  (Poisson's ratio), την συνοχή  $c$  (cohesion), την γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  (friction angle) και την γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ . Οι πρώτες δύο παράμετροι αποτελούν ελαστικές σταθερές, ενώ η συνοχή  $c$  και η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  αποτελούν παραμέτρους διατμητικής αντοχής κατά Mohr - Coulomb. Αναφορικά με την γωνία διασταλτικότητας  $\psi$ , είναι ένα μέγεθος το οποίο εκφράζει την τάση διόγκωσης του εδαφικού υλικού κατά τη διάτμηση και μετρείται σε μοίρες.

Το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σχήματος (Εικόνα 24) χωρίζεται σε δύο τμήματα, το πρώτο στο οποίο γίνεται γραμμικώς η απεικόνιση της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού και το δεύτερο στο οποίο απεικονίζεται η συνεχής ανάπτυξη παραμορφώσεων υπό συνθήκες σταθερών τάσεων όταν το υλικό φτάσει σε κατάσταση οριακής ισορροπίας ακολουθώντας το κριτήριο αστοχίας κατά Mohr - Coulomb.



Εικόνα 24 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του ελαστικού – τέλεια πλαστικού μοντέλου κατά Mohr- Coulomb



Εικόνα 25 Κύκλοι του Mohr.

Κατά την διαδικασία της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εδαφικού μέσου, εκτός από τον καθορισμό των πέντε παραμέτρων είναι απαραίτητο να ορίσουμε τις συνθήκες προσομοίωσης - στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες - του σχηματισμού, τα φυσικά χαρακτηριστικά του, όπως τα  $\gamma_{sat}$  και  $\gamma_{unsat}$  και τα  $k_x$  και  $k_y$ . Επίσης καθοριστηκαν το μέτρο διάτμησης  $G$  και το μέτρο ελαστικότητας  $E_{oed}$ .

### Διακριτοποίηση μοντέλου προσομοίωσης

Όταν ορισθεί η γεωμετρία και καθορισθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών, επιλέγουμε την εντολή παραγωγής πλέγματος - generate mesh - για να προκύψει το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση και γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα Plaxis V8. Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε την πυκνότητα που επιθυμούμε στο πλέγμα : πολύ χονδρό πλέγμα (very coarse) , χονδρό (coarse), μεσαίο (medium), λεπτό (fine), και πολύ λεπτό (very fine). Αν επιθυμούμε μεγαλύτερη ακρίβεια, σε μια περιοχή, το πρόγραμμα μας δίνει επίσης την δυνατότητα να δημιουργήσουμε πυκνότερο πλέγμα τοπικά αν επιλέξουμε, από το μενού παραγωγής πλέγματος, τις εντολές refine cluster , refine line ή refine around point.

## **Αρχικές εντατικές συνθήκες**

Αφού έχουμε δημιουργήσει το γεωμετρικό μοντέλο του προβλήματος και έχουμε πραγματοποιήσει την διακριτοποίηση προχωρούμε στον καθορισμό του αρχικού εντατικού πεδίου (initial conditions). Κατ' αρχήν καθορίζουμε τις συνθήκες πίεσης του νερού - water pressure generation - για να προκύψει το αρχικό πεδίο υδατικών πιέσεων. Στη συνέχεια καθορίζουμε το αρχικό πεδίο ενεργών και ολικών τάσεων - initial stresses. Καθορίζουμε επίσης από το πρόγραμμα το μοναδιαίο βάρος του νερού ( $10\text{kN/m}^3$ ) και στην συνέχεια σχεδιάζουμε την στάθμη του.

Για να ορίσουμε την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα - αν υπάρχει - ενεργοποιούμε το αντίστοιχο εικονίδιο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (phreatic level) και έπειτα χρησιμοποιούμε τον κέρσορα για να σχεδιάσουμε το επίπεδο της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

## **Υπολογισμοί**

Καθορίζουμε τον τύπο του υπολογισμού (calculation type) και εισάγουμε τις φάσεις (phases). Η αρχική φάση (initial phase) αντιστοιχεί στο αρχικό εντατικό πεδίο. Στα επόμενα στάδια ενεργοποιούνται τα στοιχεία ή τα τμήματα του γεωμετρικού μοντέλου που θεωρείται ότι κατασκευάζονται σε κάθε φάση και τα οποία είχαμε απενεργοποιήσει όταν εισάγαμε τα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιώντας την εντολή υπολογισμών (calculations) ξεκινά η υπολογιστική διαδικασία. Μπορούμε να επιλέξουμε ενδεικτικά σημεία του μοντέλου (select points for curves) αν επιθυμούμε να εξάγουμε και να αξιοποιήσουμε διαγράμματα ανάπτυξης των παραμορφώσεων σε διάφορες υπολογιστικές φάσεις.

## **Αποτελέσματα (output)**

Όταν ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί υπάρχει δυνατότητα επισκόπησης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων. Η εφαρμογή ενεργοποιείται αν επιλέξουμε την εντολή output όπου παρουσιάζονται μέσω διαφόρων εντολών διαγράμματα διαφόρων παραμέτρων όπως οριζόντιων ή κατακόρυφων μετατοπίσεων, τάσεων κλπ για κάθε φάση των υπολογισμών

Για την παράθεση των παραπάνω μεγεθών η επιλεγμένη μέθοδος παρουσίασης των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω χρωματικών διαβαθμίσεων. Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων για κάθε σχηματισμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

## 6.2. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σχηματισμών της περιοχής μελέτης

Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν είναι σύμφωνες με το καταστατικό μοντέλο για ελαστικό – τέλεια πλαστικό έδαφος, Mohr – Coulomb και το οποίο μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά των σχηματισμών που βρίσκονται στη περιοχή της μελέτης.

Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων των σχηματισμών της περιοχής (Βαγιωνιά – Γκαγκάλες – Ασήμι) οι οποίες και εισήχθησαν για την προσομοίωση επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά.

Στον παρακάτω Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα μοντέλα προσομοίωσης.

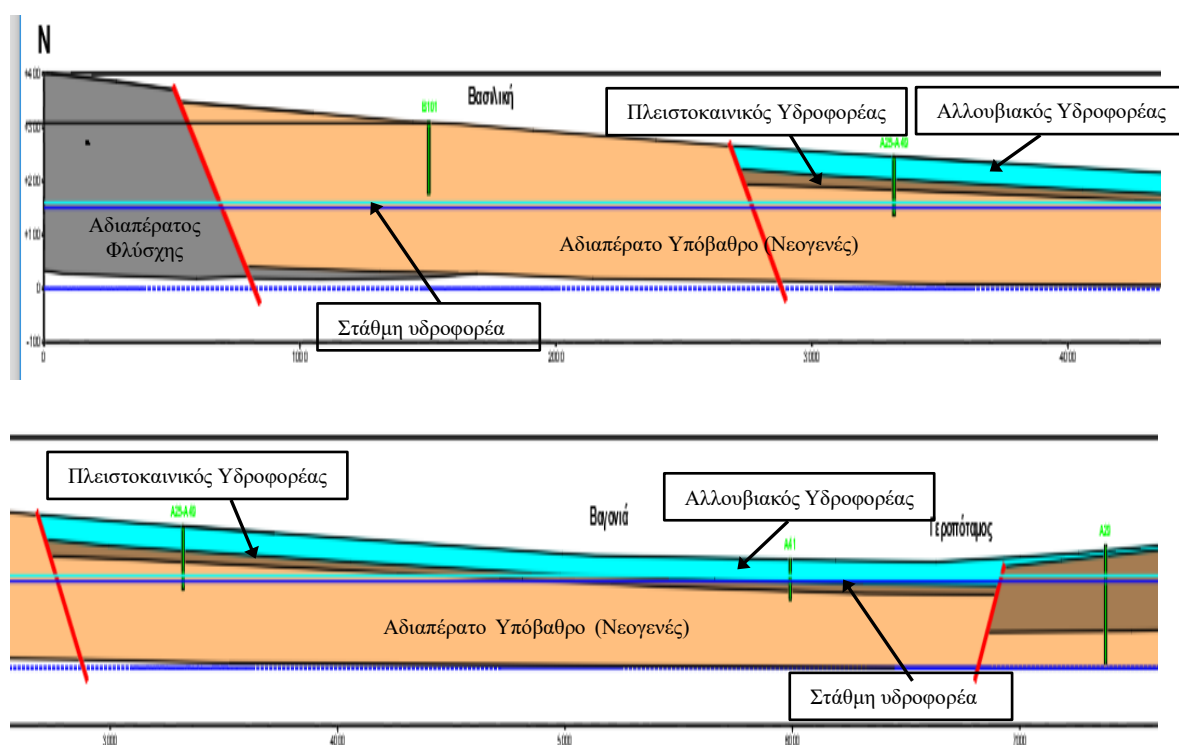
Γεωτεχνικές παράμετροι	Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί	Νεογενείς σχηματισμοί
Φαινόμενο βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,5	20
Φαινόμενο βάρος για συνθήκες κορεσμού $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,5	21
Συντελεστής διαπερατότητας $k_x$ , (m/s) $k_y$ (m/s)	$1 \times 10^4$ $1 \times 10^4$	$1 \times 10^6$ $1 \times 10^6$
Συνοχή (kN/m <sup>2</sup> )	55	100
$\phi$ (°)	30	50
Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m <sup>2</sup> )	$5 \times 10^4$   $10 \times 10^4$	$10 \times 10^4$   $15 \times 10^4$   $20 \times 10^4$
$\nu$	0,3	0,25

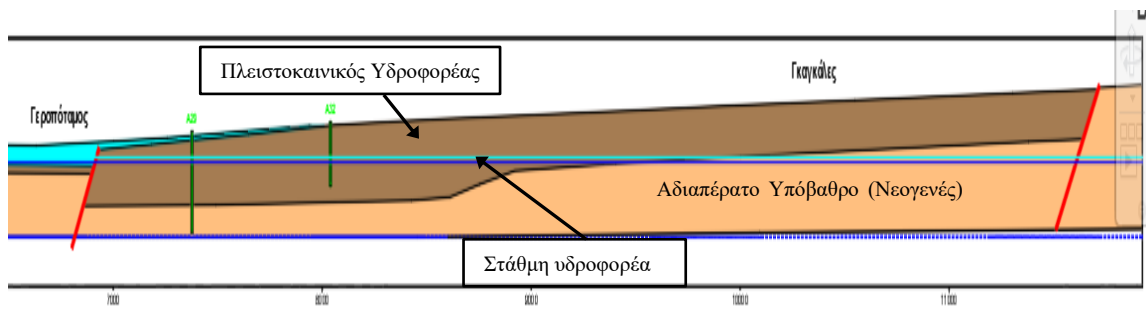
Πίνακας 6 Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοίωσης

### 6.3. Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης βασίζεται στην γεωλογική τομή (Εικόνα 26). Έγιναν παραμετρικές αναλύσεις στην περιοχή νοτίως του Γεροποτάμου, κατασκευάζοντας ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης με τους εδαφικούς σχηματισμούς της περιοχής και με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας ταπεινώνοντας τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Σημειώνεται πως οι Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί έχουν ένα μέσο πάχος 55m ενώ οι Νεογενείς σχηματισμοί 145m. Η στάθμη του υδροφόρου που αρχικώς βάσει των δεδομένων των γεωτρήσεων βρισκόταν στο +150 ταπεινώθηκε ανά 4m μέχρι το +130.

Στα σενάρια διερευνήθηκε η επίδραση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών στο τελικό αποτέλεσμα διαφοροποιώντας το μέγεθος του. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο της προσομοίωσης δείχνει πώς παραμορφώνεται το έδαφος σε σχέση με την πτώση στάθμης που παρουσιάζει κάθε φορά ο υδροφόρος καθώς και με την διαφοροποίηση του μέτρου ελαστικότητας.





Εικόνα 26 Γεωτεχνική τομή στην οποία βασίστηκαν οι αναλύσεις περιοχή Βαγιονιά νοτίως του Γεροποτάμιου

#### 6.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι εδαφικές υποχωρήσεις όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Η ένταση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις που ακολουθούν, είναι ανάλογη της ταπείνωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή η εντονότερη ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου οδηγεί σε μεγαλύτερες εδαφικές υποχωρήσεις.

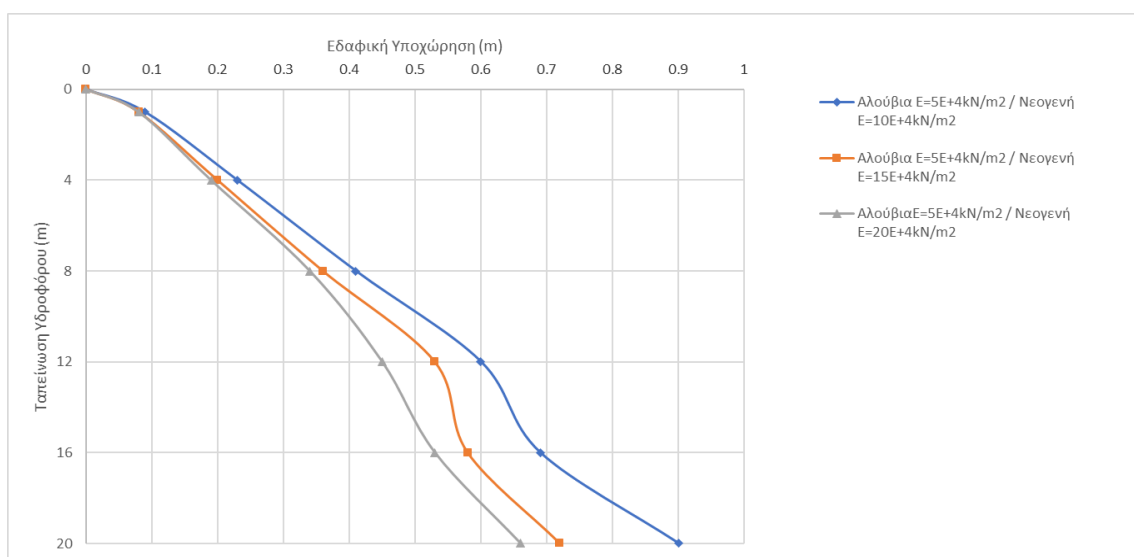
Στον Πίνακα 7 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι (υποβιβασμός της στάθμης του υδροφόρου και το μέτρο ελαστικότητας των σχηματισμών) που θεωρήθηκαν στα διάφορα μοντέλα προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα της μέγιστης εδαφικής υποχώρησης που προέκυψαν.

Ταπείνωση στάθμης H (m)	Μέτρο ελαστικότητας E(kN/m <sup>2</sup> )  Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί	Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m <sup>2</sup> )  Νεογενείς σχηματισμοί	Εδαφική Υποχώρηση στην Επιφάνεια Y (m)
1	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.09
4			0.23
8			0.41
12			0.60
16			0.69
20			0.90

1	$5 \times 10^4$	$15 \times 10^4$	0.08
4			0.20
8			0.36
12			0.53
16			0.58
20			0.72
1	$5 \times 10^4$	$20 \times 10^4$	0.08
4			0.19
8			0.34
12			0.45
16			0.53
20			0.66

Πίνακας 7 Προσομοίωση με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της πτώσης στάθμης 1/2.

Στην Εικόνα 27 που ακολουθεί έχουν αποτυπωθεί συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα (εδαφικές υποχωρήσεις) από τρία σενάρια που εξετάστηκαν στα οποία το μέτρο ελαστικότητας αλλάζει στους Νεογενείς σχηματισμούς ενώ παραμένει σταθερό για τους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.



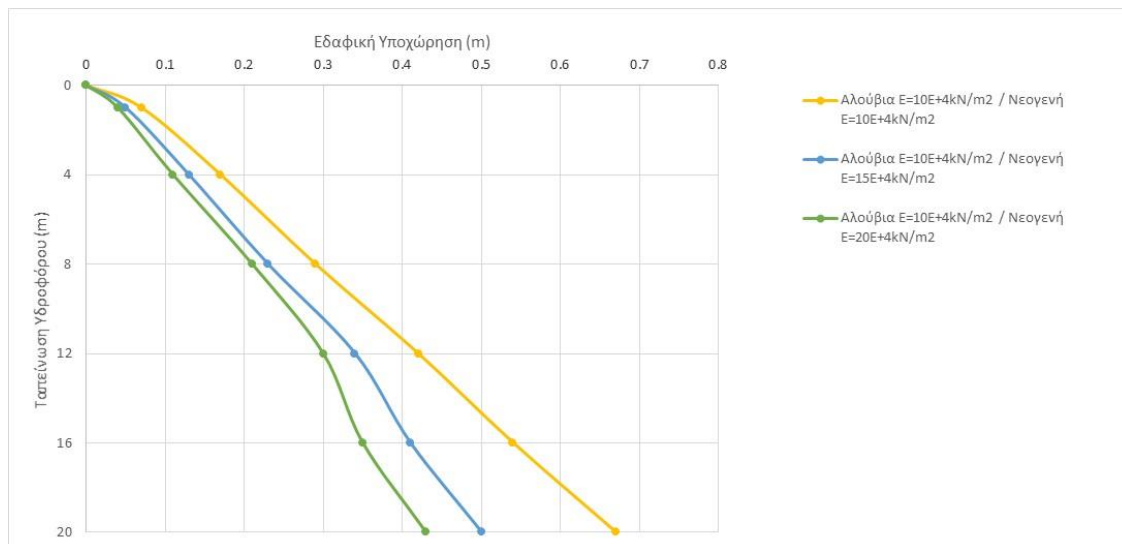
Εικόνα 27 Εδαφική υποχώρηση συναρτήσει της ταπείνωσης του υδροφόρου για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας στους Νεογενείς σχηματισμούς και σταθερό μέτρο ελαστικότητας στους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.



Ταπείνωση στάθμης H (m)	Μέτρο ελαστικότητας E(kN/m <sup>2</sup> )  Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί	Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m <sup>2</sup> )  Νεογενείς σχηματισμοί	Εδαφική Υποχώρηση Υ στην επιφάνεια (m)
1	10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.07
4			0.17
8			0.29
12			0.42
16			0.54
20			0.67
1	10x10 <sup>4</sup>	15x10 <sup>4</sup>	0.05
4			0.13
8			0.23
12			0.34
16			0.41
20			0.50
1	10x10 <sup>4</sup>	20x10 <sup>4</sup>	0.04
4			0.11
8			0.21
12			0.30
16			0.35
20			0.43

Πίνακας 8 Προσομοίωση με αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της πτώσης στάθμης 2/2.

Στην εικόνα που ακολουθεί έχουν αποτυπωθεί συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων στις οποίες το μέτρο ελαστικότητας αλλάζει στους Νεογενείς σχηματισμούς ενώ παραμένει σταθερό στους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.

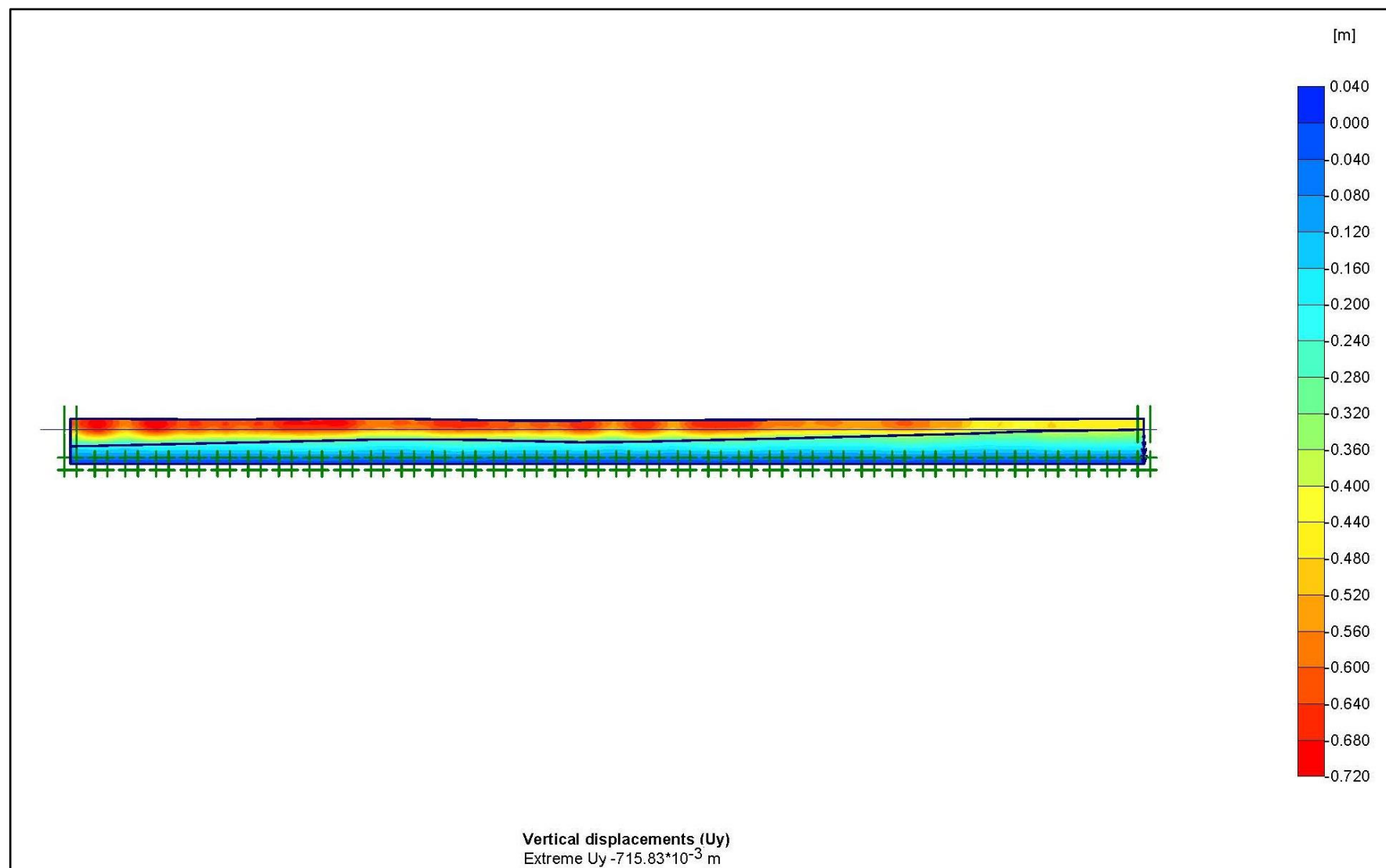


Εικόνα 28 Εδαφική υποχώρηση συναρτήσει της ταπείνωσης του υδροφόρου για διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας στους Νεογενείς σχηματισμούς και σταθερό μέτρο ελαστικότητας στους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς.

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται συγκεντρωτικά το εύρος της εδαφικής υποχώρησης συναρτήσει της πτώσης στάθμης του υδροφόρου και του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών. Επιπλέον στην εικόνα 29 παρουσιάζεται μια ενδεικτική κατακόρυφη μετατόπιση στην περιοχή μελέτης από το πρόγραμμα Plaxis.

Ταπείνωση στάθμης H (m)	Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m <sup>2</sup> ) Νεογενείς σχηματισμοί	Μέτρο ελαστικότητας E(kN/m <sup>2</sup> ) Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί	Εδαφική Υποχώρηση στην Επιφάνεια Υ (m)	Μέτρο ελαστικότητας E(kN/m <sup>2</sup> ) Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί	Εδαφική Υποχώρηση (m)
1	10x10 <sup>4</sup>	5x10 <sup>4</sup>	0.09	10x10 <sup>4</sup>	0.07
	15x10 <sup>4</sup>		0.08		0.05
	20x10 <sup>4</sup>		0.08		0.04
4	10x10 <sup>4</sup>		0.23		0.17
	15x10 <sup>4</sup>		0.20		0.13
	20x10 <sup>4</sup>		0.19		0.11
8	10x10 <sup>4</sup>		0.41		0.29
	15x10 <sup>4</sup>		0.36		0.23
	20x10 <sup>4</sup>		0.34		0.21
12	10x10 <sup>4</sup>		0.60		0.42
	15x10 <sup>4</sup>		0.53		0.34
	20x10 <sup>4</sup>		0.45		0.30
16	10x10 <sup>4</sup>		0.69		0.54
	15x10 <sup>4</sup>		0.58		0.41
	20x10 <sup>4</sup>		0.53		0.35
20	10x10 <sup>4</sup>		0.90		0.67
	15x10 <sup>4</sup>		0.72		0.50
	20x10 <sup>4</sup>		0.66		0.43

Πίνακας 9 Εδαφική υποσώρηση συναρτήσει της πτώσης στάθμης του και του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών



Εικόνα 29 Ενδεικτική κατακόρυφη μετατόπιση στην περιοχή μελέτης

## 7. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ BOUWER

### 7.1. Γενικά

Η βασική αιτία της εδαφικής υποχώρησης και της πλευρικής μετακίνησης της εδαφικής επιφάνειας είναι η αύξηση της ενεργού τάσης των υπεδαφικών υλικών (Bouwer, 1977).

Σύμφωνα με το Bouwer, η εδαφική υποχώρηση λόγω της υπεράντλησης του υδροφορέα είναι μη αντιστρέψιμη. Μπορεί όμως να σταματήσει με την διακοπή των αντλήσεων σε συνδυασμό με τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα τοπικά. Παρόλα αυτά, η επάνοδος στα αρχικά επίπεδα μίας επιφάνειας η οποία έχει υποχωρήσει είναι από σπάνια έως αδύνατη, ακόμα και μετά από τεχνικό εμπλουτισμό.

Η ενδοκοκκώδης ή ενεργή πίεση είναι η πίεση που μεταφέρεται μέσω των κόκκων στα σημεία επαφής των υπεδαφικών υλικών. Για συστήματα που δεν υπόκεινται σε κάποιο τεκτονικό καθεστώς δυνάμεων η κατακόρυφος ενδοκοκκώδης πίεση ορίζεται από τη σχέση (Bouwer, 1977):

$$P_i = P_t - P_h \quad (1)$$

Όπου

$P_i$ = ενδοκοκκώδης πίεση,

$P_t$ = συνολική πίεση,

$P_h$ = υδραυλική πίεση.

Αυτή η συσχέτιση μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή εάν υποτεθεί ένα οριζόντιο επίπεδο σε κάποιο βάθος μέσα στον υδροφορέα (Bouwer, 1977).

Η κατακόρυφη φόρτιση στο επίπεδο αυτό προέρχεται από τα ανώτερα στρώματα. Παρόλα αυτά υπάρχει και μία αντίθετη δύναμη την οποία δέχεται το επίπεδο λόγω της υδραυλικής πίεσης του υδροφόρου ορίζοντα. Η διαφορά μεταξύ των δύο φορτίσεων είναι το καθαρό φορτίο το οποίο παραλαμβάνουν οι κόκκοι του υλικού.

Η συνολική πίεση σε ένα συγκεκριμένο βάθος υπολογίζεται ως το βάρος ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας - σε οτιδήποτε, στερεό ή και υγρό - η οποία βρίσκεται πάνω από αυτό το βάθος. Για ελεύθερους υδροφορείς η ολική πίεση αυξάνει με το βάθος (γραμμή

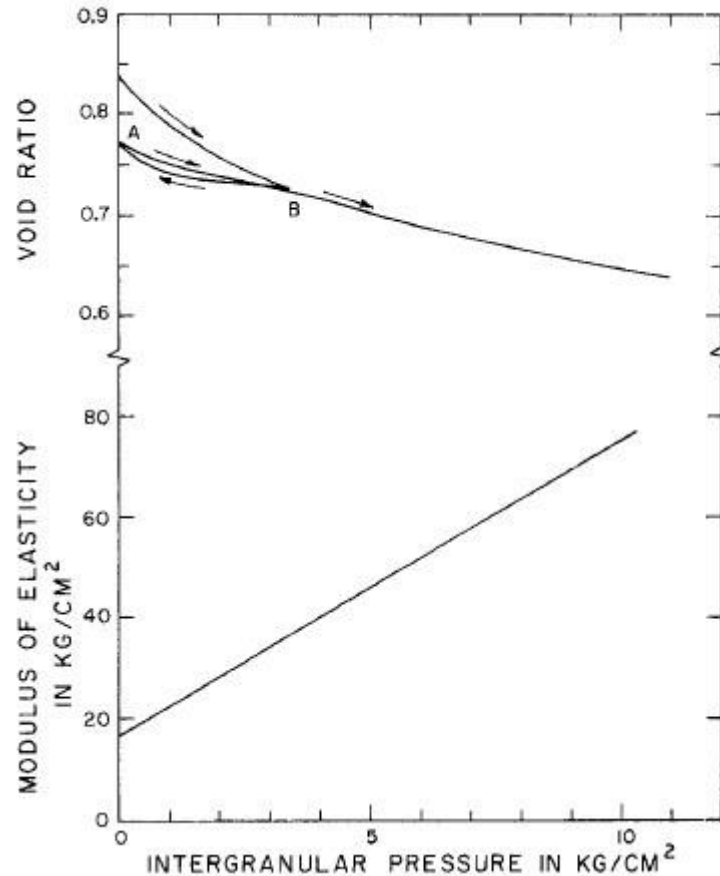
$P_{t1}$  (Εικόνα 30). Η υδραυλική πίεση αυξάνει γραμμικά από το 0 (στον υδροφόρο ορίζοντα) με το βάθος σύμφωνα με την γραμμή  $Ph_1$  (Εικόνα 30). Πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα η υδραυλική πίεση είναι αρνητική. Προσδιορίζεται δύσκολα και συνήθως θεωρείται μηδενική. Αναφέρει χαρακτηριστικά στο παράδειγμά του Bouwer ότι η οριζόντια απόσταση μεταξύ  $P_{t1}$  και  $Ph_1$  είναι ίση με  $P_{i1}$  σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση. Θεωρώντας ότι ο υδροφόρος ορίζοντας υποβαθμίζεται από το βάθος των 20 m σε 50m και ότι το ποσοστό υγρασίας στη ζώνη υποβιβασμού της στάθμης είναι 10% όπως και στην αρχικά ακόρεστη ζώνη  $P_t$  και  $Ph$  μετά την ταπείνωση της στάθμης μεγαλώνουν ανάλογα και προκύπτουν οι γραμμές  $P_{t2}$  και  $Ph_2$  με διάστικτες γραμμές. Η οριζόντια απόσταση μετά των διάστικτων γραμμών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταξύ των συνεχών γραμμών, υποδεικνύοντας μια αύξηση στο  $P_i$  (ενεργή πίεση).

Η αύξηση στο  $P_i$  οφείλεται στην μείωση της άνωσης των εδαφικών κόκκων στη ζώνη όπου υποβιβάζεται η στάθμη. Λαμβάνοντας υπόψιν το πάχος της ζώνης υποβιβασμού της στάθμης προκύπτει αύξηση του ολικού φορτίου ίσο με τη διαφορά μεταξύ των γραμμών  $P_t$  και  $Ph$  μετά την ταπείνωση της στάθμης.

Εφόσον το ανώτερο στρώμα περιέχει νερό σε συνεχή φάση και δεν υφίσταται υδροφόρος ορίζοντας πάνω από το αδιαπέρατο στρώμα ή αύξηση του  $P_i$  σε αυτό το στρώμα θα μειώνεται γραμμικά από την τιμή του υδροφορέα σε μηδενική τιμή στην κορυφή.

Ως εκ τούτου η εδαφική υποχώρηση είναι αποτέλεσμα της συμπίεσης των υπεδαφικών υλικών οφειλόμενο στην απώλεια της άνωσης στη ζώνη υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (Bouwer, 1977).





Εικόνα 31 Διάγραμμα απεικόνισης υποθετικής σχέσης μεταξύ λόγου κενών και ενδοκοκκώδους πίεσης για μέσης διαβάθμισης υλικό (πάνω πλευρά) και συσχέτιση μεταξύ ελαστικότητας και ενδοκοκκώδους πίεσης στην κάτω πλευρά (πηγή Bouwer, 1977)

Η σχέση μεταξύ της συμπίεσης  $S_u$  ενός εδαφικού σχηματισμού πάχους  $Z_1$  της μείωσης των λόγων κενών από  $e_1$  σε  $e_2$  σε συνδυασμό με την αύξηση της ενεργούς τάσης από  $P_{i1}$  σε  $P_{i2}$  μπορεί να προκύψει ως (Bouwer, 1977):

$$S_u = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + 1} z_1 \quad (2)$$

Για τον υπολογισμό της εδαφικής υποχώρησης η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε διάφορες μορφές στις οποίες το  $P_i$  αυξάνεται. Το αποτέλεσμα των τιμών του  $S_u$  αθροίζεται για να εκτιμηθεί η συνολική συμπίεση η οποία είναι η εδαφική υποχώρηση. Η τιμή του  $S_u$  που αντιστοιχεί σε αύξηση  $P_i$  μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους: με την ελαστική ή τη λογαριθμική θεωρία (Bouwer, 1977).

Σύμφωνα με την ελαστική θεωρία ο λόγος της αύξησης της τάσης ( $P_{i2} - P_{i1}$ ) προς την παραμόρφωση / συμπύκνωση ανά μονάδα πάχους  $S_u / Z_1$ , θεωρείται σταθερή και ίση με τον συντελεστή ελαστικότητας  $E$  (Bouwer, 1977).



Στη σχέση (Bouwer, 1977):

$$\frac{P_{i2}-P_{i1}}{S_u/Z_1} = E \quad (3)$$

Επιλύοντας την για  $S_u$  προκύπτει (Bouwer, 1977):

$$S_u = \frac{(P_{i2}-P_{i1})Z_1}{E} \quad (4)$$

Δηλαδή το  $S_u$  υπολογίζεται από την αύξηση του  $P_i$  σε ένα στρώμα με πάχος  $Z_1$  και μέτρο ελαστικότητας  $E$  (Bouwer, 1977).

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα της (Εικόνα 31). χρησιμοποιώντας τις καμπύλες του  $e$  σε σχέση με το  $P_i$ . Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2) και (3) (Bouwer, 1977):

$$E = \frac{e_1+1}{\frac{e_1-e_2}{P_{i2}-P_{i1}}} \quad (5)$$

Το οποίο μπορεί επίσης να γραφεί ως (Bouwer, 1977):

$$E = \frac{e+1}{\frac{de}{dP_i}} \quad (6)$$

όπου  $de/dP_i$  είναι η κλίση της καμπύλης του  $e$  ως προς το  $P_i$ .

Οι κλίσεις αυτές μπορούν να προσδιοριστούν και γραφικά από πειραματικές καμπύλες. Για τα πραγματικά ελαστικά υλικά το  $E$  είναι σταθερό. Για εδάφη και υλικά υδροφορέων το  $E$  τείνει να αυξάνει ταυτόχρονα με την αύξηση του  $P_i$ . Αυτό αποτυπώνεται γραφικά με την καμπύλη του μέτρου ελαστικότητας στην (Εικόνα 31), το οποίο υπολογίζεται προσδιορίζοντας την κλίση της καμπύλης του λόγου κενών στο σχήμα για διάφορες τιμές του  $P_i$ , αγνοώντας την ανάκτηση της καμπύλης και το πρώτο τμήμα της επανασυμπίεσης δηλαδή λαμβάνοντας την κλίση μετά το σημείο B και ακολούθως υπολογίζοντας το  $E$  μέσω της σχέσης 6 (Bouwer, 1977).

Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας  $E$  με την αύξηση του  $P_i$  δείχνει πως το  $E$  για ένα ομοιογενές στρώμα θα αυξηθεί με την αύξηση του βάθους καθώς το  $P_i$  αυξάνεται με το βάθος. Για να υπολογιστεί το  $S_u$  για έναν τέτοιο σχηματισμό, το στρώμα διαιρείται σε αρκετές υποενότητες, κάθε μία από τις οποίες έχει τις δικές της τιμές  $P_i$  και  $E$ . Η συμπύκνωση της κάθε υποδιαίρεσης υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 6. Τα τελικά αποτελέσματα αθροίζονται για να δώσουν την τελική συμπύκνωση του σχηματισμού.

Μερικές φορές το αντίστροφο του  $E$  ονομάζεται δείκτης συμπιεστότητας, όταν χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς εδαφικής υποχώρησης (Bouwer, 1977).

Η εξάρτηση του  $E$  από το  $P_i$  αποφεύγεται με την λογαριθμική θεωρία του Terzaghi. Αυτή η θεωρία βασίζεται στο γεγονός ότι όταν το  $e$  σχεδιάζεται σε σχέση με το  $\log P_i$ , παράγεται μία σιγμοειδής καμπύλη με επίπεδα τμήματα στις κατώτατες και ανώτατες τιμές του  $P_i$ , και με ένα ευθύγραμμο τμήμα για τις τιμές μεσαίου μεγέθους του  $P_i$ . Η κλίση του γραμμικού τμήματος καλείται δείκτης συμπιεστότητας  $C_c$  και υπολογίζεται από τη σχέση (Bouwer, 1977):

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log P_{i2} - \log P_{i1}} \quad (7)$$

Λύνοντας αυτή την εξίσωση για  $e_1 - e_2$  και αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα στην εξίσωση (2) προκύπτει (Bouwer, 1977):

$$S_u = z_1 \frac{C_c}{e_1 + 1} \log \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \quad (8)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο για το εύρος τιμών του  $P_i$  όπου το  $e$  έχει γραμμική σχέση με το  $\log P_i$ . Οι τιμές του  $e_1$  συνήθως κυμαίνονται μεταξύ του 0.7 και του 1.3. Επομένως το  $e_1 + 1$  κυμαίνεται από το 1.7 έως το 2.3. Αυτή είναι μια διακύμανση περίπου το 15% από την μέση τιμή του 2. Εφόσον η αβεβαιότητα στο  $C_c$  πιθανότατα είναι μεγαλύτερη του 15% (ειδικά όταν εφαρμοστούν εργαστηριακά δεδομένα σε συνθήκες πεδίου) ο όρος  $C_c/(e_1 + 1)$  στη σχέση 8 μπορεί να ενωθεί σε μια ενιαία τιμή συντελεστή  $C_u$  (Colijn and Potma, 1944) με την εξίσωση να παίρνει τη μορφή (Bouwer, 1977):

$$S_u = Z_1 C_u \log \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \quad (9)$$

Όπου  $C_u = \frac{C_c}{e_1 + 1}$

Για να εφαρμοστεί η εξίσωση 4 ή η εξίσωση 9 θα πρέπει το  $E$  ή το  $C_u$  να είναι γνωστό. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν μέσα από εργαστηριακές δοκιμές, όπως προαναφέρθηκε ή να προσδιοριστούν από μετρήσεις εδαφικής υποχώρησης ή συμπίκνωσης εξαιτίας πτώσης της ελεύθερης στάθμης ή της πιεζομετρικής επιφάνειας (Bouwer, 1977).

	$E \text{ in kg/cm}^2$	$C_u$
Dense gravel and sand	2,000-10,000	0.005
Dense sand	500-2,000	0.01
Loose sand	100-200	0.05
Dense clay and silt	100-1,000	0.05
Medium clay and silt	50-100	0.1
Loose clay	10-50	0.3
Peat	1-5	0.2-0.8

Πίνακας 10 Τιμές μέτρων ελαστικότητας  $E$  και  $C_u$  για μη συμπυκνωμένα υλικά (πηγή Bouwer, 1978)

Τα δεδομένα του Πίνακας 10 δείχνουν ότι η συμπίεστικότητα κοκκωδών υλικών αυξάνει με την μείωση του μεγέθους των κόκκων. Ας σημειωθεί ότι το  $E$  του νερού είναι περίπου  $20.000 \text{ kg/cm}^2$ .

## 7.2. Υπολογισμοί

Για τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων σε ελεύθερο υδροφορέα σύμφωνα με τον Bouwer, πρέπει να σχεδιαστεί διάγραμμα που να αποτυπώνει την επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση σε έναν ελεύθερο υδροφορέα.

Δεδομένου ότι στο κεφάλαιο 6 ο υπολογισμός των εδαφικών υποχωρήσεων πραγματοποιήθηκε σε διάφορα επίπεδα πτώσης στάθμης του υδροφόρου καθώς και διάφορα μέτρα ελαστικότητας των σχηματισμών, στη παρούσα παράγραφο ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία.

Κατά συνέπεια υπολογίστηκαν οι ενδοκοκκώδεις πιέσεις για την αντίστοιχη πτώση στάθμης του υδροφόρου από το απόλυτο υψόμετρο  $+150 \text{ m}$  ανά  $4 \text{ m}$  έως το απόλυτο υψόμετρο  $+130 \text{ m}$ .

Στον Πίνακα 11 δίνονται οι επιμέρους εκτιμήσεις των ενδοκοκκωδών πιέσεων όπως αυτές προέκυψαν από τα παρακάτω διαγράμματα. Για τον υπολογισμό της εδαφικής υποχώρησης κατά Bouwer απαιτείται ο μέσος όρος της ενδοκοκκωδούς πίεσης μεταξύ 2 σχετικών τιμών τόσο για το  $P_{i1}$  όσο και για το  $P_{i2}$ .

Επιλέχθηκε λοιπόν κατά περίπτωση υποβιβασμού της στάθμης (4, 8, 12, 16, 20) μία πτώση στα αντίστοιχα σχετικά υψόμετρα (+150, +146, +142, +138, +134, +130) και μια αντίστοιχα στο απόλυτο υψόμετρο μηδέν (0).

Σημειώνεται ότι κατά Bouwer δεν πραγματοποιείται λεπτομερής αναφορά σε πιο βάθος ανάγεται η δεύτερη τιμή και αποδεικνύεται από τις πράξεις ότι επιλέγεται αυθαίρετα το βάθος. Κατ' επέκταση για την πληρότητα των υπολογισμών επιλέχθηκε το απόλυτο υψόμετρο μηδέν που αντιπροσωπεύει το πάχος του σχηματισμού των νεογενών βάσει τομής, επομένως αποδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια, συνδυάζοντάς το με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Plaxis.

Πτώση Στάθμης	Pi (kg/cm <sup>2</sup> )	Απόλυτο Υψόμετρο	Ενδοκοκκώδης πίεση στο αντίστοιχο απόλυτο υψόμετρο (kg/cm <sup>2</sup> )	Μέσος όρος (kg/cm <sup>2</sup> )
4m	Pi1	+150	9.3-0.0 = <b>9.3</b>	17.70
		0	40.8-14.7 = <b>26.1</b>	
	Pi2	+146	10.0-0 = <b>10.0</b>	18.25
		0	40.8-14.3 = <b>26.5</b>	
8m	Pi1	+150	9.3-0.0 = <b>9.3</b>	17.70
		0	40.8-14.7 = <b>26.1</b>	
	Pi2	+142	10.9-0 = <b>10.9</b>	18.90
		0	40.8-13.9 = <b>26.9</b>	
12m	Pi1	+150	9.3-0.0 = <b>9.3</b>	17.70
		0	40.8-14.7 = <b>26.1</b>	
	Pi2	+138	11.8-0 = <b>11.8</b>	19.55
		0	40.8-13.5 = <b>27.3</b>	
16m	Pi1	+150	9.3-0.0 = <b>9.3</b>	17.70
		0	40.8-14.7 = <b>26.1</b>	
	Pi2	+134	12.6-0 = <b>12.6</b>	20.15
		0	40.8-13.1 = <b>27.7</b>	
20m	Pi1	+150	9.3-0.0 = <b>9.3</b>	17.70
		0	40.8-14.7 = <b>26.1</b>	
	Pi2	+130	13.5-0 = <b>13.5</b>	20.80
		0	40.8-12.7 = <b>28.1</b>	

Πίνακας 11 Ενδοκοκκώδης πίεση σύμφωνα με την αντίστοιχη πτώση στάθμης

Επιπλέον για τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας όπως αυτές επιλύθηκαν και με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

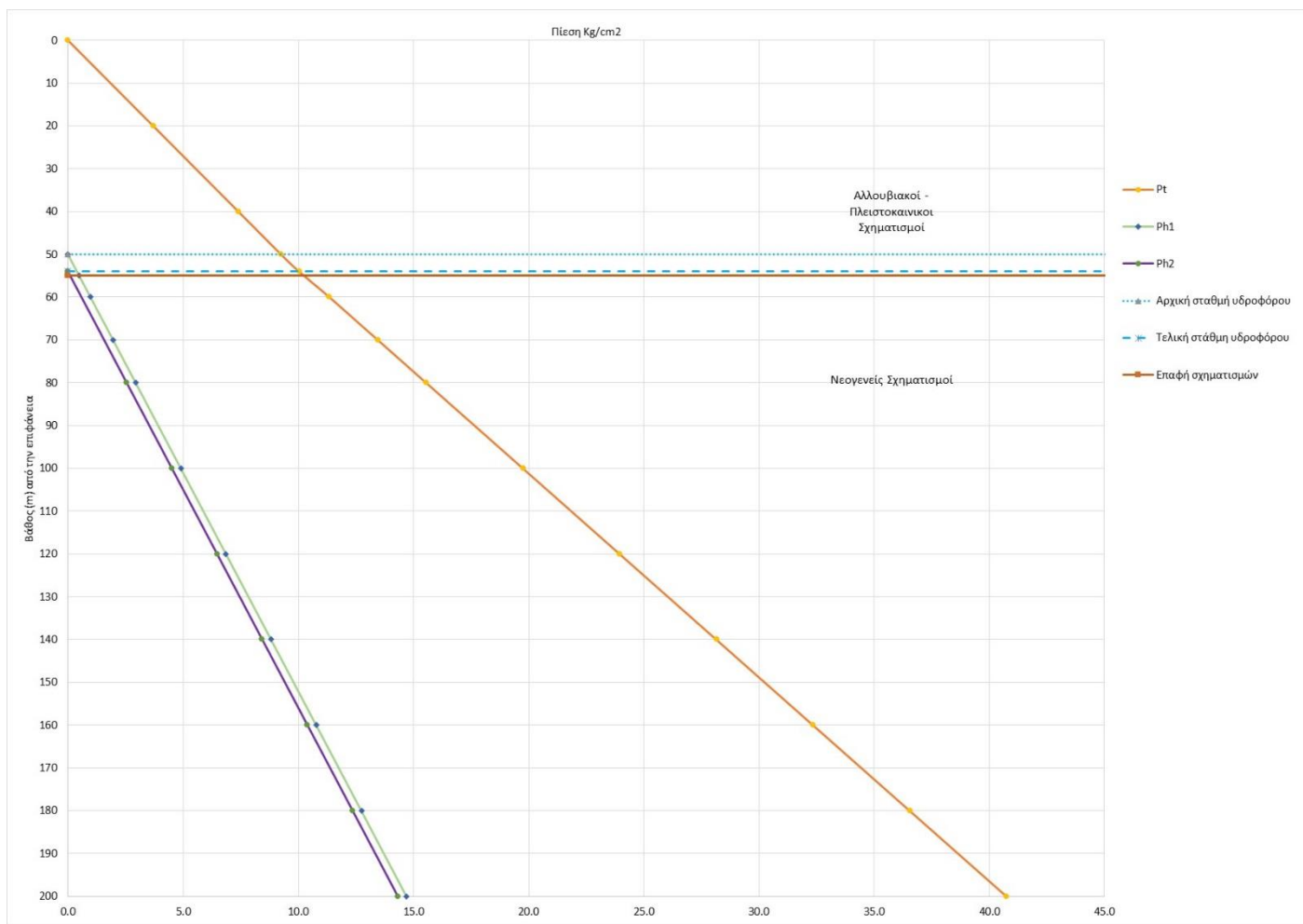
Σημειώνεται πως για τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση :

$$S_u = \frac{(P_{i2} - P_{i1})z_1}{E}$$

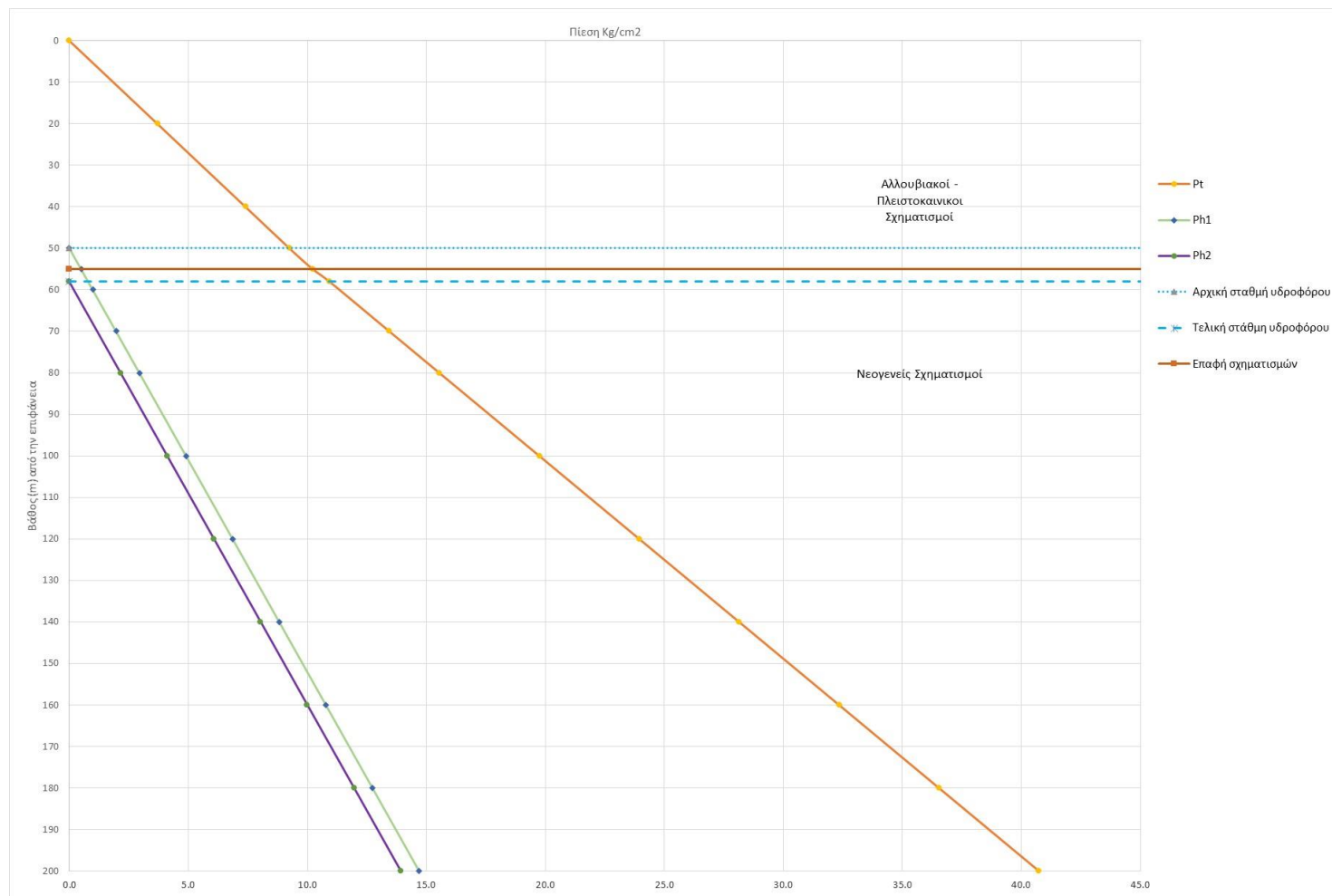
Ταπείνωση H (m)	Απόλυτο Υψόμετρο	Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί E(kN/m <sup>2</sup> )	Νεογενείς σχηματισμοί E (kN/m <sup>2</sup> )	Εδαφική Υποχώρηση Y (m)
4	+146	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.14
			15x10 <sup>4</sup>	0.11
			20x10 <sup>4</sup>	0.10
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.11
			15x10 <sup>4</sup>	0.08
			20x10 <sup>4</sup>	0.07
8	+142	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.30
			15x10 <sup>4</sup>	0.24
			20x10 <sup>4</sup>	0.21
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.24
			15x10 <sup>4</sup>	0.18
			20x10 <sup>4</sup>	0.15
12	+138	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.46
			15x10 <sup>4</sup>	0.37
			20x10 <sup>4</sup>	0.33
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.36
			15x10 <sup>4</sup>	0.28
			20x10 <sup>4</sup>	0.23
16	+134	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.61
			15x10 <sup>4</sup>	0.50
			20x10 <sup>4</sup>	0.44
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.48
			15x10 <sup>4</sup>	0.36
			20x10 <sup>4</sup>	0.31

Ταπείνωση H (m)	Απόλυτο Υψόμετρο	Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί E(kN/m <sup>2</sup> )	Νεογενείς σχηματισμοί E (kN/m <sup>2</sup> )	Εδαφική Υποχώρηση Y (m)
20	+130	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.78
			15x10 <sup>4</sup>	0.63
			20x10 <sup>4</sup>	0.55
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.61
			15x10 <sup>4</sup>	0.46
			20x10 <sup>4</sup>	0.39

Πίνακας 12 Υπολογισμός εδαφικών υποχωρήσεων

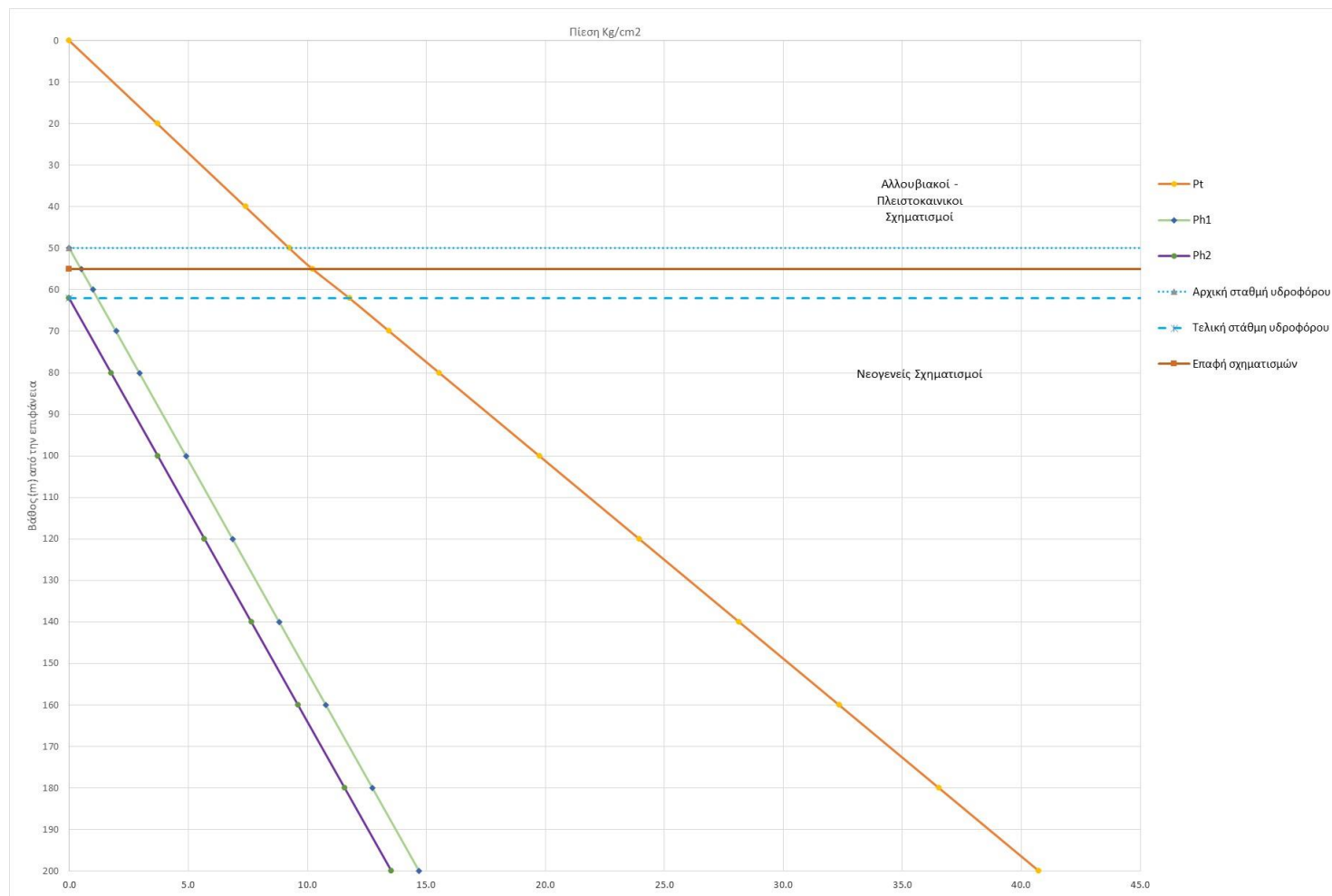


Εικόνα 32 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση

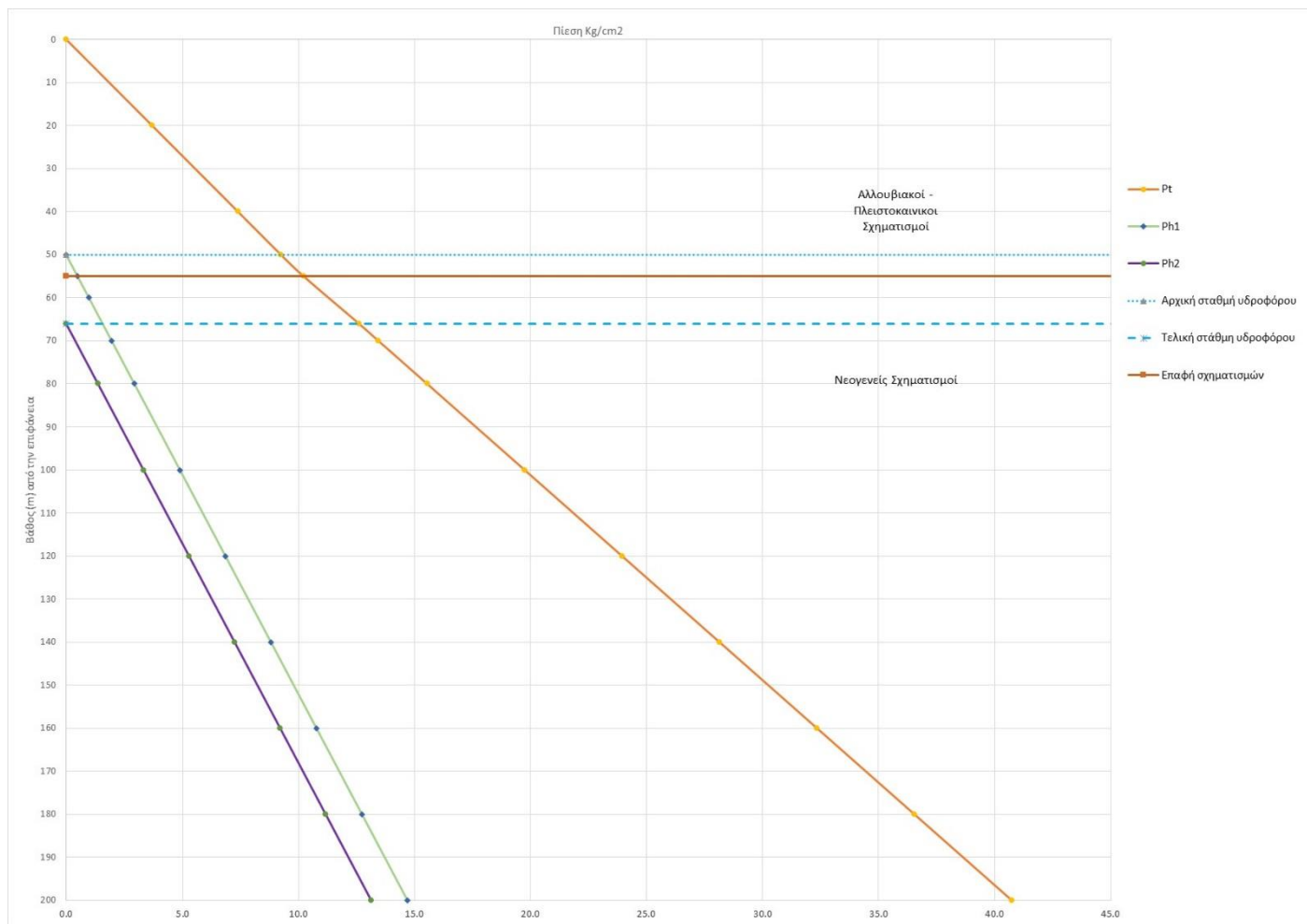


Εικόνα 33 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 8m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση

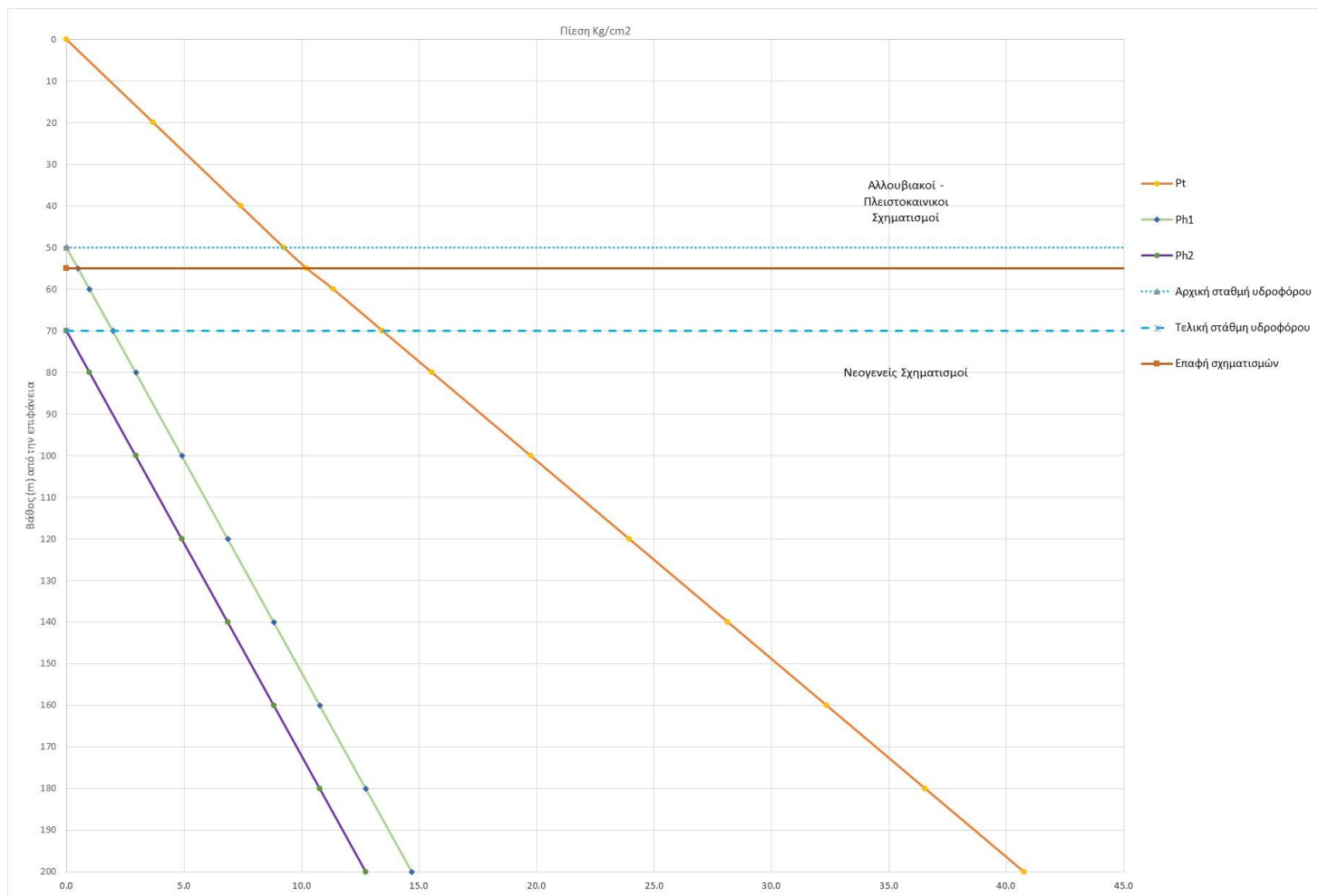




Εικόνα 34 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 12m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση



Εικόνα 35 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 16m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση



Εικόνα 36 Η επίδραση της πτώσης της ανώτερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20m στη συνολική, υδραυλική και ενδοκοκκώδη πίεση

Επιπλέον για τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας ανάλογες με αυτές που επιλύθηκαν με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σημειώνεται πως για τον υπολογισμό των εδαφικών υποχωρήσεων χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση :

$$S_u = \frac{(P_{i2} - P_{i1})z_1}{E}$$

Ταπείνωση στάθμης Η (m)	Απόλυτο Υψόμετρο στάθμης	Αλλουβιακοί – Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί E(kN/m <sup>2</sup> )	Νεογενείς σχηματισμοί E (kN/m <sup>2</sup> )	Εδαφική Υποχώρηση Υ υπολογισμένη με το λογισμικό Plaxis (m)	Εδαφική Υποχώρηση κατά Bouwer Υ (m)	ΔΙΑΦΟΡΑ Απόλυτη (m)	ΔΙΑΦΟΡΑ %
4	+146	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.23	0.14	0.09	39.1
			15x10 <sup>4</sup>	0.20	0.11	0.09	45.0
			20x10 <sup>4</sup>	0.19	0.10	0.09	47.4
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.17	0.11	0.06	35.3
			15x10 <sup>4</sup>	0.13	0.08	0.05	38.5
			20x10 <sup>4</sup>	0.11	0.07	0.04	36.4
8	+142	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.41	0.30	0.11	26.8
			15x10 <sup>4</sup>	0.36	0.24	0.12	33.3
			20x10 <sup>4</sup>	0.34	0.21	0.13	38.2
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.29	0.24	0.05	17.2
			15x10 <sup>4</sup>	0.23	0.18	0.05	21.7
			20x10 <sup>4</sup>	0.21	0.15	0.06	28.6
12	+138	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.62	0.46	0.16	25.8
			15x10 <sup>4</sup>	0.53	0.37	0.16	30.2
			20x10 <sup>4</sup>	0.45	0.33	0.12	26.7
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.42	0.36	0.06	14.3
			15x10 <sup>4</sup>	0.34	0.28	0.06	17.6
			20x10 <sup>4</sup>	0.30	0.23	0.07	23.3
16	+134	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.69	0.61	0.08	11.6
			15x10 <sup>4</sup>	0.58	0.50	0.08	13.8
			20x10 <sup>4</sup>	0.53	0.44	0.09	17.0
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.54	0.48	0.06	11.1
			15x10 <sup>4</sup>	0.41	0.36	0.05	12.2
			20x10 <sup>4</sup>	0.35	0.31	0.04	11.4
20	+130	5x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.90	0.78	0.12	13.3
			15x10 <sup>4</sup>	0.72	0.63	0.09	12.5
			20x10 <sup>4</sup>	0.66	0.55	0.11	16.7
		10x10 <sup>4</sup>	10x10 <sup>4</sup>	0.67	0.61	0.06	9.0
			15x10 <sup>4</sup>	0.50	0.46	0.04	8.0
			20x10 <sup>4</sup>	0.43	0.39	0.04	9.3

Πίνακας 13 Σύγκριση εδαφικής υποχώρησης βάσει πεπερασμένων στοιχείων και εξίσωσης Bouwer

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εδαφικής υποχώρησης από την εξίσωση του Bouwer με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τιμές έχουν διαφορά μερικών εκατοστών όπως φαίνεται στον παραπάνω συγκριτικό Πίνακα 14.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάγκη άρδευσης των αγροτικών εκτάσεων, η απουσία περιβαλλοντικής συνείδησης, σχεδιασμού και ελέγχων, προκάλεσε την ανόρυξη πολυάριθμων γεωτρήσεων, την υπέρμετρη άντληση του υπόγειου νερού και ως εκ τούτου την ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων λόγω της ανακατανομής των γεωστατικών τάσεων.

Για την εκτίμηση του μηχανισμού εκδήλωσης των εδαφικών υποχωρήσεων λόγω υπεράντλησης υδροφόρων έγιναν παραμετρικές αναλύσεις με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis V8 καθώς επίσης σύμφωνα με την προσέγγιση κατά Bouwer (1977). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εδαφικές υποχωρήσεις από άλλες τεχνικές έρευνας για να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της κατάστασης.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν βασίστηκαν σε ένα μοντέλο, με τους ανώτερους Αλλουβιακούς – Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς μέσου πάχους περί τα 55m και τους κατώτερους νεογενείς σχηματισμούς μέσου πάχους 145m. Για τις αναλύσεις παραμετροποιήθηκαν τόσο η στάθμη του υδροφόρου όσο και το μέτρο ελαστικότητας των σχηματισμών.

Η ταπείνωση της στάθμης θεωρήθηκε από τα + 150 m μέχρι τα +130 m. Γίνεται σαφές ότι οι εδαφικές υποχωρήσεις στην περιοχή μελέτης είναι άμεσα εξαρτώμενες τόσο από την πτώση της στάθμης του υδροφόρου όσο και από το μέτρο ελαστικότητας των σχηματισμών. Παρατηρούμε επίσης ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους αναλυτικούς υπολογισμούς βάσει των εξισώσεων του Bouwer είναι ελάχιστα πιο συντηρητικά από εκείνα των πεπερασμένων στοιχείων.

Για την αντιμετώπιση είναι επιτακτική η ανάγκη ενεργειών σε επιστημονικό, θεσμικό, τεχνολογικό, οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο με άξονα την ανάπτυξη της περιοχής.

Όσο βρίσκεται ακόμη σε διαχειρίσιμο επίπεδο το φαινόμενο, προτείνονται:

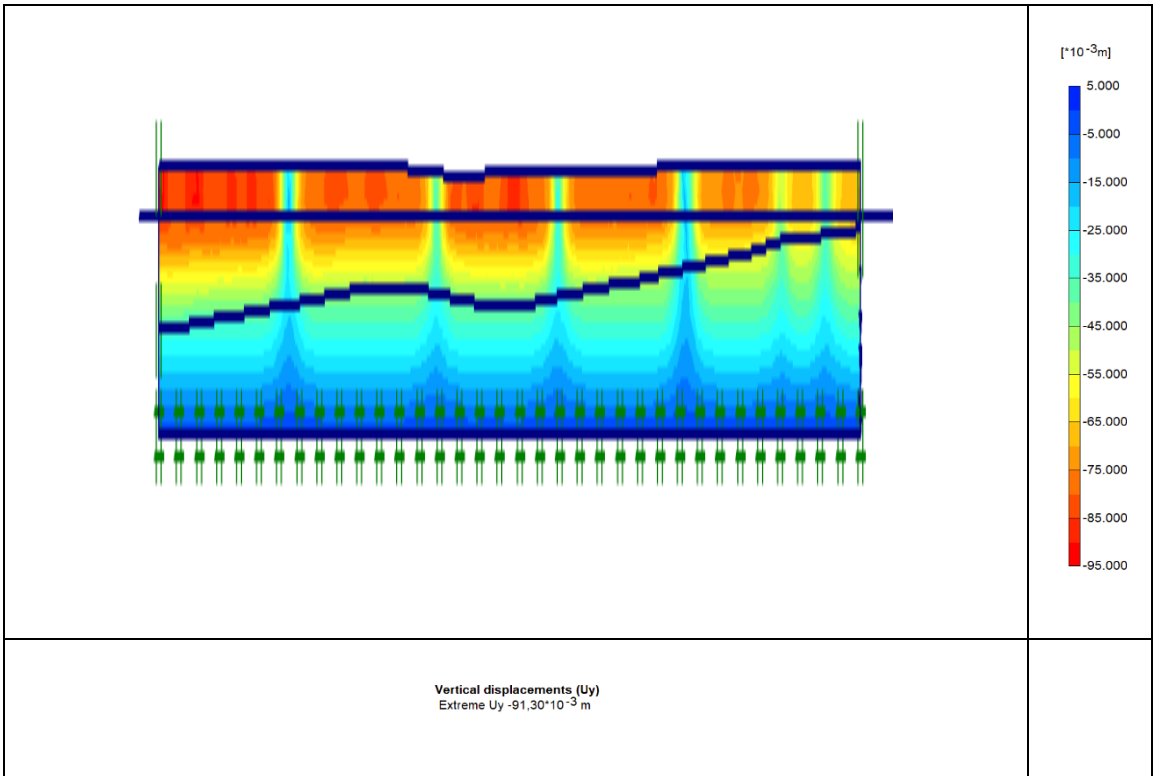
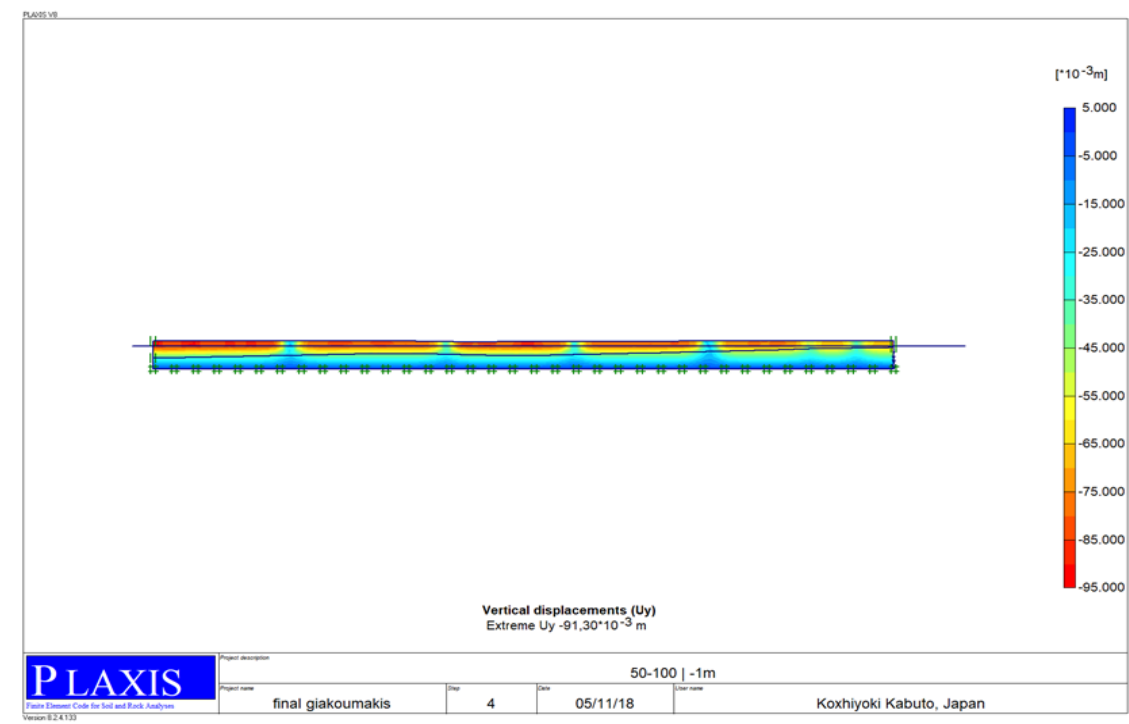
- Γεωτεχνική μελέτη της συμπεριφοράς των σχηματισμών της λεκάνης και ανάλυση δειγμάτων ώστε να αποτυπωθούν ακριβείς πληροφορίες αναφορικά με τις γεωτεχνικές παραμέτρους των σχηματισμών.

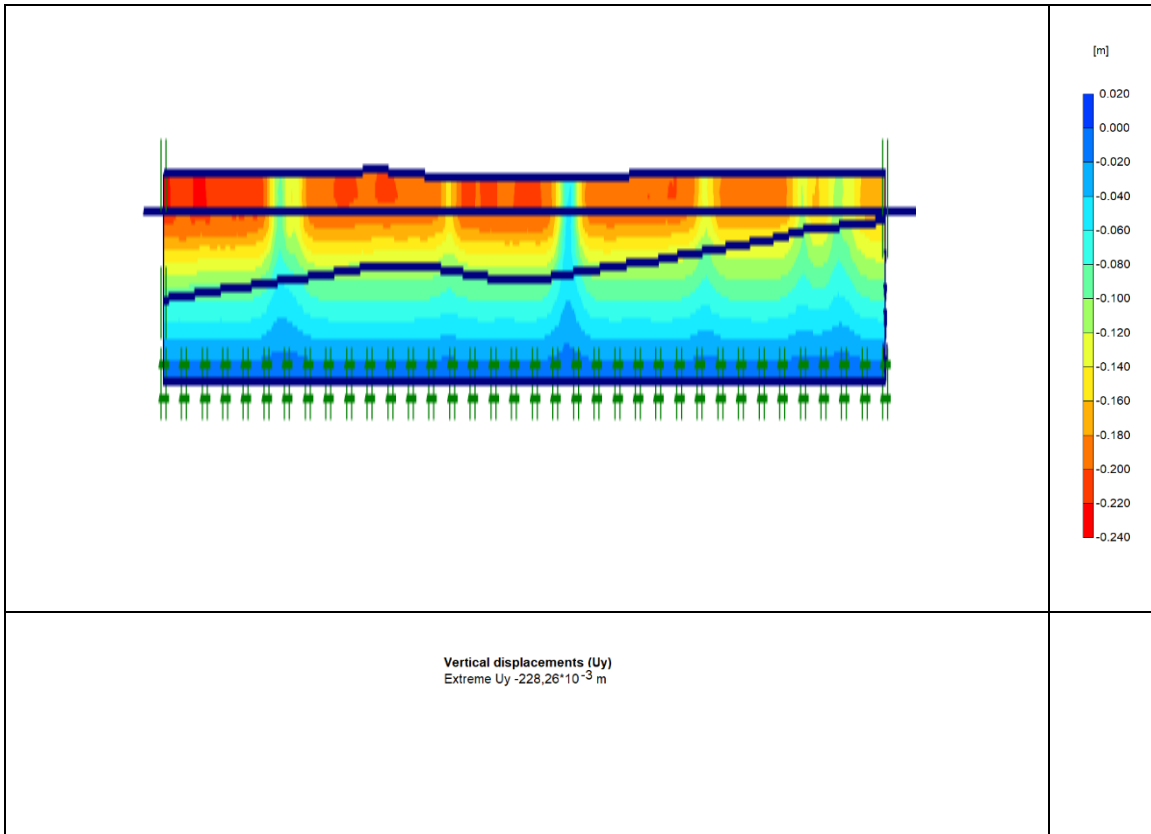
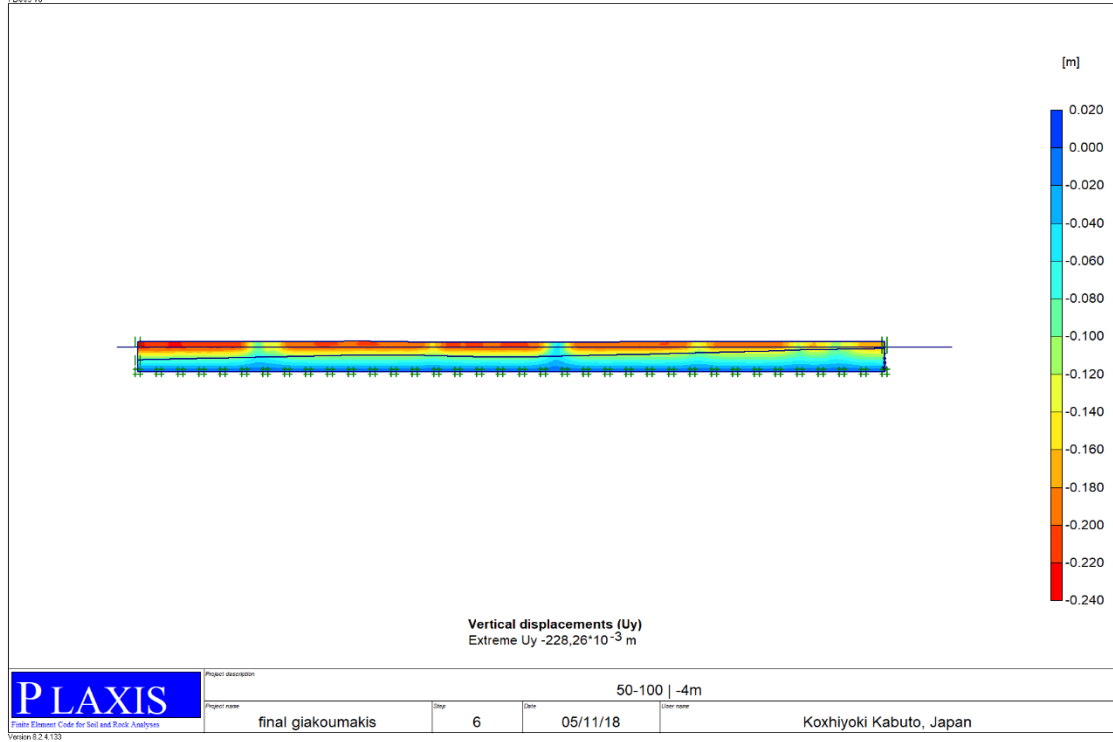
- Υδρογεωλογική μελέτη της περιοχής για τον ακριβή προσδιορισμό της πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με:
  - λεπτομερή απογραφή γεωτρήσεων,
  - καταγραφή στάθμης και
  - παραγωγή ισοπιεζομετρικών χαρτών.
- Έλεγχο και λεπτομερή αποτύπωση εδαφικών υποχωρήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Συχνούς ελέγχους αποτυπώνοντας ενδεχόμενες ρωγματώσεις σε κατασκευές αλλά και πιθανές εδαφικές μετακινήσεις.
- Τέλος, σύνταξη μελέτης για τις επιτρεπόμενες ποσότητες άντλησης ανά γεώτρηση.

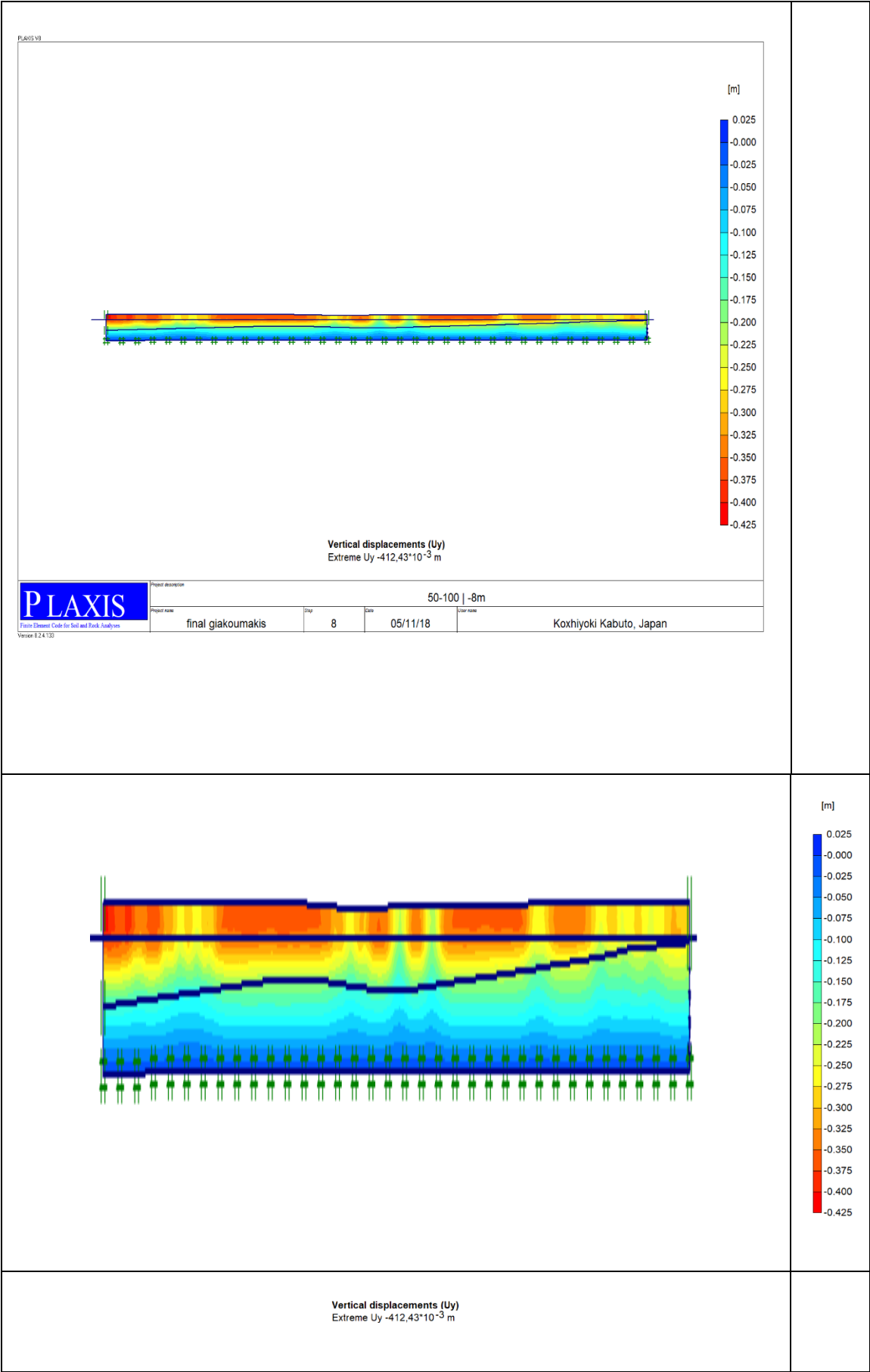


## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

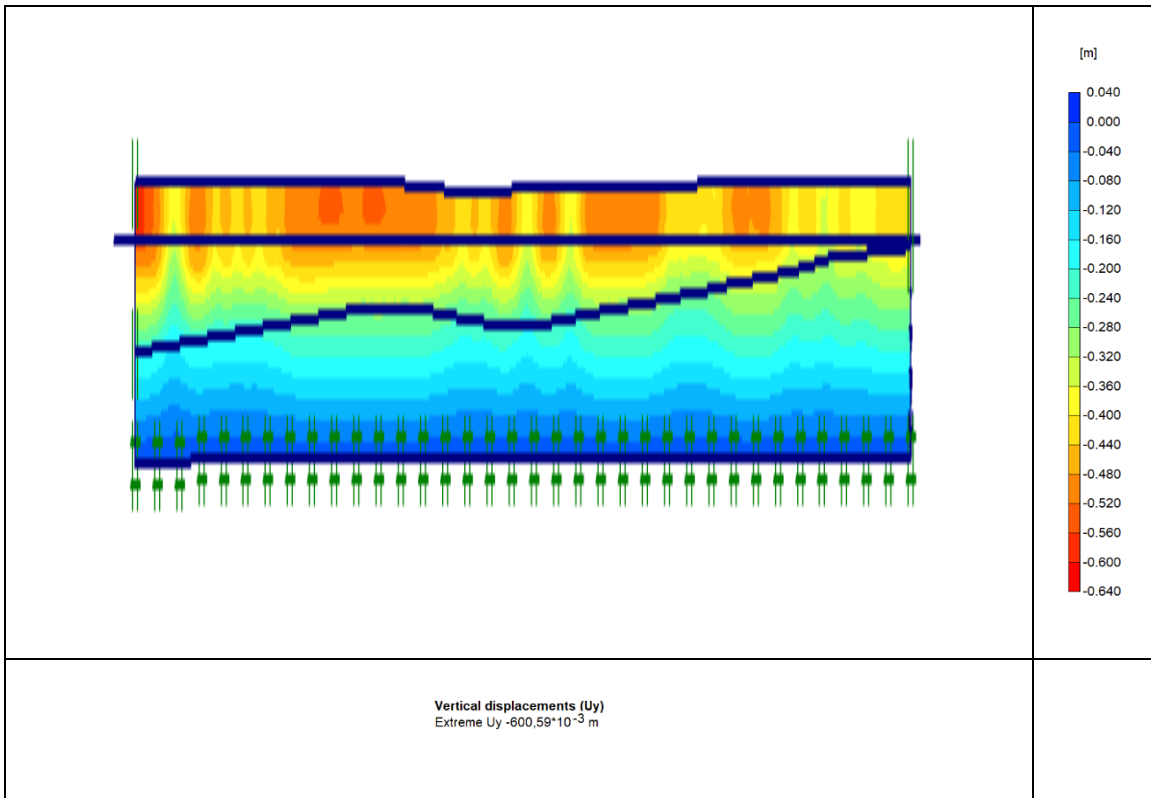
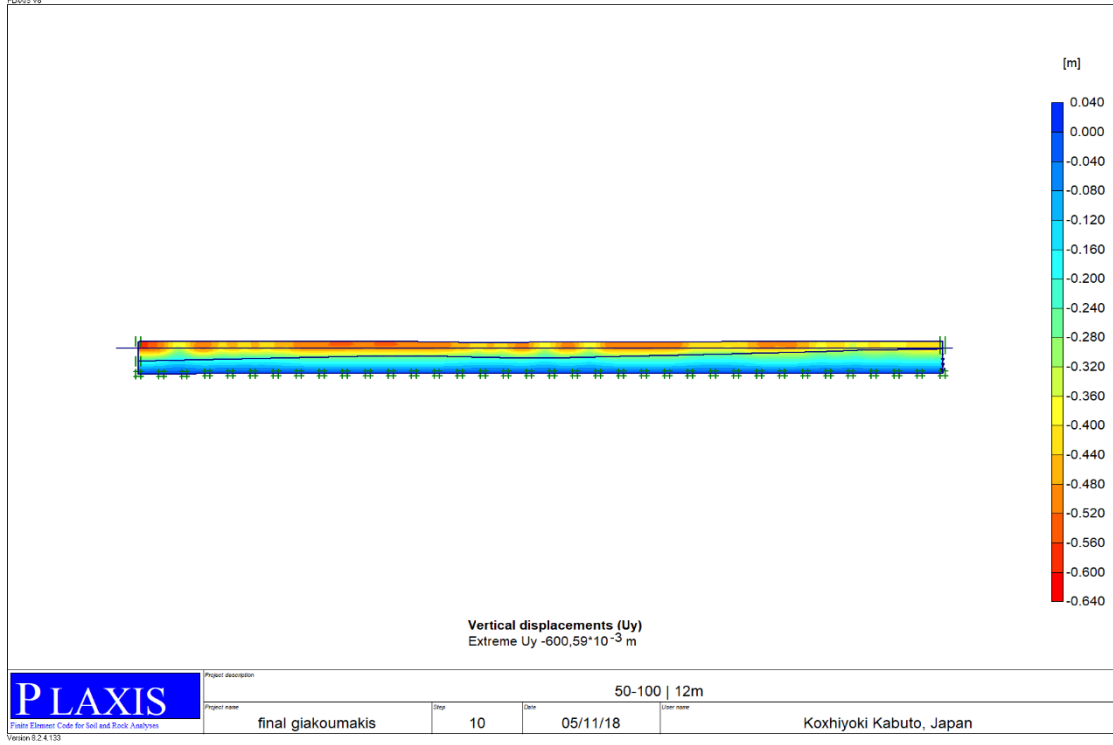
Παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων όπως αυτά προέκυψαν από τις αναλύσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία.

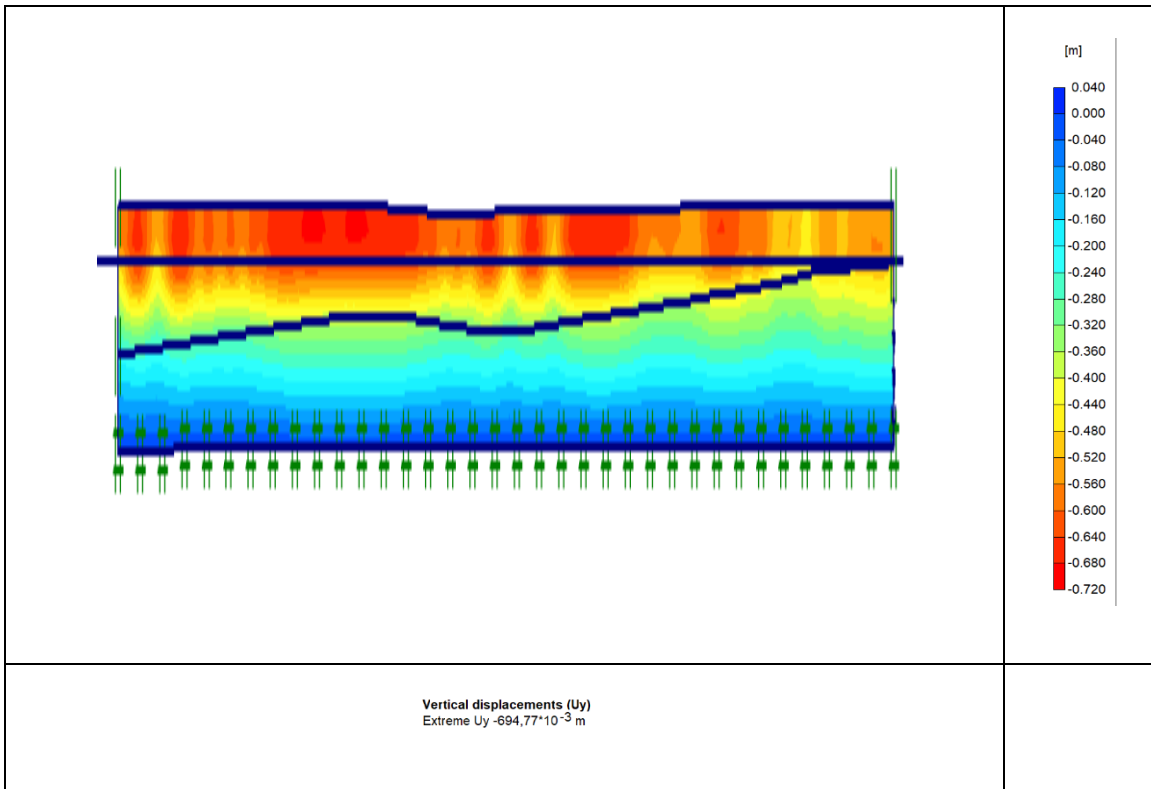
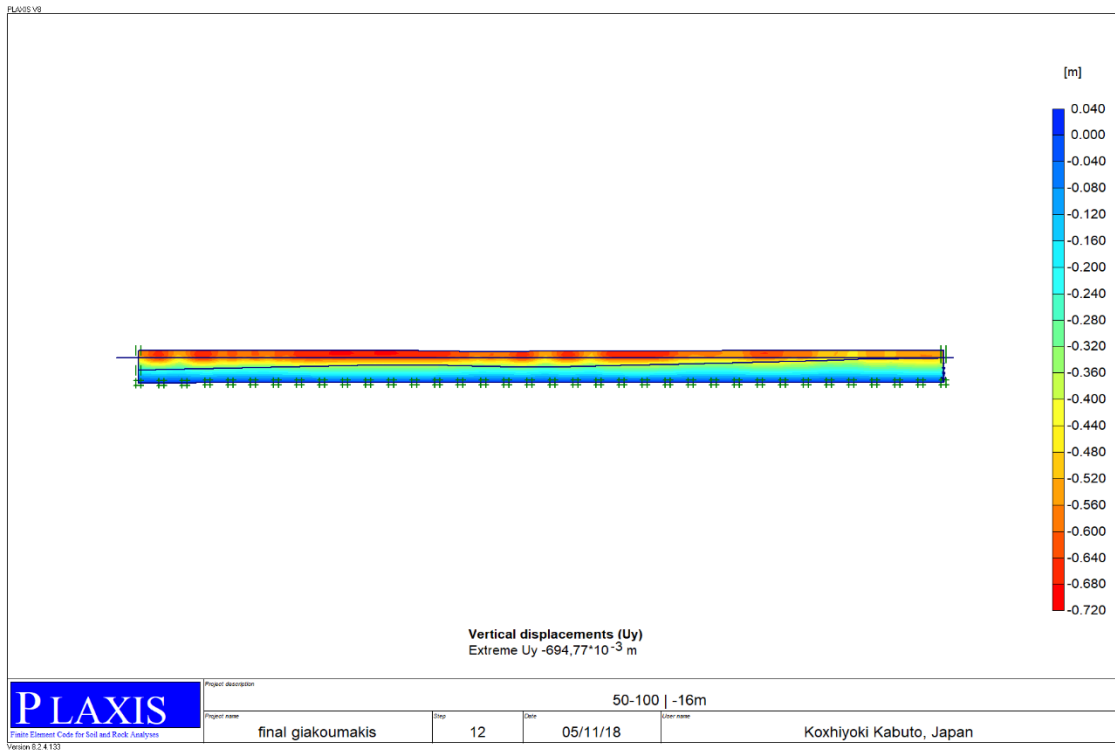


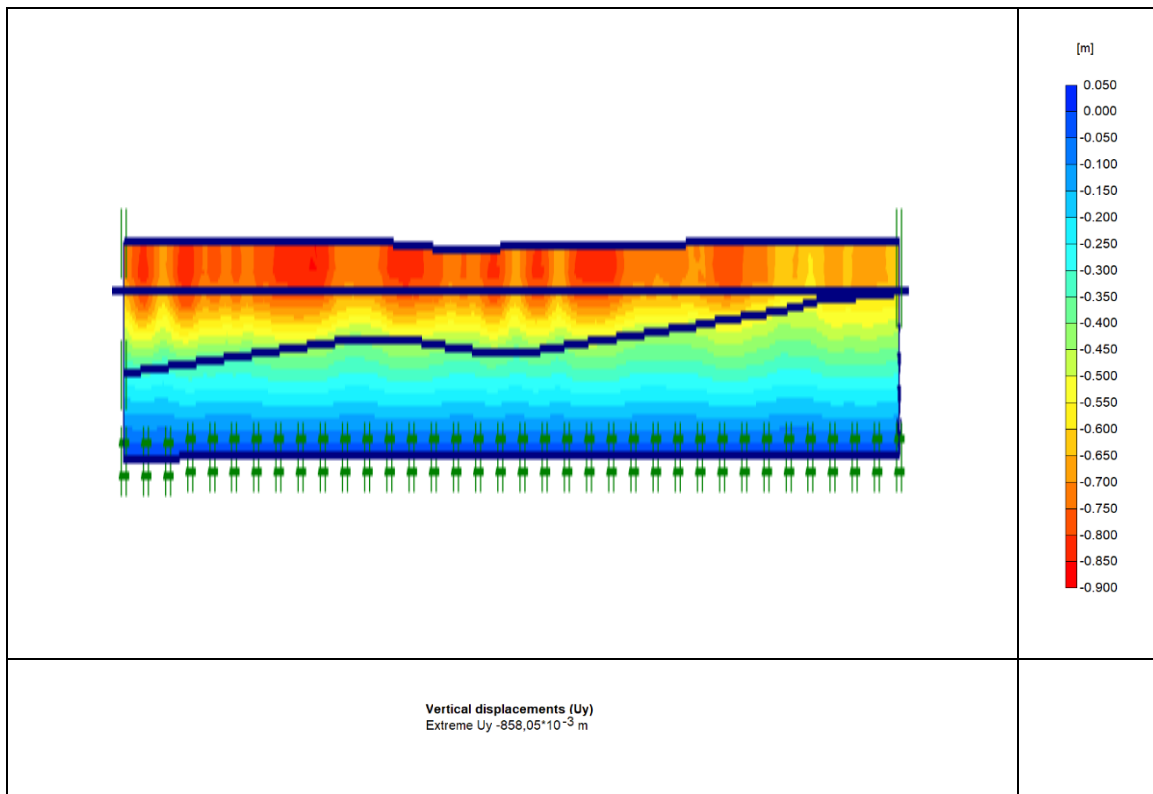
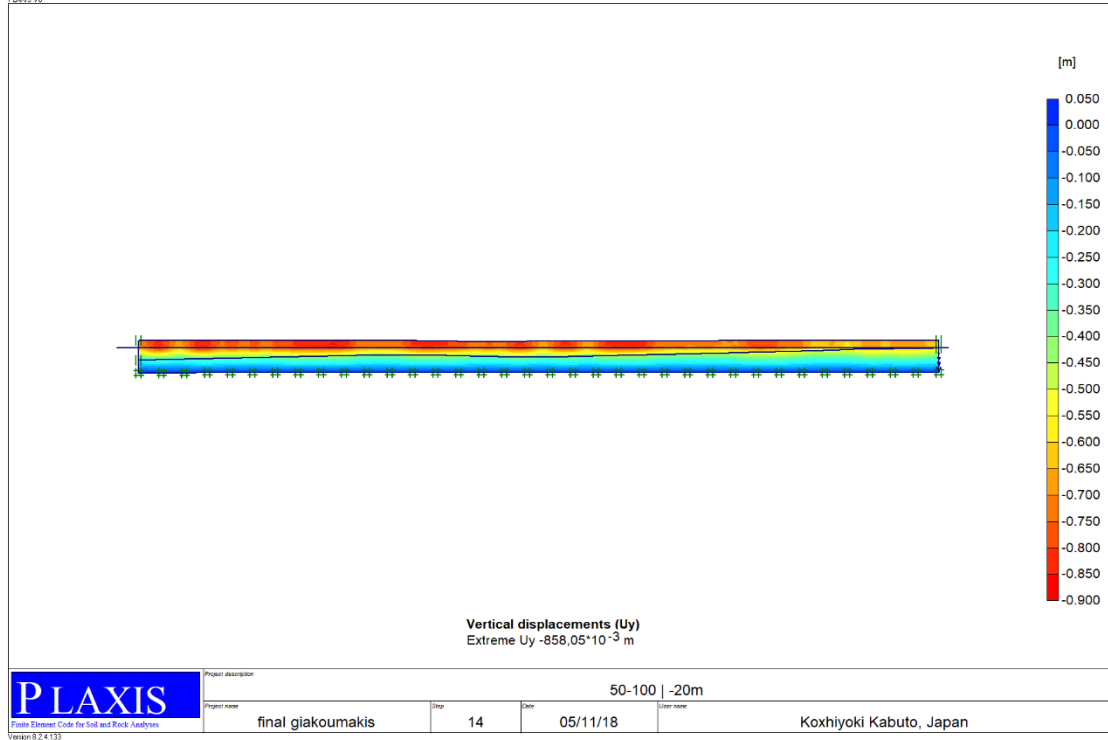


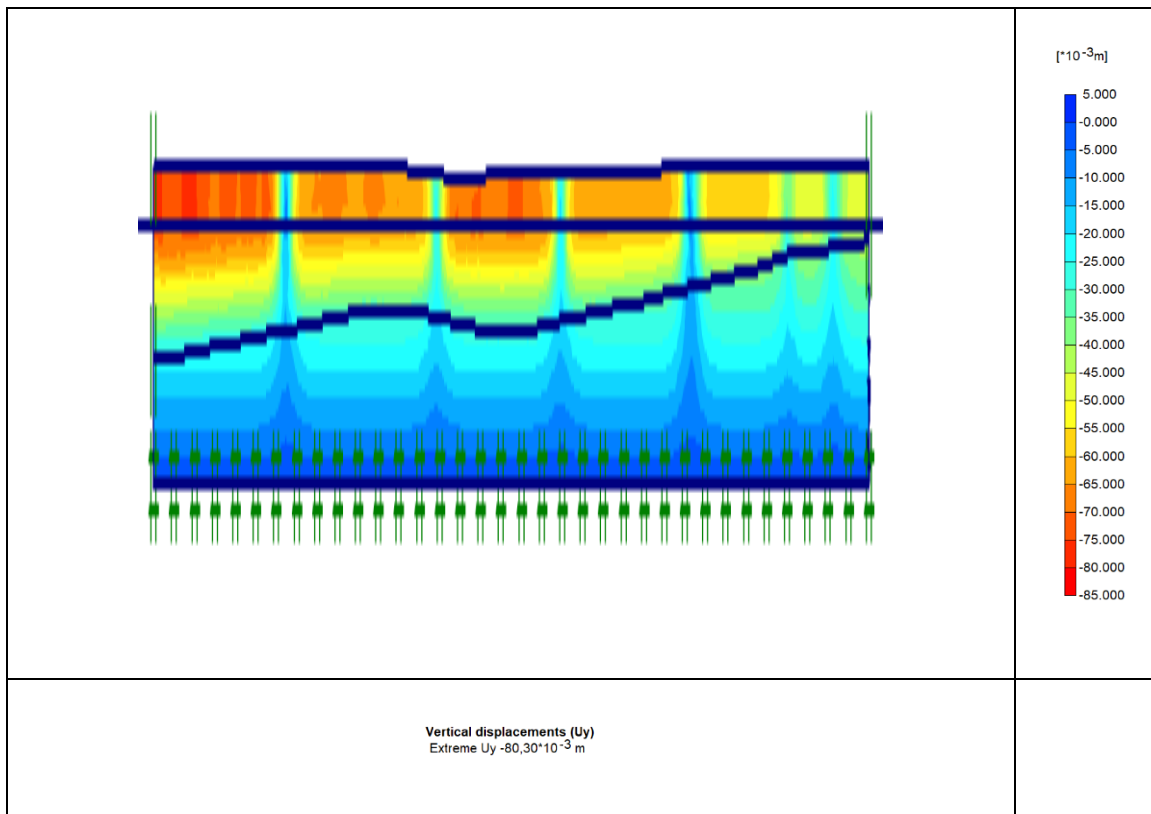
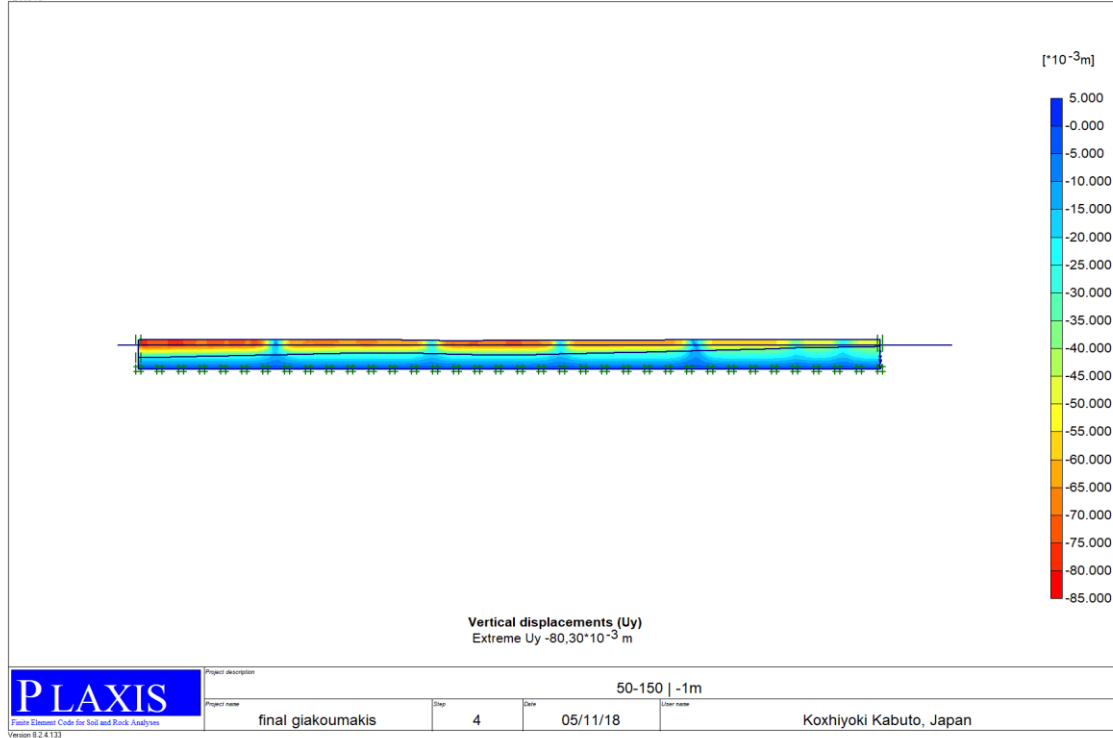


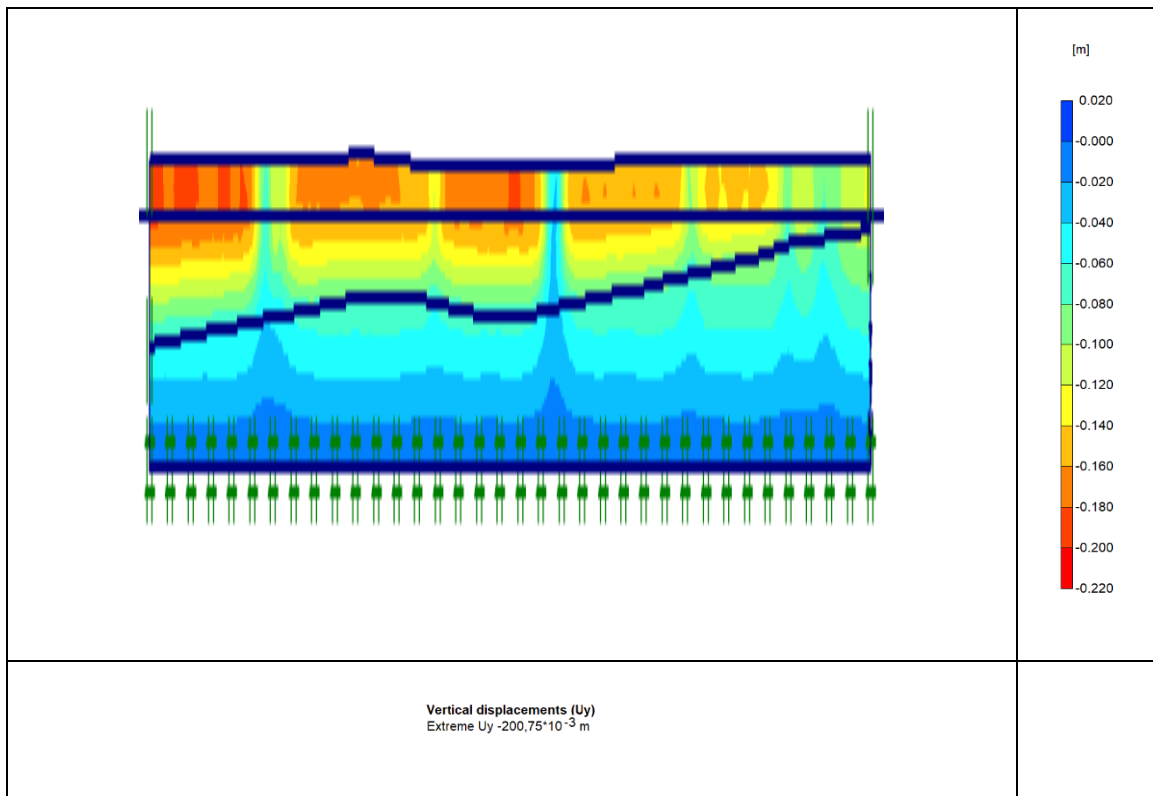
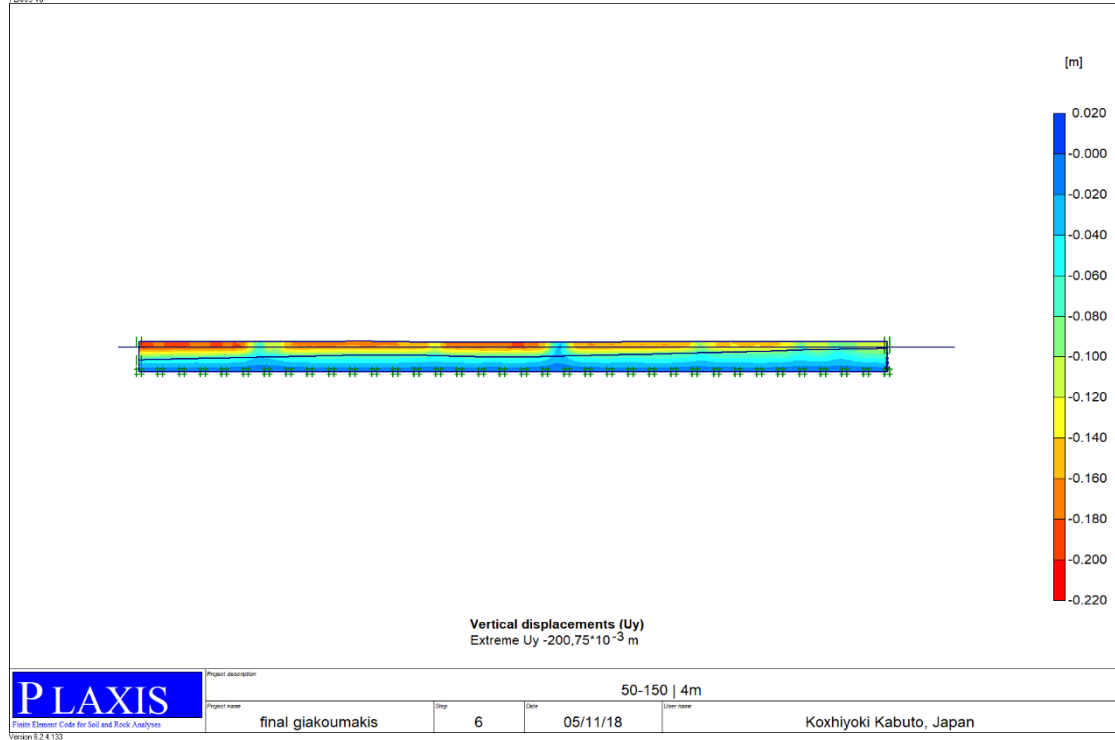
PLAXIS V8



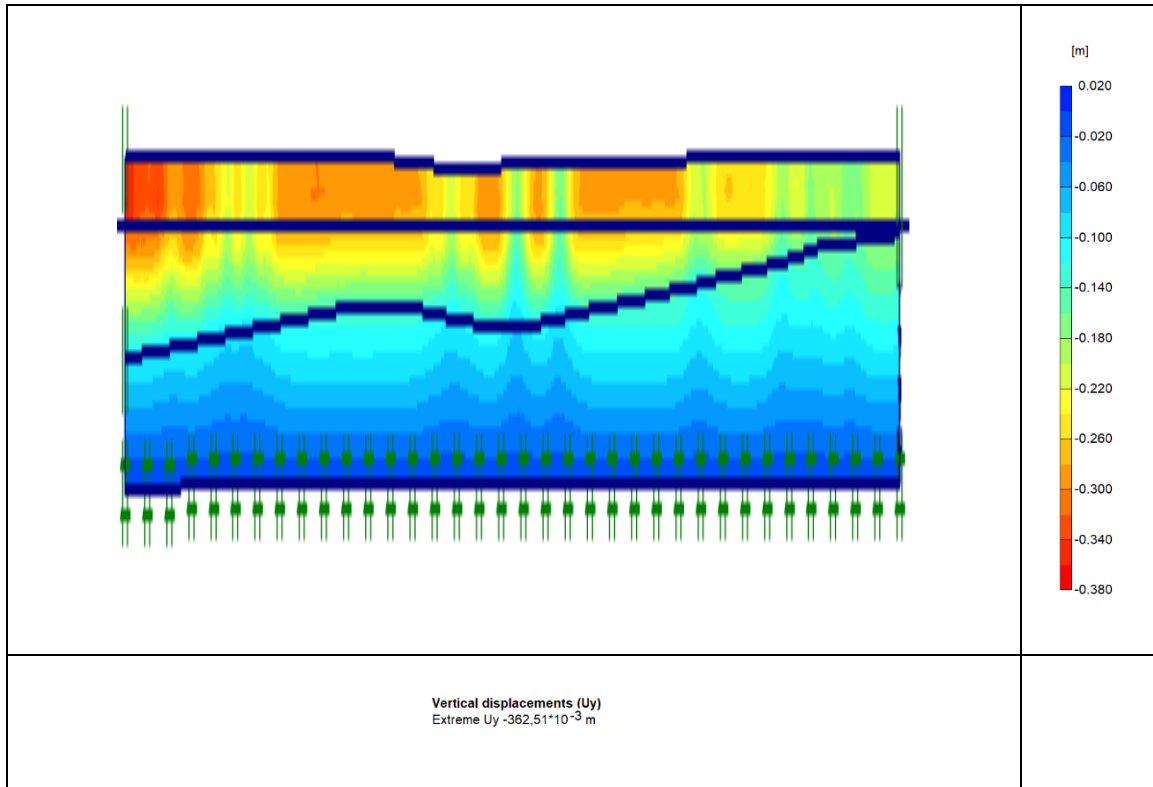
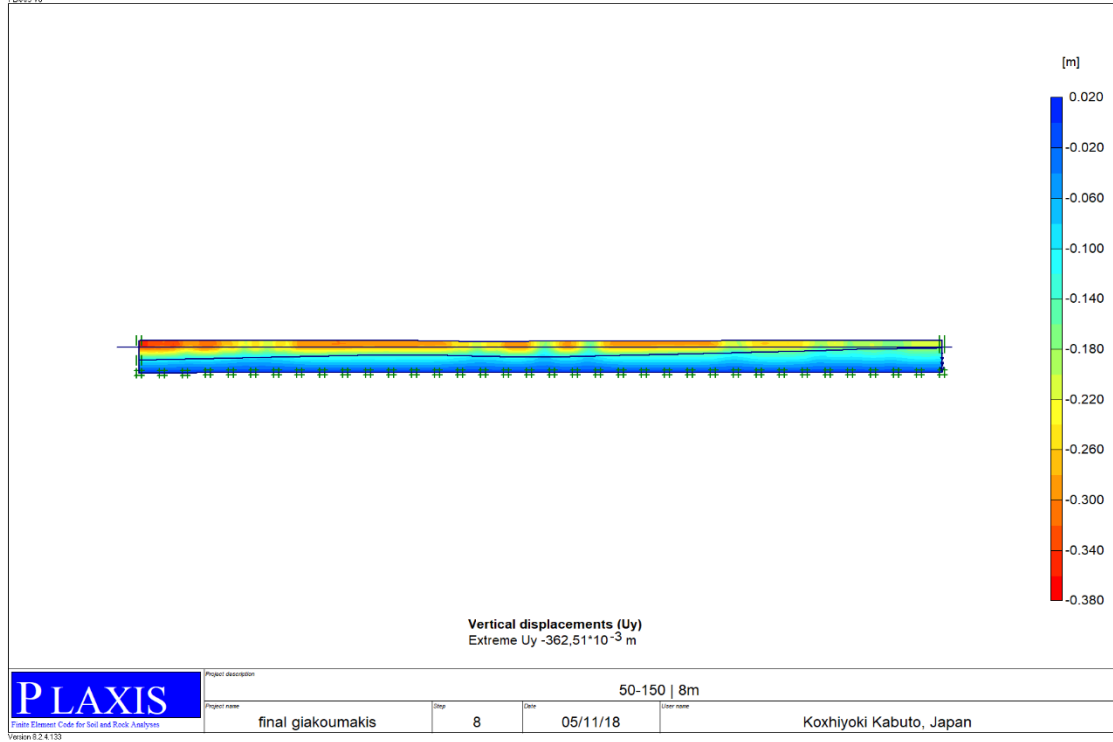


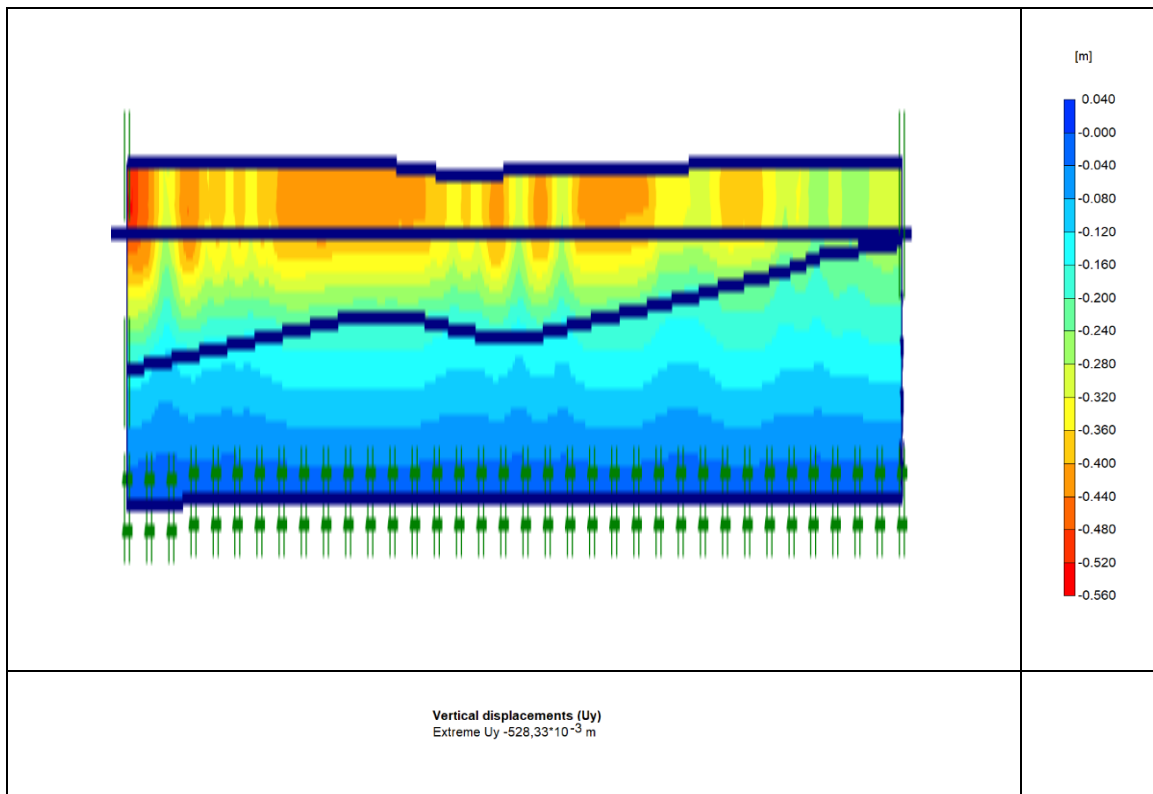
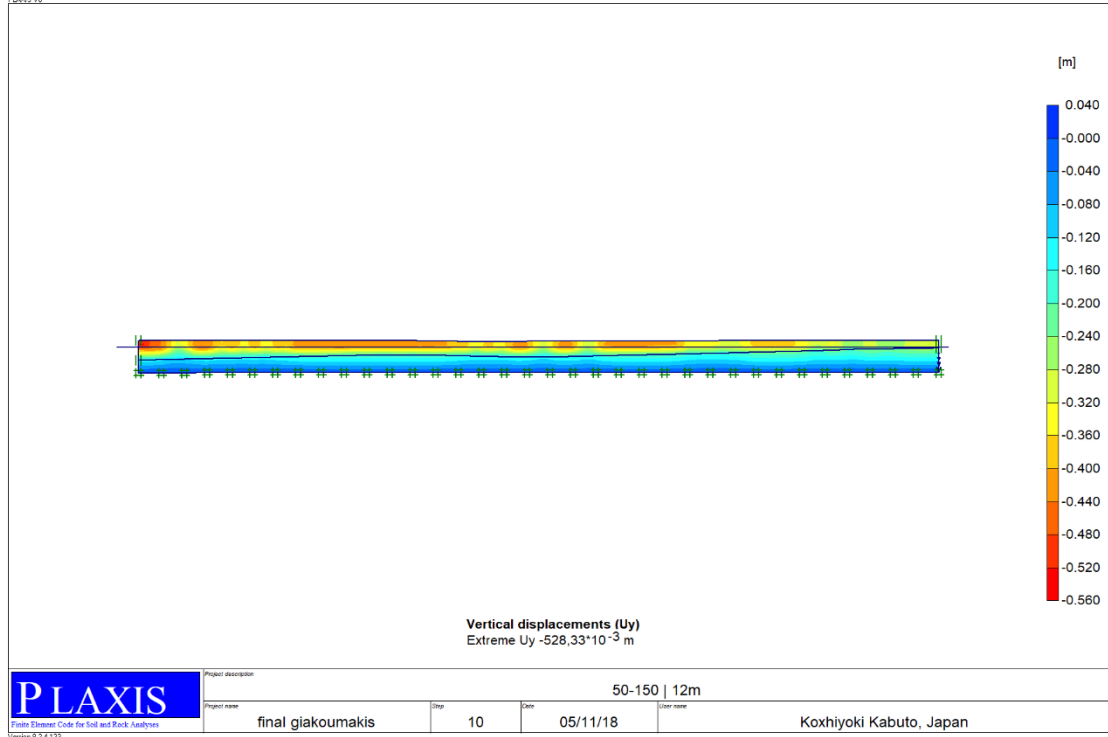


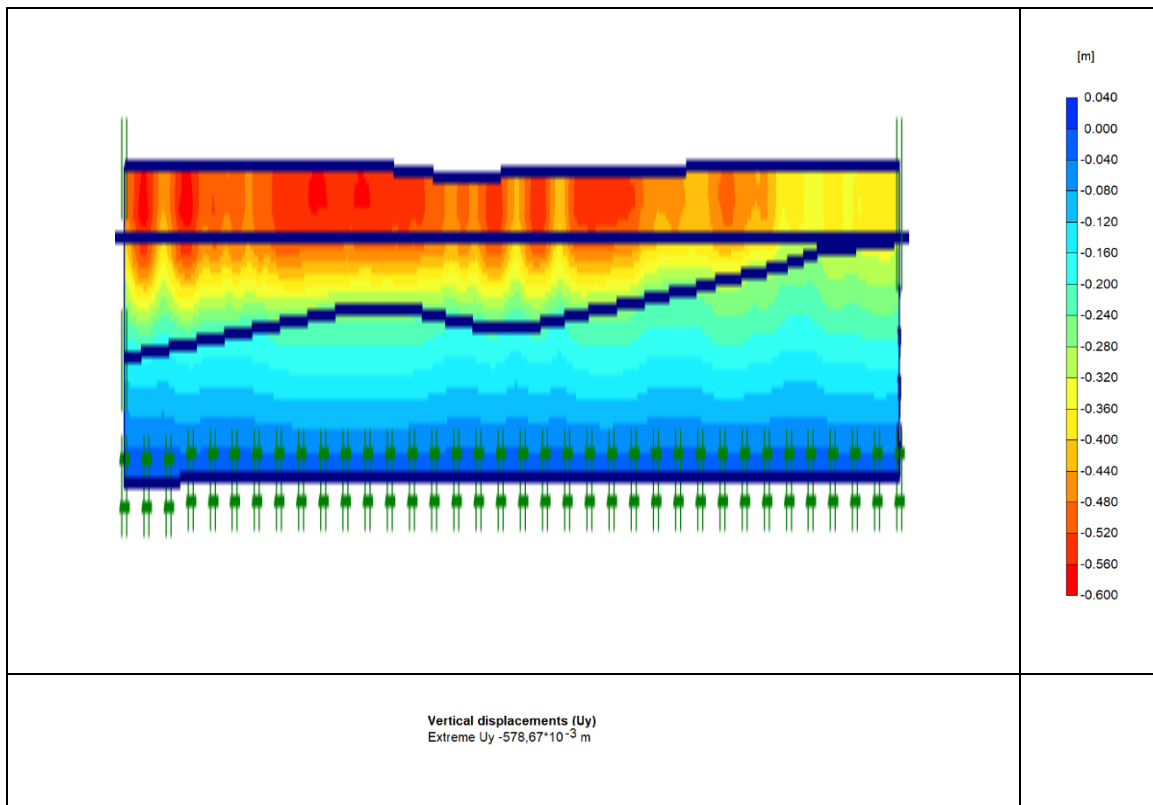
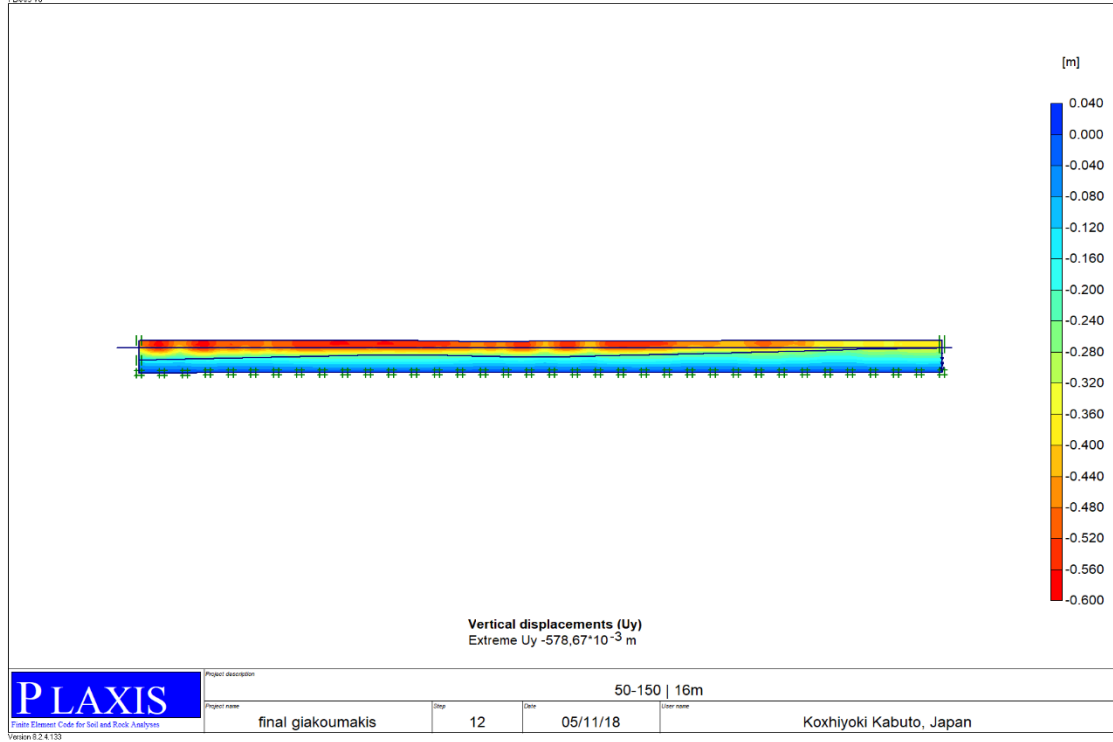


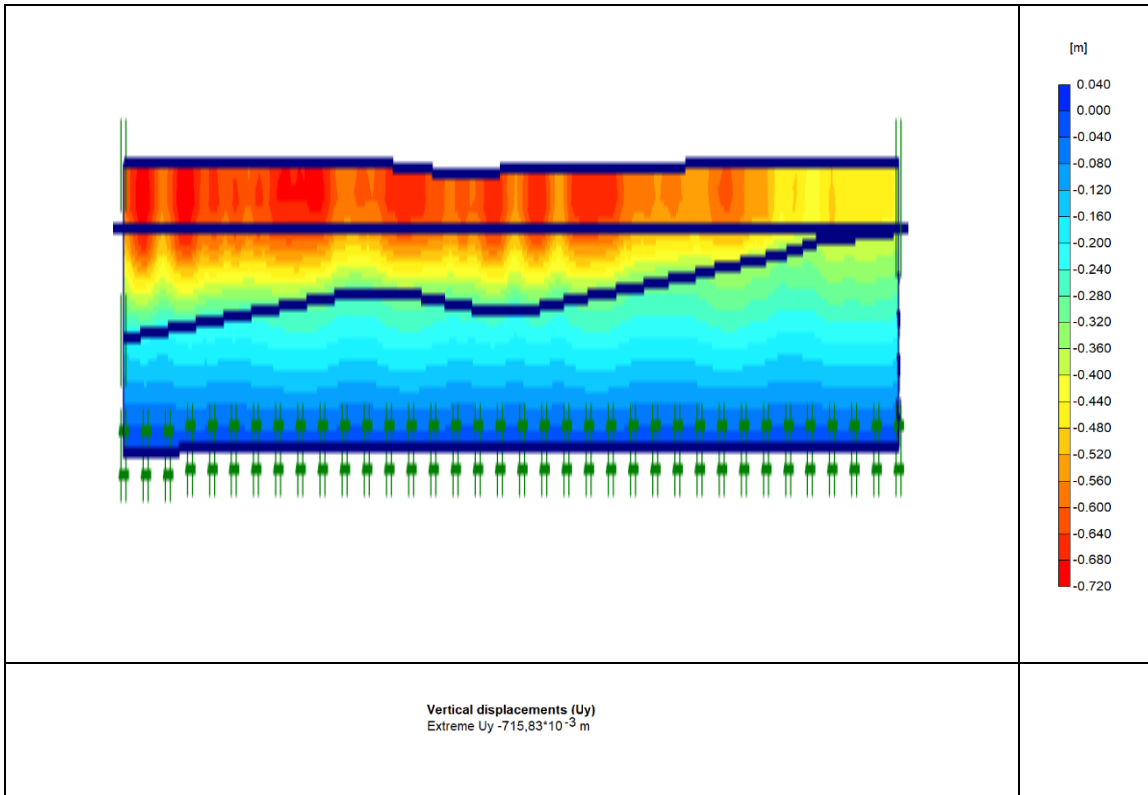
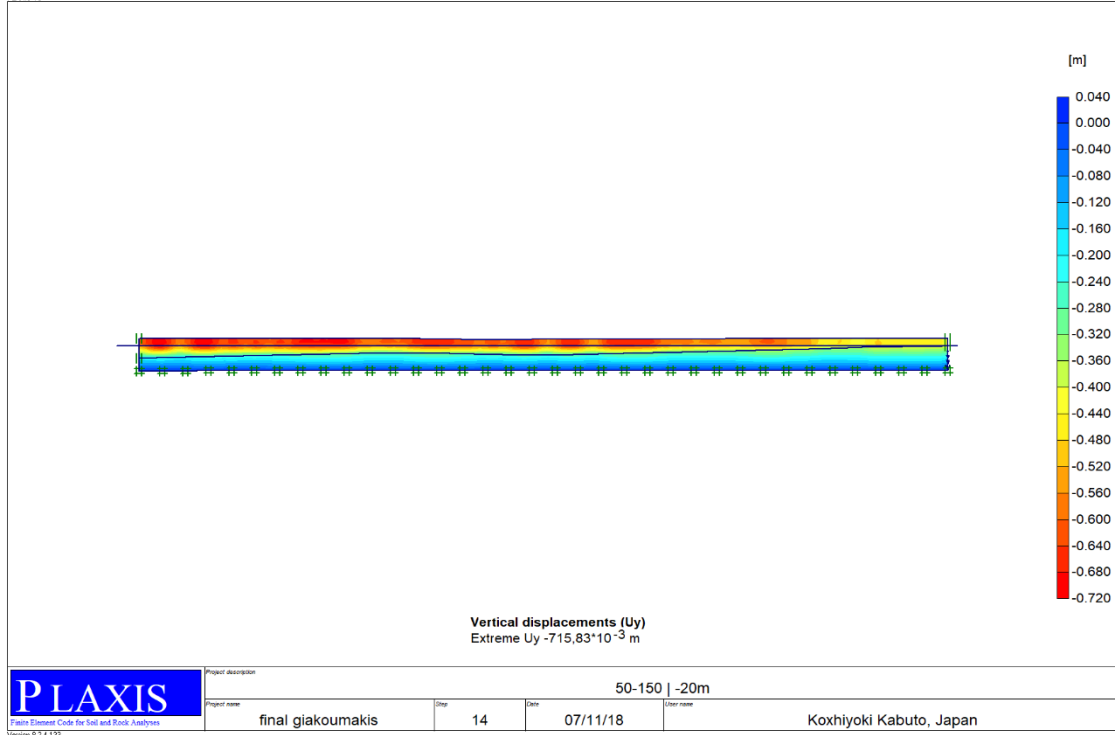


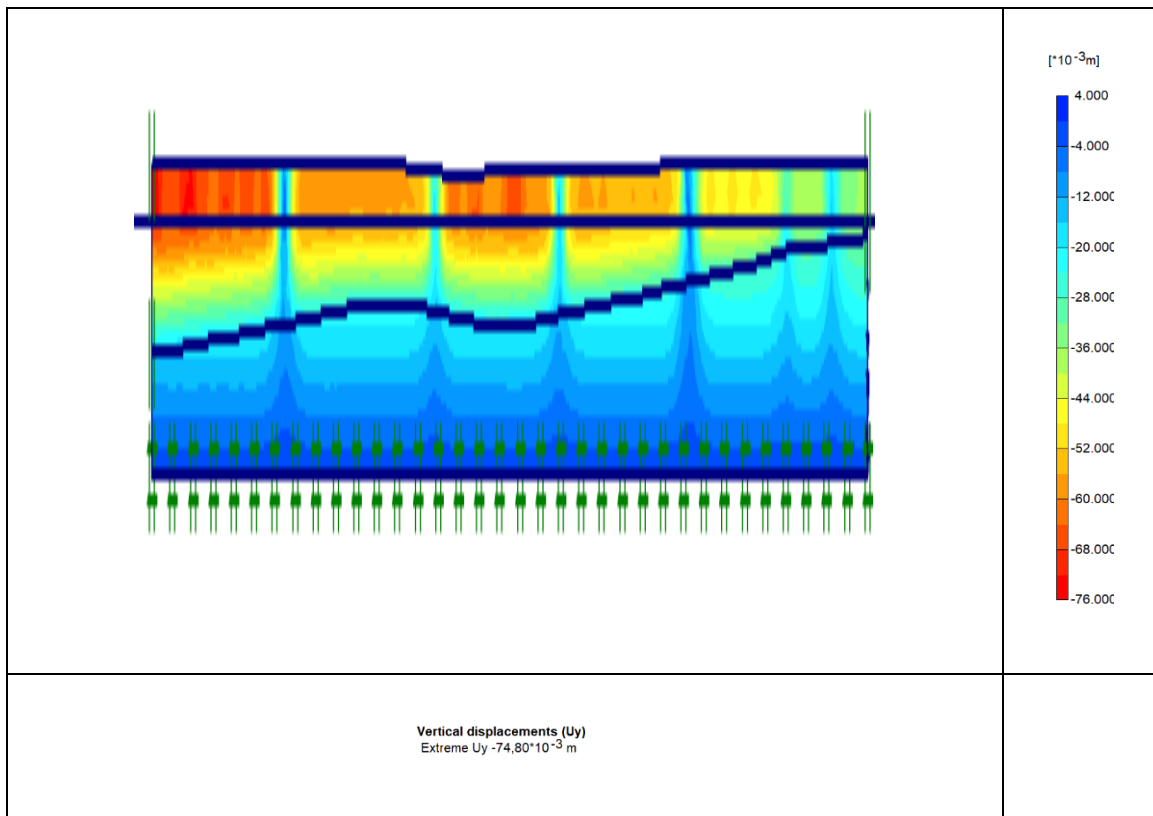
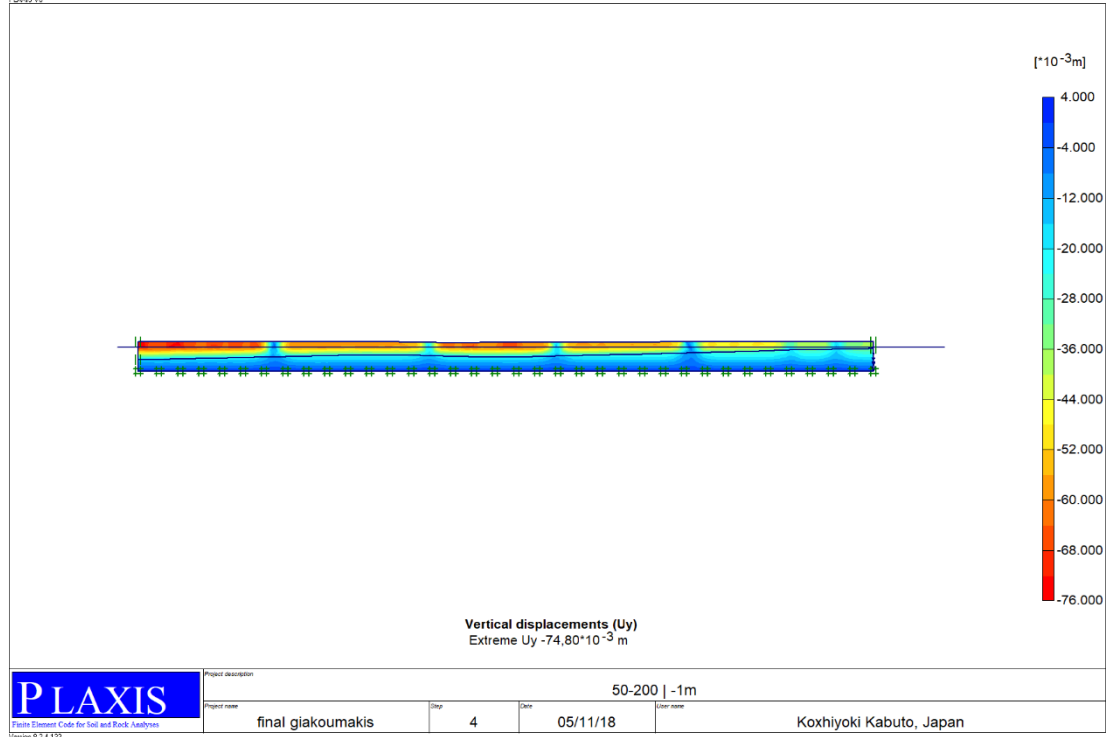


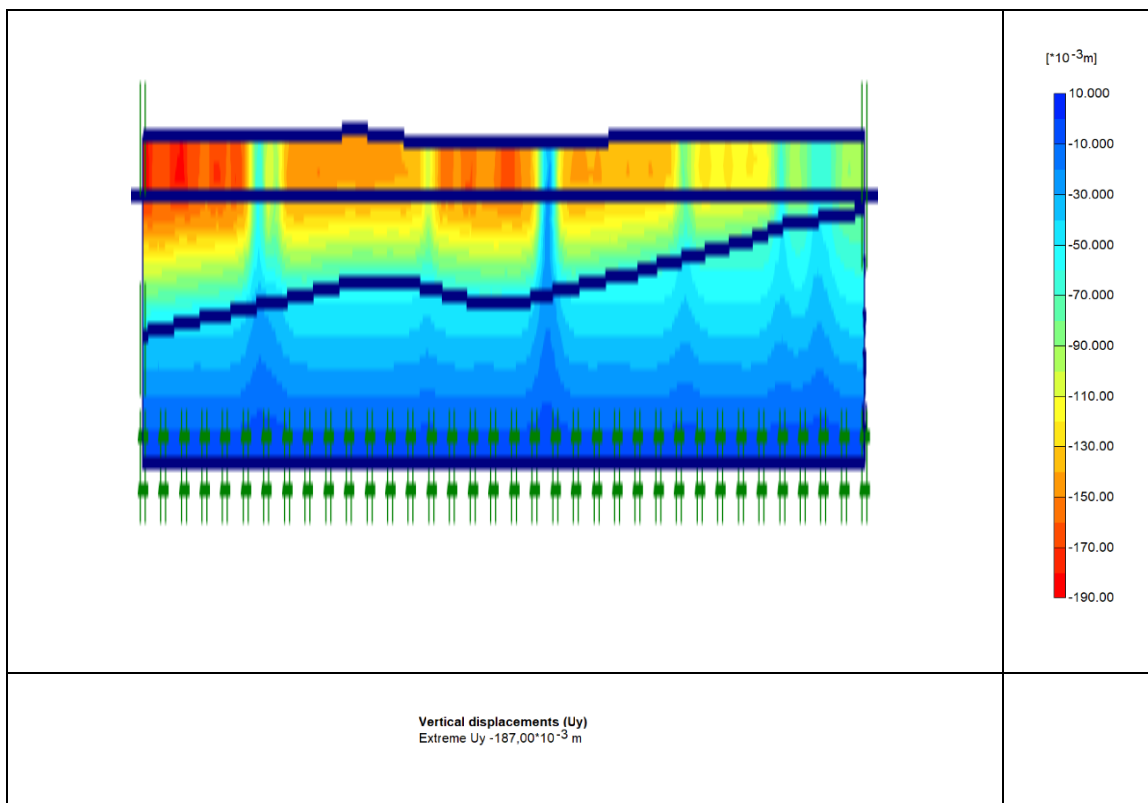
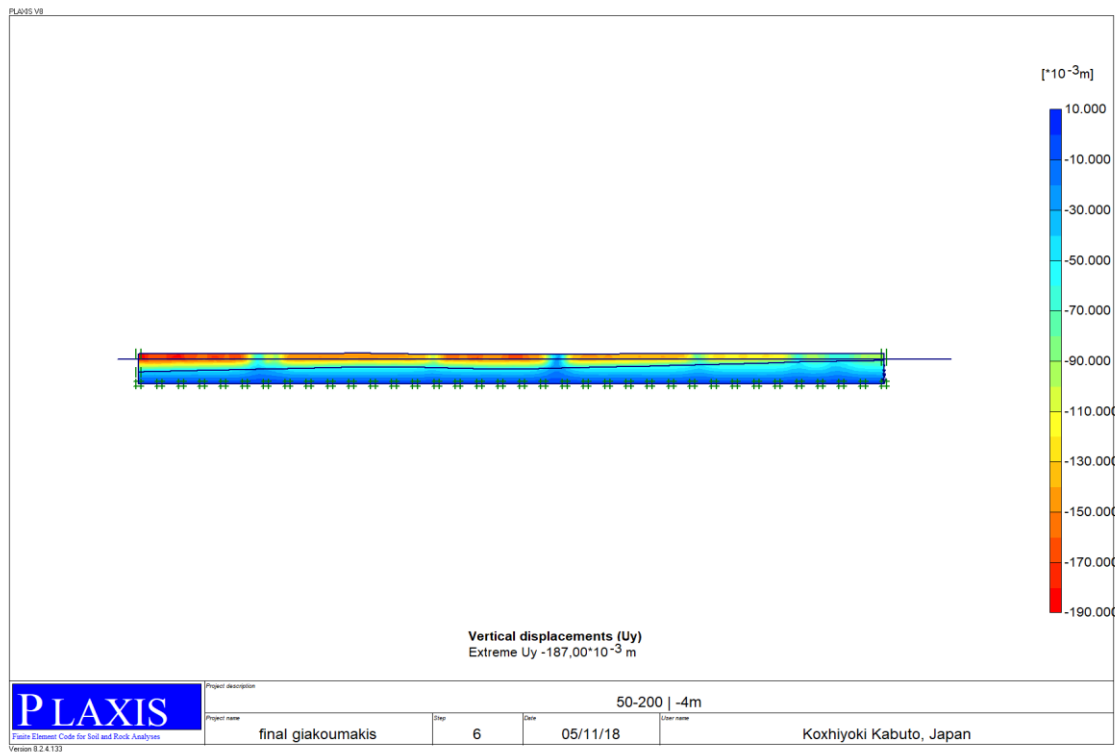


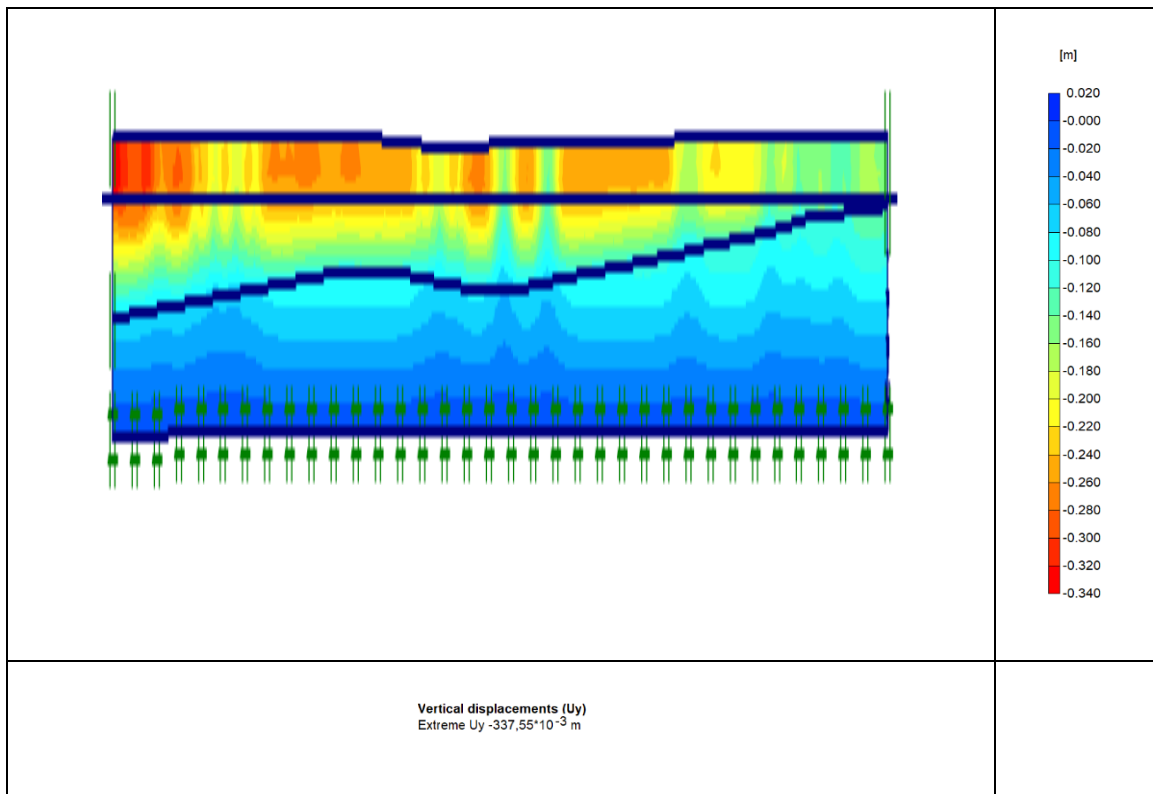
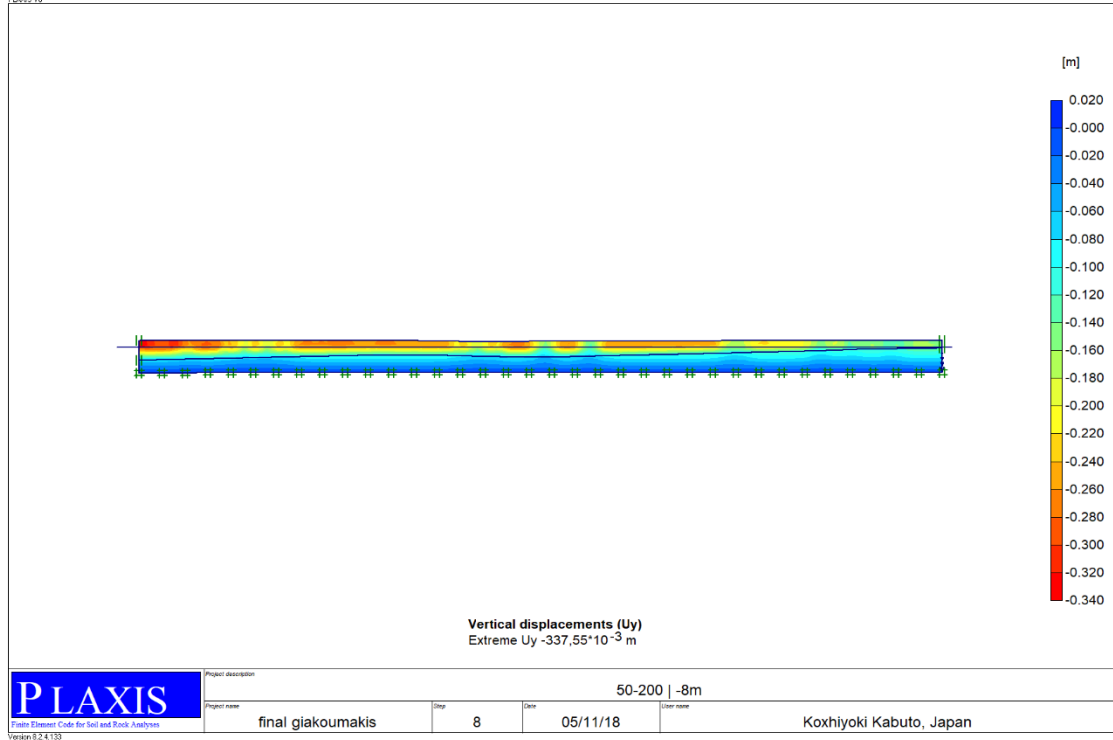


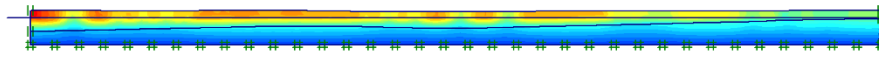








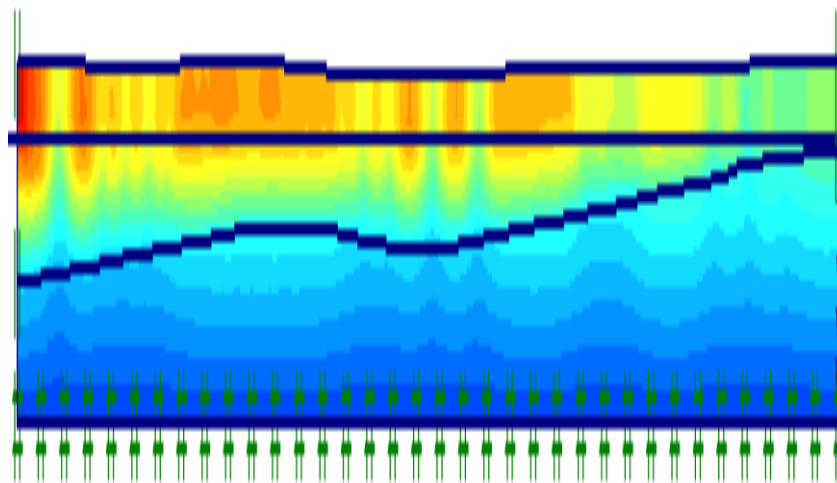




Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy  $-492,11 \cdot 10^{-3}$  m

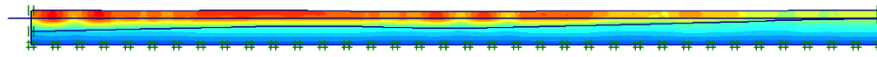


Project description	50-200   -12m			
Project name	final giakoumakis	Step	10	Date
				05/11/18
Version	3.2.4.133			User name
				Koxhiyoki Kabuto, Japan



Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy  $-492,11 \cdot 10^{-3}$  m

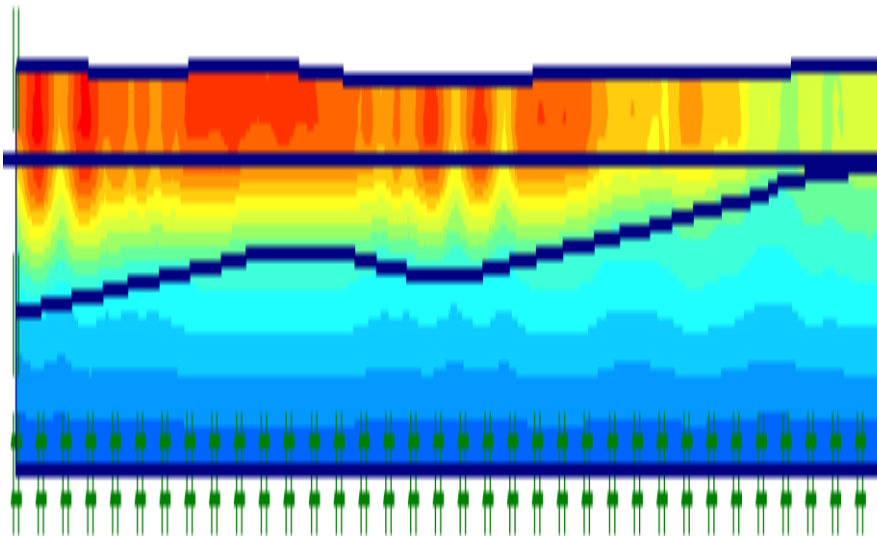




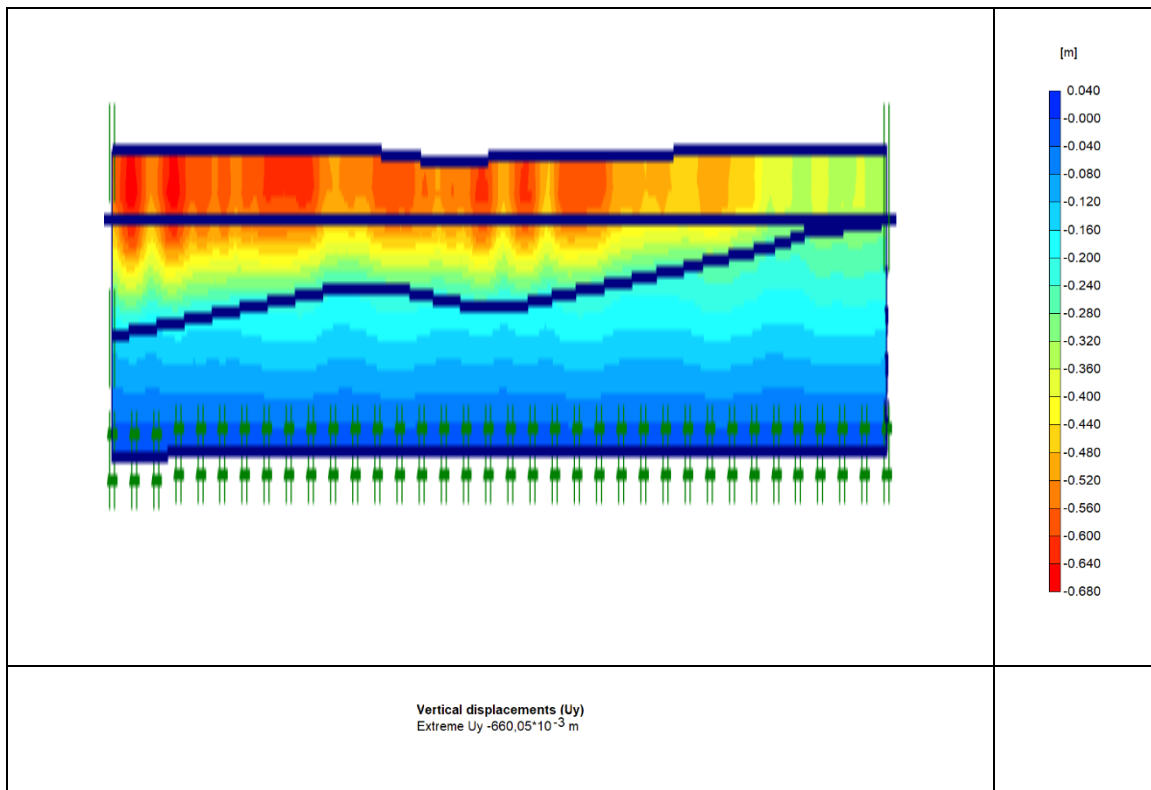
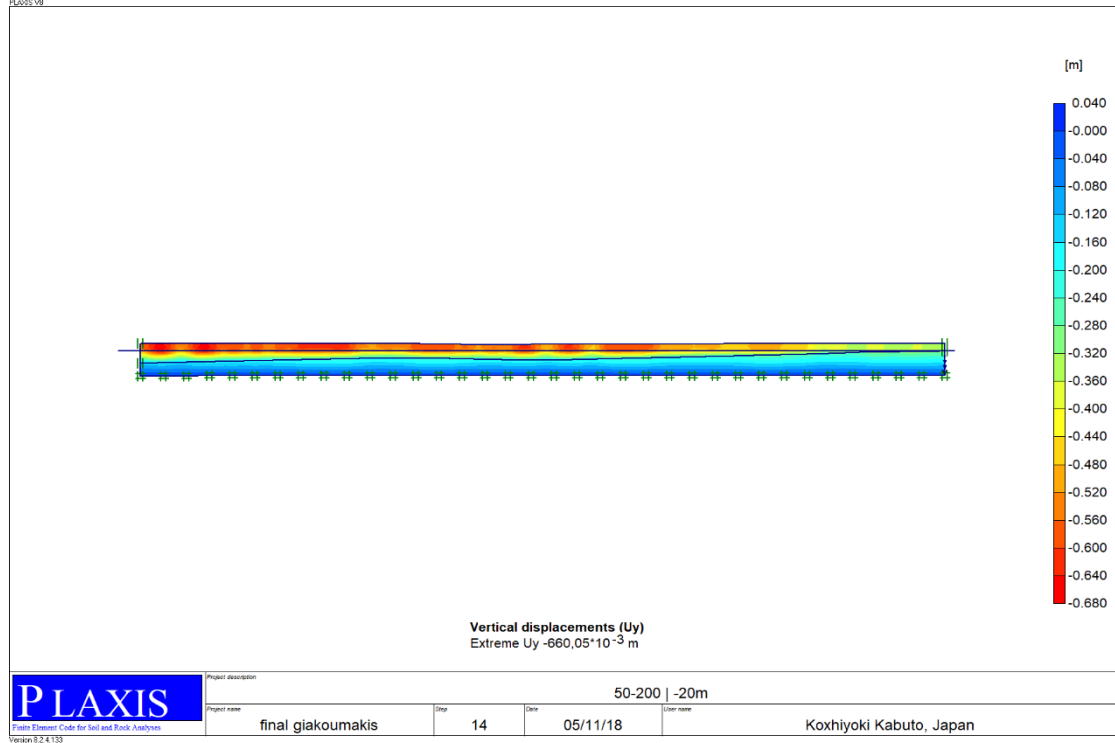
Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy  $-533,07 \cdot 10^{-3}$  m

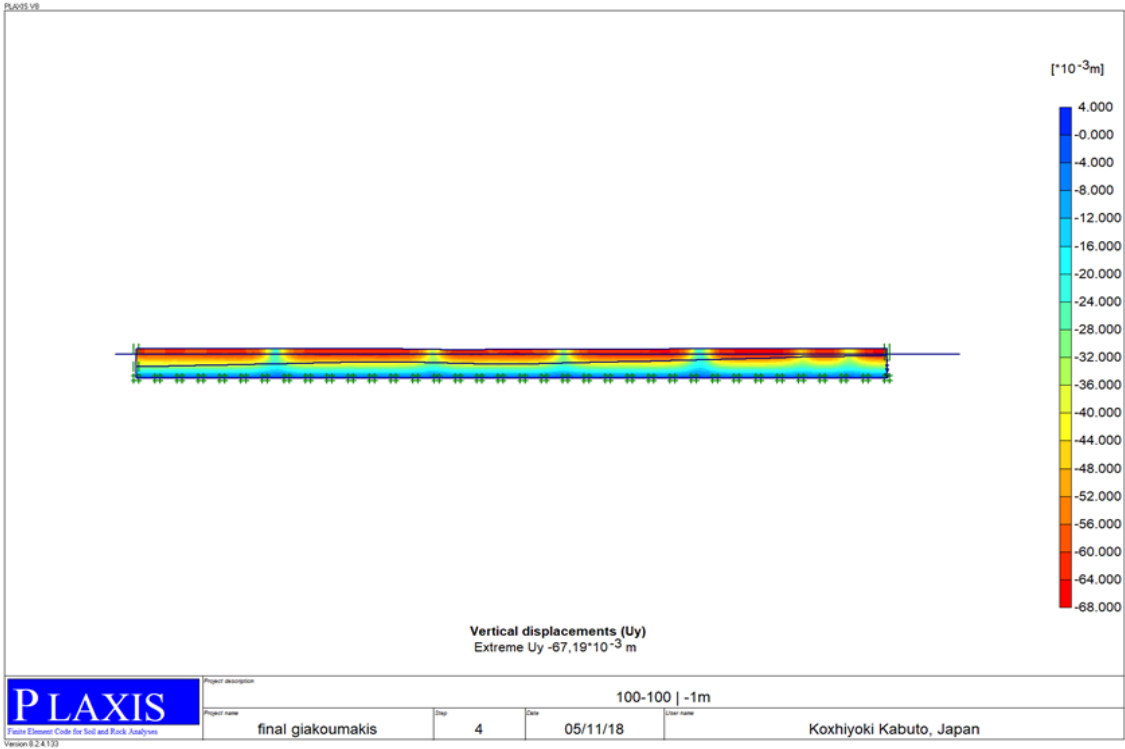
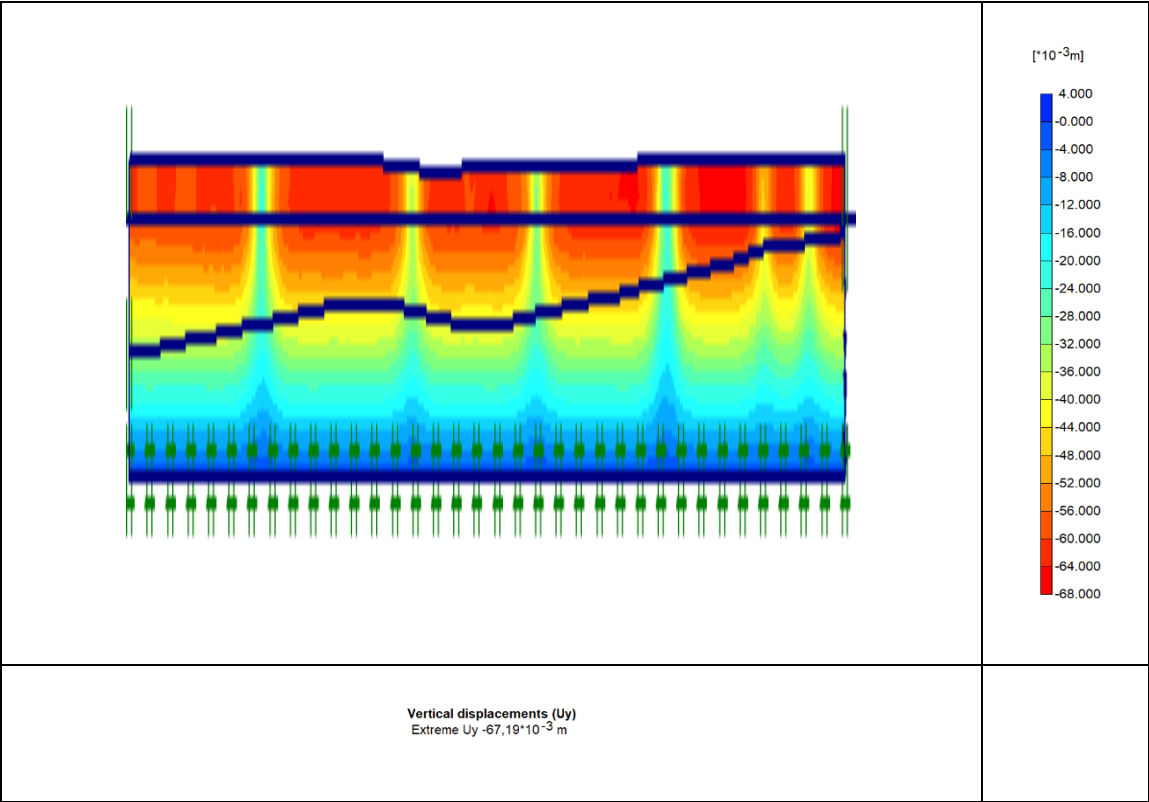


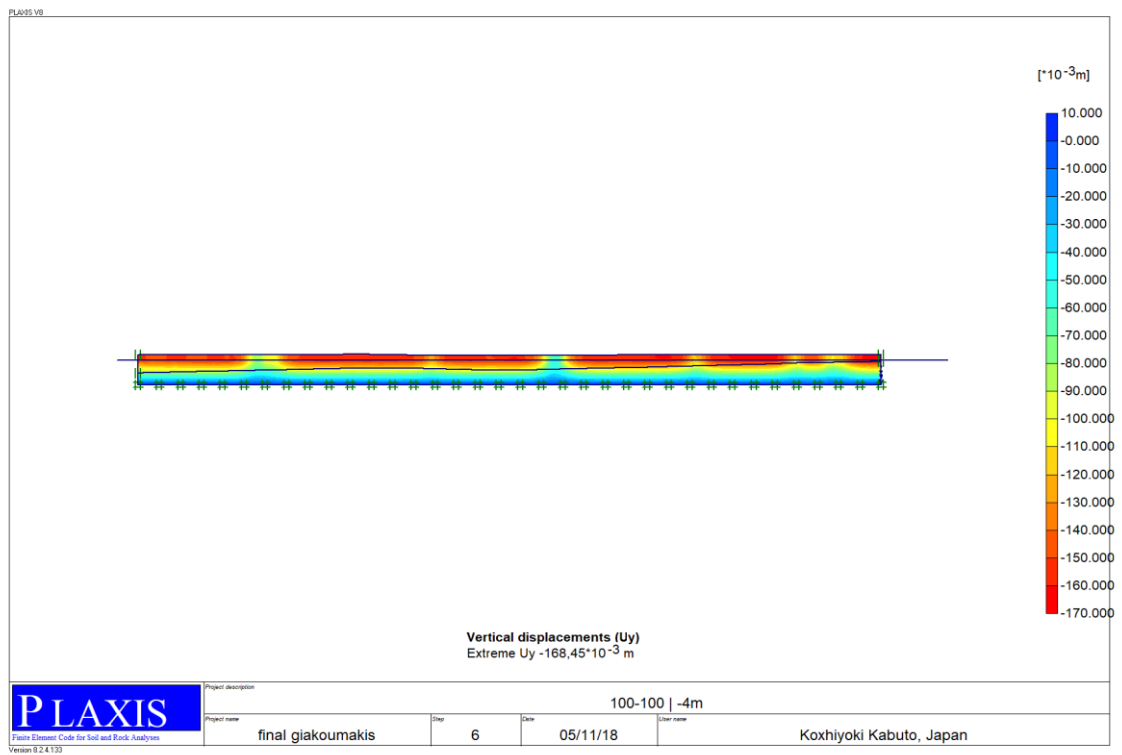
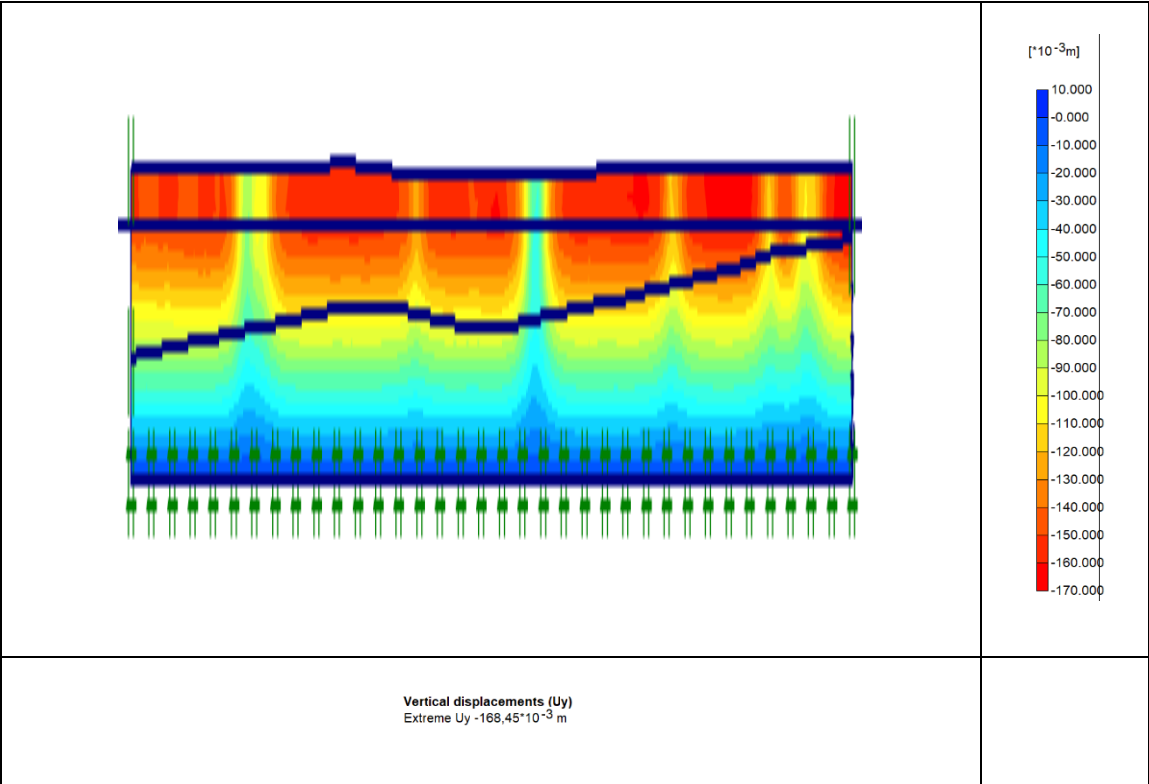
Project description	50-200   -16m			
Project name	final giakoumakis	Sheet	12	Date 05/11/18
Client name	Koxhiyoki Kabuto, Japan			

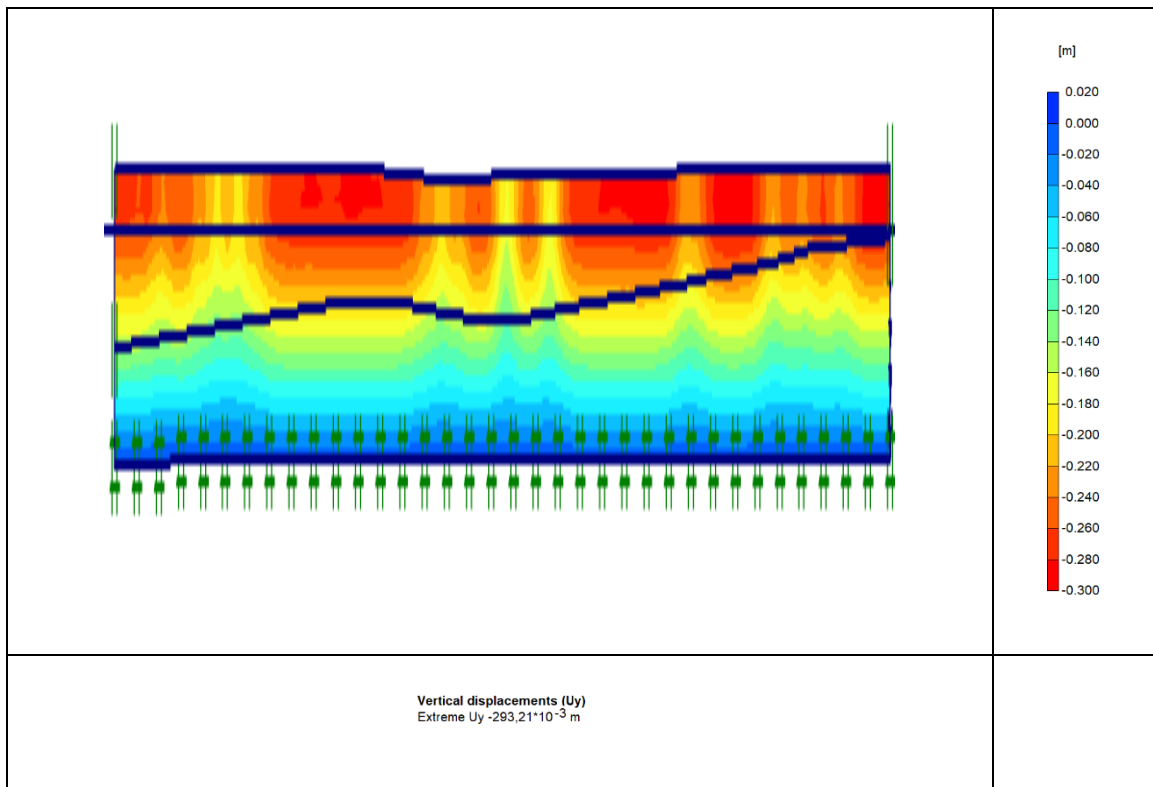
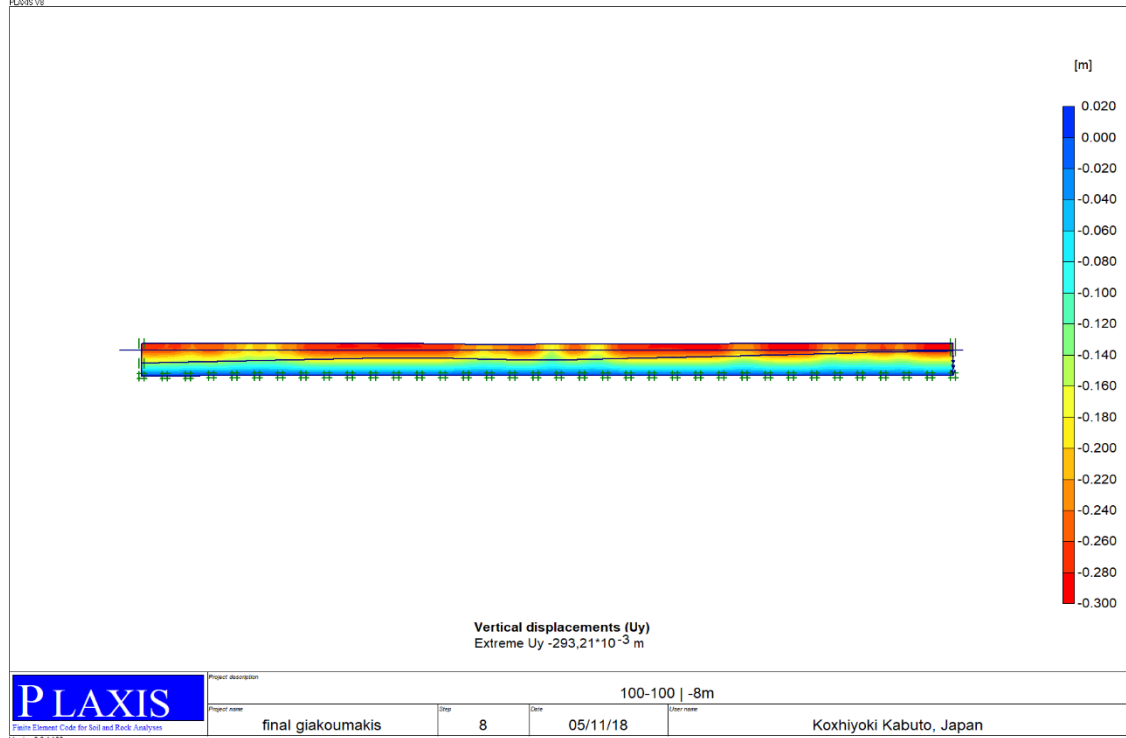


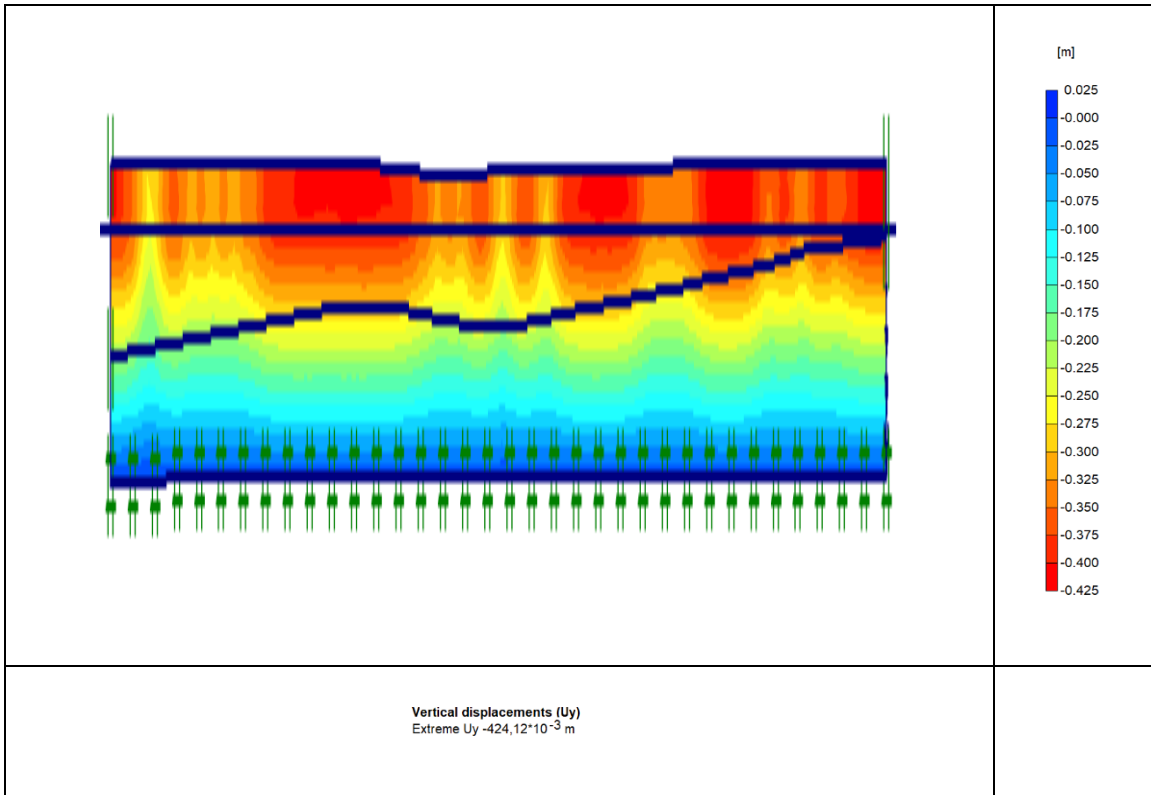
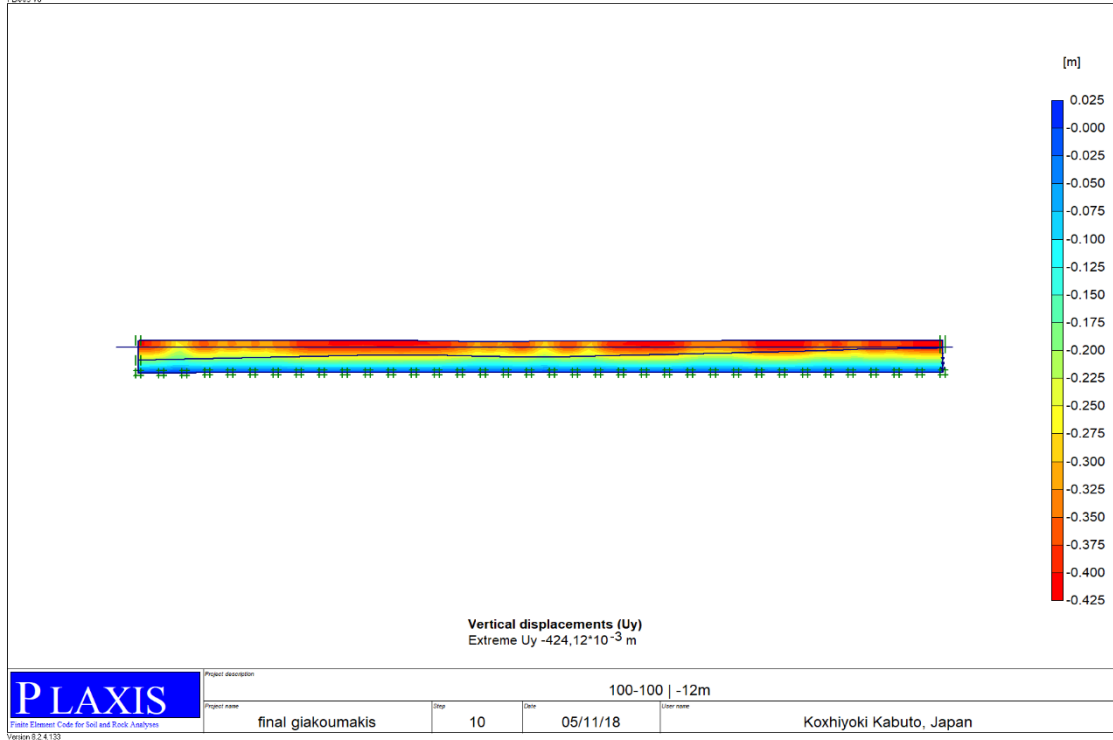
Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy  $-533,07 \cdot 10^{-3}$  m

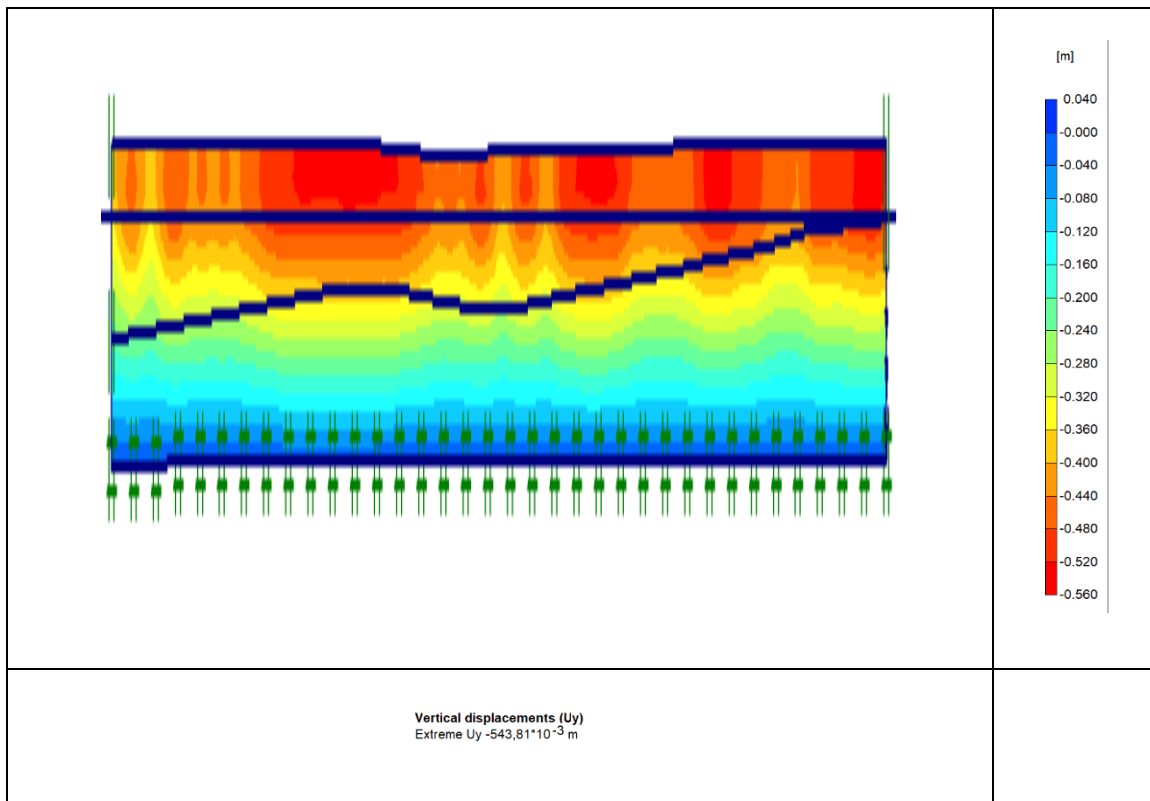
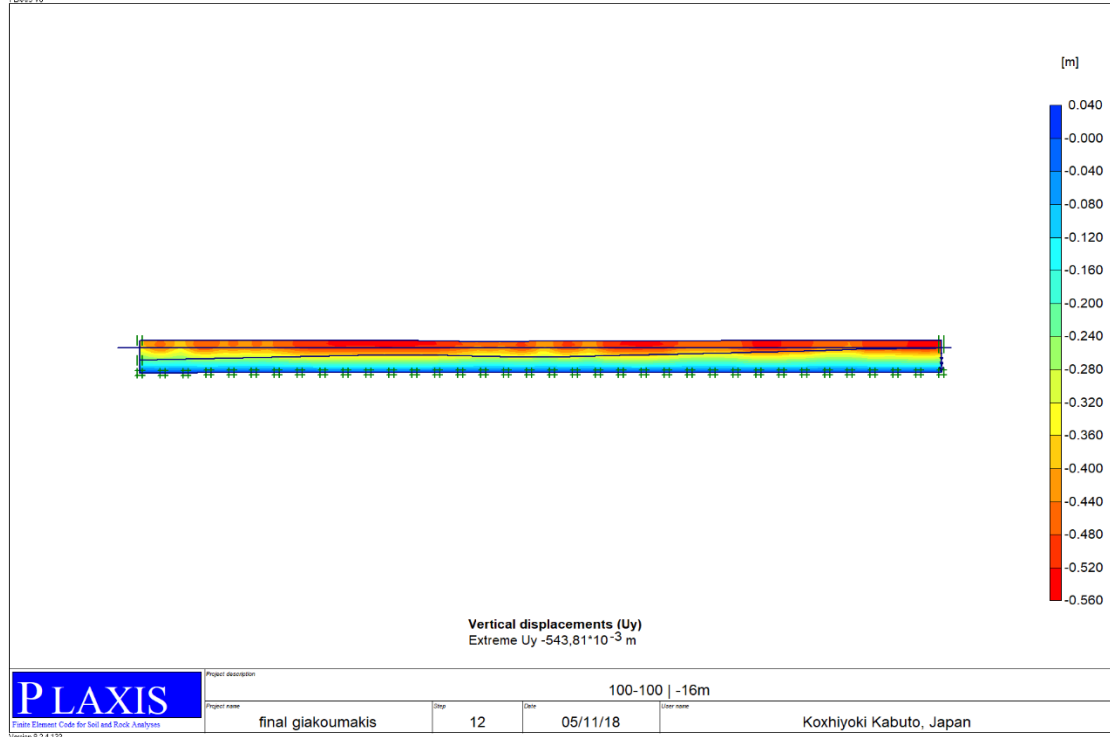


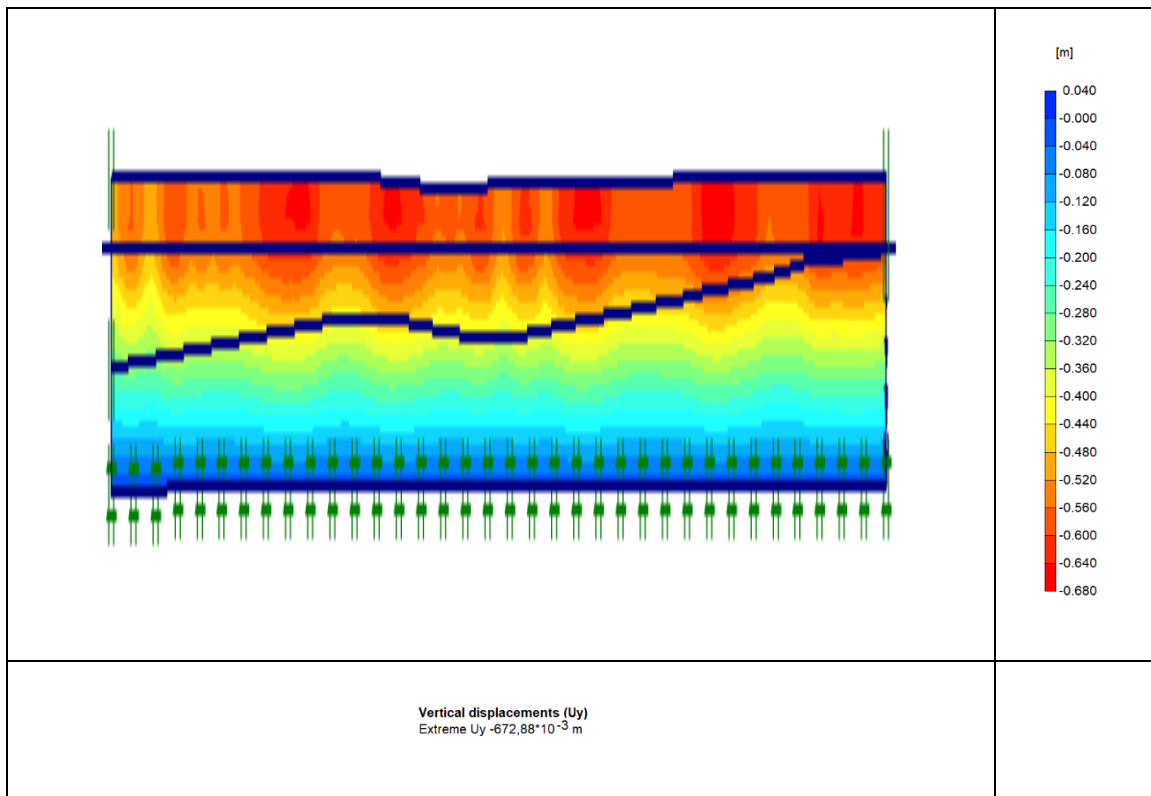
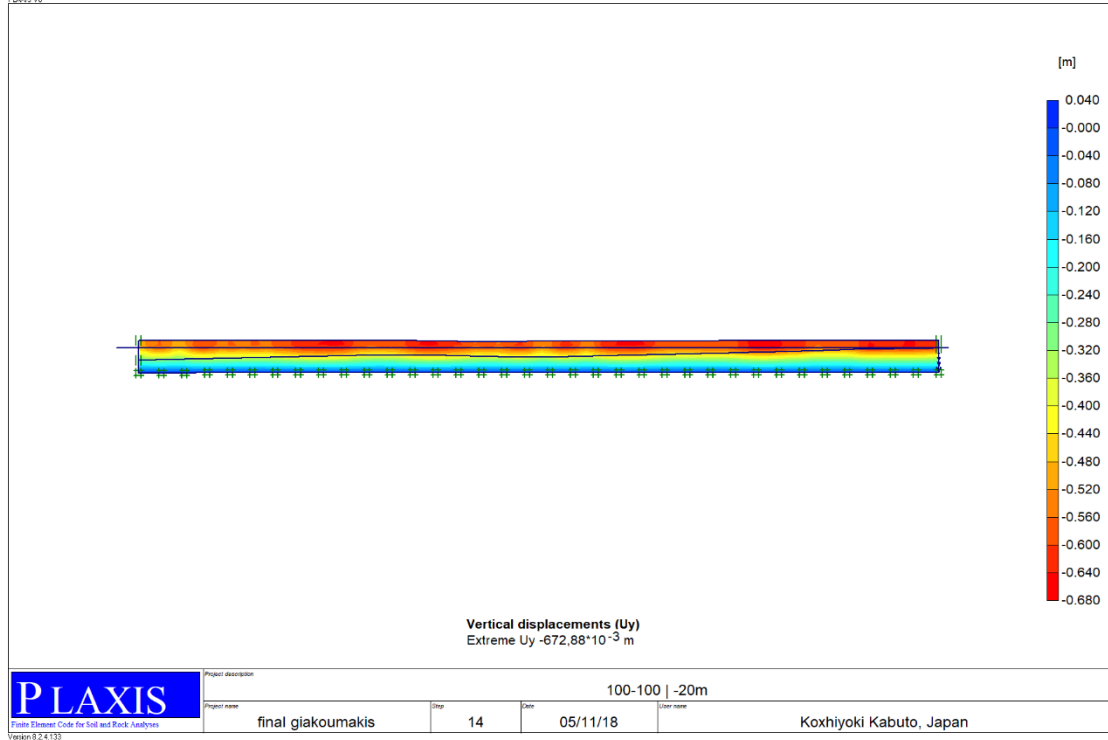




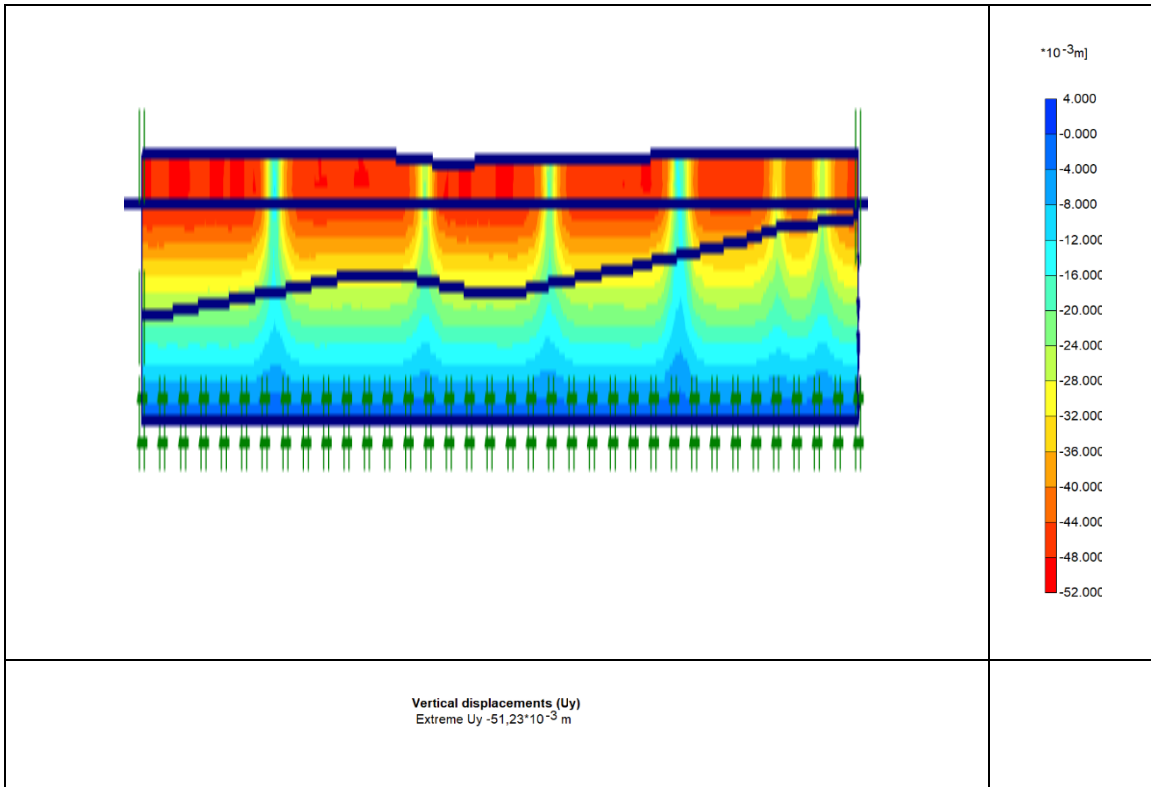
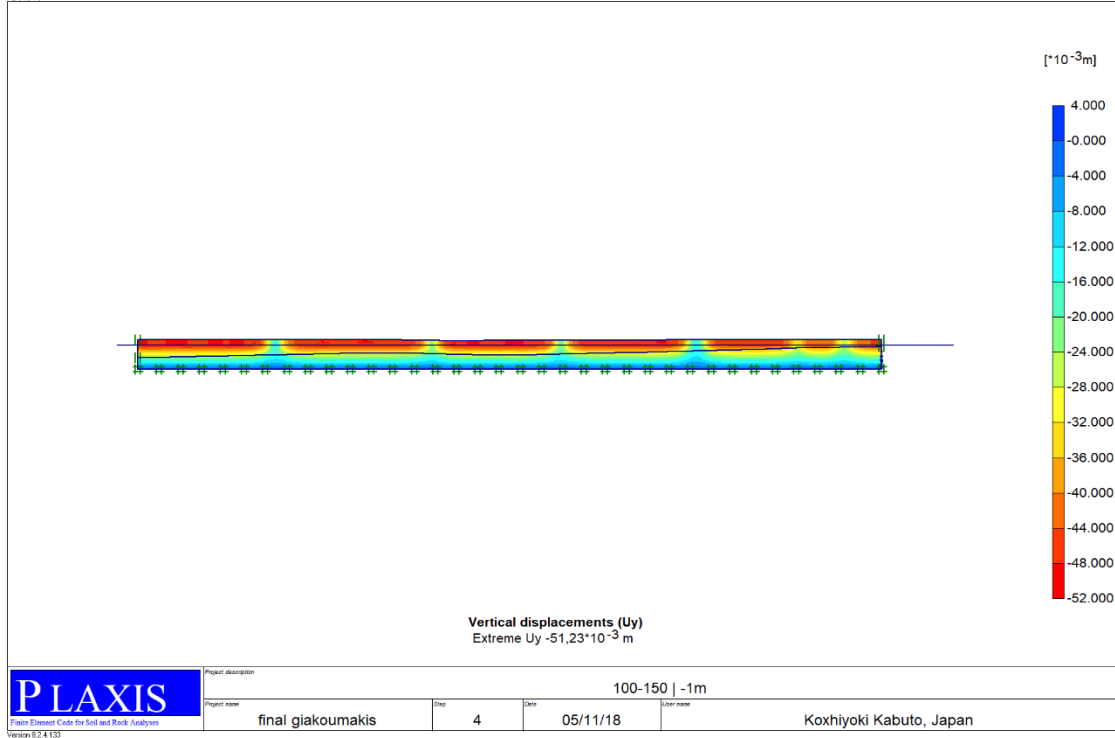


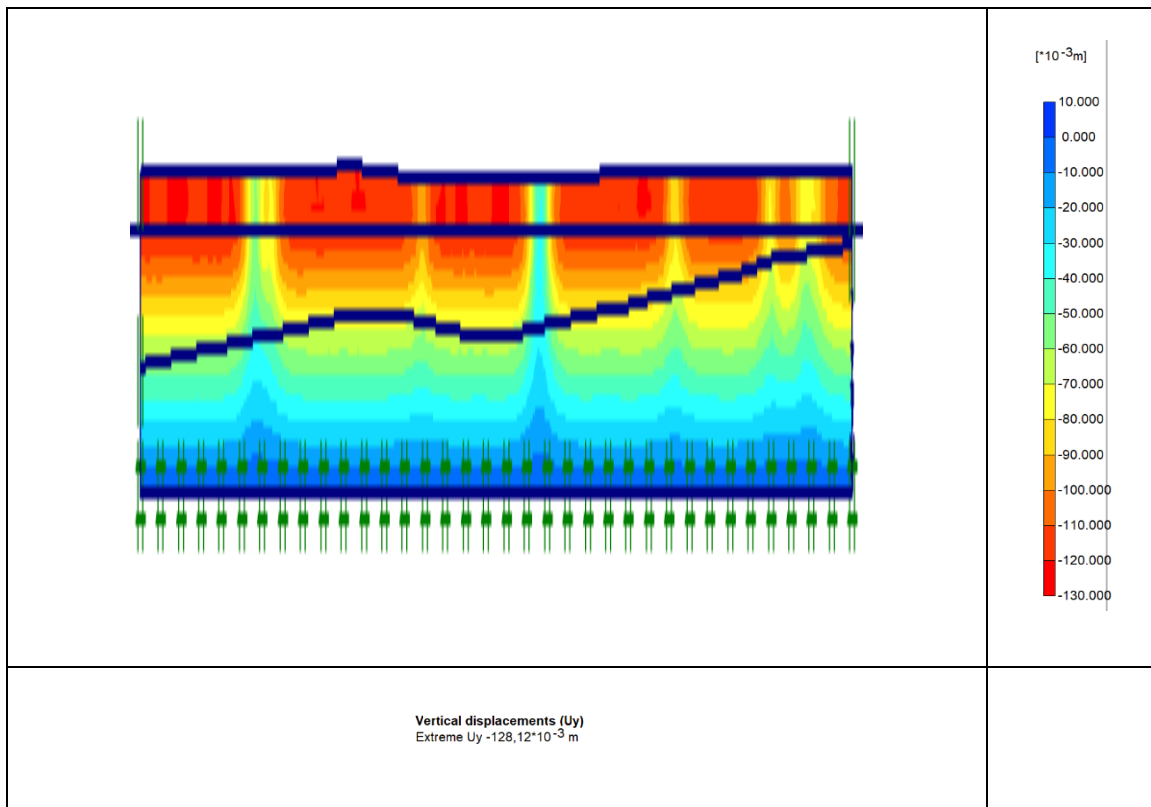
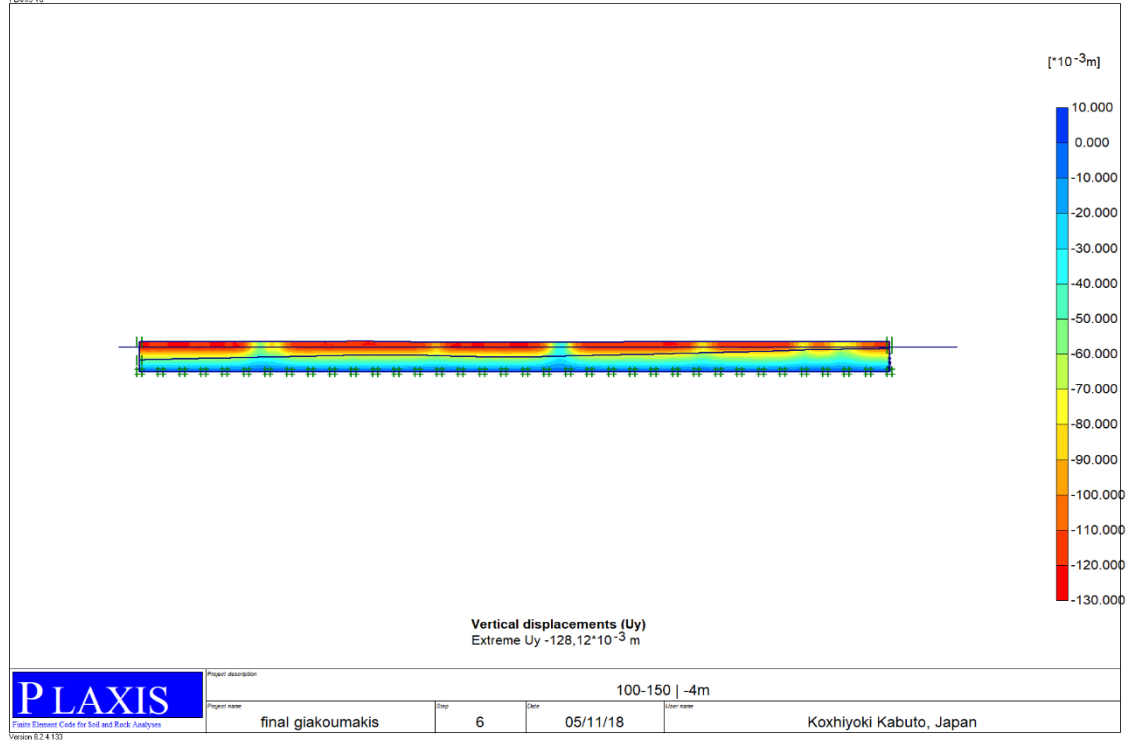


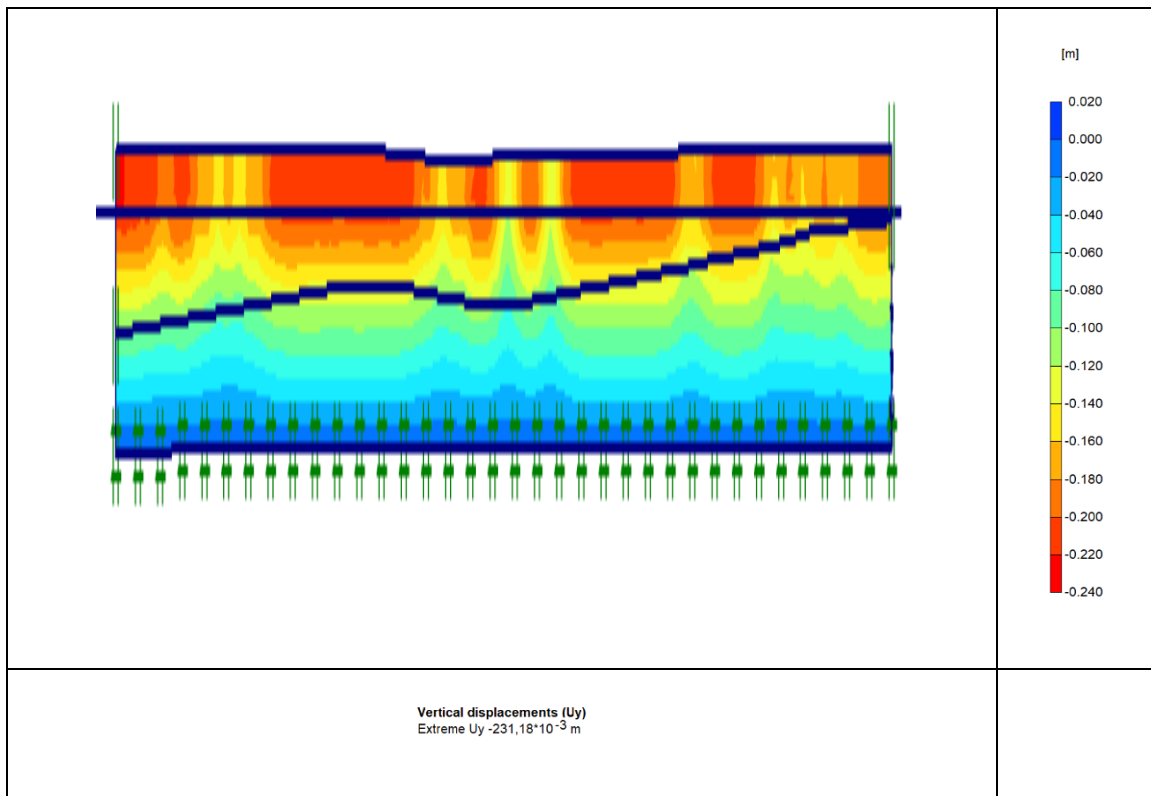
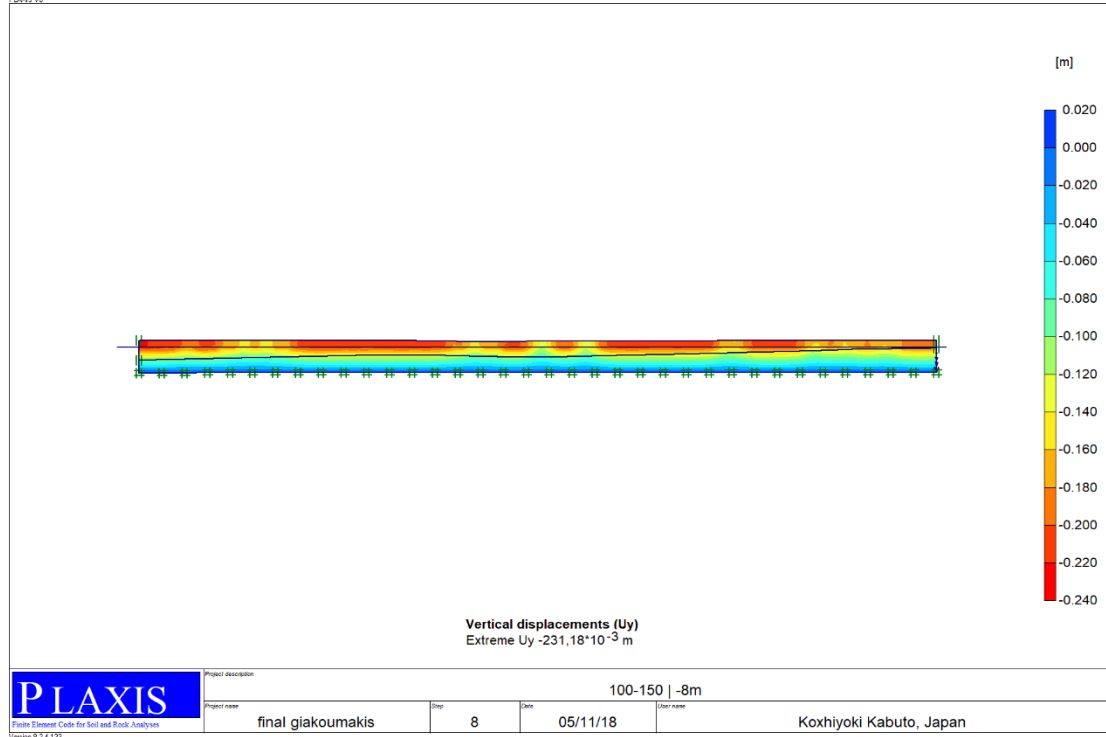




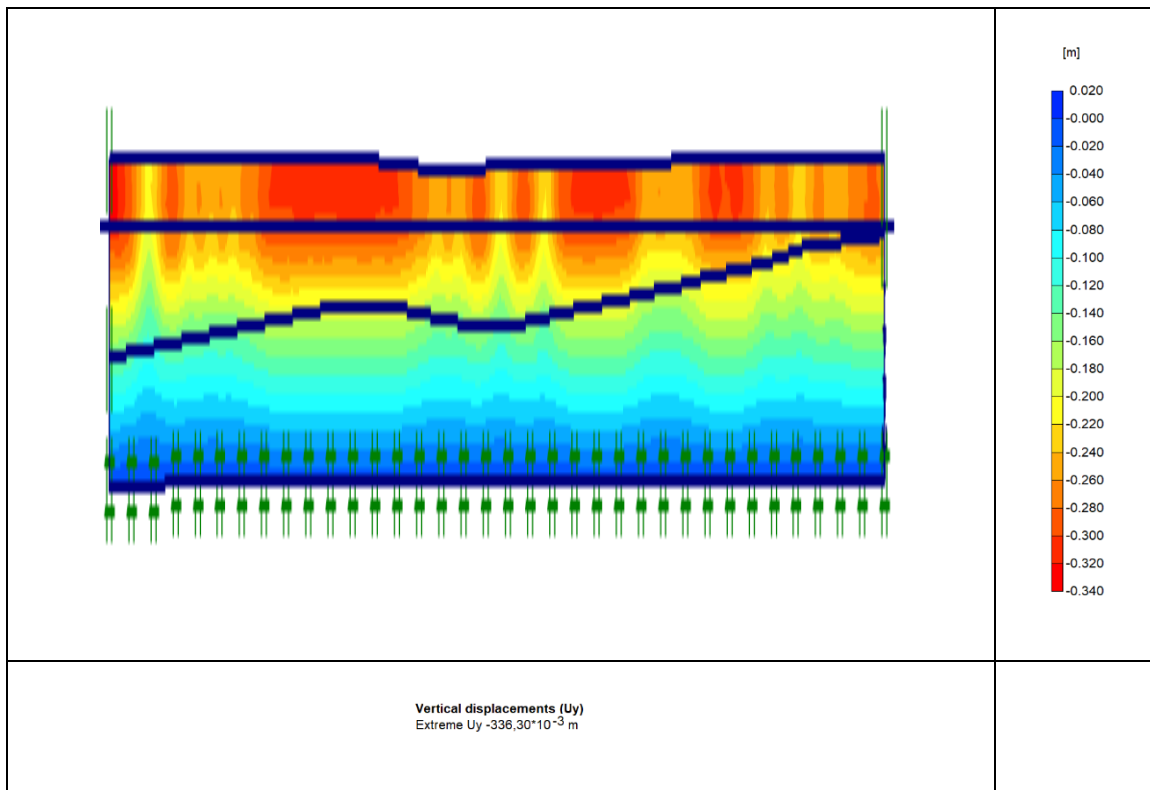
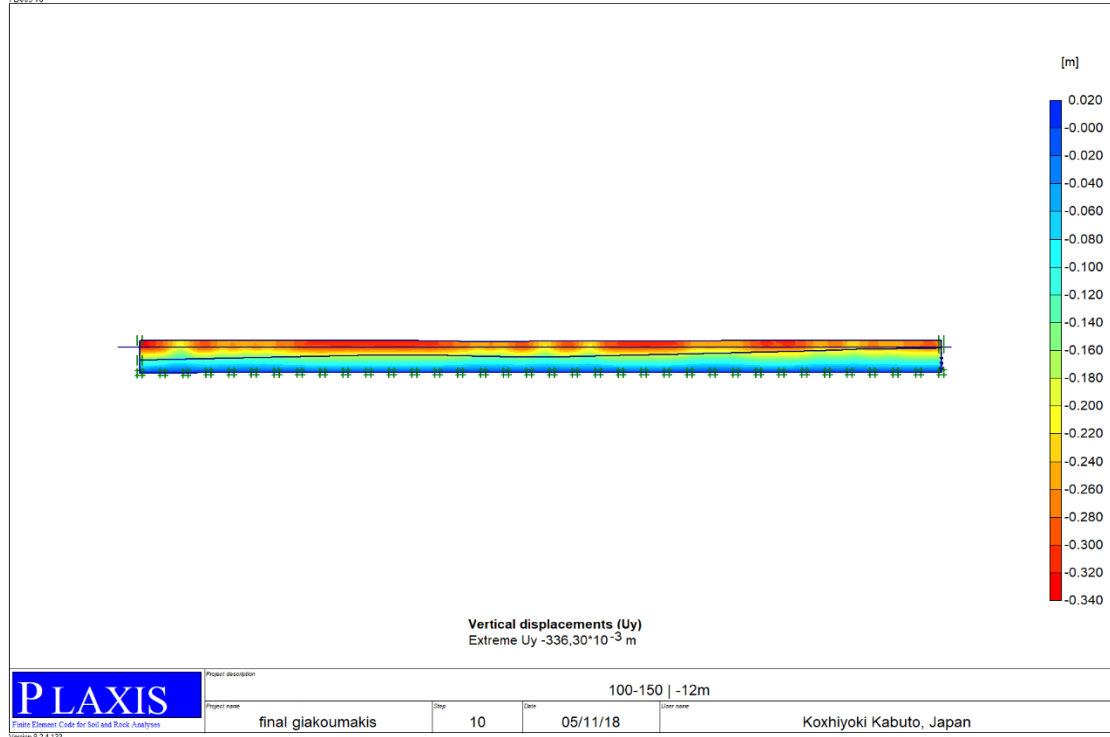


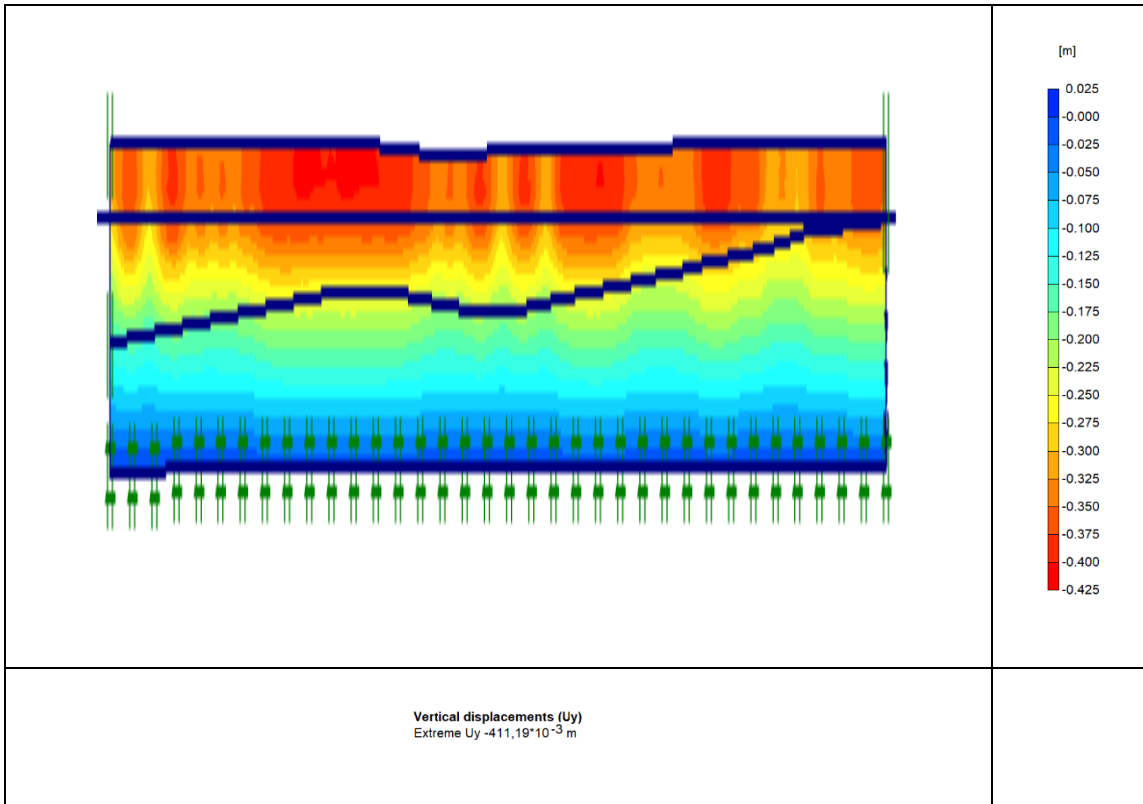
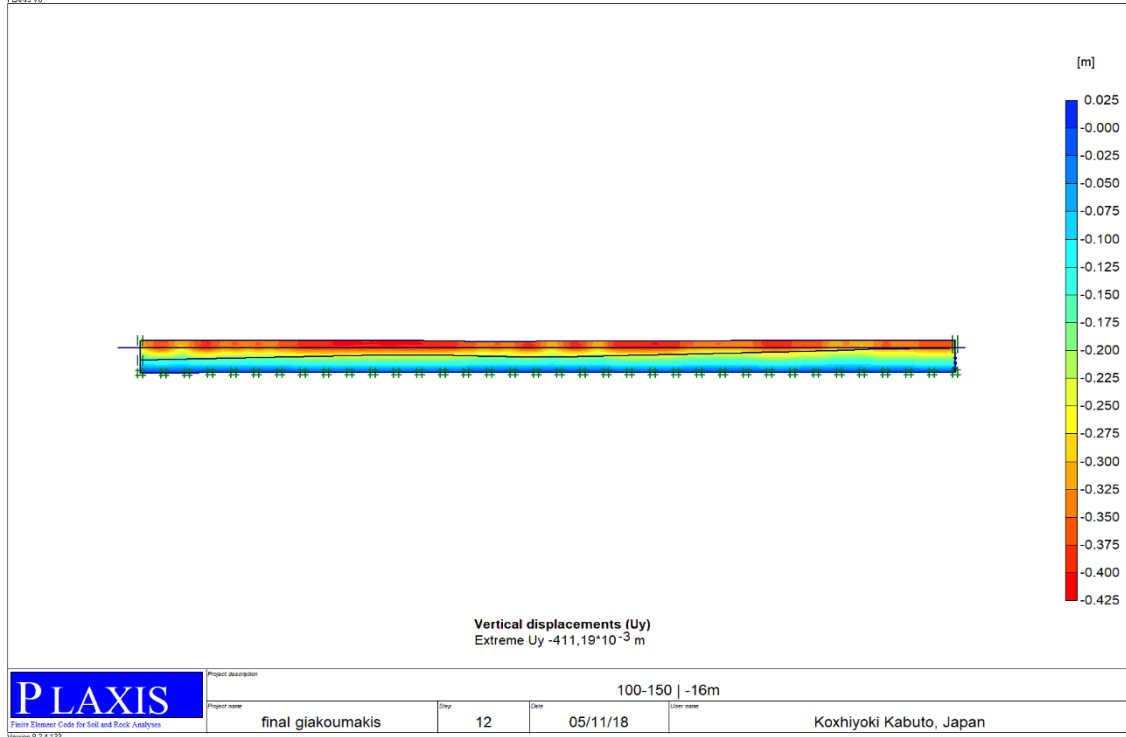


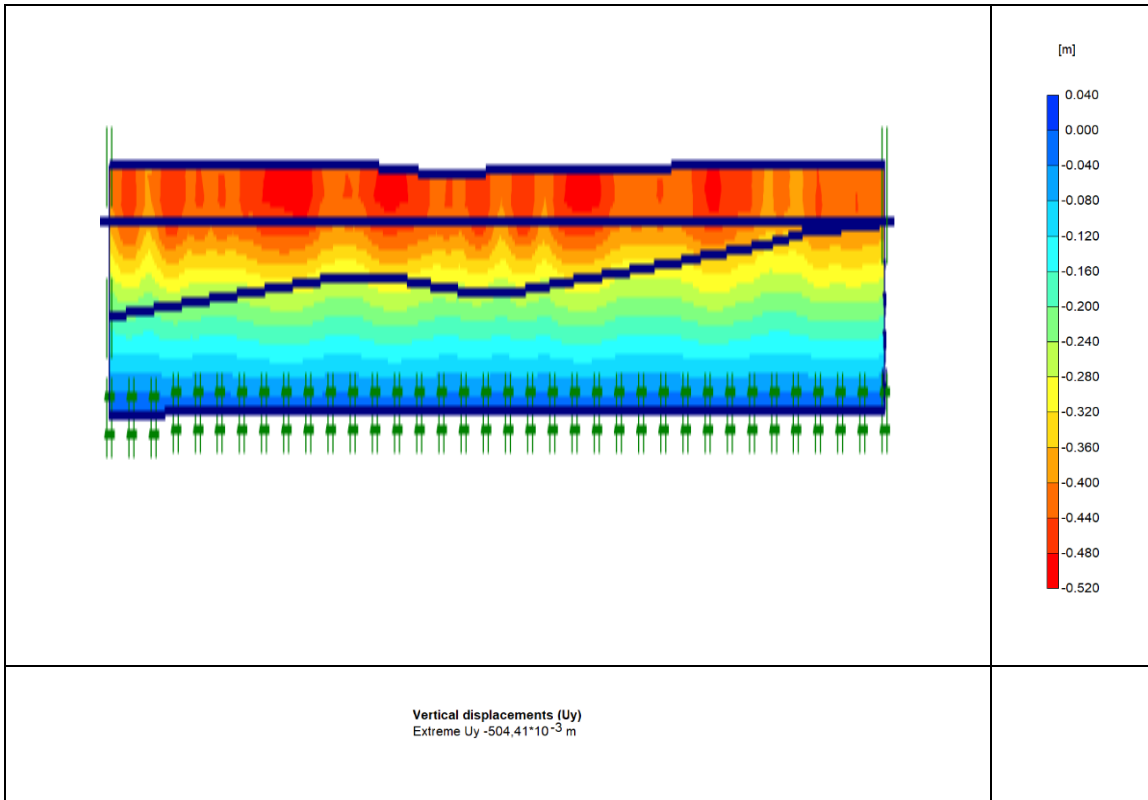
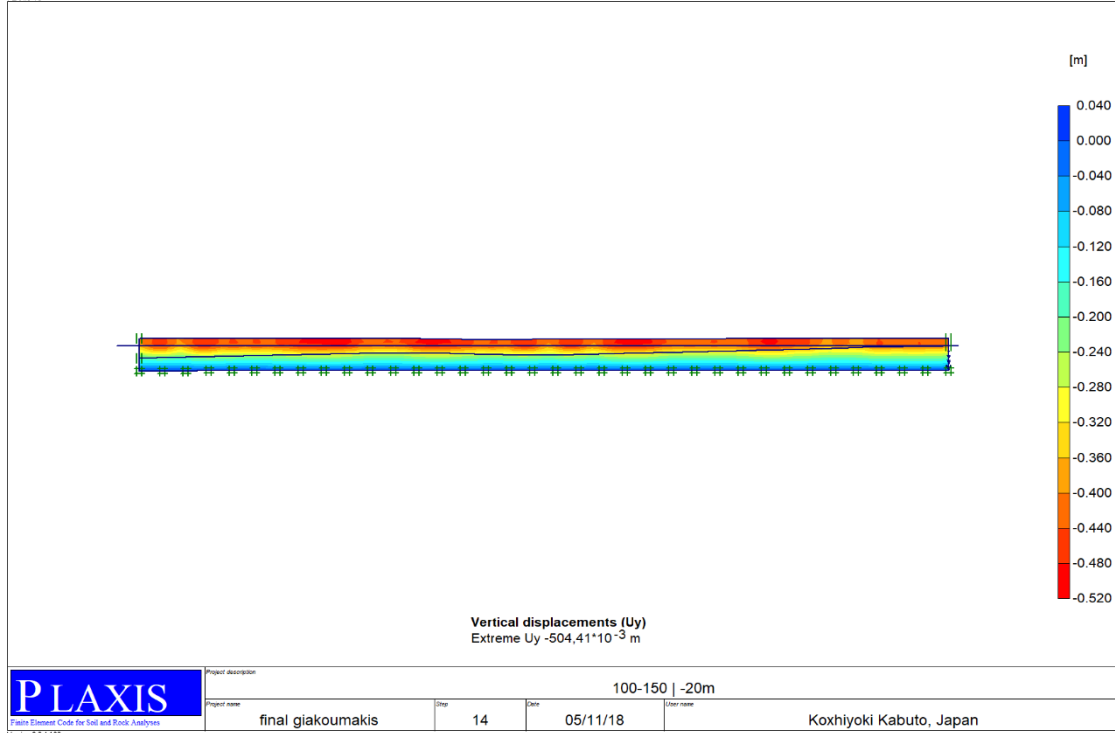


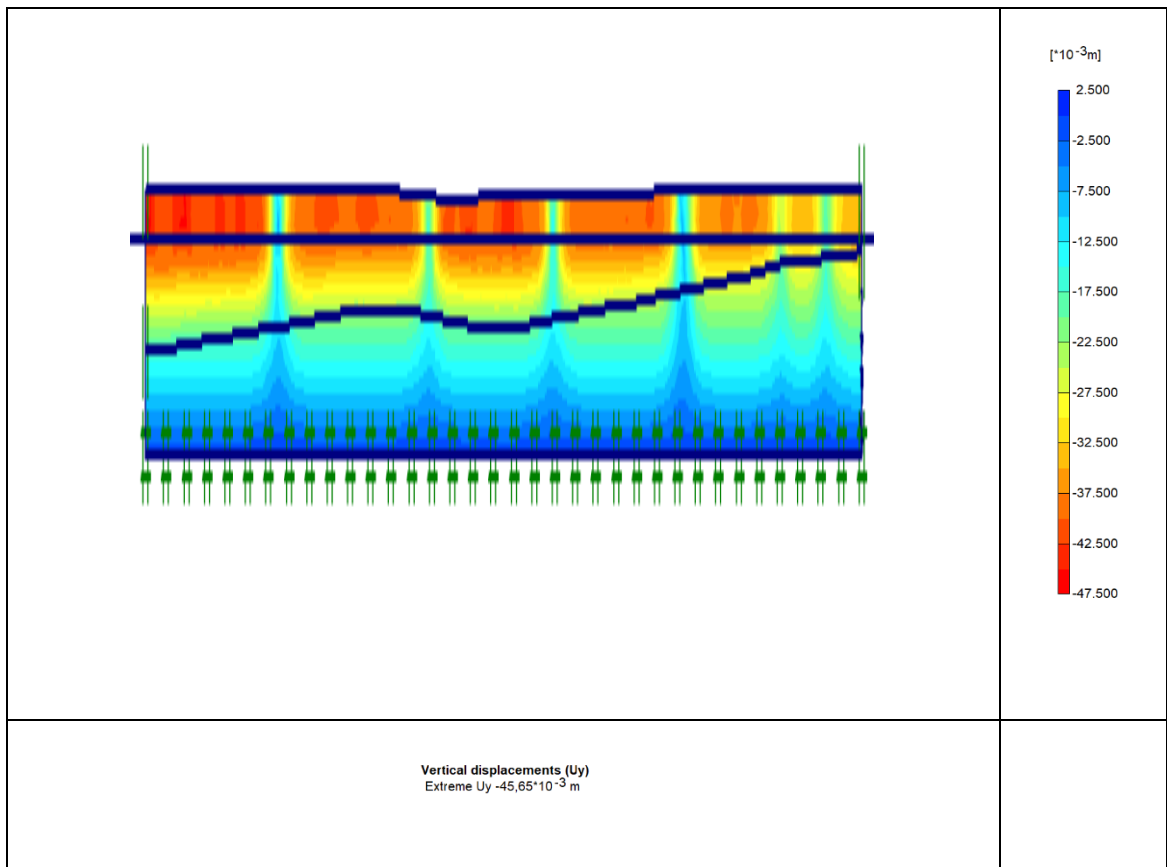
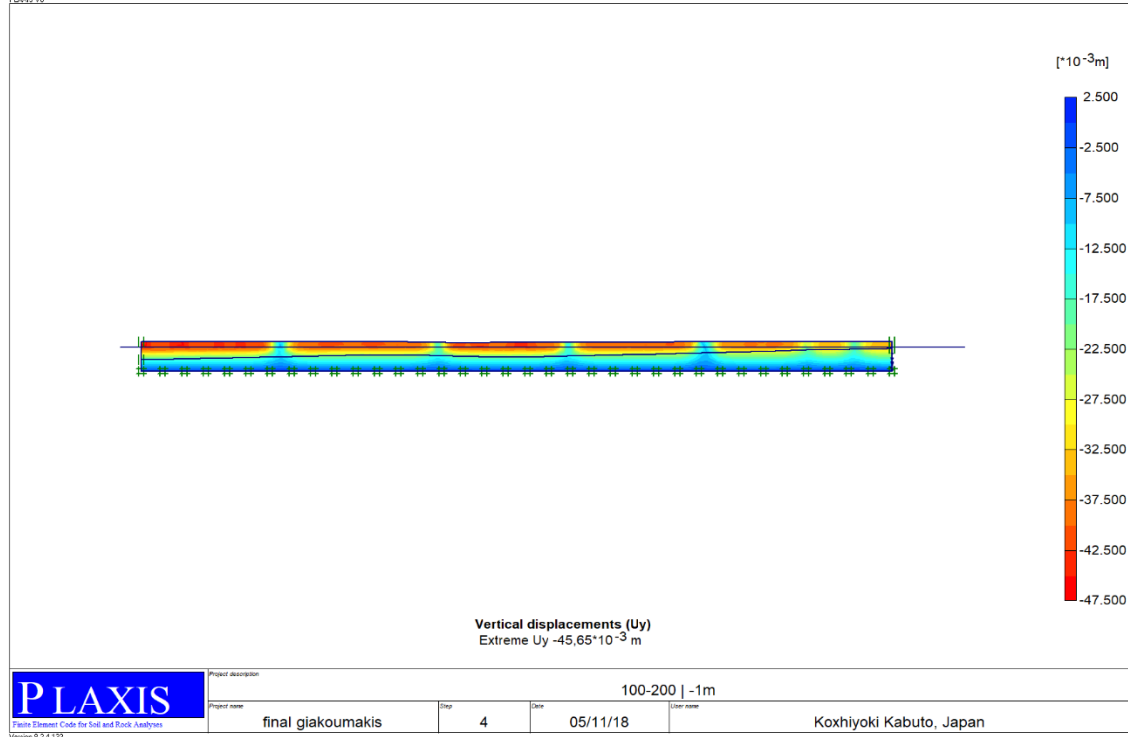


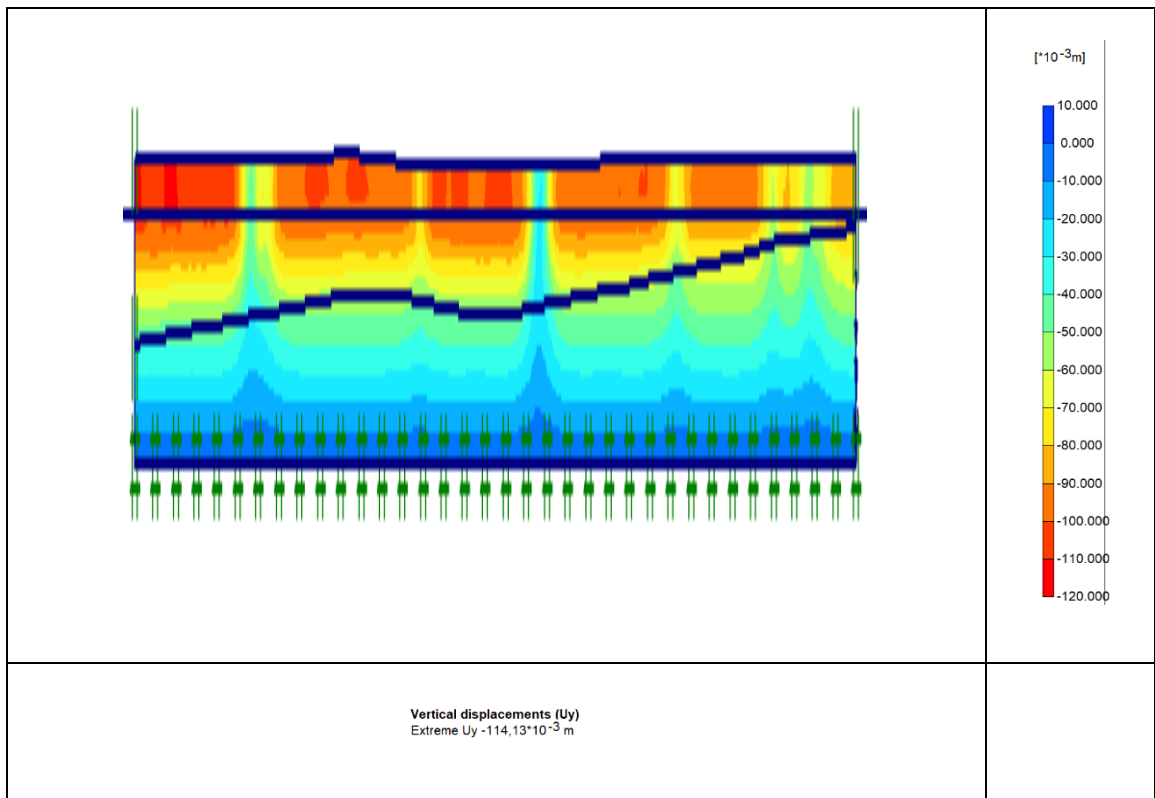
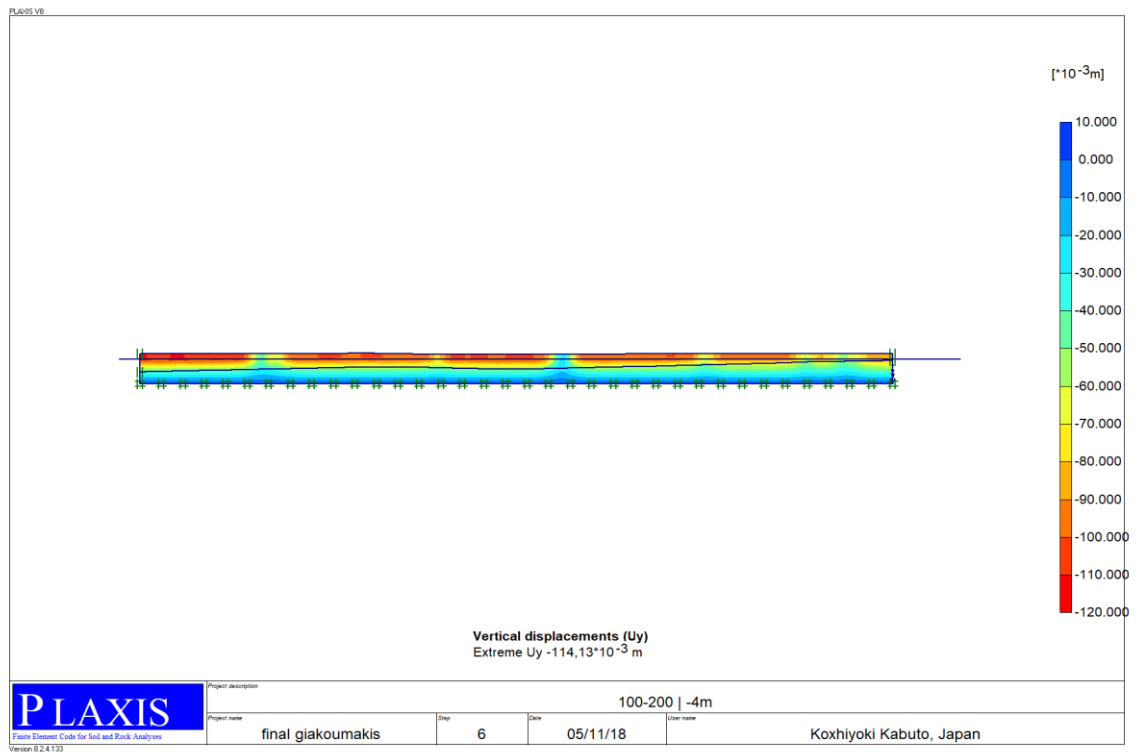
PLAXIS VB





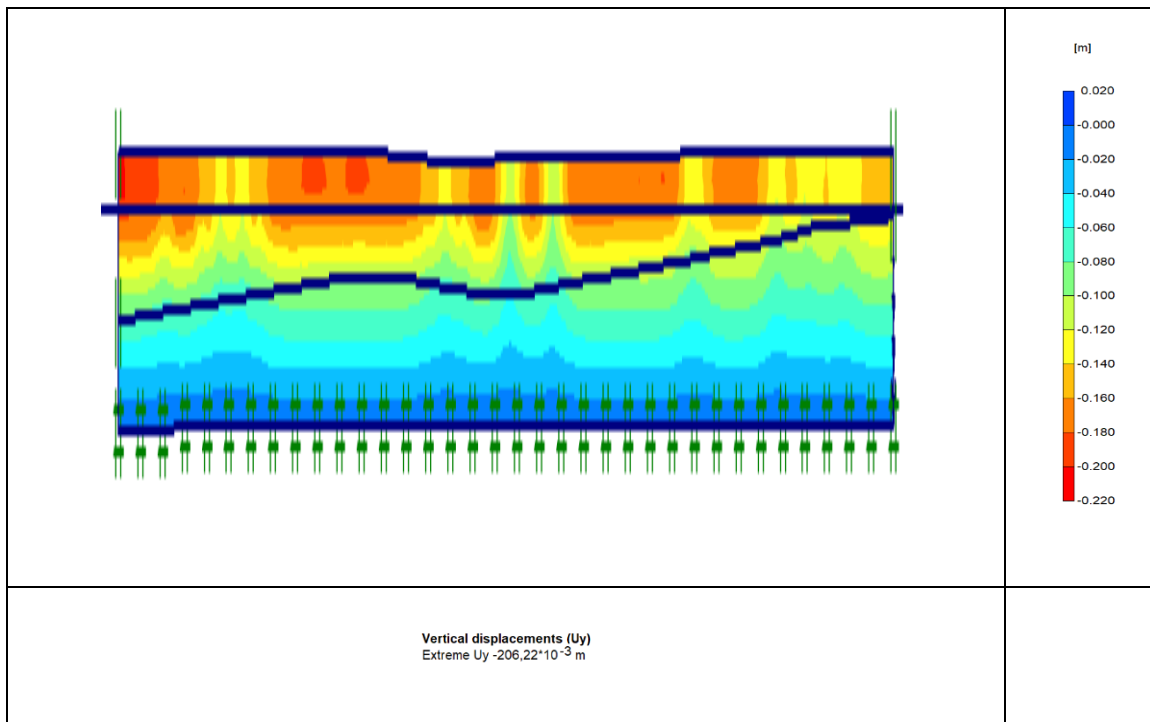
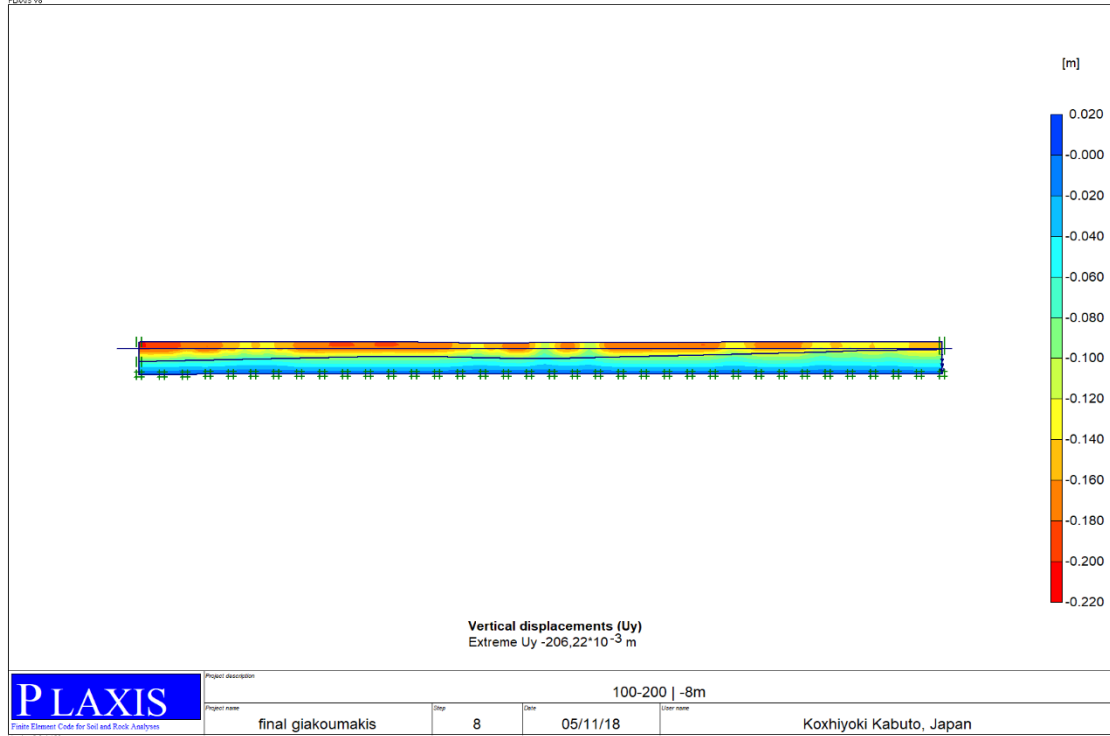


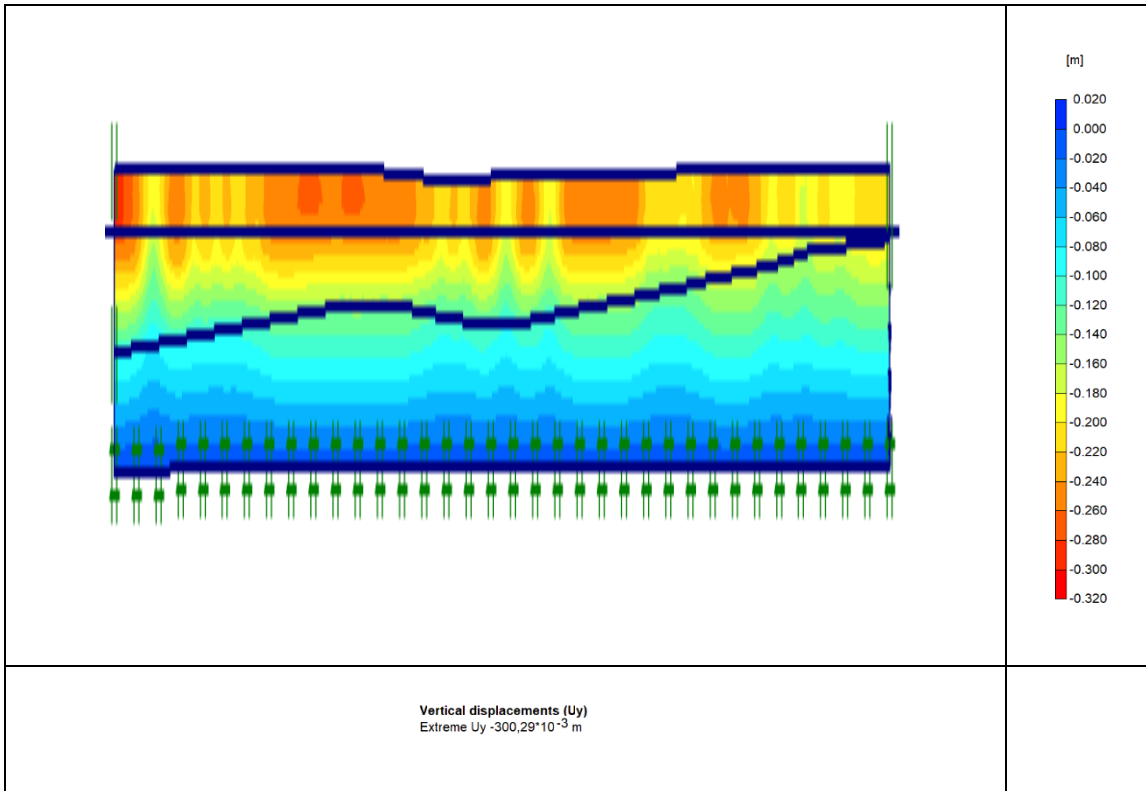
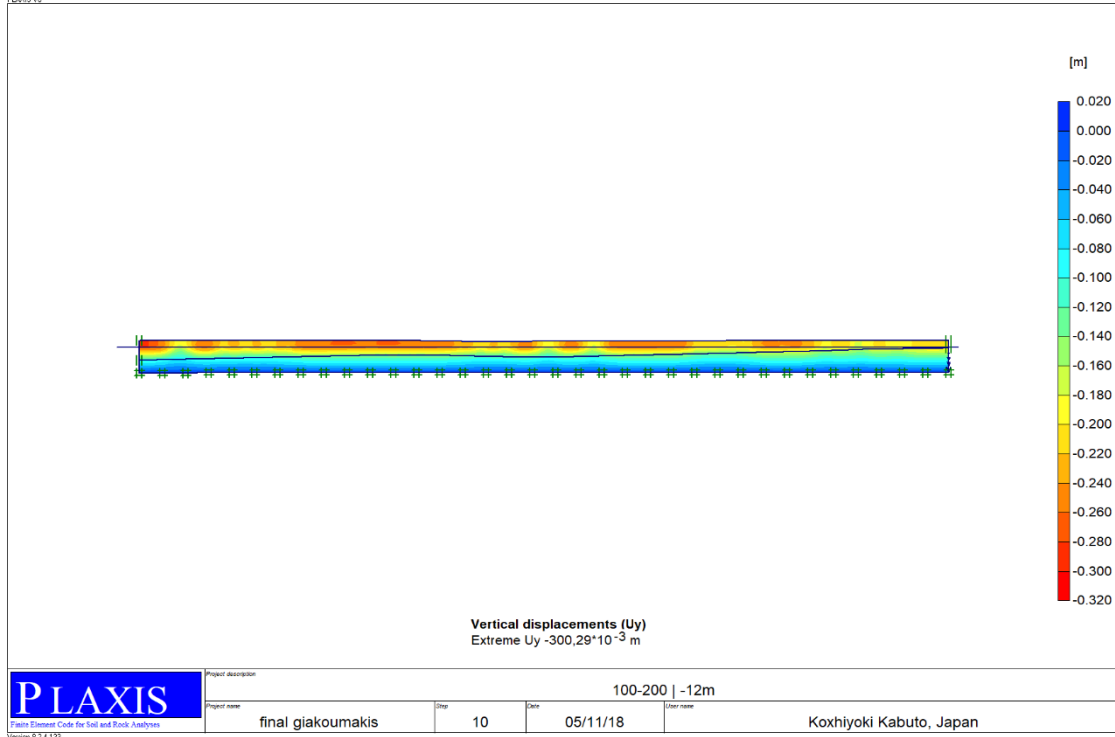


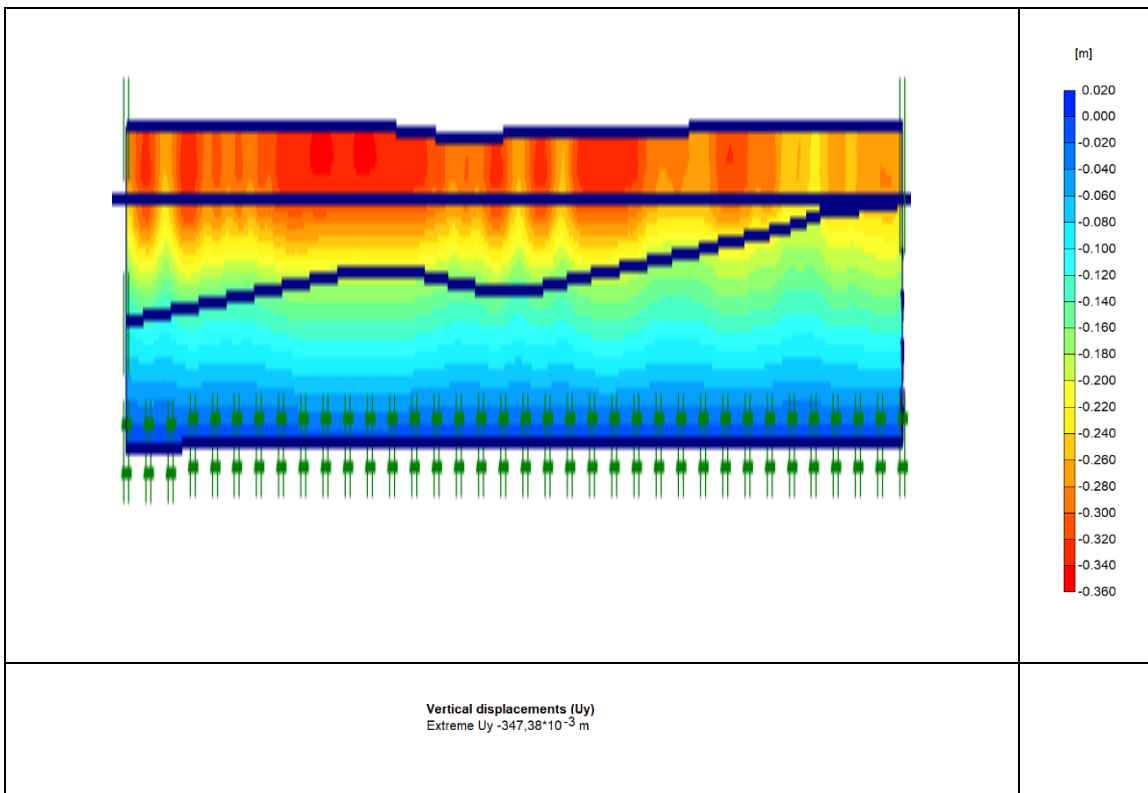
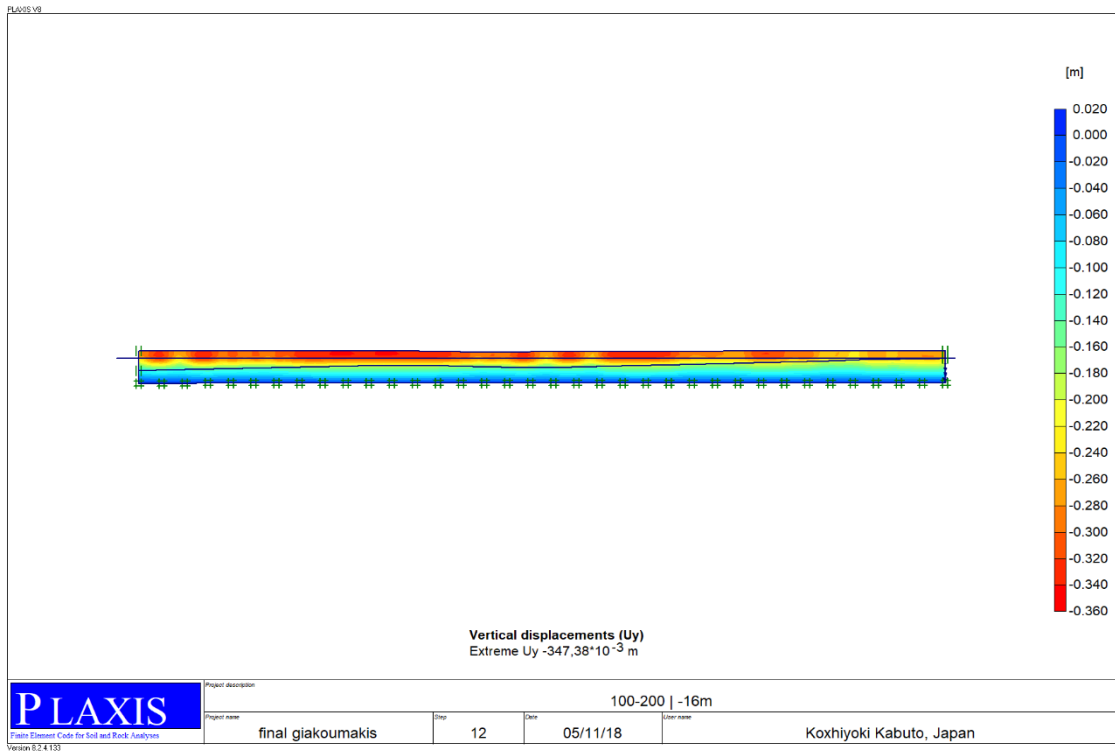


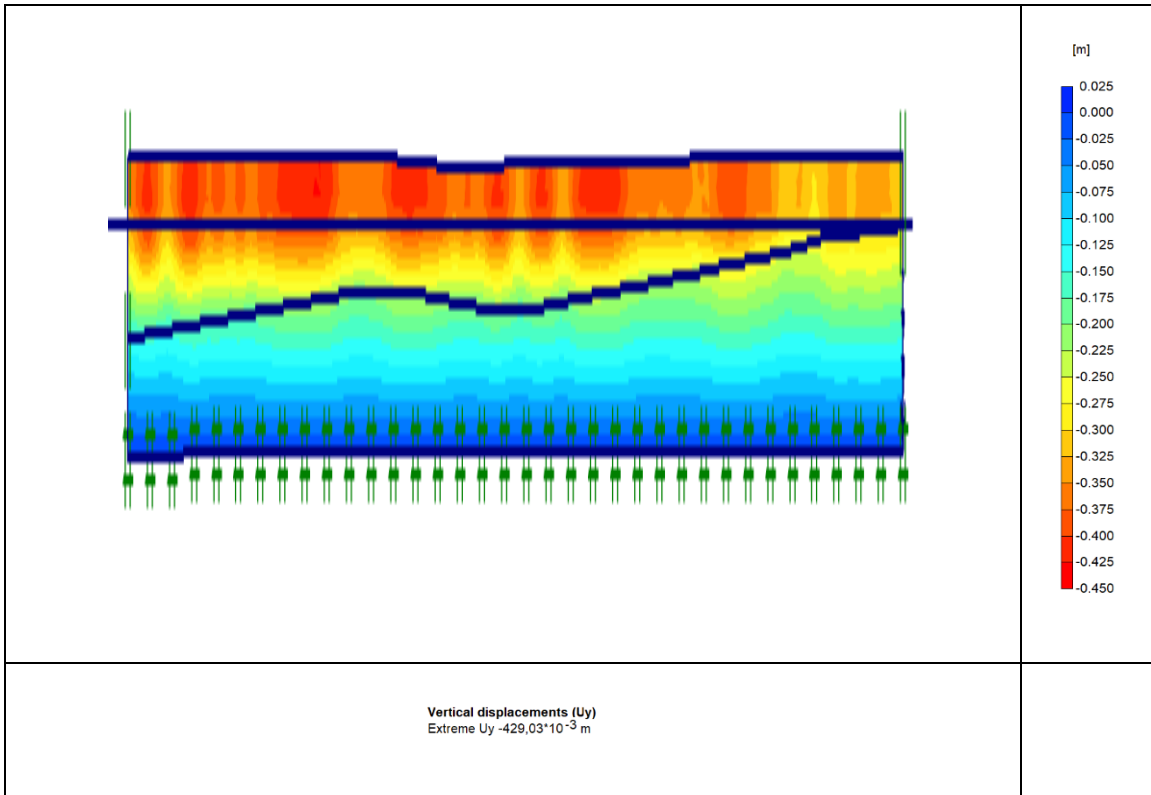
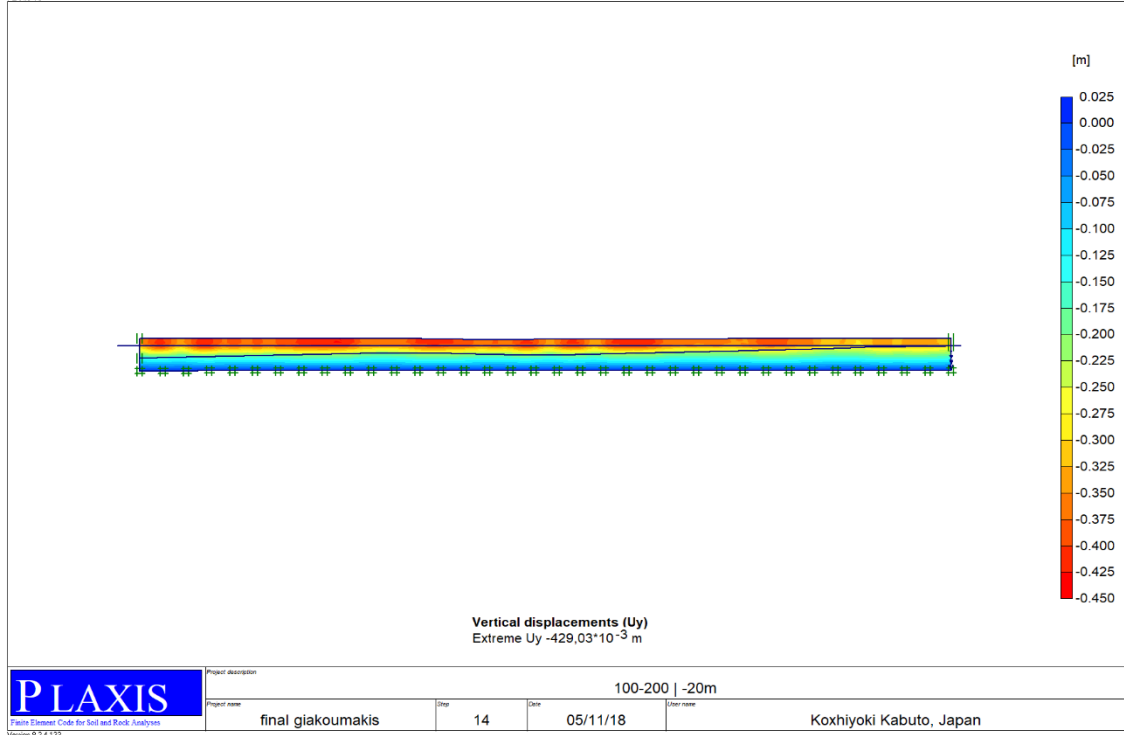


PLAXIS V8









## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγιουτάντης, Ζ. (2002): *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων*. Εκδ. Ίων, Αθήνα.

Αγιουτάντης, Ζ. και Μερτίκας, Σ. (2003): *Ένας πρακτικός οδηγός για την Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων*. Εκδ. Ίων, Αθήνα.

Βασιλάκης, Ε. (2006): *Μελέτη της τεκτονικής δομής της λεκάνης Μεσσαράς, Κεντρικής Κρήτης με τη βοήθεια τεχνικών τηλεπισκόπησης και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Αθήνα.

Βουδούρης, Κ. (2006): *Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρολογίας, Θεσσαλονίκη.

Βουδούρης, Κ. (2014): *Τεχνική Υδρογεωλογία: Υπόγεια νερά*. Εκδ. Τζιόλα, Αθήνα.

Δημητράκης, Β. (2014): *Ανάλυση Σεισμικής Δραστηριότητας στη Δυτική Κρήτη και Ανάδειξη Περιοχών Κατάλληλων για Ανέγερση Έργων Μεγάλης Κλίμακας με χρήση GIS*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο – Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2000). *Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων*.

Καλλέργης, Γ. (1999): *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.

Κούκης, Γ. – Σαμπατακάκης, Ν. (2007): *Γεωλογία τεχνικών έργων*. Εκδ. Παπασωτηρίου Αθήνα.

Κρίνης, Π. (2009): *Εφαρμογή μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής σε λεκάνες του ελληνικού χώρου. (Λεκάνη Μεσσαράς του νομού Ηρακλείου, νότια Κρήτη)*. Διατριβή Ειδίκευσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Κριτσωτάκης, Μ. (2009): *Διαχείριση Υδατικών Πόρων Μεσσαράς Κρήτης*. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διατμηματικό

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Έλεγχος Ποιότητας & Διαχείριση Περιβάλλοντος», Χανιά.

Μανούτσογλου, Ε. (2013) : *Εισαγωγή στην Γεωλογία*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μουντράκης, Δ. (1985): *Γεωλογία της Ελλάδας*. Εκδ. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας) – ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος). (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000*.

Πανταζής, Ν. (2004): *Λεξικό τεχνικών όρων*. Εκδ. Καστανιώτη, Αθήνα.

Παπασπύρου, Σ. (2006): *Συμπυκνώσεις επιχωμάτων*. Εκδ. Εκδοτική, Αθήνα.

Χατζηγιάννη, Ε.(2016): *Ενσωμάτωση των Τοπικών Σχεδίων Απορριμμάτων των Δήμων της Περιφέρειας Κρήτης στον Περιφερειακό Σχεδιασμό Διαχείρισης Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑΚ)*, Γενική Διεύθυνση Αναπτυξιακού Προγραμματισμού, Περιβάλλοντος & Υποδομών, Διεύθυνση Περιβάλλοντος & Χωρικού Σχεδιασμού Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων Κρήτης (Περιφέρεια Κρήτης, Πε.Σ.Δ.Α.Κ, 2016).

Περίερος, Β., Παπαμαστοράκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ., Δρακοπούλου, Ε., και Παναγόπουλος, Α. (2004). Υπόγειο Υδατικό Δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και Προοπτικές. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, XXXVI, Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2004

Σούλιος, Γ. (1986): *Γενική Υδρογεωλογία: Πρώτος τόμος*. Εκδ. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Σούλιος, Γ. (1986): *Γενική Υδρογεωλογία: Δεύτερος τόμος*. Εκδ. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Σούλιος, Γ. (2004): *Γενική Υδρογεωλογία: Τρίτος τόμος*. Εκδ. Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.

Φυτρολάκης, Ν. (1980) : *Η γεωλογική δομή της Κρήτης – προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα*. Διατριβή Υψηγείας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Αγγελίτσα, Β. (2011): *Διερεύνηση εδαφικών υποχωρήσεων λόγω υπεράντλησης στο δήμο Αμυνταίου*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Angelier, J., Tarantola, A., Valette, B., and Manoussis, S. (1982). Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress — I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 69(3), pp. 607-621

Bonneau, M. (1984). Correlation of the Hellenide nappes in the south-east Aegean and their tectonic reconstruction. *Geological Society London Special Publications*, 17(1), pp. 517-527

Bouwer, H. (1977). Land subsidence and cracking due to groundwater depletion. *Ground Water*, 15, pp. 358–364

Cheng, J., and Xiang, S. (1991). Sinkhole Collapse Resulting from Pumping of Karst Groundwater: A Problem and its Solutions. *Land Subsidence (Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, May 1991)*, IAHS Publ. no. 20, pp. 313-322

Domenico, P.A., and Schwartz, F.W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley, New York, Chichester, Brisbane, Toronto

Fassoulas, C., Kiliass, A., and Mountrakis, D. (1994). Postnappe stacking extension and exhumation of high-pressure/low-temperature rocks in the island of Crete, Greece. *Tectonics*, 13(1), pp. 127-138

Friend, S. (2002). *Sinkholes*. Pineapple Press Inc, Sarasota, Florida.

Galloway, D.L., and Burbey, T.J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), pp. 1459-1486

Hall, R., Audley – Charles, M.G., and Carter, D.J. (1984). The significance of Crete for the evolution of the Eastern Mediterranean. In: *The geological evolution in the Eastern Mediterranean*. Eds. J.E. Dixon, A.H.F. Robertson, *Geological Society London Special Publications*, 17, pp. 499-516.

Hung, W.-C., Hwang, C., Chang, C.-P., Yen, J.-Y., Liu, C.-H., Yang, W.-H. (2010). *Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using*

*multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui river alluvial fan. Environmental Earth Sciences*, 59, pp.1535–1548.

Kilias, A., Tranos, M.D., Orozco, M., and Soto, J.I. (2002). Extensional collapse of the Hellenides: A review. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 15 (3-4), pp. 129-139

Kohl, M.S. (2001). ***Subsidence and sinkholes in east Tennessee. A field guide to holes in the ground.*** State of Tennessee, Department of Environment & Conservation, Division of Geology, Nashville, Tennessee.

Kontogianni, V. – Pytharouli, S. – Stiros, S. (2007): ***Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly.*** University of Patra, Department of Civil Engineering, Geodesy Laboratory, Patra, Greece.

Loupasakis, C. – Rozos, D. (2009): ***Finite-element simulation of land subsidence induced by water pumping in Kalochori village, Greece.*** Institute of Geology and Mineral Exploration, Engineering Geology Department, National Technical University of Athens, School of Mining & Metallurgical Engineering, Laboratory of Engineering Geology and Hydrogeology, Athens, Greece.

Papadaki, E. (2014): ***Monitoring subsidence at Messara basin using radar interferometry.*** Technical University of Crete, Department of Mineral Resources Engineering, Laboratory of Geodesy and Geomatics Engineering, Chania, Greece.

Tills, T. (2013). ***Scienc Year.*** World Book, Inc, Chicago

Todd, D.K. (1980). ***Groundwater Hydrology.*** John Wiley, New York, Chichester, Brisbane, Toronto

Tomas R., Romero R., Mulas J., Marturia, J.J., Mallorqui, J.J., Lopez-Sanchez, J.M., Herrera, G., Gutierrez, F., Gonzalez, P.J., Fernandez, J., Duque, S., Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castaneda, C., Carrasco, D., Blanco, P. (2014). Radar Interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental Earth Sciences*, 71, pp. 163–181.

Waltham, T., Bell, F.G., Culshaw, M. (2005). ***Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction.*** Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg

Manual Plaxis: Plaxis 2D Professional Version



## ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ

- [http://www.crete.gov.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=11600:%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%86%CE%B5%CF%81%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C%CF%82-%CF%83%CF%87%CE%B5%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%80%CE%B5%CF%83%CE%B4%CE%B1%CE%BA&catid=345&lang=en#.WmIXNDfQAkl](http://www.crete.gov.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=11600:%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%86%CE%B5%CF%81%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C%CF%82-%CF%83%CF%87%CE%B5%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%80%CE%B5%CF%83%CE%B4%CE%B1%CE%BA&catid=345&lang=en#.WmIXNDfQAkl)
- [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_2.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_2.pdf)
- [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_1.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_1.pdf)
- Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ (2018) *Θέματα Υδρογεωλογίας περιβάλλοντος*, <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/> [τελευταία πρόσβαση 17/06/18]
- Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (2018) *Χαρακτηριστικά Αποθηκεύτρων Πετρωμάτων*, [http://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/10153/Mihaniki%20Petreleon\\_Simeioseis\\_Kefal aio%203-2.pdf](http://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/10153/Mihaniki%20Petreleon_Simeioseis_Kefal aio%203-2.pdf) [τελευταία πρόσβαση 16/06/18]
- <http://www.scienceillustrated.gr/site/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%BC%CE%B9%CE%B1-%CE%B4%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%BD%CE%B7/> [τελευταία πρόσβαση 26/9/2018]
- NERC (Natural Environment Research Council). (2017). Quarrying and the environment. [https://www.bgs.ac.uk/mendips/caveskarst/karst\\_3.htm](https://www.bgs.ac.uk/mendips/caveskarst/karst_3.htm) [τελευταία πρόσβαση 27/9/2018]
- Vazquez, T. (2017). Despite large holes in the road, Brevard just doesn't get sinkholes. *Florida Today*. <https://eu.floridatoday.com/story/news/2017/09/27/experts-say-sinkholes-unlikely-brevard-county/704151001/> [τελευταία πρόσβαση 28/9/2018]

